

LAS CORDIERITITAS ORBICULARES Y MASIVAS CÁMBRICAS DEL COMPLEJO EL PILÓN, SIERRA DE CÓRDOBA: EJEMPLO ÚNICO A NIVEL MUNDIAL DE ACUMULACIÓN DE CORDIERITA VINCULADA A PROCESOS MAGMÁTICOS

Carlos W. RAPELA¹ y Edgardo G. BALDO²

¹Centro de Investigaciones Geológicas (Universidad Nacional de La Plata - CONICET), La Plata. crapela@cig.museo.unlp.edu.ar

²Centro de Investigaciones en Ciencia de La Tierra (Universidad Nacional de Córdoba - CONICET), Córdoba. ebaldo@com.uncor.edu

Dedicado a la memoria del Dr. Carlos E. Gordillo

RESUMEN

Las cordierititas y granitos altamente peraluminosos del Complejo Granítico El Pílon, Sierras de Córdoba, Argentina, se emplazaron en el Cámbrico Inferior en condiciones de presión baja y alta temperatura durante la descompresión final del orógeno Pampeano en el margen sudoccidental de Gondwana. Cordierititas orbiculares y masivas, muy frescas, con hasta 90 % de cordierita se encuentran genéticamente asociadas con un plutón menor de monzogranito cordierítico y un cuerpo mayor de granodiorita porfírica cordierítica. La petrogénesis de esta asociación ha sido estudiada utilizando métodos geocronológicos, petrográficos, mineralógicos, termobarométricos, geoquímicos e isotópicos. Los magmas graníticos se formaron por anatexis de rocas corticales en la corteza media, generados en la etapa tardía de la Orogenia Pampeana. Las cordierititas aparecen en la parte superior de los conductos de alimentación magmática, que conectan la región fuente localizada a ~ 6 kbar, con el nivel de emplazamiento del plutón a $3,7 \pm 0,3$ kbar. Un marcado incremento de la actividad de los fluidos relacionado a la rápida descompresión y a la asimilación de esquistos metapelíticos hidratados en el techo de la cámara magmática, produjo una brusca caída de la temperatura *liquidus* durante el emplazamiento del fundido monzogranítico, seguido por una cristalización isobárica. Este efecto de sobrecalentamiento indujo a que cordierita de alto-Mg comenzaran a cristalizar sobre los objetos sólidos disponibles: restitas de biotita + sillimanita de los esquistos asimilados, formando la facies cordieritita orbicular, o sobre las paredes de los conductos, formando la facies de cordieritita masiva. Una fuerte convección dentro de la pequeña cámara magmática produjo una segregación por flujo de las cordierititas cumuláticas y las restitas englobadas (cordieritita orbicular), desarrollando diferenciados leucograníticos y pegmatoides evolucionados, en equilibrio isotópico con las cordierititas. Esta última conclusión es consistente con una isócrona Rb-Sr que incluye muestras de la cordieritita masiva, los núcleos biotíticos de la cordieritita orbicular y del monzogranito cordierítico, los cuales definen una edad de 523 ± 4 Ma. La muy buena alineación (*Mean Square Weighted Deviation* = 2,2; n = 18) y la uniforme relación inicial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de $0,7136 \pm 0,0005$, demuestran que los diferentes tipos de roca son coetáneos y genéticamente vinculados. Esta edad es concordante además con la edad U-Pb en circón obtenida en la granodiorita porfírica (523 ± 2 Ma), lo cual demuestra que todas las unidades del Complejo El Pílon se emplazaron en el mismo episodio de edad cámbrica inferior, durante la orogenia Pampeana. Un rápido ascenso de los magmas peraluminosos en la corteza, puede explicar porque el emplazamiento de estos granitos fue simultáneo con el pico metamórfico registrado en terrenos adyacentes con migmatitas y granulitas de alto grado. Aun dejando de lado el hecho de que las cordierititas del Complejo El Pílon son un ejemplo petrogenético excepcional, y de extrema rareza, éstas constituyen la concentración de cordierita más grande reportada en la Tierra, al grado de haber sido explotada como roca de aplicación de gran belleza. Solo en las montañas de Sukuba (Japón), se ha descrito otro ejemplo de cordierititas orbiculares, de reducidas dimensiones, que no obstante han sido declarado monumento nacional. Su extraordinaria rareza se debe al hecho de una convergencia de procesos que involucra una fusión con exceso de fluidos inductora del efecto de sobrecalentamiento, de una roca fuente pelítica apropiada, de condiciones de baja-P y alta T y de flujo magmático responsable de su acumulación, situación muy poco frecuente. Si se tiene en cuenta que además de requerir de anatexis de rocas hidratadas en presencia de abundante fluidos, es necesaria la acción de una tectónica de placas activa para producirlas, su presencia en otro planeta del sistema solar, es también muy poco probable. Todas estas son razones más que suficientes para que las autoridades provinciales y nacionales decidan acciones para preservar este ejemplo geológico único.

Palabras clave: textura orbicular, cordierititas, granitos anatócticos, Sierras Pampeanas de Córdoba.

ABSTRACT

Orbicular and massive cordieritites from the Lower-Cambrian El Pílon complex, Sierra de Córdoba: A worldwide unique example of cordierite accumulation associated with magmatic processes. Cordieritites and high peraluminous granites of the El Pílon granite complex, Sierras de Córdoba, Argentina, were emplaced during a low-P high-T meta-

morphic event, during the final decompression of the Early Cambrian Pampean orogen in the southwestern margin of Gondwana. Very fresh orbicular and massive cordierite bodies with up to 90 % cordierite are genetically associated with a cordierite monzogranite pluton and a larger body of cordierite porphyritic granodiorite. The petrogenesis of this association has been studied using petrographical, mineralogical, thermobarometric, geochemical, geochronological and isotope methods. The granitic magmas were formed by anatexis of middle crustal metamorphic rocks formed later in the Pampean orogeny. The cordierites appear at the top of feeder conduits that connected the source region located at ~ 6 kbar with the pluton emplacement level at 3.7 ± 0.3 kbar. A fall in the liquidus temperature during emplacement was produced by a marked increase in fluid activity owing to rapid decompression and assimilation of surrounding hydrous metapelitic schists followed by isobaric crystallization. The superheated effect induced high-Mg cordierite to crystallize early on biotite-sillimanite restitic mineral assemblages of the assimilate schists (orbicular facies) or at the wall of the feeder conduits (massive facies). Strong convection in the small magma chamber caused flow segregation of cumulate cordierite and restite (orbicular cordierites), developing leucogranites and highly evolved pegmatoids that are in isotopic equilibrium. This is consistent with a Rb-Sr isochron that includes the massive cordierite, the biotite-sillimanite restite and the cordierite monzogranite that define an age of 523 ± 4 Ma (MSWD = 2.2; n = 18). The excellent fit of the isochron allows defining a uniform initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 0.7136 \pm 0.0005 ratio, that indicate the different type of rocks and facies are coeval and genetically linked. The age is the same as the one obtained by U-Pb method in zircons of the porphyritic granodiorite (523 ± 2 Ma), which in turns indicate that all units of the El Pilón Complex were emplaced during the same Early Cambrian episode of the Pampean orogeny. Rapid ascent of highly peraluminous magmas might explain why emplacement of these granites was simultaneous with the metamorphic peak registered in neighbouring high-grade migmatites and granulite terranes. The cordierites of El Pilón are a very rare and exceptional petrogenetic case, and at the same time is the largest deposit of cordierite so far reported in the World, largely exploited as an elegant ornamental stone. In the Sukuba Mountains (Japan) has been described another small example of orbicular cordierites, that is considered a national monument. The exceptional rarity of the cordierites is related to the infrequent conditions required for its formation, which include extensive fluid-present melting that induced superheated effect, hydrated high-Mg metapelitic source rocks and low-P, high-T conditions. Taking into account that these unfrequented conditions can only be achieved during active plate tectonics, the probability of finding cordierites in another planet of solar system, is very unlikely. All these reasons are more than enough valid to require measures from provincial and national authorities to secure preservation of this unique geological example.

Keywords: orbicular texture, cordierites, anatectic granites, Pampean ranges of Córdoba.

