

# CARACTERIZACIÓN LITOGEOQUÍMICA DEL GRANITO LA CHINCHILLA Y SU RELACIÓN CON EL URANIO, SIERRA DE VELASCO, PROVINCIA DE LA RIOJA

Marcos SALVATORE<sup>1</sup>, Francisco J. PARRA<sup>1</sup>, Daniel L. SANCHEZ<sup>2</sup>, Juan O. ALVAREZ<sup>1</sup>, Carina BELLO<sup>1</sup> y Juan J. ZARCO AMBROSIO<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Comisión Nacional de Energía Atómica, Gerencia de Exploración de Materias Primas, Regional Centro, Córdoba.

E-mail: msalvatore@rcentro.cnea.gov.ar

<sup>2</sup> YPF S.A.- Geología El Guadal - UNAS. E-mail: daniel.sanchez@ypf.com

## RESUMEN

El plutón La Chinchilla es un cuerpo granítico de forma subelipsoidal en planta que aflora en el sector central de la sierra de Velasco, provincia de La Rioja, Argentina, cubriendo un área aproximada de 3,75 km<sup>2</sup>. Intruye en forma neta al granito porfírico Huaco, o bien mediante contactos pegmatoides y en algunos sectores con desarrollo de *stockscheider*. Fueron definidas tres facies graníticas en base a sus características texturales, composición mineralógica y radioactividad natural. La facies porfírica de mayor extensión areal, la facies equigranular y la facies de borde de grano fino de escasa representación areal, todas correspondientes modalmente a monzogranitos. Los análisis químicos reflejan contenidos elevados en uranio para todas las facies, siendo la equigranular la que muestra los mayores tenores. Asimismo esta facies se encuentra levemente enriquecida en álcalis, elementos incompatibles (F, Rb, Sn y U) y relaciones Th/U menores a 0,8 evidenciando un mayor grado de fraccionamiento.

**Palabras clave:** *Petrografía, geoquímica, uranio, plutón La Chinchilla*

## ABSTRACT

*Lithochemical characterization of the La Chinchilla pluton and their relationship with uranium, Sierra de Velasco, La Rioja.*

The Chinchilla pluton is a granitic subelipsoidal shaped body that crops out in the central area of the Sierra de Velasco, La Rioja, Argentina, covering an approximate area of 3.75 km<sup>2</sup>. This small body sharply intrudes into Huaco porphyritic granite, or by pegmatoid contacts and in some sectors stockscheider development. Three granite facies were defined based on their textural characteristics, mineral composition and natural radioactivity. The porphyritic facies presents major areal extent, whereas the equigranular facies and the fine grain boundary facies are poorly represented. All facies have a monzogranitic modal composition. Chemical analysis show high uranium content for all facies, being the equigranular which shows the greatest tenors. This facies is also slightly enriched in alkalis, incompatible elements (F, Rb, Sn and U) and Th/U relations less than 0,8 showing a greater degree of fractionation.

