

# Granitoides peraluminosos con andalucita y cordierita magmáticas en la sierra de Velasco: implicancias para el orógeno famatiniano

Pablo H. ALASINO<sup>1</sup>, Juan A. DAHLQUIST<sup>1,2</sup>, Carmen GALINDO<sup>3</sup>, Edgardo G. BALDO<sup>4</sup> y César CASQUET<sup>3</sup>

RESUMEN. La combinación de estudios petrológicos, geoquímicos y de química mineral en el sector noreste de la sierra de Velasco, a la latitud de la localidad de Santa Vera Cruz, revelan la presencia de una unidad ígnea peraluminosa con andalucita (Si = 3,85, Al = 8,14 y Fe<sup>3+</sup> = 0,04) y cordierita (K+Na = 0,33 y X<sub>Fe</sub> = 0,40) magmáticas, la cual es denominada *unidad Santa Cruz*. La aluminosidad del magma (ISA = 1,30 - 1,42), evidenciada por la presencia de minerales aluminosos como cordierita, andalucita y muscovita y la geoquímica de roca total indican que esta unidad fue derivada de fusión parcial de una secuencia metasedimentaria (esencialmente pelítica) en la corteza superior, que se emplazó en un rango de presión - temperatura de 2 a 2,4 kbar y 670 a 720 °C. Notablemente, las características geoquímicas de la unidad Santa Cruz sugieren una roca fuente diferente a la establecida para otras unidades peraluminosas del orógeno famatiniano.

Palabras clave: *cordierita magmática, andalucita magmática, granitos peraluminosos, sierra de Velasco, Argentina*

ABSTRACT. *Peraluminous granitoids with magmatic andalusite and cordierite in the Sierra de Velasco: Implications to the Famatinian Orogen.* The combination of petrological, geochemical and mineral/chemical data for the NE sector of the Sierra de Velasco, at the latitud of the Santa Vera Cruz town, reveal the presence of peraluminous igneous unit with magmatic andalusite and cordierite, which has been named Santa Cruz unit. The aluminous of magma (ASI = 1.30 - 1.42), evident by the presence of aluminous minerals such as cordierite, andalusite and muscovite and the whole-rock geochemical, principally indicate that this unit was derived of the partial melting of a metasedimentary secueny (mainly pelitic) in the upper crustal, which was emplaced a pression - temperature range of 2 to 2.4 kb and 670 to 720 °C. Remarkably, the geochemical characteristics of Santa Cruz unit suggest a different source rock than other peraluminous units founded in the Famatinian Orogen.

Key words: *magmatic cordierite, magmatic andalusite, peraluminous granitoids, Sierra de Velasco, Argentina.*

## Introducción

Rocas intrusivas con cordierita y silicatos de aluminio de edad ordovícica han sido descritas en diversos sectores de las Sierras Pampeanas, como por ejemplo en la sierra de Capillitas (granitoides con cordierita y andalucita, Toselli e Indri 1984; Indri 1986), en la sierra de Quilmes (pegmatitas con cordierita y andalucita, Oyarzábal 1988), en la sierra de Mazán (granitoides con cordierita y pegmatitas con andalucita, Schalamuk et al. 1989; Toselli et al. 1991), en la sierra de Zapata (granitoides con cordierita y andalucita, Toselli et al. 1992) y en las sierras de Los

Llanos y Chepes (granitoides con cordierita y xenocristales de sillimanita, (Pankhurst et al. 1996; Dahlquist 2000; Dahlquist et al. 2004a, en referato). En el sector NE de la sierra de Velasco (*sensu stricto*), Rapela et al. (1996) citan por vez primera la presencia de granitoides con cordierita, también reconocidos por Toselli y Saavedra (Saavedra, com. per.), si bien los datos permanecen inéditos.

Este trabajo presenta nuevos datos de campo, petrología, geoquímica y química mineral de una intrusión peraluminosa con cordierita y andalucita (ambos minerales de supuesto origen magmático), aflorante en el sector nororiental de sierra de Velasco, a la latitud de la localidad de Santa Vera Cruz, la cual es denominada aquí unidad Santa Cruz (denominada en un principio unidad peraluminosa sierra de Velasco, Alasino et al. 2004a, b). Basados en estos datos se establece un modelo petrogenético preliminar para esta unidad ígnea.

<sup>1</sup>CRILAR-CONICET, Entre Ríos y Mendoza (5301), Anillaco, La Rioja, Argentina.

<sup>2</sup>ANPCyT.

<sup>3</sup>Dpto. de Petrología y Geoquímica, Fac. de CC. Geológicas, Universidad Complutense, 28040, Madrid, España.

<sup>4</sup>Escuela de Geología, Fac. de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba. CONICET

## Antecedentes geológicos de la sierra de Velasco

La sierra de Velasco cuenta con numerosos estudios geológicos. Los primeros fueron desarrollados por Bodenbender (1911) y Stelzner (1923), continuándose más tarde



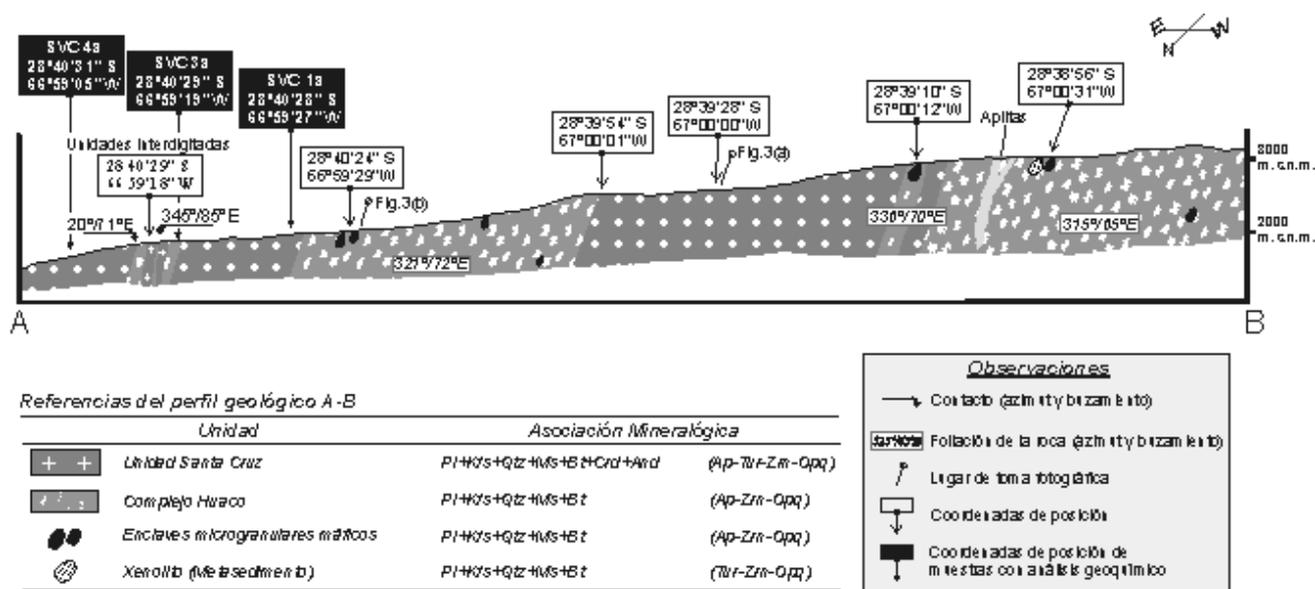


Figura 2. Perfil geológico A-B del sector noreste de la sierra de Velasco. Referencias: Escala horizontal 1: 250 - Escala vertical 1: 750. Nota: la representación de los enclaves, xenolitos y unidades interdigitadas se encuentran exagerados con respecto a la escala.

dio (granitoides porfíricos del sector SO de la sierra de Velasco, 481±3 Ma edad SHRIMP, U-Pb sobre circón, Pankhurst *et al.* 2000), aunque existen granitoides más jóvenes (Plutón San Blas, 340±3 Ma edad determinada por SHRIMP, U-Pb sobre circón, Dahlquist *et al.* 2004b, *en referato*), correspondientes al período carbonífero (Fig. 1).

**Geología de la unidad Santa Cruz**

La unidad Santa Cruz aflora en el sector noreste de la sierra homónima inmediatamente al oeste de la localidad de Santa Vera Cruz (Figs. 1 y 2). El plutón aflora al pie de la sierra interdigitándose progresivamente con el complejo Huaco (Aceñolaza *et al.* 2000; Toselli *et al.* 2000) ha-

cia el oeste hasta que, finalmente, desaparece. La unidad Santa Cruz corta la foliación magmática de este complejo granítico, lo que indica posterioridad respecto del mismo, aunque la simple evidencia geológica no permite resolver si el magmatismo peraluminico es también famatiniano o está relacionado con un evento tectonotermal posterior. Sin embargo, la ausencia de xenolitos ígneos (como ocurre en el plutón Carbonífero San Blas, Alasino 2002) provenientes del complejo Huaco sugiere un emplazamiento casi contemporáneo.

La unidad Santa Cruz está formada por granitoides de color blanco a gris, con textura equigranular, tamaño de grano medio a grueso (4 a 6 mm) y leucocráticos (criterio de Thorpe y Brown 1993) (Fig. 3 - a). Los minerales observados a simple vista o con lupa son: cuarzo, con forma irregular a redondeado, traslúcido; feldespatos, general-

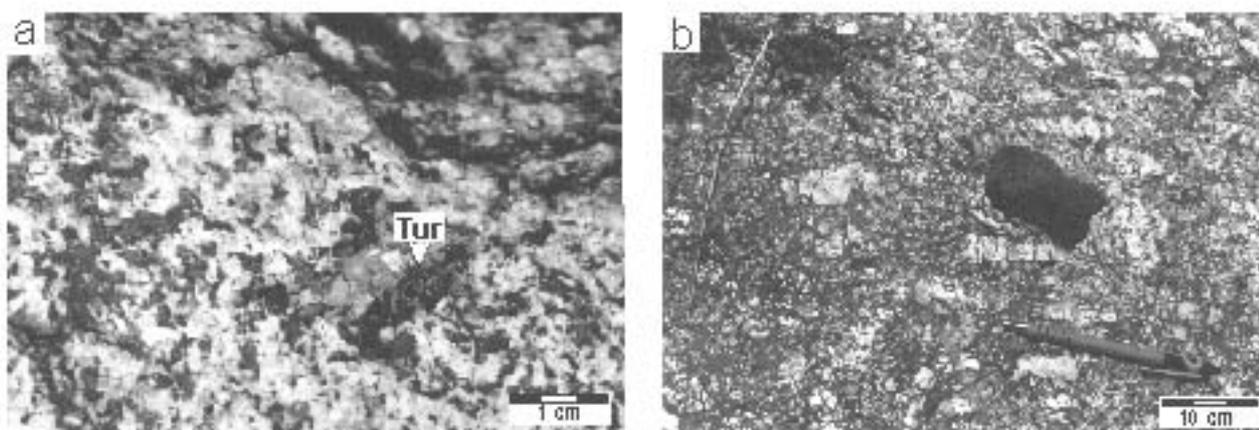


Figura 3. Fotografías de campo: (a) Unidad Santa Cruz, nótese la presencia de turmalina, (b) Complejo Huaco, mostrando una textura porfírica y contenido de enclaves microgranulares máficos.

mente de sección rectangular, color gris claro a rosado; biotita y muscovita, este último mineral se halla en mayor proporción que la biotita. El mineral accesorio más abundante es la turmalina (0,5 x 0,2 cm), siendo su presencia una característica distintiva de esta roca (Fig. 3 - a). Se observa la presencia de óxidos. La roca se caracteriza por su aspecto isótropo homogéneo y ausencia de enclaves microgranulares máficos. Cabe mencionar que, en ciertos sectores, el incremento de turmalina y muscovita es notable.