INTRODUCCIÓN

La cordierita es un mineral de baja presión que aparece por encima de la curva *solidus* en muchos magmas félsicos peraluminosos, y como mineral metamórfico (subsólido) en rocas pelíticas (Clarke 1995). Ambas ocurrencias de la cordierita son típicas de terrenos de baja presión (P) y alta temperatura (T), que sufrieron una fusión parcial extensiva en los estadios termales finales de una colisión continental y amalgamamiento de terrenos. Existen ejemplos comunes en el cinturón Paleozoico Superior del Hercínico de Europa, en el cinturón Cretácico-Mioceno del Ryoke belt in Japón y en los cinturones Pampeano y Famatiniano del Cámbrico y Ordovícico de las Sierras Pampeanas en Sudamérica (Gardien *et al.* 1997, Brown 1998, Rapela *et al.* 1998).

La cordierita es usualmente un mineral accesorio en granitos y riolitas con alto contenido en alúmina, y su abundancia muy rara vez excede el 10 % de la moda mineral. Cordierititas, en la cuales la cordierita es una fase mineral principal que excede el 30 % de la moda, son un miembro extremo de esta familia de rocas, que excepcionalmente se aproxima a una composición monomineralica con aproximadamente

90 % de cordierita. En los casos en que el origen es magmático, esta composición extrema puede alcanzarse solamente por algún tipo de proceso de acumulación después de la cristalización, ya que no existen protolitos sedimentarios ni magmas normales con dicha composición.

Si las cordierititas son poco comunes, las cordierititas orbiculares son aún más raras. Las orbículas son estructuras en capas concéntricas y forma de huevo, de 5 hasta 30 cm, que aparecen muy ocasionalmente en rocas graníticas, formadas por los mismos minerales esenciales del granito huésped: feldespato, cuarzo, biotita, anfíboles, etc.). Ejemplos de granitos orbiculares de este tipo han sido descritos en las Sierras Pampeanas, como en la Sierra de Comechingones (Sureda y Viramonte 1972) y en la Sierra de Velasco (Quartino y Villar Fabre 1962, Linares y Quartino 1978, Grosse *et al.* 2009). Aunque las cordierititas orbiculares son una curiosidad en sí mismas, su petrogénesis es particularmente ilustrativa sobre varios aspectos críticos del magmatismo granítico, tales como la composición de la fuente, el contenido de agua de los magmas, la dinámica de la cristalización en sus aspectos físicos y el mecanismo de emplazamiento de los magmas peraluminosos en cinturones metamórficos de baja

P y alta T. Este hecho ya fue percibido por los petrólogos de hace casi 90 años como Sederholm (1928), que se sorprendía por el hecho de que en los granitos orbiculares se enfrentaban con la mayoría de los problemas de la petrología granítica “adentro de una nuez”. Con la perspectiva que dan casi 100 años de progreso científico, se percibe que la sola existencia de los granitos orbiculares constituye una evidencia del origen magmático de los granitos, controversial en esa época.

En el Complejo Granítico de El Pílon en las cercanías de Villa de Soto, Provincia de Córdoba (Fig. 1) se encuentran afloramientos únicos de cordierititas masivas y cordierititas orbiculares, con transiciones entre ambos tipos. Las orbículas de cordieritita, descritas por primera vez por Gordillo (1974, 1979) y más tarde, por Rapela *et al.* (2002), tienen el doble atractivo visual que da la particularidad de las estructuras ovales y el color azul-violeta de la cordierita, antiguamente conocida como dicroita por sus propiedades pleocroi-

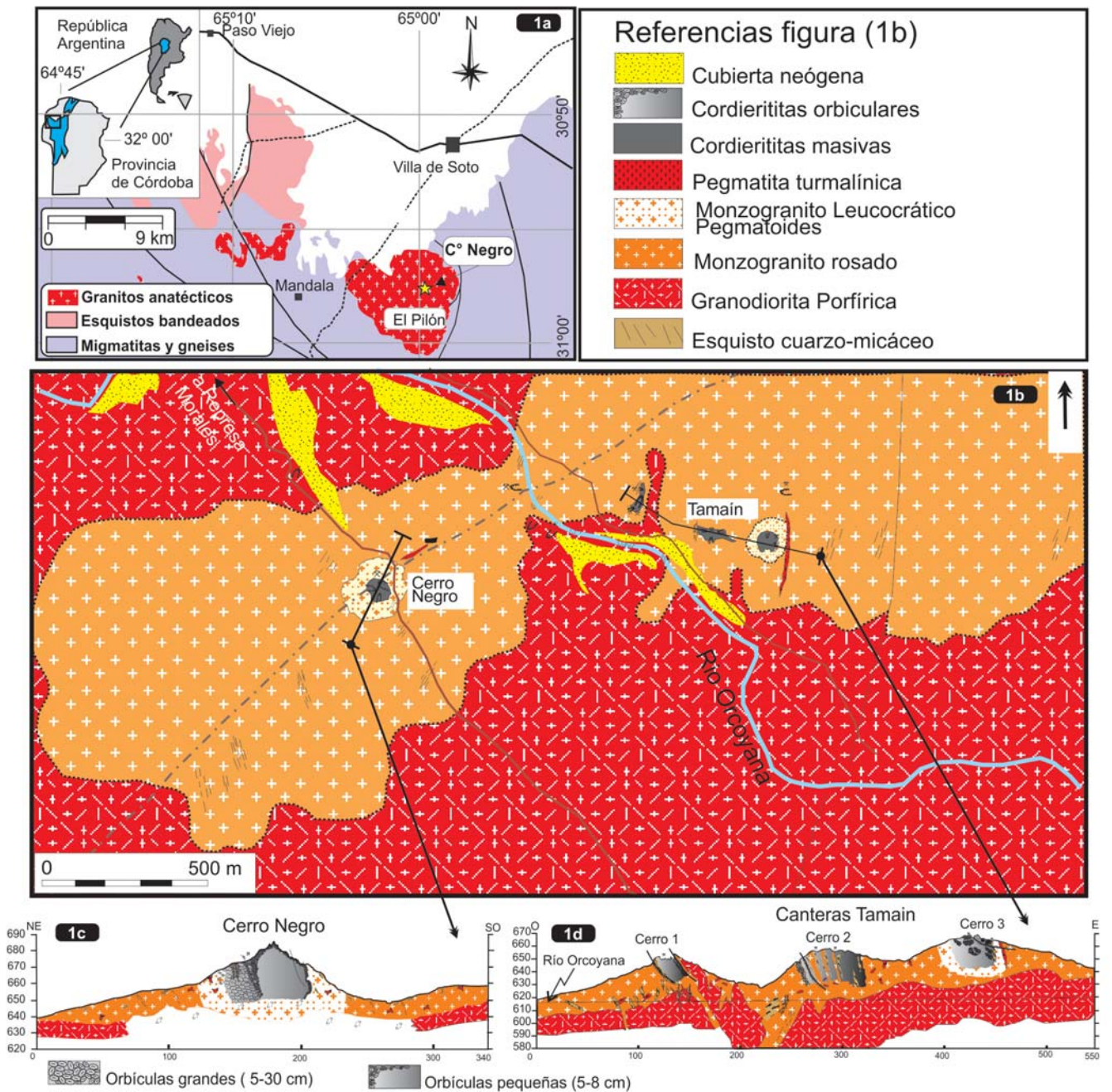


Figura 1: Mapas y perfiles geológicos de Complejo Granítico El Pílon y las cordierititas (modificados de Rapela *et al.* 2002). 1a) Esquema Geológico del sector noroeste de las Sierras de Córdoba y ubicación del complejo Granítico El Pílon. 1b) Mapa litológico del sector central del complejo Granítico El Pílon y ubicación de los afloramientos de cordieritita dentro del monzogranito equigranular. 1c y 1d) Perfiles geológicos del Cerro Negro y cerros 1, 2 y 3 de Canteras Tamain respectivamente.

cas (cambio de color según la dirección de la luz). Esta combinación de textura orbicular y composición mineralógica hacen de estas rocas el segundo ejemplo a nivel mundial reconocido hasta el presente, con la diferencia de que el otro hallazgo, descrito por Yoshiki (1933) y Tagiri *et al.* (2007), en las montañas Tsukuba, al noreste de Tokio, (Japón) es un afloramiento de dimensiones muy reducidas (5m x 2m), mientras que en el Complejo de El Pilón, abarcan un área de más de 12000 m² constituyéndose en la mayor concentración de cordierita del mundo hasta ahora conocida. Lo exótico de este material ha llevado a que se explote como roca ornamental, quedando actualmente en el terreno las escombreras y una parte del denominado Cerro Negro (Fig. 1) que es el sitio de mayor concentración de orbículas y las de mayor tamaño. La belleza ornamental de esta roca puede ser apreciada en los frentes de algunos edificios argentinos y europeos, y también adornando centros comerciales de la ciudad de Buenos Aires, como el Patio Bulrich y Unicenter. Por esta razón, sus afloramientos han sido intensivamente explotados como rocas de aplicación, y exportados a Europa desde principios de la década de 1950 (Gordillo 1974).