**Keywords:** *Petrography, geochemistry, uranium, La Chinchilla pluton*

## INTRODUCCIÓN

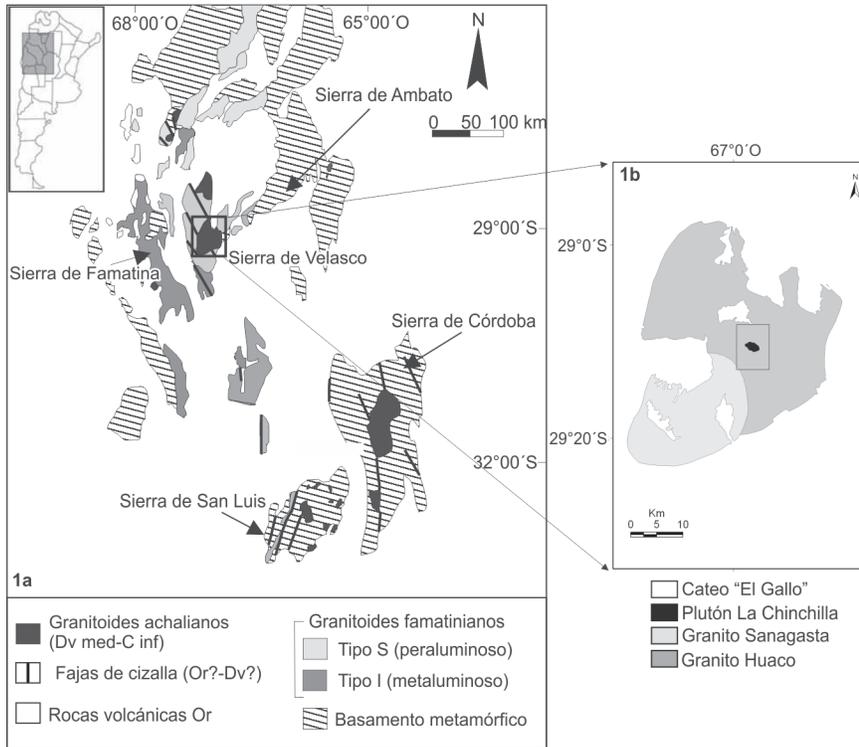
El plutón La Chinchilla se ubica en el sector central de la sierra de Velasco dentro del cateo de exploración denominado "El Gallo", distante unos 57 km al NNO de la ciudad capital de La Rioja (Figs. 1a y b). El primer antecedente que pone en evidencia la anomalía radimétrica en la región es un informe interno presentado a la Comisión Nacional de Energía Atómica (Belcastro 1974) consistente en el relevamiento aeroradimétrico detallado y regular de la sierra de Velasco en una escala de 1:50.000. Trabajos de investigación más recientes (Grosse *et al.* 2005a y

b, Grosse 2007) identifican por primera vez el plutón y reflejan mediante estudios petrográficos y geoquímicos su carácter evolucionado y su enriquecimiento en elementos incompatibles, en especial uranio. A partir de esta base bibliográfica la Comisión Nacional de Energía Atómica solicita el área a la autoridad minera de la provincia de La Rioja para efectuar tareas de prospección y exploración de minerales de uranio. El objetivo de esta contribución es presentar el mapa geológico detallado de las facies graníticas constitutivas del plutón La Chinchilla. Además se caracteriza la geología, radimetría, petrografía y geoquímica, determinando la

relación entre el grado de evolución magmática y el contenido de uranio para las distintas facies graníticas identificadas en el plutón.

## MARCO GEOLÓGICO

Las rocas graníticas que constituyen gran parte el basamento de las Sierras Pampeanas fueron generadas durante el ciclo orogénico Famatiniano. Estos granitoides famatinianos pueden ser separados en dos cinturones subparalelos de rumbo NNO (Pankhurst *et al.* 2000), un cinturón metaluminoso hacia el oeste y un cinturón peraluminoso hacia el este (Fig. 1a).



**Figura 1:** a) Ubicación geográfica y marco geológico regional de las Sierras Pampeanas discriminando los diferentes eventos magmáticos paleozoicos. Modificado de Grosse (2009). b) Marco geológico local y ubicación del cateo El Gallo. Modificado de Grosse (2009).



**Figura 2:** Banda biotítica de grano fino en el contacto entre el plutón La Chinchilla y el granito Huaco.

La sierra de Velasco se encuentra en el sector central de las Sierras Pampeanas, y está constituida casi enteramente por ro-

cas ígneas. Toselli *et al.* (2005) presentan el esquema geológico de la sierra de Velasco y reconocen las siguientes unidades

de origen ígneo: granitoides ordovícicos pre a sin tectónicos de origen cortical, típicos de ambiente colisional, con edades de  $481 \pm 2$  Ma, U-Pb *SHRIMP* (Rapela *et al.* 2001), ubicados en el sector centro y norte de la sierra, los cuales corresponden con el cinturón peraluminoso. Hacia el sur de la sierra está representado el cinturón metaluminoso por el plutón de Patquía de origen mixto, interacción corteza-manto. Estos se encuentran afectados por fajas de cizalla de rumbo NNO.