Al oeste, y en contacto neto con la unidad Santa Cruz, aflora un monzogranito de color gris claro (Fig. 3 - b), con textura porfirica (abundantes fenocristales euhedros de feldespato alcalino de 4 a 10 cm), perteneciente al complejo Huaco (Figs. 1 y 2). Esta unidad ígnea muestra un alineamiento mineral, principalmente por los megacristales de feldespato alcalino, que define una foliación magmática con una orientación de 315° / 65° E, lo cual sugiere que estuvo sometida a un campo de esfuerzos durante su emplazamiento. Los enclaves microgranulares máficos son abundantes en esta facies del complejo Huaco, y en menor medida se hallaron también xenolitos de probable origen metamórfico (Alasino 2002), los que presentan la siguiente asociación mineral: muscovita > biotita > cuarzo > feldesptos > turmalina > circón > minerales opacos, los tres últimos como minerales accesorios. La mayoría de los enclaves máficos tienen forma ovoidal y están orientados según la foliación de la roca. Cortando al complejo Huaco se han observado diques aplíticos, poco abundantes, de disposición sinuosa. Estos diques afectan la foliación de la roca, puesto que se encuentran desviando la orientación de los fenocristales de feldespato, lo que sugiere que la intrusión de los diques aplíticos ocurrió cuando la roca todavía no se encontraba solidificada totalmente; se destaca también la presencia de xenocristales (fenocristales de feldespatos perteneciente al complejo Huaco) en el interior de las aplitas.

## Descripción petrográfica

La clasificación petrográfica del granitoide que forma la unidad Santa Cruz corresponde, principalmente, a un monzogranito con transiciones al campo granodiorítico. La asociación mineral de dicha unidad ígnea consiste en Pl (32±3 %) - Kfs (microclino, Mc) (28±2 %) - Qtz (28±4 %) - Bt (2±1 %) - Ms (5±2 %) y Crd-And-Ap-Tur-Zrn-Opq (5±1 %). Moda a partir del análisis de tres cortes delgados. (Abreviaturas minerales según Kretz 1983).

**Feldespato Alcalino:** Se trata de microclino y se muestra en dos variedades, (a) cristal de grano grueso (Mc<sub>a</sub>) (en torno a 5,2 x 4,6 mm) con sección tabular, subhedro, con maclas en enrejado e inclusiones minerales de Qtz-Pl-Tur

(este último ocasionalmente) y Ms de probable origen secundario; (b) de grano medio (Mc<sub>b</sub>) (en torno a 2,2 x 1,9 mm), con forma similar a Mc<sub>a</sub>, maclas del enrejado y sin inclusiones minerales.

**La Plagioclasa:** es bimodal; la plagioclasa (Pl<sub>a</sub>) es de grano grueso (en torno a 6,3 x 3,5 mm) con sección tabular, subhedral, con maclado polisintético, generalmente zonación oscilatoria (Fig. 4 - d); presenta inclusiones de Ap-Bt y aloja muscovita de probable origen secundario. La plagioclasa Pl<sub>b</sub> es de grano medio (en torno a 2,8 x 0,8 mm) con similares características que la anterior, pero muestra zonación progresiva.

**Biotita:** se presenta en dos tamaños, de grano medio (Bt<sub>a</sub>) (en torno a 2,8 x 1,6 mm), forma rectangular a irregular, subhedra, pleocroísmo de marrón oscuro a marrón claro, con inclusiones de Ap y Zrn. La segunda variedad (Bt<sub>b</sub>) es de grano fino (en torno a 1,4 x 0,4 mm), de hábito tabular, subhedra-anhedra. Esta variedad se encuentra en la matriz de la roca o como inclusión mineral.

**Muscovita:** este mineral es abundante y se presenta mayoritariamente con un tamaño de grano medio (Ms<sub>a</sub>) (en torno a 3,8 x 2,0 mm), con sección rectangular, subhedra (Fig. 4 - f). La segunda variedad es de grano fino (Ms<sub>b</sub>) (en torno a 1,0 x 0,4 mm), con forma similar a la Ms<sub>a</sub> y aparece generalmente como inclusión en otros minerales. Por último se reconoce una variedad de muscovita (Ms<sub>c</sub>) dispuesta en "nidos" asociados a cristales de cordierita y andalucita, estos últimos generalmente como relictos de reemplazo (Fig. 4 - a, b, c).

**Cuarzo:** mineral abundante y se muestra en dos tamaños, como cristal de grano grueso (Qtz<sub>a</sub>) (en torno a 4,3 x 2,2 mm), con sección irregular, subhedro y extinción ondulosa. El Qtz<sub>b</sub> es de grano fino (en torno a 1,5 x 1,2 mm), posee forma irregular, subredondeado y subhedro. Se muestra como inclusión mineral o en la matriz de la roca.

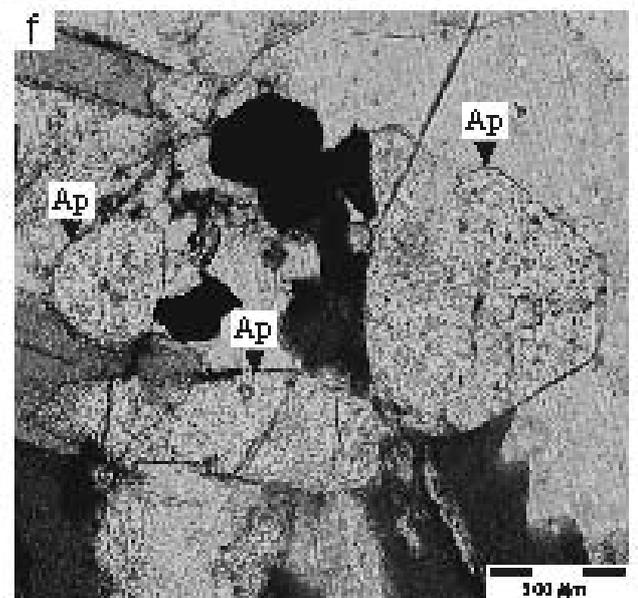
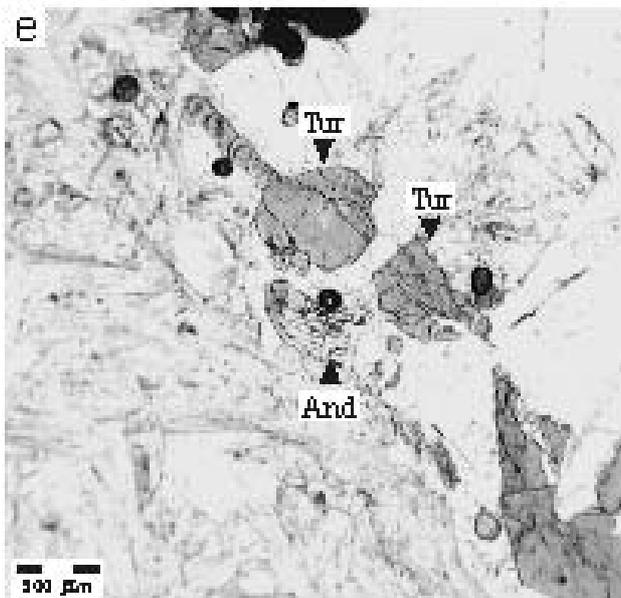
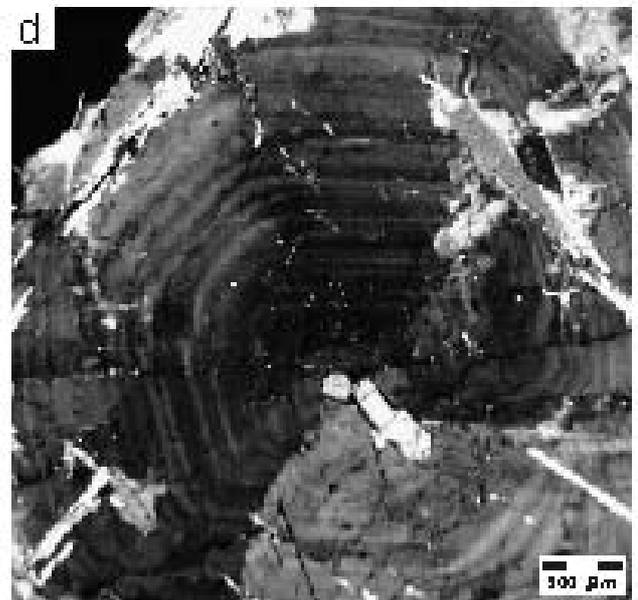
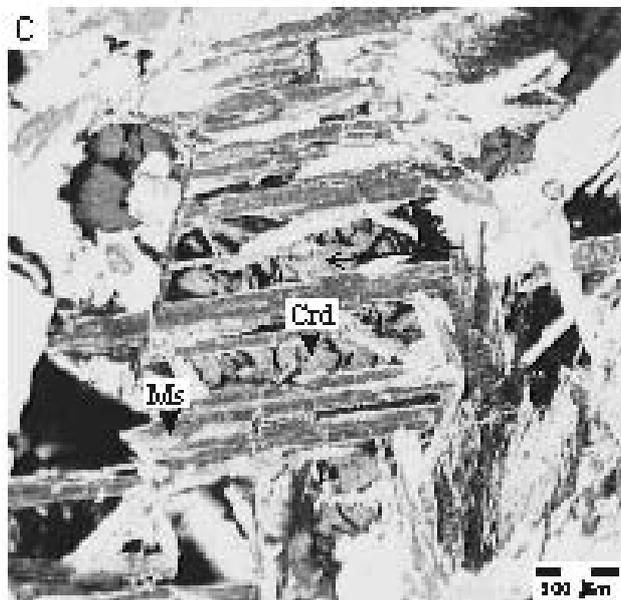
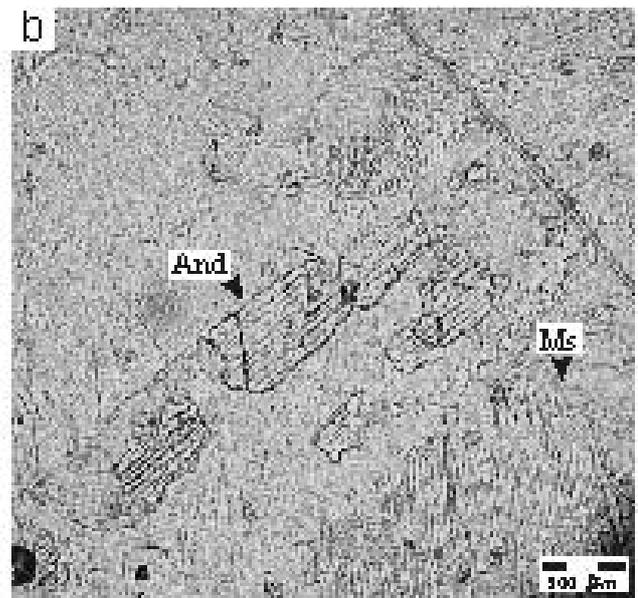
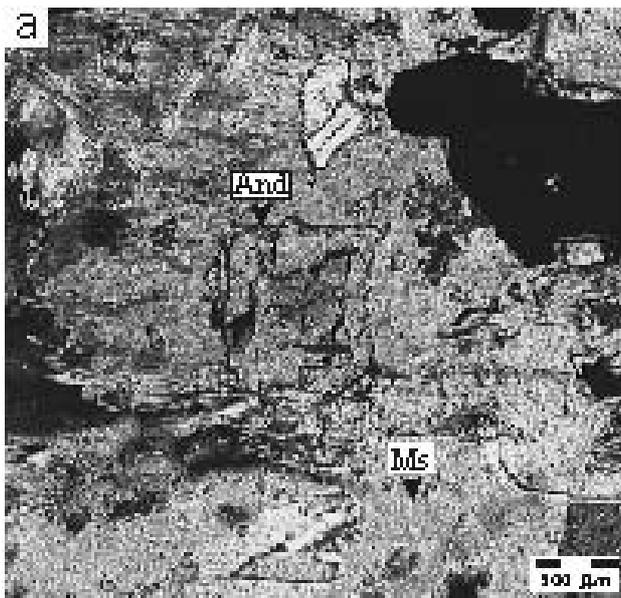
**Cordierita:** Se presenta como cristales relictos (en torno a 3,2 x 1,9 mm) en los pseudomorfos de muscovita (Fig. 4 - c), con forma rectangular a cuadrada, subhedral, con ocasionales bordes anhedrales. Muestra inclusiones minerales de apatita y circón. Algunos cristales de cordierita son euhedros y exhiben alteración a pinita. Se observó a la cordierita asociada a biotita y clorita, ambas posiblemente de origen secundario.