GEOLÓGIA Y EDAD DEL COMPLEJO GRANÍTICO EL PILÓN

Los afloramientos de cordieritas, tanto orbiculares como masivas, están espacialmente ligados al Complejo Granítico El Pilón definido originalmente por Lucero y Olsacher (1981). Con una superficie aflorante de aproximadamente 70 km², el complejo se localiza en la parte central de un bloque de basamento de presión media a baja, definido por abundantes migmatitas de sillimanita y cordierita, gneises con conspicua presencia de cordierita y ausencia de granate en las rocas de alto grado (ver Rapela *et al.* 2002 para mayor detalle sobre estas rocas). Hacia el noroeste aflora una secuencia de esquistos bandeados (Formación Tuclame, Lucero y Olsacher 1981) que registran un metamorfismo de baja presión con cordierita + andalucita y localmente la presencia de nódulos cordieríticos de 10 a 15 cm (Baldo y Verdecchia 2004, Martino *et al.* 2009). El complejo El Pilón, tiene forma subcircular, de aproximadamente 10 km de diámetro (Fig. 1) y se reconocen dos cuerpos principales: (1) un cuerpo mayor de una granodiorita porfírica de cordierita-sillimanita y (2) un cuerpo pequeño de un monzogranito leucocrático con cordierita, localizado en el sector noreste del complejo. Este último cuerpo incluye, y está genéticamente asociado con cuerpos subcirculares de cordierita

(Fig. 1b). Además, filones subordinados de pegmatitas con turmalina se encuentran espacialmente asociados con el monzogranito. La roca de caja de ambos cuerpos son migmatitas metatexiticas y diatexiticas con plagioclasa ± feldespato potásico + cuarzo + sillimanita + biotita + cordierita como paragénesis crítica. Las descripciones siguientes fueron extraídas del trabajo de mayor detalle de Rapela *et al.* (2002).

La granodiorita porfírica

El cuerpo granítico más grande del complejo es una granodiorita porfírica caracterizada por la abundancia de enclaves de las migmatitas y esquistos de la Formación Tuclame que forman las rocas de caja, los que varían desde pocos centímetros a >50 cm. En escala regional, el contacto de la granodiorita con la roca de caja es neto, pero en la escala de afloramiento es transicional en pocos metros, con un incremento de los enclaves de la roca de caja en el granito. No hay evidencias de contraste térmico entre la granodiorita y la roca de caja, y la abundancia de enclaves metamórficos sugiere que el presente nivel de erosión está cercano al techo de la intrusión granítica (Gordillo 1974). La mineralogía del cuerpo está dominada por cristales poiquilíticos de feldespato alcalino de 1–7 cm (Or₉₀), plagioclasa (An₂₅₋₃₀), cuarzo, biotita, sillimanita prismática y cordierita alterada, con apatita y circón como minerales accesorios. La cordierita es abundante y aparece ya sea como cristales anhedrales o incluida dentro del feldespato alcalino o en forma nódulos de hasta 10 cm de diámetro.

La composición modal granodiorítica fue deducida de la composición química (Fig. 2a), dada la heterogeneidad de la roca, en tanto que la edad de emplazamiento fue estimada en forma precisa en 523 ± 2 Ma mediante dos métodos, por U-Pb convencional e isócrona Rb-Sr (Rapela *et al.* 1998).

El monzogranito cordierítico

El pequeño cuerpo de ~4 km² de monzogranito leucocrático cordierítico forma en planta dos lentes subcirculares conectadas por una estrecha zona de 200 m coincidente con la parte topográficamente mas baja del sector (Fig. 1b). La forma tridimensional del cuerpo puede ser razonablemente inferido integrando las observaciones de las partes más bajas, a lo largo del río Orcoyana y otros arroyos pequeños, con las de las sectores más altos. En las partes bajas se observa que la granodiorita porfírica se encuentra siempre en contacto con el piso del cuerpo monzogranítico o intruida por diques de este último, y que el contacto es esencialmente un plano subhorizontal. El techo del cuerpo estaba situado por encima

del nivel actual de erosión, por lo cual no se lo puede observar, pero la abundancia de grandes enclaves de esquistos similares a los que afloran a 14 km al noroeste del complejo (Formación Tuclame), sugieren que el techo estaba cercano al actual nivel de erosión, y que el monzogranito se emplazó como una delgada intrusión subhorizontal, o como una intrusión cúpula entre la granodiorita y los esquistos (Figs. 1c y 1d). Evidencias en la zona de contacto sugieren la ausencia de contraste térmico entre ambas unidades pero la presencia de enclaves irregulares de la granodiorita porfírica en el monzogranito, próximo al contacto, claramente indican que este último fue un evento tardío dentro del complejo.

La composición modal del cuerpo fue estimada químicamente como monzogranítica (Fig. 2a), con feldespato alcalino anhedral (Or_{90}) + plagioclasa + cuarzo + biotita + cordierita (parcialmente retrogradada a sillimanita + biotita) como minerales principales. Circón y apatita son los minerales accesorios más comunes, en tanto que agrupamientos (*clusters*) de biotita + sillimanita + granate + cordierita ± cuarzo son comunes, al igual que venas pegmatíticas irregulares. Mientras que el contenido modal de biotita varía de 8 a 15 % en las facies principal del cuerpo, ocurren a veces llamativos decrecimientos a menos del 5 %, lo cual se refleja en el índice de color de los leucogranitos y pegmatoides asociados a las cordierititas de la cantera Cerro Negro (Fig. 1c).

Las cordierititas

En la cumbre de pequeños cerros dentro del monzogranito, aparecen cuatro afloramientos de aproximadamente 40 m x 80 m, de una roca de color verde azulado con altos porcentajes de cordierita (Fig. 1c y 1d). Tres de ellos (Cantarras Tamaín 1, 2 y 3), afloran en la parte sur del lente subcircular oriental, en tanto que el afloramiento restante aflora en el lente occidental del monzogranito (Cerro Negro, Figura 3a). Esta roca excepcional, que consiste en 70–95 % de cordierita fue denominada *cordieritita* por Gordillo (1974) y Schreyer *et al.* (1979).

Fueron reconocidas dos facies principales de cordieritita –orbicular y masiva– denominadas respectivamente variedades “dark” y “light” por Schreyer *et al.* (1979). La cantera Cerro Negro está compuesta enteramente por una cordieritita orbicular espectacular, que consiste en orbículas ovoidales de 5–30 cm de diámetro mayor (Fig. 3b), a menudo con un borde compuesto por un fino agregado de biotita y fibrolita. Las orbículas están compuestas de un manto de color claro y un núcleo de color oscuro (Figs. 4a y b; la terminología de la estructura orbicular es de Leveson 1966). El manto es esencialmente monomineralico, y consiste en un agregado policristalino de cordierita fresca poligonal, con clorita y fibrolita alrededor de los cristales individuales, y cantidades menores de cuarzo, plagioclasa, dumortierita,