Granitoides de edades devónica superior a carbonífera inferior, estudiados en el sector central de la sierra de Velasco como Huaco, Sanagasta y La Chinchilla (Grosse *et al.* 2005 a, Grosse *et al.* 2009) y otros ubicados al norte como La Punta, Señor de La Peña, Asha y San Blas (Báez *et al.* 2002, Báez *et al.* 2005) todos sin evidencia de deformación, son agrupados en la orogenia Achaliana (Sims *et al.* 1998). Estos granitoides están vinculados a mineralizaciones de uranio, wolframio y tierras raras.

En el área de estudio se presentan dos unidades graníticas, el granito Huaco y el plutón La Chinchilla (Fig. 1b), además de cuerpos intrusivos menores como aplitas, pegmatitas y aplopegmatitas. El granito Huaco tiene una superficie aflorante de  $620 \text{ km}^2$  y una forma subelipsoidal (Grosse *et al.* 2005a). Tiene una edad de cristalización de 350-358 Ma Carbonífero inferior (U-Pb en monacitas; Grosse *et al.* 2007).

El contacto entre el granito Huaco y el plutón La Chinchilla es neto e irregular, en la mayoría de los afloramientos es subvertical. Hacia el SE del plutón se observa subhorizontal donde el granito Huaco se encuentra en la parte superior del contacto, indicando que se trataría de la parte cuspidal de la cámara magmática del plutón La Chinchilla (Grosse *et al.* 2005b, Zarco Ambrosio *et al.* 2007, Fig. 2). En sectores el contacto es pegmatóide, además se observó desarrollo de **stockscheider**, con grandes cristales de feldespato potásico perpendiculares al contacto, también aparece en sectores una banda rica en biotita de grano fino de  $\pm 3 \text{ cm}$  de espesor intercalada entre ambas litologías (Zarco Ambrosio *et al.* 2007, Fig. 2).

El plutón La Chinchilla posee una edad de  $344,5 \pm 1,4$  Ma (U-Pb en monacitas; Grosse *et al.* 2007). Es un cuerpo granítico de forma subelipsoidal en planta cuyo eje mayor tiene rumbo ONO con una longitud aproximada de 2,5 km y eje menor de 1,5 km, resultando en un área de 3,75 km<sup>2</sup>.

## METODOLOGÍAS APLICADAS

### Autorradiografías $\alpha$

Esta técnica ha sido utilizada para determinar la distribución de los minerales radioactivos en la roca. El principio de este método se basa en la detección de partículas  $\alpha$  producidas a partir del decaimiento radioactivo natural del  $U^{238}$  y del  $Th^{232}$ . Para ello se utiliza papel radiográfico, el cual se dispone en contacto con secciones de roca pulidas y secciones delgadas. Las partículas  $\alpha$ , luego de un tiempo de exposición, producen impactos en el papel radiográfico, los cuales una vez revelados, permiten ubicar la fuente de radioactividad. Dada la abundancia de uranio químico presente en las muestras analizadas se asumió a este elemento como la principal fuente de radioactividad natural.

### Prospección radimétrica sistemática

Sobre el plutón La Chinchilla se tomaron datos puntuales de radimetría gamma total con una malla cuadrada de 25 x 25 m, abarcando una superficie de 245 Ha. En este relevamiento se emplearon scintilómetros del tipo SRAT SPP2. El tratamiento estadístico de los datos fue realizado con el módulo de análisis geoestadístico de ArcGis 9.3, el método de interpolación elegido fue el kriging considerado el mejor estimador, con un modelo de semivariograma esférico, siendo este el que generó la mejor respuesta de acuerdo a los datos geológicos. A partir del mismo se generó un modelo *raster* asignando a cada píxel un valor estimado de radioactividad natural.