**Andalucita:** Aparece en secciones basales cuadradas (0,9 mm), o rectangular (en torno a 1,6 x 0,6 mm), euhedral (Fig. 4 - a, e). También se observan cristales de andalucita relictos rodeados por muscovita (Fig. 4 - b). Es poco frecuente.

## Minerales accesorios

**Turmalina:** Se presenta generalmente con forma irregular (en torno a 6,0 x 4,1 mm), subhedra-anhedra (Fig. 4 - e).

**Figura 4.** Microfotografías de la unidad Santa Cruz: (a) Sección basal de cristal de andalucita inserto en muscovita a nicoles cruzados, (b) Cristal relicto de andalucita en muscovita a nicoles paralelos, (c) Cordierita en muscovita pseudomorfa a nicoles cruzados, (d) Cristal de plagioclasa con zonación oscilatoria a nicoles cruzados, (e) Cristales de turmalina y andalucita a nicoles paralelos, (f) Cristales de apatita a nicoles cruzados.



**Apatita:** Mineral accesorio abundante, con secciones rectangulares (en torno a 1,0 x 0,6 mm), circulares (0,4 mm de diámetro) y hexagonales (0,4 mm de lado), euhedras-subhedras (Fig. 4 - f).

**Circón:** Es otro mineral accesorio abundante, como inclusión mineral en biotita y cordierita. En ocasiones alcanza un desarrollo importante (en torno a 0,13 x 0,07 mm).

**Minerales Opacos:** generalmente se muestran con forma irregular, subhedro, asociado a biotita y apatita, con dimensiones máximas de 0,24 x 0,18 mm (Fig. 4 - f).

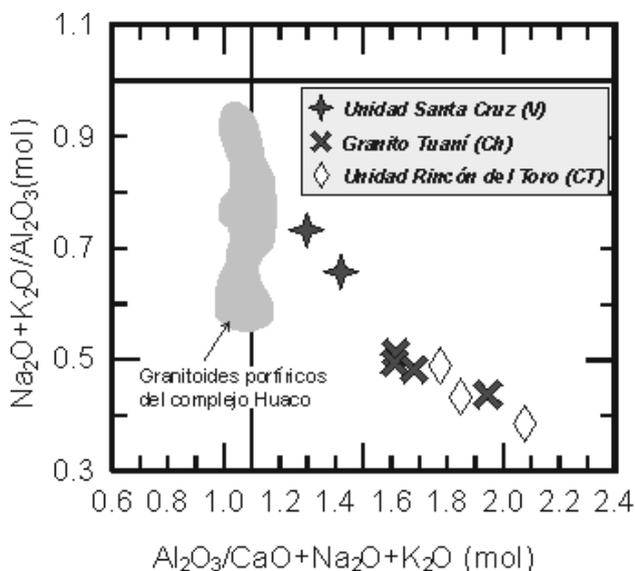
**Clorita:** mineral secundario, con forma irregular, subhedra-anhedra. Generalmente se halla asociada a biotita y cordierita.

## Geoquímica de la unidad Santa Cruz

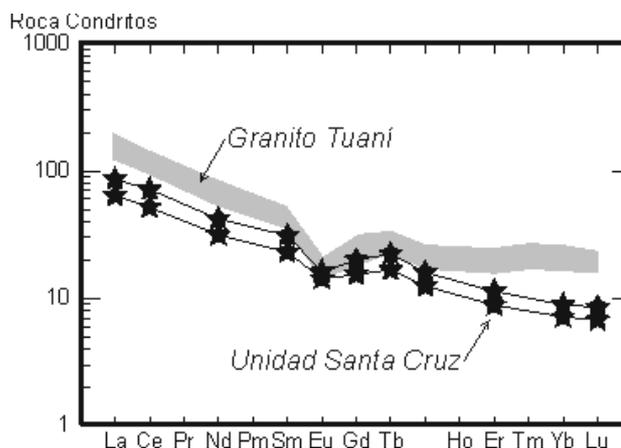
### Metodología de análisis

El análisis geoquímico comprende: (i) dos [C31]determinaciones de elementos mayoritarios y traza de la unidad Santa Cruz, (ii) un promedio de trece análisis geoquímicos de la facies porfírica del complejo Huaco, las cuales corresponden a diferentes sectores de la sierra de Velasco y una determinación en el área de estudio. Los datos se muestran en el Cuadro 1. Las determinaciones se llevaron a cabo en ACTLABS (Canadá), metodología de análisis en Cuadro 1.

Para el estudio comparativo de la unidad Santa Cruz con otros granitoides, se han tenido en consideración también datos geoquímicos del Granito Tuaní, sierra de Che-



**Figura 5.** Índice de saturación de alúmina (Shand 1927), según diagrama de Rapela (1982). Campo de los granitoides porfíricos del complejo Huaco constituido con datos de trece muestras pertenecientes al equipo de investigación PAMPRE (inéditos), promedio Tabla 1. Referencias: sierra de Velasco (V), sierra de Chepes (Ch) (Dahlquist et al. 2004c este volumen) y Cerro Toro (CT), sierra de Famatina (Dahlquist y Alasino 2004a en referato).



**Figura 6.** Diagrama de tierras raras mostrando a la unidad Santa Cruz, sierra de Velasco. La zona gris representa el promedio de cuatro muestras de la unidad Granito Tuaní, sierra de Chepes (Dahlquist 2000). Diagrama normalizado a condritos según Nakamura (1974). Tb, Ho y Tm acordado según Boynton (1984).

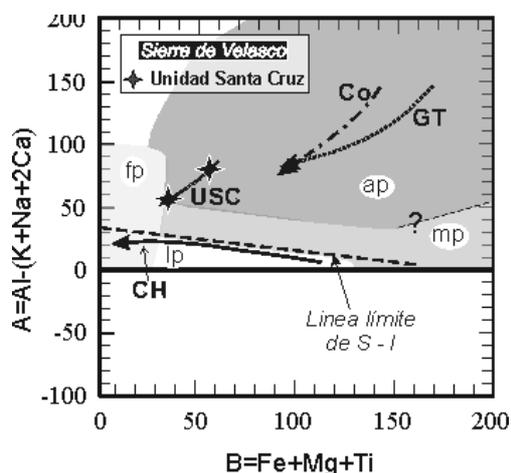
pes (Dahlquist 2000; Dahlquist *et al.* 2004a, *en referato*), unidad Rincón del Toro, sierra de Famatina (Dahlquist y Alasino 2004a en referato) y de granitoides de similares características reportados en la literatura (D'Amico *et al.* 1981). [C.35]

### Elementos Mayoritarios

Los granitoides de la unidad Santa Cruz poseen valores intermedios de SiO<sub>2</sub> (65,4 a 68,6 %), con bajo contenido de CaO (0,9-1,2 %) y elevado contenido de álcalis (Na<sub>2</sub>O=3,45-3,52% y K<sub>2</sub>O=5,67-5,99%) (Cuadro 1), comparado con rocas calcoalcalinas con similares valores de SiO<sub>2</sub>. El contenido de FeO+MgO+TiO<sub>2</sub> (2,2 - 3,5%) es bajo, comparado con los granitoides tipo-S del Famatina (unidad Rincón del Toro, FeO+MgO+TiO<sub>2</sub>=9,9-12,0%, Dahlquist y Alasino 2004a, *en referato*) y la sierra de Chepes (unidad Granito Tuaní, FeO+MgO+TiO<sub>2</sub>= 7,1-10,4%, Dahlquist 2000). Los granitoides de la unidad Santa Cruz poseen una mineralogía que indica una fuerte peraluminosidad del magma (Miller *et al.* 1981 y Zen 1988). Sin embargo, los valores del índice de saturación en aluminio (ISA) (1,30-1,42 (Fig. 5) son moderadamente elevados cuando se los compara con otros granitoides tipo-S del orógeno famatiniano (unidad Rincón del Toro, ISA=1,8-2,1 y Granito Tuaní, ISA=1,6-1,9, Fig. 5), lo cual es debido al elevado contenido de álcalis. La facies porfírica (facies más representativa) del complejo Huaco varían desde metaluminosas a levemente peraluminosas con valores extremos del índice de saturación en aluminio de 1,14 (Fig. 5).