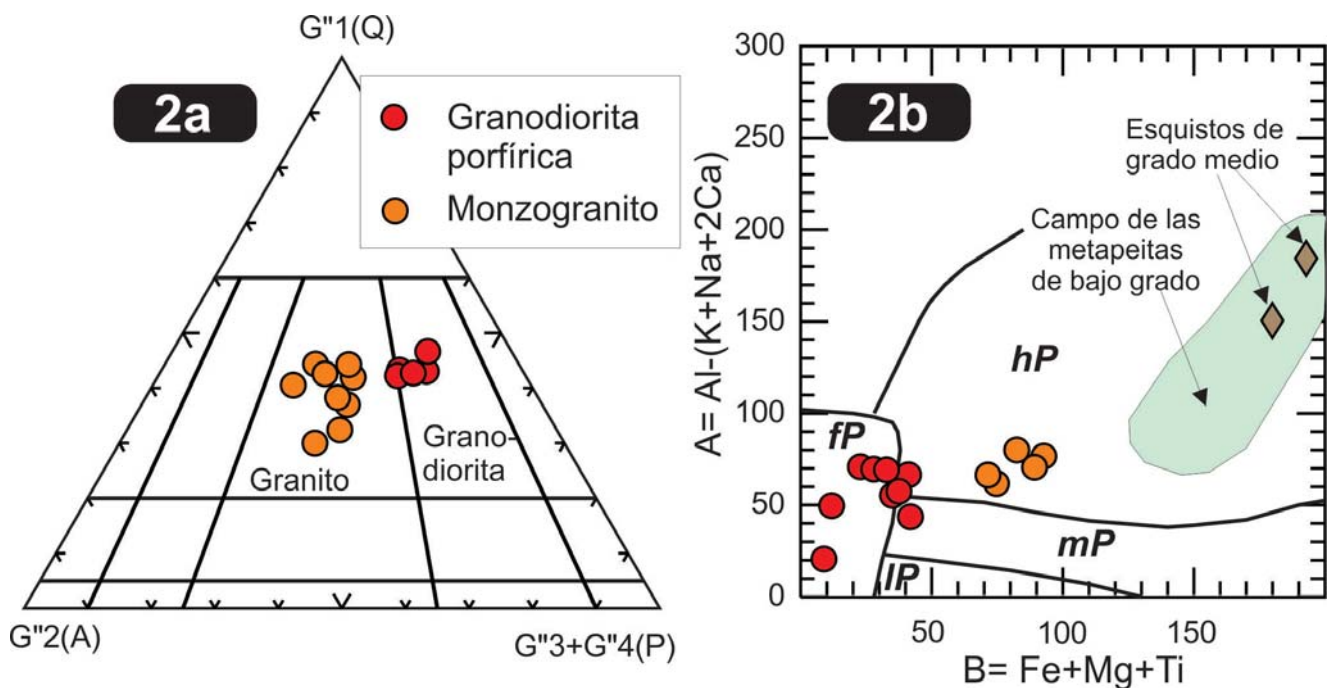


Figura 2: Clasificación química de los granitos peraluminosos del complejo El Pilón. 2a) Clasificación normativa G1, G2 y G3 (La Roche 1992). 2b) Diagrama de Villaseca *et al.* (1998): fP= Granitos félsico muy peraluminoso, hP= altamente peraluminoso, mP= moderadamente peraluminoso, IP= levemente peraluminoso.

apatita y circón. Las orbículas grandes (>20 cm) tienen relaciones altas manto/núcleo y los mantos muestran una zonación de tamaño de cristal en la cual los cristales individuales de cordierita decrecen desde 1v7 mm alrededor del núcleo a un agregado fino en la capa exterior (Fig. 4b). Las partes externas de los núcleos son a menudo irregulares y parcialmente digeridas por las capas más internas del manto. El manto de las orbículas pequeñas (<5–8 cm) está usualmente poco zonado, y la relación manto/núcleo es baja.

El núcleo oscuro de las orbículas está compuesto de biotitas (orientadas con arreglo lepidoblástico, sillimanita y cordierita, con cantidades subordinadas de feldespato, cuarzo, ilmenita, apatita y moscovita + clorita como fases secundarias. A pesar de poseer una composición aluminica, el granate nunca fue observado como parte de la mineralogía de los núcleos. La fábrica y mineralogía de los núcleos orbiculares son indistinguibles del melanosoma de las migmatitas cordieríticas regionales. El espacio entre orbículas es frecuentemente ocupado por una matriz leucogranítica compuesta de cuarzo, feldespato alcalino perfitico y plagioclasa (Fig. 4a).

En la cantera Cerro Negro, en la parte baja de una sección de 30 m, en contacto con el monzogranito, se observan orbículas de gran tamaño (>20 cm) en una “matriz” de orbículas más pequeñas. En esta sección se observa además un decrecimiento hacia arriba del tamaño de orbícula, semejante al decrecimiento de grano en las estructuras sedimentarias. En la parte inferior de la sección, la matriz leucogranítica entre orbículas se incrementa en proporción hacia el contacto con el granito, dando como resultado orbículas “nadando” en el

leucogranito, hasta 4 m del contacto. No obstante, las orbículas nunca fueron observadas en otras partes del cuerpo monzogranítico. En el Cerro Negro fue descubierta una variedad Na-Be de cordierita con 1,25 % Na_2O y 0,93 % de BeO (Schreyer *et al.* 1979).

En las canteras Tamaín 2 y 3, las orbículas pequeñas son monocristales de cordierita con un núcleo pequeño ocupado por una cordierita límpida de color azul violeta ($\text{Mg}/(\text{Fe}+\text{Mg}) = 0,66$), rodeado por el manto de cordierita de la misma composición que muestra abundantes inclusiones de apatita dendríticas, similares a las observadas en las orbículas de Tsukuba (Tagiri *et al.* 2007) indicando un crecimiento rápido en un sistema magmático.

La fábrica de las orbículas sugiere que éstas crecieron epitaxialmente siguiendo una nucleación alrededor de restitas ricas en biotita o grandes cristales idiomórficos de cordierita. La acumulación de orbículas, que parecen haberse deformado y acomodado una contra otra de una manera dúctil en una matriz fluida es típica de la facies orbicular. El borde externo del manto de las orbículas grandes se encuentra a veces digerido y deformado por “impactos” de pequeñas orbículas durante el proceso de acumulación (Fig. 4b).

En las canteras Tamaín 1 y 2 predomina la facies de cordieritita masiva, que se aproxima a una composición casi monominerálica de cordierita (85–90 %), con biotita, feldespato alcalino, plagioclasa y cuarzo integrando el remanente 10–15 %. Variedades de grano fino y grueso, con contactos netos entre ellas, son típicos de la facies masiva. En algunos sectores la cordieritita masiva muestra una transición gradual hacia variedades más oscuras, con aumento de hasta el



Figura 3: Cordierititas orbiculares del Cerro Negro: 2a) Aspecto del afloramiento del Cerro Negro anterior a su explotación masiva para roca ornamental. 2b) Aspecto de campo de la agrupación de orbículas de cordierita en el Cerro Negro. Algunas orbículas muestran núcleos vacíos por meteorización diferencial de las biotitas.

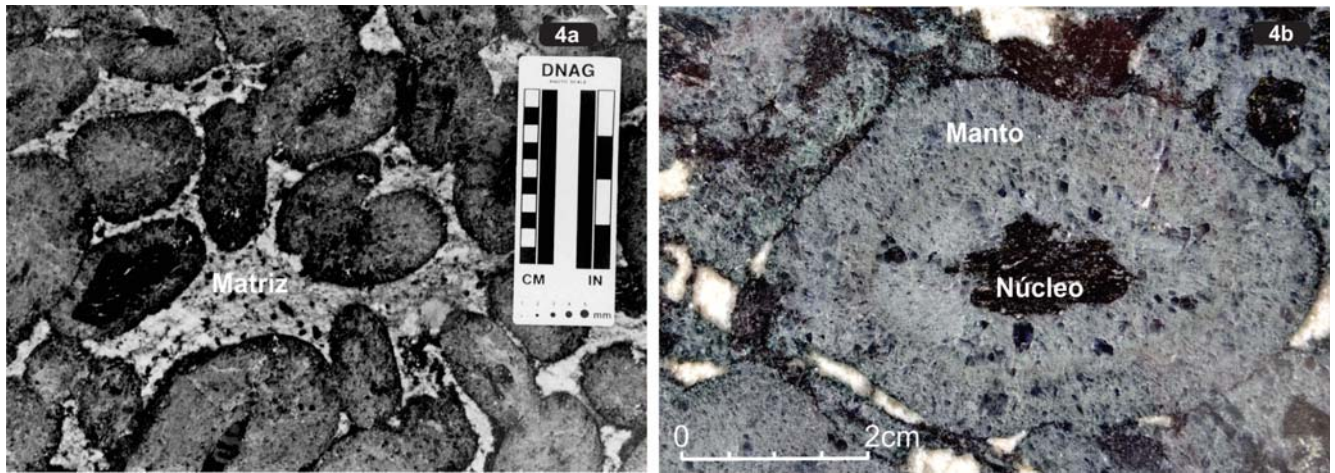


Figura 4: Características de las orbículas de cordierita del Cerro Negro: 4a) Agrupación de orbículas con preservación de la matriz compuesta del monzogranito leucocrático. 4b) Detalle de una orbícula con núcleo biotítico rodeado por el manto cordierítico integrado por zonas de cordieritas de tamaño decreciente hacia afuera. Se observa además el borde externo de la orbícula levemente deformado en el contacto con otra orbícula.