### Análisis químicos

Se han efectuado en el laboratorio de química perteneciente al Departamento Re-

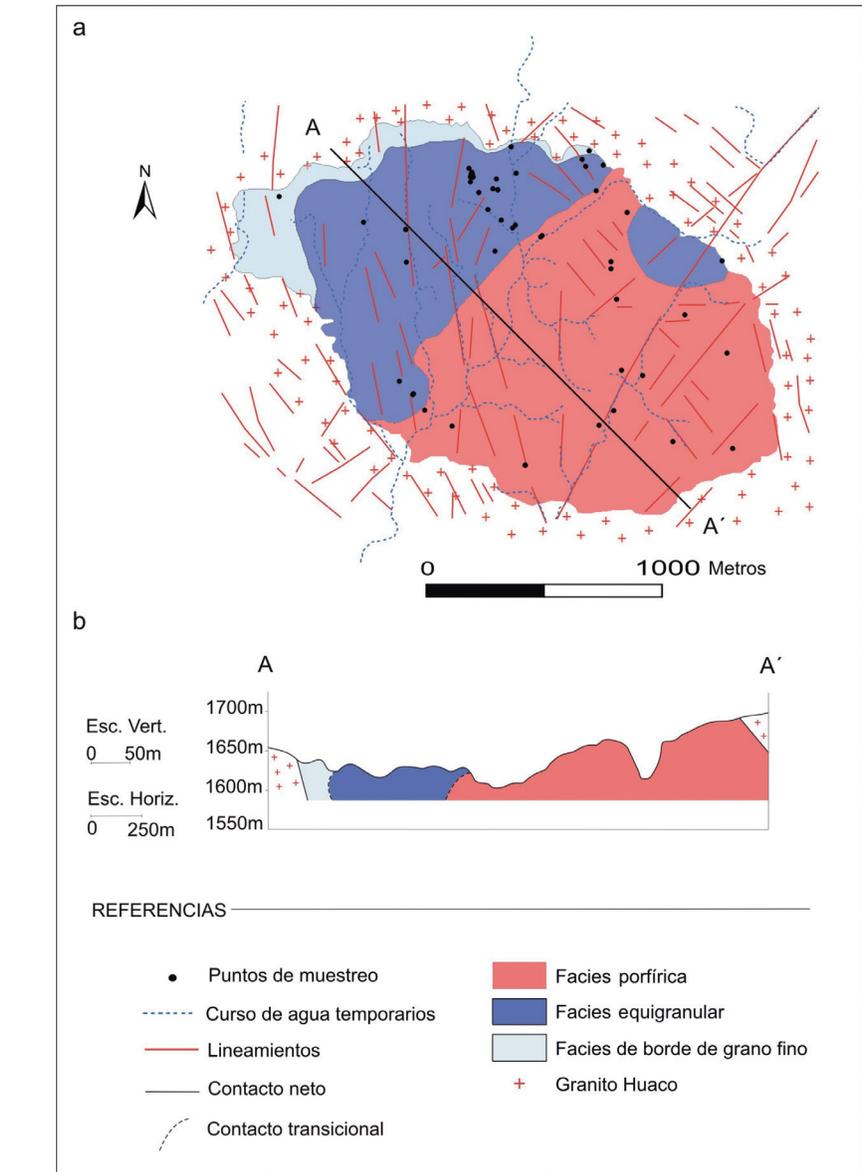


Figura 3: a) Mapa geológico mostrando las diferentes facies graníticas y contactos reconocidos. b) Perfil geológico A-A' del plutón La Chinchilla.

gional Cuyo de la Comisión Nacional de Energía Atómica, 24 análisis químicos llevando a cabo determinaciones de elementos mayoritarios, uranio total y elementos traza.

El  $SiO_2$  fue determinado por gravimetría. El  $P_2O_5$  y  $TiO_2$  por absorción molecular. Por su parte el uranio químico fue establecido mediante fluorescencia láser y/o absorción molecular, y el Th por el método ICP-OES. Por último Cu, Zn, Mn, Pb, Sr, Mo, V, Rb, Ca, Mg, Na, K, Al y Fe, se determinaron mediante el método de absorción atómica.

## CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y RADIMÉTRICA DEL PLUTÓN LA CHINCHILLA

### Geología de campo

A partir del mapeo detallado a escala 1:2.500 y teniendo en cuenta las características texturales, composición mineralógica y radioactividad gamma total se definieron tres facies graníticas. Los contactos entre estas facies son transicionales y constituyen una franja de escala métrica. La transición entre la facies porfírica y la equigranular es gradual donde se observa

una disminución paulatina de la cantidad de megacrystalos de feldespato potásico. Por su parte en la transición entre la facies equigranular y la de borde se observa una disminución gradual del tamaño de grano. (Figs. 3a y b) (Sánchez 2008).