### Elementos trazas

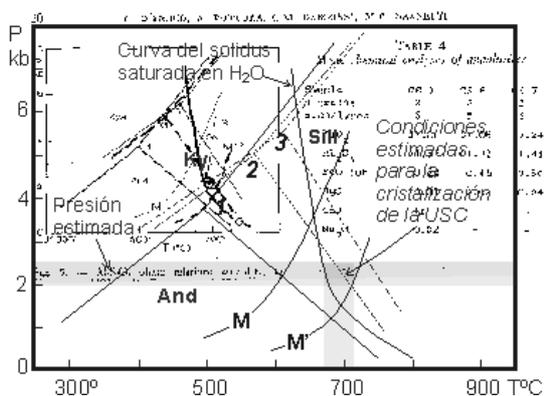
La unidad Santa Cruz presenta contenidos de Ba entre 436 y 517 ppm, Rb entre 359 y 363 ppm, y de Sr entre 105 y 116 ppm, así como relaciones Rb/Sr entre 3,1 y 3,4 y de



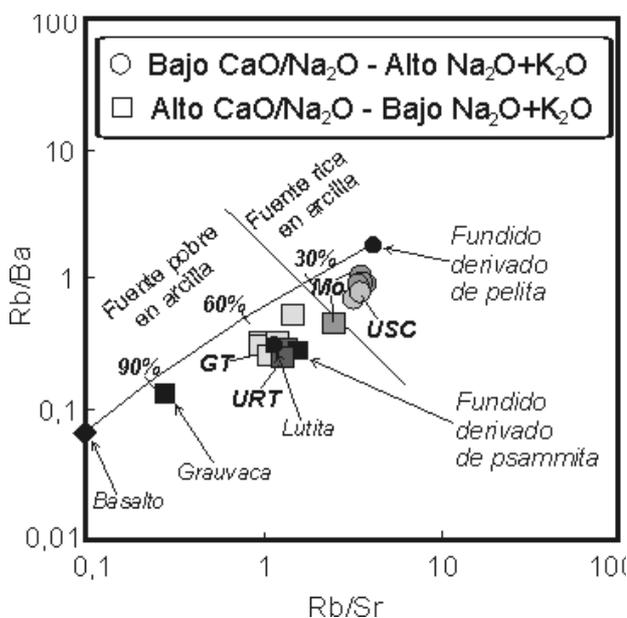
**Figura 7.** Diagrama multicatónico A-B (modificado a partir Villaseca et al. 1998), mostrando diferentes tipos de granitoides (USC = unidad Santa Cruz; CH = tendencia evolutiva del complejo Huaco elaborada a partir de trece muestras pertenecientes al equipo de investigación PAMPRE (inéditos), promedio Tabla 1; Co = granodiorita Cooma, Flood y Vernon 1977; GT = Granito Tuani, Dahlquist et al. 2004a en referato). La línea límite de tipo-I y -S extraído de White y Chappell 1989. Referencias: (ap) granitoides altamente peraluminosos, (mp) granitoides moderadamente peraluminosos, (fp) granitoides peraluminosos félsicos y (dp) granitoides débilmente peraluminosos.

Rb/Ba entre 0,7 y 0,8. El patrón de Tierras Raras es relativamente bajo en relación con otros granitoides peraluminosos, como el Granito Tuani (Dahlquist 2000); posee valores de  $[La/Yb]_N = 8,99-9,70$  y moderada anomalía negativa de Eu ( $Eu/Eu^*$  de 0,65 a 0,76) (Fig.6).

Vale destacar el alto contenido de Be (14 - 22 ppm) que presenta la unidad de estudio, en comparación con las rocas peraluminosas de la unidad Granito Tuani (Be=2 ppm, muestra ROD-16, análisis químico de esta muestra en Dahlquist et al. 2004c este volumen) y la unidad Rin-



**Figura 8.** Grilla de estabilidad para los trimorfos de Aluminio (modificado a partir de D'Amico et al. 1981). (1) Holdaway 1971, (2) Greenwood 1976 y (3) Richardson et al. 1969. M = curva de reacción experimental muscovita + cuarzo (Evans 1965), M' = curva empírica de estabilidad de muscovita + cuarzo en condiciones subsaturadas de H<sub>2</sub>O (D' Amico et al. 1981).



**Figura 9.** Diagrama discriminatorio para diferentes fuentes de granitoides peraluminosos (modificado a partir de Sylvester 1998). USC: unidad Santa Cruz, GT: Granito Tuani - sierra de Chepes (Dahlquist et al. 2004c este volumen), Mo: granitos de Moravia (D'Amico et al. 1981) y URT: unidad Rincón del Toro - sierra de Famatina (Dahlquist y Alasino 2004a en referato).

cón del Toro, sierra de Famatina (Dahlquist y Alasino 2004a, en referato) (Be=4-5 ppm, tres muestras, datos inéditos).

## Química mineral

### Metodología de análisis

El análisis mineral de las principales fases minerales de la unidad peraluminosa sierra de Velasco (Cuadro 2) se realizó con una microsonda de electrones JEOL-JXA-8900M en el Instituto de Microscopía Electrónica "Luis Brú", Universidad Complutense de Madrid, España, utilizando un voltaje de aceleración de 15 kv y 20 nA de intensidad de corriente. El diámetro de haz utilizado fue de 5 micrones y el tiempo de medida, de 10 segundos. La calibración se realizó con una combinación de metales puros, óxidos y minerales.

### Química mineral de la unidad Santa Cruz

Las variedades de plagioclasas analizadas son oligoclasas (Pl<sub>a</sub> An<sub>15,2</sub>-An<sub>24,2</sub>; Pl<sub>b</sub> An<sub>19,6</sub>-An<sub>23,3</sub>) y el microclino posee composiciones de Or<sub>86,4</sub>-Or<sub>88,9</sub> (Cuadro 2). Las micas negras magmáticas (Bt<sub>a</sub>) (X<sub>Fe</sub> = 0,57) se ubican en el campo de las biotitas con altos contenidos de Al<sup>IV</sup>, mostrando composiciones similares a las biotitas que cristalizan junto con andalucita y cordierita en los granitos peraluminosos (p.ej., D'Amico et al. 1981) (Cuadro 2); existe una variedad de biotita (Bt<sub>b</sub>) que posee, en comparación

**Cuadro 1.** Análisis clínicos representativos de la unidad Santa Cruz y granitoides porfíricos del complejo Huaco

Unidad	USC	USC	CH	CH
Muestras	SVC-1a	SVC-4a	SVC-3	x(n+13)
Método de Análisis I	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS
<i>Óxidos mayoritarios (wt%)</i>				
SiO <sub>2</sub>	65,26	68,62	70,86	72,22±0,8
TiO <sub>2</sub>	0,27	0,21	0,55	0,31±0,1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,01	18,20	14,53	14,14±0,2
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,28	1,47	2,75	2,45±0,4
FeO	-	-	-	-
MnO	0,08	0,05	0,04	0,06±0,0
MgO	0,91	0,52	0,80	0,77±0,2
CaO	1,17	0,93	1,63	1,58±0,2
Na <sub>2</sub> O	3,45	3,52	3,19	2,81±0,2
K <sub>2</sub> O	5,67	5,99	4,76	4,53±0,2
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,52	0,43	0,26	0,15±0,0
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	-	-	-	0,57±0,1
H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	-	-	-	-
LOI	1,24	0,98	1,69	-
Total	98,96	99,54	100,11	99,59
<i>Elementos traza (ppm)</i>				
Cs	49,48	47,46	17,88	7,64±1,7
Rb	362,54	359,39	337,63	220,31±24
Sr	116,19	104,67	130,85	86,54±15
Ba	517,33	436,32	451,91	409,70±95
La	28,43	21,11	62,1	35,13±5,3
Ce	61,95	44,92	131,59	74,25±11
Pr	6,85	5,07	14,73	-
Nd	26,45	19,83	55,72	30,77±4,7
Sm	6,32	4,69	10,51	6,26±0,9
Eu	1,25	1,10	1,39	0,93±0,1
Gd	5,53	4,24	7,00	5,60±0,7
Tb	1,05	0,79	1,02	1,01±0,1
Dy	5,49	4,28	5,07	5,73±0,6
Ho	0,95	0,76	0,93	-
Er	2,55	1,99	2,81	3,26±0,3
Tm	0,34	0,28	0,40	-
Yb	1,96	1,57	2,44	2,79±0,2
Lu	0,29	0,23	0,38	0,38±0,0
U	5,09	5,73	5,21	3,33±0,5
Th	12,69	9,66	33,53	17,43±3,0
Y	25,50	19,52	22,47	31,77±3,2
Nb	18,64	17,51	19,00	14,18±1,7
Zr	116,96	95,52	219,82	140,80±21
Hf	3,66	3,06	6,87	4,14±0,5
Ta	3,33	2,94	2,54	1,58±0,3
Ga	24,78	21,92	23,4	19,15±0,8
Ge	3,00	3,30	2,70	-

Hierro total calculado como Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Nomenclatura: Guión (-) = no determinado. X = valor promedio de 13 muestras. ICP-MS = en inglés Inductively Coupled Plasma Emission Mass Spectrometry. Muestras analizadas en ACTLABS (Canadá).

con la variedad anterior, menor contenido de TiO<sub>2</sub> y FeO y mayor concentración de MgO (ver Cuadro 2). Las micas blancas son muscovitas (FeO+MgO=2,01%) y los diagramas Si<sup>IV</sup> vs. Al<sup>IV</sup> y Fe<sup>2+</sup> vs. Al<sup>IV</sup> indican sustitución del tipo celadonítica (ver composición en Cuadro 2). En el diagrama de Miller *et al.* (1981), que diferencia micas primarias y secundarias, se observa que las muscovitas asociadas a andalucita y cordierita son secundarias (Ms<sub>c</sub>), mientras que las muscovitas tipo "a" de la descripción petrográfica son primarias.