40 % de biotita modal. Esporádicos porfiroblastos de granates son observados solamente en la variedad de grano fino de la cantera Tamaín 2 (ver Fig. 6a de Rapela *et al.* 2002), mientras que estaurólita (0,9–1,5 % ZnO) aparece eventualmente en las variedades con mayor cantidad de biotita. La apatita es el mineral más abundante en la cordieritita masiva de grano fino y se observan además, circón, turmalina y menos frecuentemente piedmontita, dumortierita y piritita. En la cantera Tamaín 3, la facies masiva de grano fino se encuentra en contacto neto con la facies orbicular consistente en pequeñas orbículas con núcleos de cordierita. La cordieritita masiva de la cantera Tamaín 2 contiene grandes xenolitos (1 m x 1,5 m) de granodiorita porfírica y se observan además una secuencia subvertical de esquistos de la Formación Tucumán interclados con cordieritita masiva y granito equigranular (Fig. 1d). La cordieritita se ubica siempre entre el esquistito y el granito. Estas evidencias sugieren que la cordierita utilizó a los xenolitos y las paredes de los diques de alimentación como elementos sólidos para cristalizar a partir del magma monzogranítico.

Por último, en el sector occidental de esta cantera se observa una facies de brecha compuesta por xenolitos angulares de la granodiorita, esquistos y cordieritas subordinadas dentro de una matriz monzogranítica, lo cual sugiere un flujo local turbulento de un fundido monzogranítico rico en fluidos, afectando a las cordierititas y las rocas metamórficas huéspedes.

Las evidencias de campo en las canteras Tamaín sugieren que las principales causas en la formación de la cordieritita masiva se vinculan con la cristalización temprana de cordierita sobre xenolitos y paredes de conductos, en cambio, en la

cordieritita orbicular del Cerro Negro, primero se formarían las orbículas de forma aisladas dentro del magma y luego se agruparían por flujo.

Las secciones transversales de los cuerpos de cordieritita muestran que ambas facies tienen una continuidad vertical restringida, y que están espacialmente asociadas a diques verticales de forma tubular del monzogranito, que terminan en el piso del cuerpo (Figs. 1c y d). Una interpretación obvia de estas relaciones espaciales, es que estos diques fueron conductos de alimentación del cuerpo monzogranítico.

Rapela *et al.* (1998) presentaron análisis Rb-Sr de la cordieritita masiva, de los núcleos biotíticos de la cordierita orbicular y del monzogranito cordierítico, los cuales definen una isócrona Rb-Sr de 523 ± 4 Ma. La muy buena alineación (*Mean Square Weighted Deviation* = 2,2, $n = 18$) y la uniforme relación inicial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de $0,7136 \pm 0,0005$, demuestran que los diferentes tipos de roca son coetáneos y genéticamente vinculados. Esta edad es concordante además con la edad U-Pb en circón obtenida en la granodiorita porfírica, lo cual permite concluir que todas las facies del Complejo Granítico El Pilón se emplazaron durante el mismo episodio de edad Cámbrica Inferior, durante la orogenia Pampeana. Esta relación inicial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ y la de la granodiorita porfírica, se encuentran dentro del rango de relaciones similares medidas en las migmatitas y gneises de alto grado de las Sierras de Córdoba (0,7137–0,7165, Rapela *et al.* 1998). Resulta claro que las rocas magmáticas de El Pilón se han derivado de fuentes comparables con estas rocas metamórficas, o han incorporado un componente substancial proveniente de ellas.

CONDICIONES P-T Y PETROGÉNESIS

La profundidad de emplazamiento del monzogranito y las cordieritas asociadas, como también las condiciones P-T de la región fuente de las rocas graníticas fueron estimados mediante cálculos termobarométricos en la cordierita, en los núcleos biotíticos de las orbículas y en restitas con biotita + sillimanita + granate en el monzogranito (Rapela *et al.* 2002).

Los resultados se muestran en la Fig. 5. Valores de 780° C y 5,9 kb fueron obtenidos en la paragénesis restítica (1) de la cordierita masiva, que indican una primer generación de cordierita + granate a ~20 km de profundidad. Estas condiciones son comparables a las obtenidas por métodos similares en migmatitas de cordierita + granate durante el episodio anatéctico en las Sierras de Córdoba (A, Fig. 5). Las condiciones P-T inferidas para la paragénesis 2 (650° C y 3,7 kb) se encuentra sobre la curva del sólido granítico saturado en agua, lo cual sugiere que la cristalización terminó en condiciones de saturación en agua. Esto es consistente con la presencia de fenómenos neumatolíticos y diques permatíticos cogenéticos. La paragénesis 3 para una restita con granate en

el monzogranito ($3,3 \pm 0,6$ kbar; $555 \pm 52^\circ$ C) corresponde a un enfriamiento subsólidos en el nivel de emplazamiento. Sobre la base de las relaciones de campo entre el monzogranito y la cordierita, se postula que el fundido monzogranítico migró por un mecanismo de diques, y que las cordieritas se formaron localmente en la parte superior de los conductos de alimentación durante el emplazamiento lacolítico del cuerpo de monzogranito (Rapela *et al.* 2002). La línea punteada gruesa con flecha en la figura 5 muestra la trayectoria de un ascenso P-T con relación cristal/fluido constante, y 90 % de fundido inicial, seguido de un enfriamiento isobárico en el nivel de emplazamiento.

La geoquímica del Complejo El Pílon y las rocas metamórficas asociadas fue tratada en detalle en el trabajo de Rapela *et al.* (2002), por lo que aquí se describirán solamente algunas relaciones vinculadas a la petrogénesis. Los granitos de El Pílon se encuentran entre los tipos de mayor peraluminosidad en la clasificación de este tipo de granitos (Fig. 2b): la granodiorita porfírica es altamente peraluminosa y el monzogranito está mayormente dentro del campo de los granitos peraluminosos félsicos. Comparados con granitos típicos de fusión de la corteza como los del Himalayas y los gra-