En la facies porfírica o bien en la transición entre ésta y la facies equigranular es importante destacar la presencia de enclaves (Fig. 4a) con formas y características composicionales y texturales variadas (Sánchez 2008). Se encontraron enclaves biotíticos con aislados megacrystalos de plagioclasa ( $\pm 2$  cm). En la zona de transición entre ambas facies son más abundantes y variados, encontrándose tipos similares al descrito anteriormente, de hasta 1 metro de diámetro y otra variedad correspondiente a granitoides leucocráticos de grano fino a medio, de forma elipsoidal, con muscovita primaria.

Son frecuentes los diques de aplitas tardío-magmáticas (Fig. 4b) con bordes de reacción con el granito Huaco. Son abundantes en la facies equigranular las pegmatitas sin-magmáticas de formas irregulares con cuarzo, feldespato potásico, berilo, muscovita y escasa turmalina y miarolas compuestas por cuarzo y berilo. Estos diferenciados tardíos, presentes en la facies equigranular, evidencian la cercanía al techo de la cámara magmática (Zarco Ambrosio *et al.* 2007, Sánchez 2008).

El plutón La Chinchilla muestra un fuerte contraste de radioactividad con el granito Huaco teniendo un valor medio de 315 c/s contra 150 c/s respectivamente. Por su parte, la distribución de los valores de radioactividad dentro del plutón La Chinchilla presenta variaciones en relación a las diferentes facies (Fig. 5). Los parámetros estadísticos de los datos radiométricos para cada facies se resume en el cuadro 1.

**Petrografía de las facies**

En el diagrama QAP de clasificación modal (Streckeisen 1976) las muestras analizadas para las tres facies descritas en el plutón La Chinchilla, se encuentran dentro del campo de los monzogranitos (Fig. 6). *Facies porfírica*: es la de mayor extensión areal, aflora en el sector centro, sur y su-



Figura 4: a) Enclave biotítico de grano fino con aislados fenocristales de plagioclasa. b) Aplita tardío-magmática que intruye al granito Huaco. Obsérvese el contacto neto entre el granito Huaco y el plutón La Chinchilla.

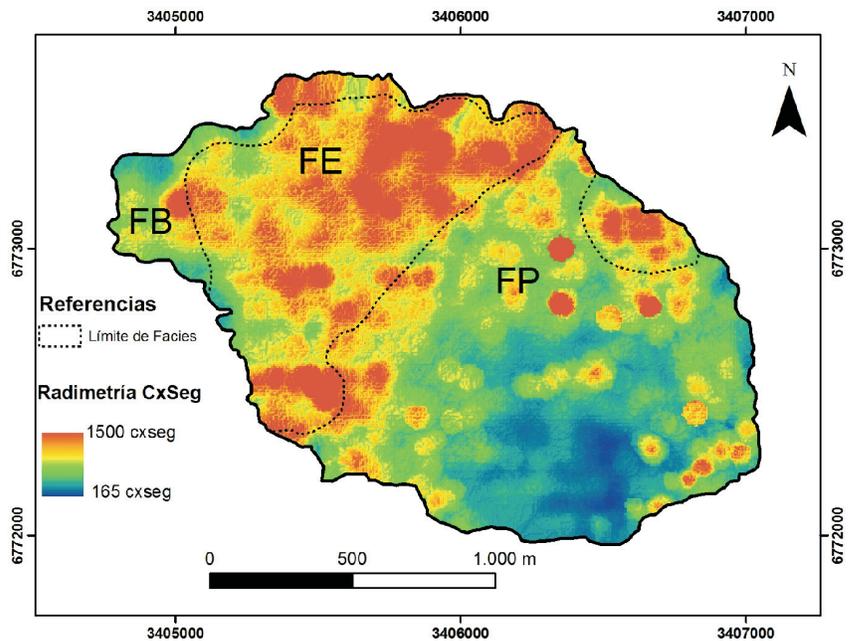
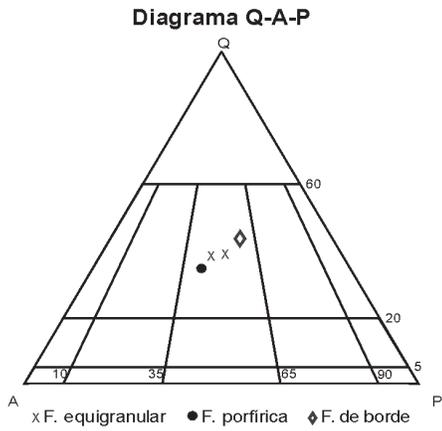