El elevado contenido de Mn y Na que muestran las cordieritas de la unidad Santa Cruz (Cuadro 2) sugieren un origen magmático para este mineral (Pereira y Bea 1994; Speer 1981 y Dahlquist *et al.* 2004a, *en referato*). Similares contenidos de Na<sub>2</sub>O han sido reportados en cordieritas magmáticas de otros plutones (p.ej., Clouds Creek y Stumpy Point Plutons; Speer 1981).

Las andalucitas (Cuadro 2) poseen composiciones químicas muy similares a las andalucitas magmáticas de granitoides fuertemente peraluminosos (D'Amico *et al.* 1981) y a las andalucitas presentes en leucosomas ricos en boro (con turmalina magmática) en migmatitas (región de Aoyama, Japón; Kawakami 2002).

El análisis químico de la apatita (Cuadro 2) muestra valores elevados de fluor, por lo que podemos clasificar, dentro de las variedades de la serie isomorfa de la apatita (Deer *et al.* 1992), como fluor-apatita (F=3,38%).

La composición del mineral opaco analizado se aproxima a la solución sólida pseudobrookita - ferropseudobrookita (FeTi<sub>2</sub>O<sub>5</sub> - Fe<sub>2</sub>TiO<sub>5</sub>) (Cuadro 2). El análisis con microscopio polarizador no nos ha permitido definir el origen de estos minerales (por ejemplo, si son el resultado de un reemplazo de ilmenita primaria). Basados en la composición química determinada para el mineral opaco, podemos afirmar que los mismos cristalizaron tempranamente como óxidos de Fe-Ti.

## Discusión

Zen (1988) concluye que los magmas fuertemente peraluminosos poseen una asociación magmática distintiva, incluyendo una serie de minerales tales como granate (rico en almandino-espersantina), cordierita, polimorfos de Al<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub> (principalmente andalucita y sillimanita), muscovita, topacio y turmalina. Los granitoides de la unidad peraluminosa sierra de Velasco poseen algunos de los minerales citados anteriormente (andalucita, cordierita, muscovita y turmalina), indicando que el magma primordial de dicha unidad ígnea estuvo saturado en aluminio. Sin embargo, el índice de saturación de alúmina es considerablemente menor al reportado para granitoides fuertemente peraluminosos, descritos en la sierra de Chepes y sierra de Famatina (ISA = 1,6 - 1,9 y 1,8 - 2,1, respectivamente, Fig. 5). Esta diferencia geoquímica es posiblemente controlada por la composición de la roca fuente, la cual posee altos valores de álcalis. Parece por ello razonable pensar que la fuente de la unidad Santa Cruz fue diferente a la que dio origen a los granitoides tipo-S de Famatina y de Chepes.

A continuación se discuten las implicancias petrogenéticas que tiene la presencia de la andalucita, cordierita, muscovita, turmalina, feldespatos y apatita de la unidad Santa Cruz.

**Andalucita:** la presencia de este mineral indica condiciones de presión bajas durante la cristalización. Flood y Vernon (1977) estiman una presión máxima de 3 kbar para el emplazamiento de rocas graníticas peraluminosas con

**Cuadro 2.** Composición química representativa de los principales minerales que conforman la unidad Santa Cruz.

Mineral	And <sup>a</sup>	Crd <sup>b</sup>	Ms <sub>a</sub> <sup>c</sup>	Ms <sub>b</sub> <sup>c</sup>	Bt <sub>a</sub> <sup>c</sup>	Bt <sub>b</sub> <sup>c</sup>	Chl <sup>d</sup>
Número de análisis % en peso	2	2	3	3	3	1	1
SiO <sub>2</sub>	35,56	47,55	45,24	45,50	35,25	34,71	26,80
TiO <sub>2</sub>	0,04	0,00	0,24	0,03	2,26	0,02	0,16
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	63,73	32,75	36,09	36,82	19,55	21,25	22,23
FeO	-	6,93	1,27	0,85	18,73	15,91	24,45
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,49	-	-	-	-	-	-
MnO	0,01	1,14	0,03	0,01	0,54	0,55	0,74
MgO	0,02	5,80	0,74	0,63	8,18	10,80	11,32
CaO	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,04	0,09
Na <sub>2</sub> O	-	1,56	0,54	0,48	0,07	0,08	0,00
K <sub>2</sub> O	0,02	0,01	10,77	10,86	9,51	9,41	0,16
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	-	-	-	-	-	-
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-	-
NiO	0,00	0,01	0,02	0,01	0,01	0,00	0,04
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,02	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02
F	0,01	0,00	0,06	0,02	0,26	0,32	0,11
Cl	0	0,01	0,00	0,00	0,04	0,04	0,00
O_F_Cl	-	-	0,02	0,01	0,12	0,14	-
Total	99,84	95,78	95,04	95,24	94,56	92,99	86,12
<i>Cálculo Estructural</i>							
Si	3,85	5,15	5,79	5,78	5,18	5,10	5,71
Al <sup>I</sup>	8,14	-	-	-	-	-	-
Al <sup>IV</sup>	-	0,85	2,21	2,22	2,82	2,90	2,29
Al <sup>VI</sup>	-	3,33	3,23	3,29	0,56	0,77	3,31
Ti	0,00	0,00	0,02	0,00	0,25	0,00	0,03
Fe <sup>3+</sup>	0,04	-	-	-	-	-	-
Fe <sup>2+</sup>	-	0,63	0,11	0,09	2,30	1,954	4,35
Mn	0,00	0,10	0,00	0,00	0,07	0,07	0,13
Mg	0,01	0,94	0,14	0,12	1,79	2,36	3,59
Ca	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02
Na	0,00	0,33	0,13	0,12	0,02	0,02	0,00
K	0,00	0,00	1,76	1,76	1,78	1,76	0,04
p	-	-	-	-	-	-	-
B	-	-	-	-	-	-	-
Ni	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
Cr	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cationes	12,04	11,33	13,39	13,38	14,77	14,95	27,48
Ab	-	-	-	-	-	-	-
An	-	-	-	-	-	-	-
Or	-	-	-	-	-	-	-
Fe_FeMg	-	0,40	0,43	0,42	0,56	0,45	0,55
Mg_FeMg	-	0,60	0,57	0,58	0,44	0,55	0,45

**Referencias:** Guión (-) no calculado o no determinado.

**Cálculo Estructural.** (a) Andalucita (And) calculado en base 20 O, (b) Cordierita (Crd) calculado en base 18 O, (c) Muscovita (Ms) y Biotita (Bt) calculado en base 28 O y 2 OH, (d) Clorita (Chl) calculado en base 28 O.

cordierita - andalucita. Las características texturales de la andalucita (euhedralidad, homogénea distribución en el corte, ausencia de asociación con texturas metamórficas y su composición química) sugieren un origen magmático para este mineral.

**Cordierita:** no se conservan cristales de cordierita sin alterar, apareciendo mayoritariamente reemplazados por pinita (muscovita pseudomorfa y clorita). Tiene numerosas inclusiones de circón. De todas maneras, la distribución homogénea en el corte delgado, el escaso contenido de inclusiones y la ausencia de texturas metamórficas asociadas, permite definirlos como cordieritas magmáticas. Por otro lado, la composición química del mineral, apunta en

el mismo sentido, como ya se ha comentado más arriba. Existe una variedad de biotita (Bt<sub>b</sub>), la cual posee en comparación con la Bt<sub>a</sub> diferentes contenidos de TiO<sub>2</sub>, FeO y MgO (ver apartado 5 y Cuadro 2), que se observa asociada a los cristales de cordierita. Esta variedad se interpreta como de origen secundario, la cual crece a expensas de la cordierita en etapas tardías donde el H<sub>2</sub>O saturaba el sistema (según reacción retrógrada (2), véase muscovita). El bajo cierre que presenta el análisis de la Bt<sub>b</sub> (Cuadro 2) es atribuido a la cantidad de H<sub>2</sub>O absorbida durante su desarrollo.

Como se mencionó anteriormente, la unidad Santa Cruz posee altos valores de berilo. Estudios realizados en

Cuadro 2. Continuación

Mineral	Pl <sub>a</sub> <sup>e</sup>	Pl <sub>b</sub> <sup>e</sup>	Kfs <sup>e</sup>	Ap <sup>f</sup>	Tur <sup>g</sup>	Pbr-Fe <sub>ss</sub> <sup>h</sup>
Número de análisis	5	6	4	1	1	1
% en peso						
SiO <sub>2</sub>	61,60	62,25	63,94	0,05	35,50	0,01
TiO <sub>2</sub>	0,01	0,01	0,01	0,00	0,58	54,95
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24,29	23,64	18,89	0,01	34,85	0,02
FeO	0,03	0,02	0,02	0,49	8,04	29,22
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	7,26
MnO	0,02	0,02	0,01	1,48	0,04	7,71
MgO	0,05	0,01	0,01	0,05	4,39	0,07
CaO	4,27	4,41	0,02	52,69	0,27	0,02
Na <sub>2</sub> O	8,93	8,96	1,35	0,16	2,06	0,00
K <sub>2</sub> O	0,18	0,16	14,93	0,01	0,03	0,01
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	-	-	41,90	-	-
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	-	11,38	-
NiO	0,02	0,00	0,02	0,00	0,05	0,00
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,02	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
F	0,04	0,02	0,01	3,38	0,13	0,00
Cl	0,01	0,00	0	0,06	0,02	0,00
O_F_Cl	-	-	-	-	0,06	-
Total	99,47	99,50	99,22	100,28	97,40	99,27
<i>Cálculo Estructural</i>						
Si	10,97	11,07	11,88	0,00	6,52	0,00
Al <sup>t</sup>	5,10	4,95	4,13	0,00	-	0,00
Al <sup>IV</sup>	-	-	-	-	1,4g	-
Al <sup>VI</sup>	-	-	-	-	6,06	-
Ti	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	2,03
Fe <sup>3+</sup>	-	-	-	-	-	1,20
Fe <sup>2+</sup>	0,00	0,00	0,00	0,03	1,24	0,27
Mn	0,00	0,00	0,00	0,10	0,01	0,32
Mg	0,00	0,00	0,00	0,01	1,20	0,01
Ca	0,81	0,83	0,00	4,60	0,05	0,00
Na	3,08	3,09	0,48	0,03	0,73	0,00
K	0,03	0,04	3,54	0,00	0,01	0,00
P	-	-	-	2,89	-	0,00
B	-	-	-	-	0,74	-
Ni	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
Cr	0,00	0,00	0,00	0,00	-	0,00
Cationes	19,99	19,98	20,03	7,66	18,13	3,81
Ab	78,24	77,90	12,00	-	-	-
An	20,70	21,17	0,10	-	-	-
Or	1,06	0,93	87,90	-	-	-
Fe_FeMg	-	-	-	-	-	-
Mg_FeMg	-	-	-	-	-	-

**Referencias:** Guión (-) no calculado o no determinado.

**Cálculo Estructural:** (e) Plagioclasa (Pl) y feldespato alcalino (Kfs) calculado en base 32 O, (f) Apatita (Ap) calculado en base 26 (O, OH, F, Cl), (g) Turmalina calculado en base 31 (O, OH, F) y (h) Pseudobrookita-Ferropseudobrookita (solución sólida) calculado en base 6 O.

esta unidad ígnea por Dahlquist y Alasino 2004b (en prensa) sugieren que este elemento se encuentra probablemente alojado en la estructura cristalina de la cordierita.