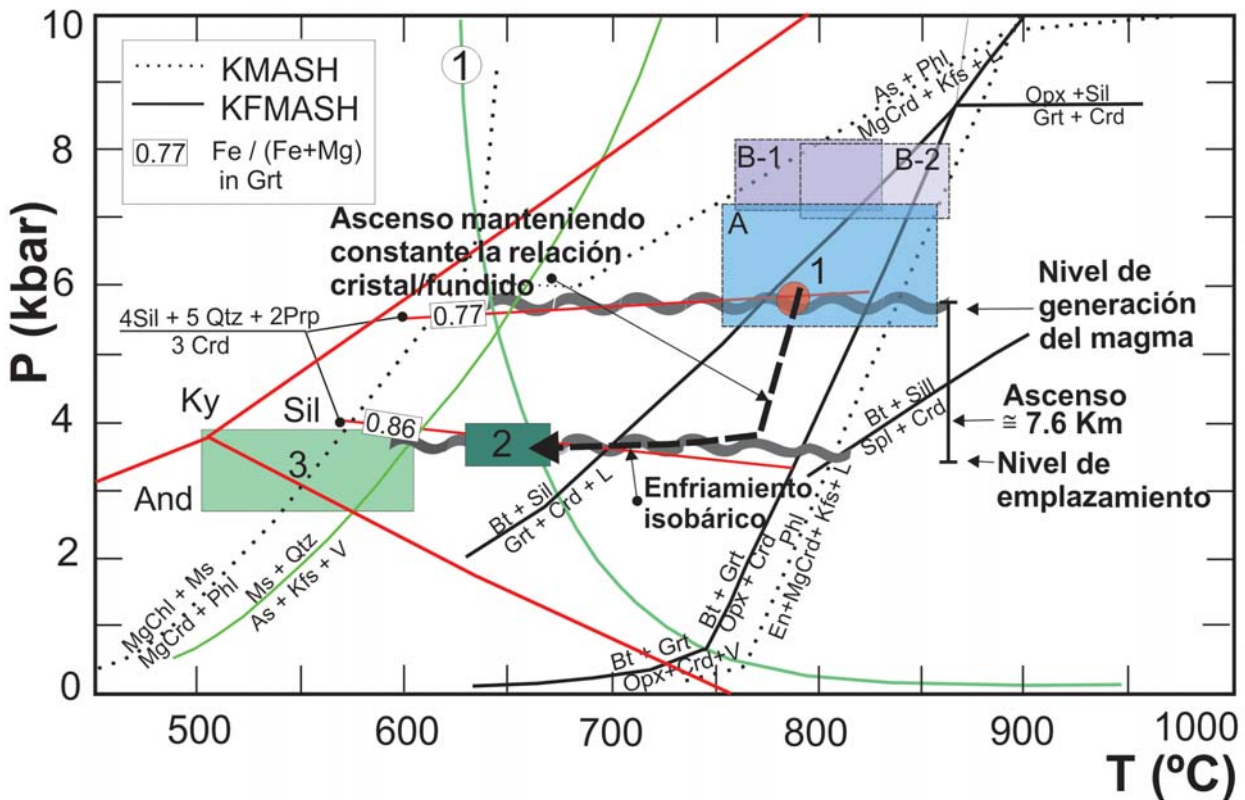


Figura 5: Síntesis evolutiva de las condiciones PT de las rocas de alto grado de las Sierras de Córdoba y del complejo el Pílon (modificado de Rapela *et al.* 2002). La línea negra de trazo grueso y flecha indica la trayectoria PT inferida de la granodiorita porfírica desde su nivel de origen (entre 6 y 8 kbar) hasta su nivel de emplazamiento (3 a 4 kbar). Principales reacciones en el sistema KFMASH y KMASH de Spear *et al.* (1999), abreviaturas mineral según Whitney y Evans (2010).



nitos Hercínicos, los monzogranitos de El Pílon están deprimidos en Na_2O , enriquecidos en K_2O y muestran distintivamente alta relación K/Rb . Una característica a destacar de los diagramas Harker es que las metapelitas con 57–67 % de SiO_2 se encuentran en una posición intermedia entre las cordierititas y los granitos.

Las cordierititas se distinguen de las cordieritas puras por el alto K_2O y bajo Al_2O_3 como resultado de la presencia variable pero siempre presente, de biotita modal. Los núcleos restíticos de las orbículas están enriquecidos en elementos traza como Rb, REE y Zr, ya sea porque se encuentran principalmente en minerales accesorios (apatita y circón incluido en biotita), o como resultado del remplazo en biotita de K por Rb.

La composición isotópica inicial de Nd, recalculada a 523 Ma, se muestra en la Fig. 6. Los valores de eNd_{523} del monzogranito, pegmatitas, núcleo restítico y cordierititas masivas son muy consistentes (-5,5 hasta -6,7), lo cual indica un alto grado de equilibrio isotópico durante el proceso de segrega-

ción del fundido. Los valores en las metamorfitas de campo de alto grado son más variables, como cabría esperar dado su heterogeneidad (promedio $-5,4 \pm 0,7$), ligeramente más positivos que los del Complejo en tanto que los esquistos que forman el techo del monzogranito y las filitas de bajo grado tienen un promedio de $-6,5 \pm 0,9$, que no se distingue de las cordieritas y el monzogranito (Fig. 6).

Las orbículas espectaculares con cordierita fresca de la cantera Cerro Negro comparten muchas sino todas las características de fábrica, comportamiento reológico y relaciones de campo de los granitos orbiculares (Elliston 1984). Una característica importante común a muchos granitos orbiculares es su restricción a lentes pequeños, chimeneas y facies marginales ricas en agua del magma en el cual cristalizan (Elliston 1984). Su desarrollo requiere la ausencia de núcleos de cristalización en el magma acompañado de una caída de la temperatura *liquidus* del fundido, lo que fuerza a la cristalización solamente sobre objetos sólidos (Vernon 1985). Una manera efectiva de provocar una caída rápida de la

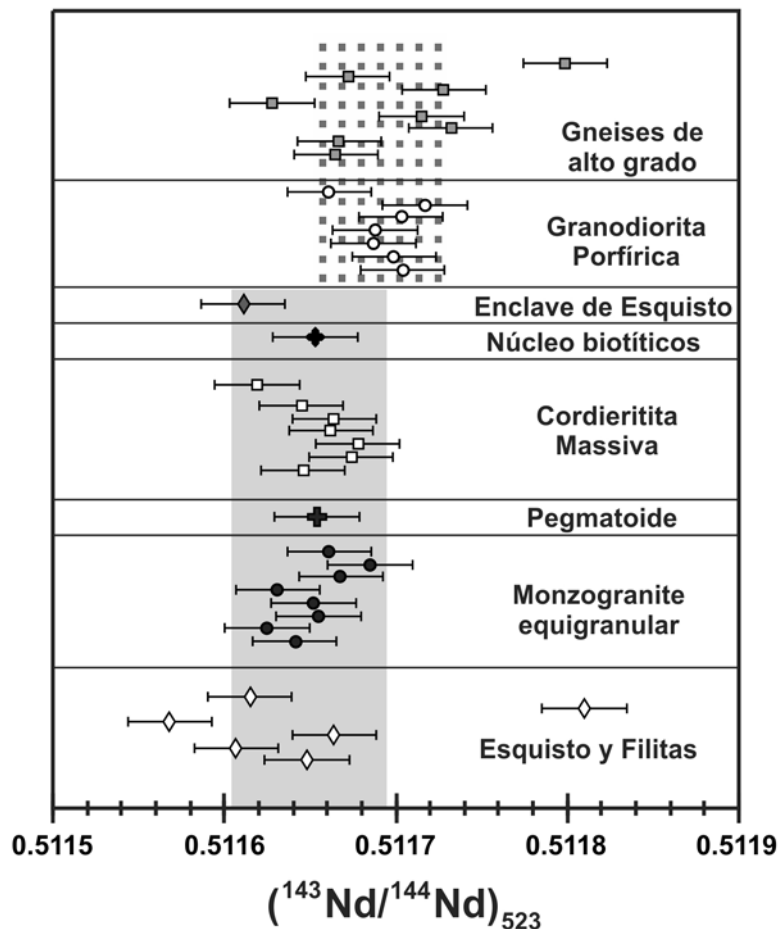


Figura 6: Composición inicial de Nd para las muestras del Complejo el Pílon y las rocas del entorno. Las columnas sombreadas representan las diferentes composiciones efectivas del monzogranito (próximas a la composición de filitas y esquistos) y de la granodiorita porfírica (más próxima a las rocas de alto grado de la caja) respectivamente.

temperatura líquidus en un magma subsaturado en H₂O, es por la introducción de H₂O en el fundido (Vernon 1985). En El Pílon, la ocurrencia local de cordierititas, pegmatitas turmaliníferas y alteración hidrotermal es consistente con una intensa actividad de fluidos asociada a los conductos de alimentación representada por el arreglo tubular de los afloramientos de cordierititas. Sin embargo los magmas peraluminosos de las Sierras de Córdoba son sub-saturados en H₂O, formados por fusión parcial ya sea en presencia de una cantidad pequeña de H₂O libre o por fusión por deshidrata-

ción de la biotita (Otamendi y Patiño Douce 2001).