Figura 5: Raster del plutón La Chinchilla generado a partir de valores de radiometría gamma total.

CUADRO 1: Valores de radiometría gamma total (c/seg) tomados sobre el plutón La Chinchilla y representados por la media y su desviación estándar (s).

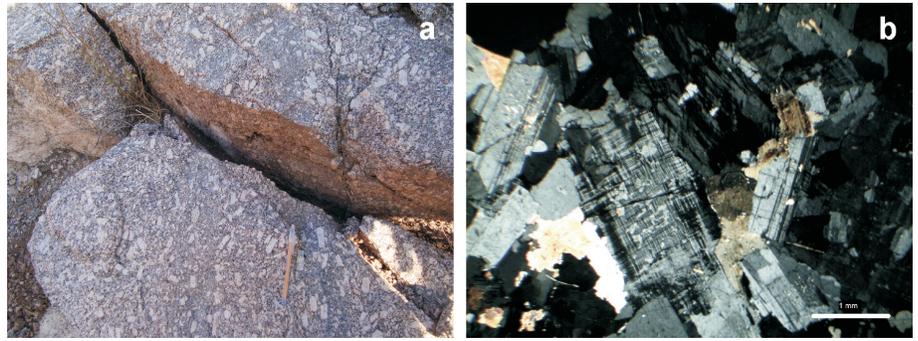
Facies	Total de mediciones (n)	Media (c/seg)	s (c/seg)
Porfírica	2958	315	215
Equigranular	2226	470	150
Borde de grano fino	287	360	150

(n) número total de mediciones.