**Muscovita:** basados en los criterios texturales y químicos de Miller *et al.* (1981), podemos establecer que gran parte de las muscovitas son de origen primario. Por otro lado, existen microdominios de muscovitas que constituyen “nidos” de este mineral, rodeando a los cristales de cordierita y andalucita (Fig. 4 - b, c). Estas muscovitas han sido interpretadas como de origen subsólido, y crecidas a partir de los minerales primarios que rodean, tales como andalucita y cordierita. D’Amico *et al.* (1981) concluyen que el desarrollo de esta variedad de muscovitas se pro-

duce a partir de la andalucita, en estadios póstumos de la cristalización, que es cuando la presión de H<sub>2</sub>O es suficiente para permitir que la muscovita se forme. D’Amico *et al.* (1981) proponen la siguiente reacción química para la producción de muscovita secundaria: And+Kfs<sub>[líquido]</sub>+H<sub>2</sub>O→Ms+Qtz<sub>[líquido, sólido]</sub>(1). Por otro lado, la composición química de la variedad “c” de las muscovitas, que por comparación con Ms<sub>a</sub> posee una baja proporción de TiO<sub>2</sub>, confirman también el origen secundario de este mineral, sugerido en principio por sus propias características texturales. Una interpretación similar se puede aplicar a la muscovita derivada de la cordierita, probablemente mediante la reacción retrógrada: Kfs+Crd+H<sub>2</sub>O=Ms+Bt+Qtz (2).

**Turmalina:** composiciones químicas de turmalina para fundidos peraluminosos en equilibrio, obtenidas experimentalmente por Wolf y London (1997) son muy similares al análisis de la turmalina de la unidad peraluminosa sierra de Velasco (Cuadro 3). Si bien se cuenta con un único análisis de química mineral podemos afirmar de forma preliminar que la turmalina es de origen magmático. Composiciones químicas de turmalina de origen pegmatítico-hidrotermal (Dutrow y Henry 2000) difieren significativamente de las de la unidad ígnea en estudio, en especial por el elevado contenido de MnO (0,7-0,9%) y bajo MgO (0,39-0,48%) de las primeras. Además, la turmalina de origen metamórfico tiene altos contenidos de MgO, Fe<sup>3+</sup> y es deficiente en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Deer *et al.* 1992; Henry *et al.* 1999).

**Feldespatos:** la escasa presencia de inclusiones de plagioclasa en cristales de microclino y el similar tamaño de los mismos nos sugiere que hubo sincronismo en la cristalización de los feldespatos (Dahlquist 1998) y que sucedió en un rango acotado de temperatura, probablemente sobre o muy cercano del eutéctico granítico. Esto es corroborado por la composición de las plagioclasa (ver apartado 5). La presencia de cristales de plagioclasa con zonación oscilatoria (Fig. 4-d) indicarían que la cristalización del magma estuvo sometida a condiciones de presión y/o temperatura variables.

**Apatita:** es flúor-apatita y el rasgo más destacable para este mineral es su abundancia y forma (rectangular-hexagonal, euhedro) con que se presenta en la unidad Santa Cruz. Chappell (1999) indica que la concentración de P en granitoides tipo-S es consistente con la elevada peraluminosidad de estas rocas. Los trabajos experimentales mencionados por este trabajo sostienen que el incremento de P se aumenta linealmente con el índice de saturación en aluminio.

Teniendo en cuenta lo descrito en este apartado podemos afirmar que la asociación mineral magmática está formada por minerales que tipifican magmas saturados en aluminio. Rocas con estas asociaciones de minerales según indica la numerosa bibliografía (White y Chappell 1977; Flood y Vernon 1977; Clemens y Wall 1981; Holtz y Johannes 1991; Dahlquist 2000; Pankhurst *et al.* 2000) tipifican magmas generados como resultado de la fusión de metasedimentos. Obviamente, rocas metasedimentarias son candidatas potenciales para la fuente de la unidad Santa Cruz.

Los datos geoquímicos de roca total apoyan esta interpretación. En el diagrama multicationico de Debon y Le Fort (1983) (Fig. 7) se proyectan las muestras de la unidad Santa Cruz, la cual se sitúa, en el campo de los granitoides félsicos altamente peraluminoso definido por Villaseca *et al.* (1998). En contraste la mayoría de las muestras del complejo Huaco se proyectan en el campo de los granitoides tipo-I.

Anderson y Rowley (1981) determinan un valor mínimo de 2 kbar de presión para la estabilidad de muscovitas magmáticas. Por otro lado, Flood y Vernon (1977), estiman una presión máxima de 3 kbar para el emplazamiento

de unidades ígneas con cordierita-andalucita. D'Amico *et al.* (1981), infieren una curva empírica de estabilidad de la muscovita a partir de su trabajo sobre granitoides con andalucita magmática y muscovita primaria. Basados en esta bibliografía y teniendo en cuenta nuestros datos podemos acotar una probable área de cristalización de la unidad Santa Cruz (Fig. 8) en valores de presión comprendidas entre 2 a 2,4 kbar y temperaturas de 670°C a 720 °C.

Con relación a la geoquímica de la unidad Santa Cruz podemos decir que los valores del índice de saturación de alúmina (ver fig. 5), a pesar del elevado contenido de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (de 18%), son relativamente bajos para magmas con la mineralogía de dicha unidad (por ej. andalucita, cordierita). Esto está vinculado, como ya se ha mencionado, con el elevado contenido de álcalis (9,1 - 9,5%) que presenta esta roca. A pesar de ello, posee una relación de Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O (de 0,59 - 0,61) baja, similar a los típicos granitoides tipo-S de Lachlan Fold Belt de Australia, definidos originalmente por White y Chappell (1977). Esto es una diferencia fundamental con el Granito de Tuani (Dahlquist 2000, Dahlquist *et al.* 2004a, *en referato*) y la unidad Rincón del Toro (Dahlquist y Alasino 2004a, *en referato*) que presentan valores muy elevados del índice de saturación de alúmina, con menores contenidos de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (de 14,7±0,6% en Granito Tuani, Dahlquist *et al.* este volumen y de 16,4±0,4% en unidad Rincón del Toro, datos inéditos) pero contenidos de álcalis bajos en relación a la unidad Santa Cruz (de 5,3-6,6% para el Granito Tuani y de 5,3-6,2% para la unidad Rincón del Toro). De esta manera, se sugiere que la roca fuente de la unidad Santa Cruz fue diferente a la que dio origen a los magmas peraluminosos primordiales de la unidad Rincón del Toro y el Granito Tuani (*op. ct.*).

Acordando con Miller (1985) las características geoquímicas descritas en el apartado 4 de la unidad peraluminosa sierra de Velasco son esperables en magmas generados por fusión de protolitos pelíticos: Ba<600, Sr<200 y Rb>100 ppm, así como altas relaciones de Rb/Sr y Rb/Ba (Miller 1985). El diagrama discriminante Rb/Sr vs Rb/Ba de Sylvester (1998) permite diferenciar la composición de la roca fuente para granitoides peraluminosos (Figura 9). En concordancia con Miller (1985), los granitoides de la unidad Santa Cruz se proyectan muy próximos al punto correspondiente a fundidos derivados de pelitas presentados en el diagrama original. Granitoides peraluminosos, con cordierita y andalucita magmática (D'Amico *et al.* 1981) coinciden prácticamente con los de la unidad ígnea estudiada (Fig. 9).

El Granito Tuani y las rocas de la unidad Rincón del Toro poseen valores CaO/Na<sub>2</sub>O notablemente más elevados (Dahlquist y Alasino 2004a, *en referato*), sugiriendo una fuente diferente (Fig. 9). En este sentido Sylvester (1998) indica que la relación CaO/Na<sub>2</sub>O es controlada por la composición de la roca fuente. De esta forma, rocas pelíticas (pobre en plagioclasa) tienden a generar fundidos con una relación CaO/Na<sub>2</sub>O más baja que los magmas derivados a partir de psamíticas y/o grauvacas (ricas en plagioclasa).

Finalmente, cabe destacar que los notablemente elevados valores de berilo (14-22 ppm) que posee la unidad Santa Cruz son similares a los contenidos en rocas interpretadas como facies peraluminosas evolucionadas (“apical pluton”) presentadas por Evensen y London 2002.

## Conclusiones

Se reconoce por vez primera en el noreste de la sierra del Velasco un plutón de granitoides peraluminosos con andalucita y cordierita primarias: la unidad Santa Cruz.

Las texturas, mineralogía y la química mineral, sugieren la cristalización de andalucita, cordierita y una muscovita primaria (muscovita tipo “a”), esta última en los estadios finales de la secuencia de cristalización. Una variedad de muscovita (tipo “c”) se habría formado por debajo del *solidus* granítico, probablemente favorecida por una elevada actividad de H<sub>2</sub>O. La turmalina puede ser interpretada como de origen magmático y, por tanto, el magma peraluminoso habría estado enriquecido en boro.