El ascenso de magmas desde la fuente con relación constante cristal/fundido (Fig. 5), produce un incremento en la a_{H_2O} con el decrecimiento de la presión (Johannes y Holtz 1996), que en el caso de El Pílon pudo haberse acentuado al final de los conductos de alimentación como resultado de la liberación de H₂O por la fusión parcial de los esquistos hidratados que forman la caja. Aún sin llegar a la saturación, un incremento en el contenido de H₂O y fluidos en el magma peraluminoso como resultado de la descompresión rápida y

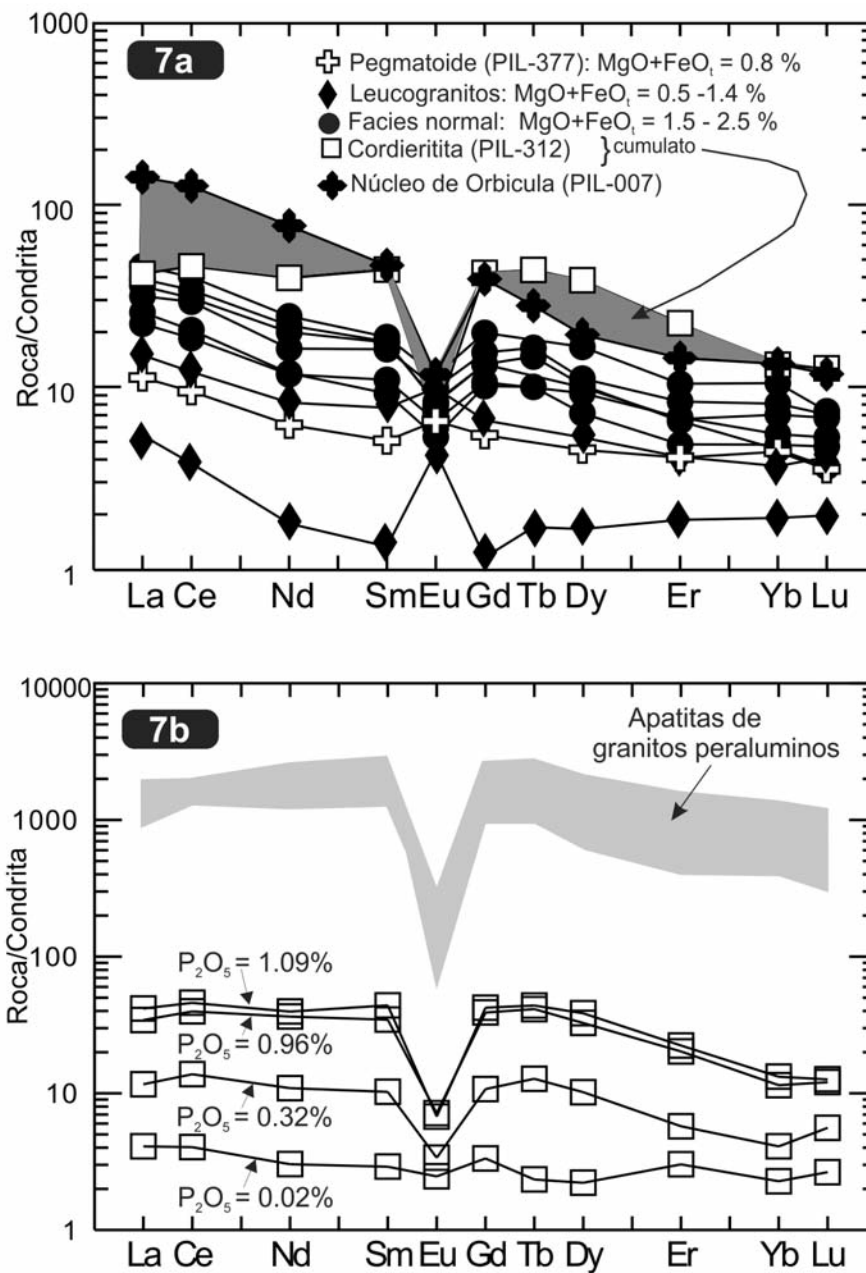


Figura 7: Patrones de distribución de elementos de Tierras Raras: a) Patrón Tierras Raras de las cordierititas masivas, monzogranito y núcleo de las orbículas. b) Patrón de Tierras Raras de las cordierititas masivas mostrando el incremento de las Tierras Raras totales y de la anomalía negativa del Eu con el incremento de contenido P₂O₅ (apatita). El campo representativo del contenido de Tierras Raras en apatitas de granitos peraluminosos corresponde a Bea (1988).



fusión parcial de las rocas de campo ricas en Al_2O_3 , habría producido el sobrecalentamiento y en consecuencia un incremento substancial de la proporción de la fase líquida del magma monzogranítico, al fundir todos los cristales formados inicialmente. Otra consecuencia de la fusión con fluidos presente es la depresión del *sólido* plagioclasa + cuarzo, por lo cual las restitas formadas en presencia de H_2O libre contienen mucho menos plagioclasa y cuarzo que aquellas formadas exclusivamente por fusión por deshidratación (Patiño Douce y Harris 1996). De esta manera, con la partición preferencial de cuarzo y feldespato en el fundido, se espera la presencia de restitas ricas en biotita en fusiones parciales en presencia de H_2O , a presiones medias y bajas. Esto es precisamente lo que se observa en las restitas ricas en biotita que forman el núcleo de las orbículas de cordierita.

El arreglo zonal y radial de los cristales de cordierita, que decrecen en tamaño hacia el borde del manto en las orbículas grandes sugiere un crecimiento estático en un ambiente líquido (Fig. 4b). No hay una diferencia genética entre esta cordierita y la que forma la facies masiva, ya que la cordierita cristaliza del magma sobre cualquier objeto sólido disponible: (1) restitas de biotita + sillimanita; (2) Cristales grandes y euhedrales de cordierita formados tempranamente, o (3) las paredes de los conductos de alimentación o de la cámara magmática del monzogranito. La cristalización de los tipos (1) y (2) conduce a la formación de cordierititas orbiculares, en tanto que la cristalización del tipo (3) desarrolla la facies de cordierita masiva.

En el proceso descrito más arriba, los elementos traza como las REE, Zr, Hf, Th y U que se concentran en la apatita y el circón, que son los accesorios principales en la cordierita y los restitas ricas en biotita, se encuentran fuertemente deprimidos en la facies leucogranítica del monzogranito formada por fraccionamiento de cordierita. Los cristales de circón están siempre dentro de cristales de biotita, por lo que el Zr, el U y el Th se deprimen en los fraccionados leucograníticos que acompañan a la formación de cordierita. El alto contenido de P_2O_5 de las cordierititas está muy probablemente relacionado con la alta solubilidad de apatita en los fundidos peraluminosos (Pichavant *et al.* 1992), de los cuales cristaliza la cordierita (Fig. 7). La depresión en REE de los leucogranitos, con anomalía positiva de Eu puede explicarse por la extracción combinada de cordierita rica en P_2O_5 y restitas biotíticas como se muestra en la Fig. 7b. Tanto la cordierita como el residuo biotítico tienen REE más altas que el monzogranito. No obstante, como el contenido de Eu es similar en el fundido y en el cumulado compuesto, la anomala

lía positiva de Eu en el líquido leucogranítico se produce por la depresión de las REE remanentes, que se particionan en el cumulado compuesto (Fig. 7a). El contenido de REE en las cordierititas está a su vez directamente relacionado con el contenido en roca total de P_2O_5 (Fig. 7b), y este a su vez con el contenido modal de apatita en las cordierititas. Cordierititas masivas de grano grueso con bajo contenido de P_2O_5 muestran patrones planos y deprimidos sin anomalía de Eu, similar a los que se observan en las cordierititas magmáticas puras (Bea 1996).

COMENTARIO FINAL

A nivel geológico, cabe preguntarse por las razones de esta rareza tan llamativa de las cordierititas. Éstas pueden deducirse de las condiciones necesarias para su formación, que se infieren para las cordierititas del Complejo de El Pilón. En primer lugar la formación tiene que ocurrir dentro del campo de estabilidad de la cordierita, a presiones bajas e intermedias. Pero ello obviamente no es suficiente, sino que además debe ocurrir una fusión con saturación de H_2O y fluidos, de un protolito apropiado, como metapelitas magnesianas. La fusión parcial con saturación en H_2O no ocurre nunca en condiciones de metamorfismo regional. Puede darse en espacios reducidos, como chimeneas magmáticas, lentes o conductos pequeños. Para formar las orbículas se necesita un "sobrecalentamiento", producido por la inyección de fluidos que provoca el descenso del *líquido* en el magma, que destruye los núcleos de una cristalización normal. Queda entonces solo un fundido, rico en magnesio, que comienza a cristalizar cordierita sobre cualquier objeto sólido que haya sobrevivido al sobrecalentamiento. Claramente, esta es una situación muy poco habitual.