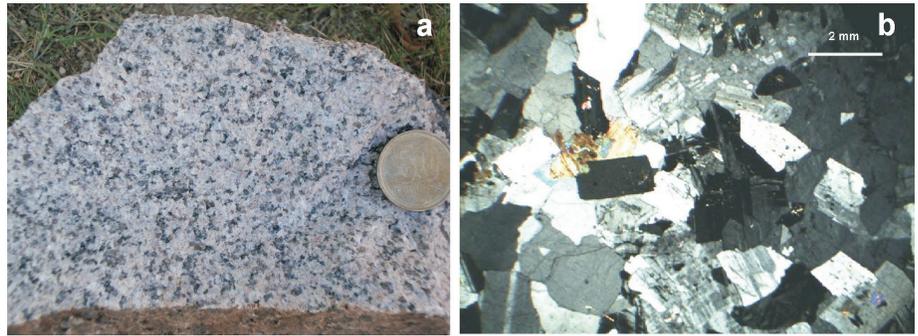


**Figura 6:** Diagrama de composición modal QAP (Streckeisen 1976).

deste del plutón y presenta dos variedades texturales (Figs. 3a y b). La más abundante es de color gris rosado, gris medio, con textura porfiroide constituida por megacristales de feldespato potásico ( $\pm 4$  cm), que en algunos sectores presentan textura rapakivi, inmersos en una base de grano grueso (4-6 mm) (Fig. 7a). La segunda variedad presenta megacristales de menor tamaño ( $\pm 2$  cm) inmersos en una base de grano fino (2-3 mm), se encuentra mejor desarrollada hacia el sudeste del plutón. Los minerales principales son cuarzo, microclino, plagioclasa y biotita, como minerales accesorios presenta muscovita, circón, fluorita y apatita mientras que los minerales secundarios son muscovita, sericita, caolinita, minerales opacos y óxidos. Como minerales esenciales presenta cuarzo (32 %), feldespato potásico (36 %), plagioclasa (26 %) y biotita + muscovita (5-6 %). Microscópicamente la textura es holocristalina porfiroide con base inequigranular hipidiomórfica seriada (Fig. 7b). El cuarzo se presenta en tres variedades texturales. El más abundante tiene tamaños variados (1,5-4 mm), es anhedral con bordes irregulares y presenta leve extinción ondulosa. Incluye plagioclasa, biotita, muscovita primaria, circón y apatita. El microclino es abundante en cristales subhedrales a anhedrales de grano grueso a medio (hasta 10 mm o más) y maclado en enrejado. Presenta textura pertítica, de tipo parche y en menor medida en cordones y simplectíticas. Tiene inclusiones de plagioclasa subhedral,



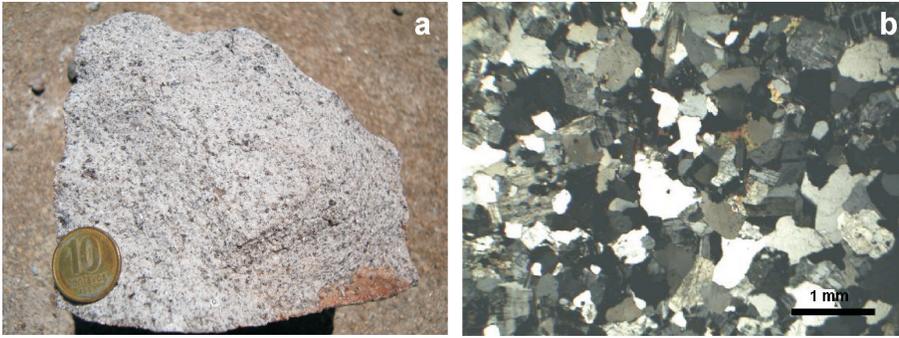
**Figura 7:** a) Afloramiento de la facies porfírica con base de grano medio a grueso. b) Microfotografía donde se reconoce la textura porfiroide.



**Figura 8:** a) Muestra de mano de la facies equigranular. b) Microfotografía con detalle de la textura granular hipidiomórfica.

fluorita, cuarzo redondeado y muscovita. La plagioclasa se encuentra ya sea en cristales pequeños subhedrales incluidos en cuarzo y microclino o bien en cristales de tamaños mayores (0,5-3 mm), subhedrales, con maclado tipo Albita. Tiene inclusiones de plagioclasa, cuarzo, fluorita y circón. La biotita tiene tamaño menor a 3,5 mm. Incluye circón, opacos y apatita, los dos primeros con generación de halos pleocroicos. Los minerales accesorios son fluorita incolora, con tintes violáceos. Es de pequeño tamaño, con tendencia euhedral y en menor medida anhedral. El circón es abundante como inclusión en biotita y plagioclasa, con halos pleocroicos, hábito prismático corto y tamaños variados. La muscovita primaria es escasa, de pequeño tamaño, y se halla principalmente como inclusión dentro del cuarzo y del microclino. La apatita es escasa y se encuentra incluida en cuarzo y plagioclasa. El principal mineral secundario es la muscovita. Reemplaza parcial o totalmente a biotita, también a plagioclasa y en menor medida al microclino. El feldespato alcalino y la plagioclasa se en-

cuentran parcialmente reemplazados por sericita y caolinita. Se observa una incipiente albitización del microclino. **Facies equigranular:** Le sigue en importancia areal a la facies porfírica y aflora en el sector noroeste del cuerpo (Figs. 3a y b). Es un granito de color mayormente rosado y en sectores por fenómenos de alteración se torna gris claro. Los minerales principales de esta facies son: cuarzo (36-38 %), feldespato potásico (28-33 %), plagioclasa (28-30 %) y biotita + muscovita (5-6 %). Como accesorios presenta fluorita, berilo, circón, monacita y minerales opacos mientras que los minerales secundarios observados son muscovita, sericita, caolinita, uranofano, minerales opacos y óxidos. La textura es holocristalina granular hipidiomórfica (Figs. 8a y b). Se diferencian tres variedades texturales de cuarzo similares a las descritas para la facies porfírica. Presentan inclusiones de plagioclasa, biotita, escasa apatita y monacita. El microclino tiene tamaños variados desde pequeños cristales intersticiales hasta cristales de grano grueso ( $> 4$  mm) con forma subhedral a anhedral,