Los xenolitos de probable origen metamórfico hallados en el complejo Huaco (muy escasos) pueden ser tentativamente asignados a la roca fuente que originó el magma de la unidad Santa Cruz. Si ello es así, cabe la posibilidad de vincular el emplazamiento del complejo Huaco, cuya cristalización se desarrolla a una presión probablemente próxima a 3 kbar y a temperaturas entre 700 a 750°C (Alasino 2002), como partícipe en la fusión parcial de metasedimentos de composición pelítica. Sin embargo, el complejo Huaco no habría sido la única fuente de calor, ya que la corteza famatiniana estaba soportando un alto gradiente geotérmico durante el Ordovícico (Dahlquist y Galindo 2004, Dahlquist *et al.* 2004c este volumen, d, e). Esto, sumado a un régimen de tipo extensional dominante en el arco magmático famatiniano (Dahlquist y Galindo 2004; Dahlquist *et al.* 2004d, este volumen) habría facilitado la generación y emplazamiento de la unidad Santa Cruz.

Las características geoquímicas de la unidad Santa Cruz indican una roca fuente diferente a la de los magmas fuertemente peraluminosos representados por el Granito Tuaní en la sierra de Chepes y la unidad Rincón del Toro en el flanco occidental de Famatina.

La composición mineralógica y la geoquímica de la unidad Santa Cruz, son compatibles con un origen a partir de la fusión parcial de metasedimentos pelíticos en la corteza superior, generando pequeños volúmenes de magmas peraluminosos, los cuales se emplazan en un rango aproximado de presión-temperatura comprendidos entre 2,0-2,4 kbar y 670-720°C

Las condiciones físicas de cristalización, la probable composición del protolito y la composición mineralógica y geoquímica de la unidad Santa Cruz son diferentes a las de los granitos fuertemente peraluminosos representados por las unidades Granito Tuaní de la sierra de Chepes y Rincón del Toro en el flanco occidental de la sierra de Famatina.

Estas diferencias petrológicas y geoquímicas, sugieren que el proceso petrogenético fue distintivo en esta región del arco magmático famatiniano, y apoyan los conceptos novedosos de Arco magmático occidental (sierras de Chepes y Famatina) y Arco magmático oriental (sierra de Velasco) propuestos por Dahlquist y Alasino 2004a (*en referato*) y Dahlquist *et al.* 2004c (este volumen).

Cabe mencionar en forma preliminar, el potencial económico que podrían llegar a tener estos granitoides debido al alto contenido de álcalis.

## Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado con fondos del proyecto del Subsidio IM40 2000 (ANPCyT), Ministerio de Ciencia y Tecnología (España) BTE2001-1486 y PICT98-4189 (Argentina). Pablo H. Alasino agradece a la CONICET y especialmente a la Dra. Mercedes Ortiz (Dirección General de Minería) por su apoyo. También al CRILAR por la apoyatura técnica. Se agradece a la Dra. Mónica López de Luchi y el Dr. Raúl Lira, revisores de este trabajo.

## Trabajos citados en el texto

- Aceñolaza, F. G., Miller, H. y Toselli, A. J., 2000. Geología de la sierra de Velasco, provincia de La Rioja, Argentina. XVII Simposio sobre Geología de Latinoamérica, Revista Perfil 18:38. Actas publicadas en CD (6 páginas), Stuttgart, Alemania.
- Alasino, P. H., 2002. Caracterización petrológica del sector norte de la sierra de Velasco, La Rioja, República Argentina. Trabajo Final (Tesina), UNC-CRILAR. Hemeroteca de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, 112p. (Inédito).
- Alasino, P. H., Dahlquist, J. A., Galindo, C., Baldo, E., Casquet, C., 2004a. Magmatismo peraluminoso en el sector NE de la sierra de Velasco, La Rioja, Argentina. Parte 1. En: F. G. Aceñolaza, G. F. Aceñolaza, M. Hünicken, A. J. Toselli (Eds). Simposio Bodenbender, Instituto Superior de Correlación Geológica, Miscelánea 13:85-86, Tucumán 2004.
- Alasino, P. H., Dahlquist, J. A., Galindo, C., Baldo, E., Casquet, C., 2004b. Magmatismo peraluminoso en el sector NE de la sierra de Velasco, La Rioja, Argentina. Parte 2. En: F. G. Aceñolaza, G. F. Aceñolaza, M. Hünicken, A. J. Toselli (Eds). Simposio Bodenbender, Instituto Superior de Correlación Geológica, Miscelánea 13:83-84, Tucumán 2004.
- Anderson, J. L. y Rowley, M. C., 1981. Synkinematic intrusion of peraluminous and associated metaluminous granitic magmas, Whipple Mountains, California. *Canadian Mineralogist* 19, 83-101.
- Bodenbender, G., 1911. Constitución geológica de la parte meridional de La Rioja y regiones limítrofes (República Argentina). Boletín de la Academia Nacional de Ciencias, en Córdoba (República Argentina). Tomo XIX (1):220 pág., Córdoba.
- Boynton, W. V., 1984. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. In: Henderson, P. (Ed.). *Rare earth element geochemistry*, Elsevier, pp. 63-114.
- Caminos, R., 1979. Sierras Pampeanas Noroccidentales, Salta, Tucumán, Catamarca, La Rioja y San Juan. Segundo Simposio de Geología Regional Argentina. Academia Nacional de Ciencias, Córdoba. Volumen 1: 225-292. Córdoba.
- Chappel, B. W., 1999. Aluminium saturation in I- and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites. *Lithos* 46, pp. 535-551.
- Clemens, J. D. y Wall, V. J., 1981. Origin and crystallization of some peraluminous (S-type) granitic magmas. *Canadian Mineralogist* 19, 111-131.

- D'Amico, C., Rottura, A., Bargossi, G. M. y Nannetti, M. C., 1981. Magmatic Genesis of Andalusite in Peraluminous Granites. Examples from Eisgarn Type granites in Moldanubiken. *Rendiconti della Società Italiana di Mineralogia e Petrologia*, 38 (1) pág 15-25.
- Dahlquist, J. A., 1998. Evolucion textural en la granodiorita Chepes, Batolito de Los Llanos-Ulapes, Sierras Pampeanas. *Actas, 10º Congreso Latinoamericano de Geología y 6º Congreso Latinoamericano de Geología Económica*, Buenos Aires 2, 224-229.
- Dahlquist, J. A., 2000. Geología, petrología y geoquímica de las rocas de la sierra de Chepes, La Rioja, Argentina. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Córdoba, pág 464.
- Dahlquist J. A. y Alasino, P. H., 2004a en referato. Hallazgo de granitoides fuertemente peraluminosos en la sierra de Famatina: Implicancias petrogenéticas para el Orogénio famatiniano. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*.
- Dahlquist, J. A. y Alasino, P. H., 2004b en prensa. Segundo reporte de cordieritas ricas en Na-Be en Argentina, sierra de Velasco. 7º Congreso de Mineralogía y Metalogenia, Río Cuarto 2004.
- Dahlquist, J. A., Rapela, C. W. y Baldo, E. G., 2004a en referato. Petrogenesis cordierite-bearing S-type granitoids in the sierra de Chepes, Famatinian Orogen, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*.
- Dahlquist, J. A., Pankhurst, R. J., Rapela, C. W., Casquet, C., Fanning, C. M., Alasino, P. H. y Báez, M., 2004b en referato. The San Pluton: An example of the Carboniferous plutonism in the Sierras Pampeanas, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*.
- Dahlquist, J. A., Rapela, C. W., Pankhurst, R. J., Baldo, E., Saavedra, J. y Alasino, P. H., 2004c este volumen. Los granitoides de la sierra de Chepes y su comparación con granitoides paleozoicos de Sierras Pampeanas: implicancias para el orogénio famatiniano.
- Dahlquist, J. A., Alasino, P. H., Galindo, C., Pankhurst, R. J., Rapela, C. W., Casquet, C., Saavedra, J., Baldo, E., González-Casado, J. y Fanning, M., 2004d. Magmatismo granítico supracrustal en el arco magmático famatiniano. Parte 2. En: F. G. Aceñolaza, G. F. Aceñolaza, M. Hünicken, A. J. Toselli (Eds). *Simpósio Bodenbender*, Instituto Superior de Correlación Geológica, Miscelánea 13:89-90, Tucumán 2004.
- Dahlquist, J. A., Alasino, P. H., Galindo, C., Pankhurst, R. J., Rapela, C. W., Casquet, C., Saavedra, J., Baldo, E., González-Casado, J. y Fanning, M., 2004d. Magmatismo granítico supracrustal en el arco magmático famatiniano. Parte 3. En: F. G. Aceñolaza, G. F. Aceñolaza, M. Hünicken, A. J. Toselli (Eds). *Simpósio Bodenbender*, Instituto Superior de Correlación Geológica, Miscelánea 13:91-92, Tucumán 2004.
- Debon, F. y Le Fort, P., 1983. A chemical-mineralogical classification of common plutonic rocks and associations. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh Earth Sciences* 73, 135-149.
- Deer, W. A., Howie, R. A. y Zussman, J., 1992. An introduction to the Rock Forming Minerals. second Longman ed., London, 696 p.
- Dutrow, B. L. y Henry, D., 2000. Complexly zoned fibrous tourmaline, Cruzeiro Mine, Minas Gerais, Brazil: A record of evolving magmatic and hydrothermal fluids. *The Canadian Mineralogist*, 38, pp.131-143.
- Evans, B. W., 1965. Application of a reaction-rate method to the breakdown equilibria of muscovite plus quartz. *American Journal Science*, vol. 263, 647-667.
- Evensen, J. M. y London, D., 2002. Experimental silicate mineral/melt partition coefficients for beryllium and the crustal Be cycle from migmatite to pegmatite. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 66(12): 2239-2265.
- Flood, R. H. y Vernon, R. H., 1977. The Cooma granodiorite, Australia: An example of in situ crustal anatexis?. *Geology* 6, 81-84.
- Greenwood, H. J., 1976. Metamorphism at moderate temperatures and pressures. In: Bayley, D.K. y MacDonald, R. (Eds.) *The evolution of the crystalline rocks*. Henry, D., Kirkland, B. L. y Kirkland, D. W., 1999. Sector-zoned tourmaline from the cap rock of a salt dome. *European Journal of Mineralogy*, 11, 263-280pp.
- Henry D. J., Kirkland, B. L., Kirkland, D. W., 1999. Sector-zoned tourmaline from the cap rock of a salt dome. *European Journal of Mineralogy*, vol. 11, 263-280.
- Holdaway, M. J., 1971. Stability of andalusite and the Aluminium Silicate phase Diagram. *American Journal Science*, vol. 271: 97-131.
- Holtz, F. y Johannes, W., 1991. Genesis of peraluminous granites I. Experimental Investigation of melt composition at 3 and 5 kb and various H<sub>2</sub>O activities. *Journal of Petrology* 32, 935-958.
- Indri, D. A., 1986. Rasgos geológicos de la Cuesta Mina Capillitas, provincia de Catamarca, Argentina. *Revista del Instituto de Geología y Minería* 6: 191-209, Jujuy.
- Jordan, T. E. y Allmendinger, R. W., 1986. The Sierras Pampeanas of Argentina: a modern analogue of the Rocky Mountain foreland deformation. *American Journal of Science*, vol. 286, 737-764.
- Kawakami, T., 2002. Magmatic andalusite from the migmatite zone of the Aoyama area, Ryoke metamorphic belt, SW Japan, and its importance in constructing the P-T path. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 97, 241-253p.
- Kretz, R., 1983. Symbols for Rock-Forming Minerals. *American Mineralogist*, 68: 277-279.
- Miller, C. F., Stoddard, E. F., Bradfish, L. J. y Dollase, W. A., 1981. Composition of plutonic muscovite: genetic implications. *Canadian Mineralogist*, Vol. 19, pp. 25-34.
- Miller, C. F., 1985. Are strongly peraluminous magmas derived from pelitic sedimentary sources?. *Journal of Geology*, vol. 93, p. 673-689.
- Nakamura, N., 1974. Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, vol. 38, pp. 757-775.
- Oyarzábal, F. R., 1988. Geología del Basamento Cristalino del extremo NE de la Sierra de Quilmes, Salta. Tesis Doctoral, Facultad de Cs. Naturales e Instituto M. Lillo, UTN (Inédita)
- Pankhurst, R. J., Rapela C. W., Saavedra, J., Baldo, E., Dahlquist, J. y Pascua, J., 1996. Sierra de Los Llanos, Malanzán and Chepes: Ordovician I and S-type granitic magmatism in the Famatinian Orogen. XIII Congreso Geológico Argentino y III Congreso de Explotación de Hidrocarburos, Bs. As., *Actas V*, 415.
- Pankhurst, R. J., Rapela, C. W., Saavedra, J., Baldo, E., Dahlquist, J. A., Pascua, I. y Fanning, C. M., 1998. The Famatinian arc in the central Sierras Pampeanas. En: R. J. Pankhurst y C. W. Rapela (eds.). *The Proto Andean Margin of Gondwana*. Geological Society, London, Special Publications, 142: 343-367.
- Pankhurst, R. J., Rapela, C. W. y Fanning, C., 2000. Age and origin the Coeval TTG, I and S-Type granites in the Famatina belt of NW de Argentina. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*: 91, 151-168.
- Pereira, M. D. y Bea, F., 1994. Cordierite-producing reactions in the Peña Negra Complex, Avila Batholith, central Spain: The key role of cordierite in low pressure anatexis. *Canadian Mineralogist* 32, 763-780.
- Ramos, V. A., 1988. Late Proterozoic-early Paleozoic of South America: A collisional history. *Episodes*, 11, 168-175.
- Rapela, C. W., 1982. Aspectos geoquímicos y petrológicos del batolito de Achala, provincia de Córdoba. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 37: 313-330.
- Rapela, C. W., Saavedra, J., Toselli, A. y Pellitero, E., 1996. Eventos Magmáticos fuertemente peraluminosos en las Sierras Pampeanas. XIII Congreso Geológico Argentino y III Congreso de Explotación de Hidrocarburos, Bs. As., *Actas V*, 337- 353.
- Rapela, C. W., Pankhurst, R. J., Casquet, C., Baldo, E., Saavedra, J., Galindo, C. y Fanning, C. M., 1998 (a). The Pampean Orogeny of the southern proto-Andes: Cambrian continental collision in the Sierras de Córdoba. En: R. J. Pankhurst y C. W. Rapela (eds.). *The Proto Andean Margin of Gondwana*. Geological Society, London, Special Publications, 142: 181-217.
- Rapela, C. W., Pankhurst, R. J., Casquet, C., Baldo, E., Saavedra, J. y Galindo, C., 1998 (b). Early evolution of the proto-Andean margin of South America. *Geology* 26, 707-710.
- Rapela, C. W., Pankhurst, R. J., Dahlquist, J. A., Fanning, C. (1999). U-Pb SHRIMP ages of Famatinian granites; new constraints on the timing and tectonic setting of I- and S-type magmas in an ensialic arc. *Resúmenes II South American Symposium on Isotope Geology*, Carlos Paz, Argentina: 264-267.
- Rapela, C. W., Casquet, C., Baldo, E. G., Dahlquist, J. A., Pankhurst, R. J., Galindo, C. y Saavedra, J. (2001). Orogénio del Paleozoico In-