Las orbículas de cordierita de las montañas de Tsukuba (Japón), a pesar de sus reducidas dimensiones, están protegidas y han sido declaradas monumento nacional, en tanto que las cordierititas orbiculares del Cerro Negro, a pesar de ser ejemplos únicos por su magnitud, rareza, calidad de exposición y variedad de fenómenos geológicos asociados, carecen aún de medidas de protección. Cabe recordar que en el mismo sector, unos 800 metros al este del Cerro Negro, se localizan además los afloramientos de cordierititas masivas (no orbiculares) compuestas por más del 85 % de cordierita verde azulada (Cerro 1, 2 y 3 de Canteras Tamaín), las que también han sido motivo de explotación para rocas ornamentales, y de las que no se han descrito rocas similares en ningún lugar. Estas y las del Cerro Negro constituyen la



mayor concentración de cordierita del planeta y por ende un patrimonio geológico excepcional a nivel mundial que justifica su declaración como patrimonio geológico y su conservación futura.

Pero existe también una restricción geológica general, a nivel de la mecánica del planeta. Por ejemplo, para la formación de los complejos migmáticos peraluminosos de Córdoba se han propuesto dos hipótesis tectónicas: o relacionados a una colisión continental (p.ej. Rapela *et al.* 1998) o por subducción de una dorsal oceánica activa debajo del continente (Fantini *et al.* 1998). En cualquiera de los dos casos está involucrada la acción de una tectónica de placas, que sabemos es característica de la Tierra. Los geólogos planetarios que han estudiado las imágenes de los otros planetas de nuestro sistema solar, se han inclinado mayoritariamente por la opinión de que en ellos no se observan las consecuencias de la tectónica de placas (Marshak 2009). En 2012, se ha señalado por noticias en Internet, que las imágenes de Marte podrían indicar la presencia de una tectónica de placas incipiente, reducida a dos placas, pero todavía no se han presentado evidencias conclusivas en ese sentido. De cualquier manera, la tectónica de placas en un planeta sin agua, sería algo muy distinta a la de la Tierra.

De la enumeración anterior de eventos conocidos, se llega a la conclusión de que la formación de cordieritas es un hecho muy raro en un planeta con agua y con tectónica de placas activa; en ausencia de ambos, su presencia en otro planeta del sistema solar es altamente improbable. Esta es una razón más para preservar este ejemplo geológico único.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Baldo, E.G. y Verdecchia, S.O. 2004. Los nódulos de Na-cordierita en los esquistos de la Formación Tuclame, Sierras Pampeanas de Córdoba. 7° Congreso de Mineralogía y Metalogénia, Avances en Mineralogía, Metalogénia y Petrología: 297–302. Río Cuarto
- Bea, F. 1996. Residence of REE, Y, Th and U in granites and crustal protoliths; implications for the chemistry of crustal melts. *Journal of Petrology* 37: 521–552.
- Brown, M. 1998. Unpairing metamorphic belts: P-T paths and a tectonic model for the Ryoke Belt, southwest Japan. *Journal of Metamorphic Geology* 16: 3–22.
- Clarke, D.B. 1995. Cordierite in felsic igneous rocks: a synthesis. *Mineralogical Magazine* 59: 311–325.
- Elliston, J.N. 1984. Orbicules: An indication of the crystallisation of hydrosilicates, I. *Earth-Science Reviews* 20: 265–344.
- Fantini, R., Gromet, L.P., Simpson, C. y Northrup, C.J. 1998. Timing of high-temperature metamorphism in the Sierras Pampeanas of Córdoba, Argentina: implications for Laurentia-Gondwana interactions. *Actas 10° Congreso Latinoamericano de Geología*, Vol. 2: 388–392. Buenos Aires.
- Gardien, V., Lardeaux, J.M., Ledru, P., Allemand, P. y Guillot, S. 1997. Metamorphism during late orogenic extension: insights from the French Variscan belt. *Bulletin de la Société Géologique, France* 168: 271–286.
- Gordillo, C.E. 1974. Las rocas cordieríticas de Orcoyana y Cerro Negro - Soto (Córdoba). *Boletín de la Asociación Geológica de Córdoba* 2: 90–100.
- Gordillo, C.E. 1979. Observaciones sobre la petrología de las rocas cordieríticas de la Sierra de Córdoba. *Boletín de la Academia Nacional de Ciencias, Córdoba* 53: 3–44.
- Grosse, P., Toselli, A.J. y Rossi, J.N. 2010. Petrology and geochemistry of the orbicular granitoid of Sierra de Velasco (NW Argentina) and implications for the origin of orbicular rocks. *Geological Magazine* 147: 451–468.
- Johannes, W. y Holtz, F. 1996. *Petrogenesis and Experimental Petrology of Granitic Rocks*. Berlin: Springer Verlag, 335 p.
- Kawano, Y. 1933. Chemical studies of the orbicular rocks from Minedera-yama. Imperial Academy of Sciences, Japan, *Proceeding* 9: 613–616.
- La Roche, H. 1992. Un homologue cationique du triangle Q-A-P (quartz-feldspath alcalin-plagioclase), figure majeure de la pétrologie des roches plutoniques. *Comptes Rendus Academie Sciences Paris* 315, Serie 2: 1687–1693.
- Levenson, D.J. 1966. Orbicular rocks: a review. *Geological Society of America Bulletin* 77: 409–426.
- Linares, E. y Quartino, B.J. 1978. Nuevas aportaciones a la génesis de las rocas orbiculares de La Rioja y el control recíproco de datos K-Ar e interpretación petrogenética. *Actas del 7° Congreso Geológico Argentino* 2: 585–93. Neuquén.
- Lucero Michaut, H.N. y Olsacher J. 1981. Descripción Geológica de la hoja 19h, Cruz del Eje. Servicio Geológico Nacional, *Boletín* 179, 91 p.
- Marshak, S. 2009. Does Plate Tectonics Occur on Other Planets? En: *Essentials of Geology*, 3rd. Edition, Chapter 2. W. W. Norton & Company, 628 p.
- Martino, R.D., Guerreschi, A.B. y Sfragulla, J.A. 2009. Petrology, structure and tectonic significance of the Tuclame banded schists in the Sierras Pampeanas of Córdoba and its relationship with the metamorphic basement of northwestern Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 27: 280–298.
- Otamendi, J.E. y Patiño Douce, A.E. 2001. Partial melting of aluminous metagreywackes in the northern Sierra de Comechingones, Central Argentina. *Journal of Petrology* 42: 1551–1572.
- Patiño Douce, A.E. y Harris, N. 1998. Experimental constraints on Himalayan anatexis. *Journal of Petrology* 39: 689–710.
- Pichavant, M., Montel, J.M. y Richards, L.R. 1992. Apatite solubility in peraluminous liquids: experimental data and extension of the model of Harrison & Watson (1984). *Geochimica et Cosmochimica Acta* 56: 3855–3861.
- Quartino, B. J. y Villar Fabre, J. 1962. El cuerpo granítico orbicular precámbrico de la Pampa de Los Altos, sierra de Velasco. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 18: 11–41.
- Rapela, C.W., Baldo, E.G.A., Pankhurst, R. y Saavedra, J. 2002. Cordierite and Leucogranite formation at low pressure: The El Pílon Granite Complex (Sierras Pampeanas, Argentina). *Journal of Petrology* 43(6): 1003–1028.
- Schreyer, W., Gordillo, C.E. y Werding, G. 1979. A new sodian-beryllian cordierite from Soto, Argentina, and the relationship between distortion index, Be content and state of hydration. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 70: 421–428.
- Sederholm, J.J. 1928. On orbicular granites: spotted and nodular granites etc., and on the Rapakivi texture. *Bulletin de la Commission Géologique de Finlande*, N° 83, 105 p.
- Spear, F.S., Kohn, M.J. y Cheney, J.T. 1999. P-T paths from anatectic pelites. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 134: 17–32.



- Sureda, R. y Viramonte, J. 1972. El granito orbicular del Cerro Reventón, Sierra de Los Comechingones, Córdoba. Actas del 5° Congreso Geológico Argentino 2: 215–240. Villa Carlos Paz.
- Tagiri, M., Oba, T. y Fujinawa, A. 2007. Radial cordierite-bearing orbicular granite formed from the melting of pelitic hornfels in granite magma. Tsukuba Mountains, Japan. Journal of Mineralogical and Petrological Science 102: 217–136.
- Vernon, R.H. 1985. Possible role of supheated magma in the formation of orbicular granitoids. Geology 13: 843–845.
- Whitney, D. y Evans, B. 2010 Abbreviations for names of rock-forming minerals. American Mineralogist 95: 85–187.
- Yoshiki, B. 1933. Petrographic notes on the orbicular rocks from Minedera-yama. Imperial Academy of Sciences, Japan, Proceedings 9: 609–612.