- ferior en el margen proto-Andino de Gondwana. Sierras Pampeanas (Argentina). *Journal of Iberian Geology. An International Publication of Earth Sciences*, 27: 23-41.
- Richardson, S. W., Gilbert, M. C. y Bell, P. M., 1969. Experimental determination of Kyanite-andalusite and andalusite-sillimanite equilibria: the aluminum silicate triple point. *American Journal Science*, vol. 271, 252-277.
- Rossi de Toselli, J., Toselli, A., Saavedra, J. y Pellitero, E., 1985. Petrología y Geoquímica de Plutones Fuertemente Peraluminicos de las Sierras Pampeanas: el Problema de los Granitos Cordieríticos. *Revista de la Asociación Argentina de Mineralogía, Petrología y Sedimentología*, 16 (1-4):55-64, 1985.
- Rossi, J. N., Toselli, A. J., Báez, M. y Sardi, F. G., 2000. Granitoides Deformados y No Deformados del Norte de la Sierra de Velasco, La Rioja Argentina. XVII Simposio sobre Geología de Latinoamérica, *Revista Perfil* 18:38. Actas publicadas en CD (4 páginas), Stuttgart, Alemania.
- Shalamuk, I. A., Toselli, A., Saavedra, J. Echeveste, H. y Fernández, R., 1989. Geología y mineralización del sector Este de la Sierra de Mazán, La Rioja, Argentina. *Asociación Argentina de Mineralogía, Petrología y Sedimentología Revista* 20 (1-4): 1-12.
- Shand, S. J., 1927. *Eruptive Rock*, John Wiley y Sons, New York, 360 pp.
- Sims, J. P., Skirrow, R. G., Stuart-Smith, P. G. y Lyons, P., 1997. Informe geológico y metalogénico de las Sierras de San Luis y Comechingones (provincias de San Luis y Córdoba), 1:250.000. *Anales XXVIII, Instituto de Geología y Recursos Minerales, SEGEMAR*, Buenos Aires.
- Sims, J. P., Ireland, T. R., Camacho, A., Lyons, P., Pieters, P. E., Skirrow, R. G. y Stuart-Smith, P. G., 1998. U-Pb, Th-Pb and Ar-Ar geochronology from the southern Sierras Pampeanas, Argentina: implications for the Palaeozoic tectonic evolution of the western Gondwana margin. In: Pankhurst, R. J., Rapela, C. W. (Eds.): *The Proto-Andean Margin of Gondwana*, Geological Society of London, Special Publication 142, 259-281.
- Speer, J. A., 1981. Petrology of cordierite and almandine-bearing granitoid plutons of the southern Appalachian Piedmont, U.S.A. *Canadian Mineralogist* 19, 35-46.
- Stelzner, A., 1923. Contribuciones a la geología de la República Argentina con la parte limítrofe de los Andes Chilenos entre los 32° y 33° S. *Actas de la Academia Nacional de Ciencias*. Tomo VIII (1-2), 228 pág. Córdoba.
- Sylvester, P. J., 1998. Post-collisional strongly peraluminous granites. *Lithos* 45, 29-44.
- Thorpe, R. S. y Brown, G. C., 1993. *The Field Description of Igneous Rocks*. John Wiley & Sons, Inc. New York, USA.
- Toselli, G. A., Saavedra, J., Del Valle Córdoba, G. y Medina, M. E., 1991. Petrología y geoquímica de los granitoides de la zona de Carrizal-Mazán, La Rioja y Catamarca. *Asociación Geológica Argentina Revista*, 46: 36-50.
- Toselli, G. A., Saavedra, J., Córdoba, G. y Medina, M. E., 1992. Los granitoides peraluminosos de la Sierra de Vinquis, Cerro Negro y Zapata (Sierras Pampeanas), provincia de Catamarca, Argentina. *Estudios Geológicos* 48: 247-256.
- Toselli, A. J. e Indri, D. A., 1984. Consideraciones sobre los silicatos de aluminio en el Granito Capillitas, Catamarca. IX Congreso Geológico Argentino; Actas III: 205- 215.
- Toselli, A. J., Rossi de Toselli, J. N. y Aceñolaza, F. G., 1986. A proposal for the systematization of the Upper-Precambrian, Lower Paleozoic basement in the Pampean Ranges, Argentina. *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie*, Teil. I (9-10), 1227.
- Toselli, A. J., Rossi, J. N., Sardi, F. y Báez, M. A., 2000. Caracterización petrológica y geoquímica de granitoides de la Sierra de Velasco, La Rioja, Argentina. XVII Simposio sobre Geología de Latinoamérica. *Revista Perfil* 18:38. Actas publicadas en CD (6 páginas), Stuttgart, Alemania.
- Turner, J. C. M., 1971. Descripción geológica de la Hoja 15d "Famatina", provincia de La Rioja. Dirección Nacional de Geología y Minería. Buenos Aires, Boletín n° 126, 98pp.
- Vielzeuf, D., y Holloway, J. R., 1988. Experimental determination of the fluid-absent melting relations in the pelitic system. *Contribution to Mineralogy and Petrology* 98: 257-276.
- Villaseca, C., Barbero, L. y Rogers, G., 1998. Crustal origin of Hercynian peraluminous granitic batholiths of Central Spain: petrological, geochemical and isotopic (Sr, Nd) constraints. *Lithos* 43, 55-79.
- White, A. J. y Chappell, B. W., 1977. Ultrametamorphism and granitoid genesis. *Tectonophysics* 43: 7-22.
- White, A. J. R. y Chappell, B. W., 1989. *Geology of the Numbla 1:100,000 Sheet (8624)*. Geological Survey NSW, Sidney.
- Wolf, M. B. y London D., 1997. Boron in granitic magmas: stability of tourmaline in equilibrium with biotite and cordierite. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 130: 12-30.
- Zen, E., 1988. Phase relations of peraluminous granitic rocks and petrogenetic implications. *Annual Review Earth Planetary Sciences*, 1988, 16:21-51.