**Figura 9:** a) Muestra de mano de la facies de borde de grano fino. b) Microfotografía mostrando la textura inequigranular seriada alotriomórfica.

macla en enrejado, a veces levemente deformada. Los cristales de mayor tamaño son periticos (tipo parche). Se observan dos generaciones de plagioclasa de características similares a la facies porfírica, siempre correspondiente al extremo albitico. La biotita es escasa, presenta color pardo claro, pardo pálido, con leve pleocroismo y tamaños variables (hasta 3 mm). Poseen inclusiones de circón y monacita los cuales generan halos pleocroicos, apatita y fluorita.

El mineral accesorio más abundante es la fluorita. Es incolora, con manchas violáceas y puede alcanzar los 2 mm. En general es anhedral con bordes irregulares, pero puede tener tendencia euhedral. Se encuentra disseminada en la matriz o bien incluida en biotita, plagioclasa y microclino. Poseen diminutas inclusiones de circón, opacos y minerales secundarios de uranio. El berilo se presenta como pequeños cristales de color verde disseminados. El circón es escaso, se halla incluido en biotita, plagioclasa y fluorita con halos pleocroicos. Además se observan minerales opacos incluidos en fluorita con halos radioactivos y bordes reemplazados a uranofano. La monacita tiene formas euhedrales, y se halla como inclusión en la biotita generando halos pleocroicos, como así también dentro de la plagioclasa, cuarzo y microclino. La apatita es escasa, se presenta como inclusión en biotita y cuarzo. El rutilo capilar es muy escaso y se encuentra incluido en cuarzo. La muscovita, al igual que en la facies porfírica, es el mineral secundario mejor desarrollado y se asocia texturalmente a cuarzo secundario. Además se observa sericita y

abundante caolinita reemplazando a ambos feldespatos. El microclino se encuentra parcialmente reemplazado por albita. Como mineral secundario de uranio se observaron cristales aciculares muy finos de uranofano ya sea rellenando microfisuras, asociado a opacos en contactos intergranulares o incluido en fluorita.

*Facies de borde de grano fino:* De escasa representación areal, aflora en el sector noroeste del plutón, en las cercanías del contacto con el granito Huaco, limitando por el oeste a la facies equigranular (Figs. 3a y b). Exhibe color gris claro, textura holocristalina inequigranular seriada alotriomórfica con aislados megacristales de feldespato potásico en una base de grano muy fino a fino (< 0,1 mm hasta 1 mm). Los minerales esenciales son cuarzo (44 %), plagioclasa (33 %) y feldespato potásico (23 %). Como minerales accesorios presenta muscovita, biotita, minerales opacos, circón, apatita y escasa fluorita y como minerales secundarios muscovita, sericita, caolinita, minerales opacos y óxidos (Figs. 9a y b).

La variedad de cuarzo más abundante es anhedral, con tamaño de grano medio a fino. El microclino se presenta con macla en enrejado, tamaño de grano entre 0,5 y 2 mm, anhedral, con inclusiones de cuarzo y biotita. La plagioclasa es subhedral, presenta tamaño de grano variable (0,3 a 1,5 mm), maclado polisintético y Carlsbad subordinado, es inclusora de biotita, fluorita y cuarzo. Entre los minerales accesorios se encuentra la biotita. Ésta es escasa, subhedral a anhedral con bordes corroídos en contacto con cuarzo. Se encuentra desferrizada con óxidos secunda-

rios en planos de clivaje, a veces asociados con muscovita y cuarzo secundarios. Otro mineral accesorio importante es la fluorita que se presenta en dos variedades texturales. La más abundante es incolora, tiene tamaño de grano menor a 0,5 mm, es euhedral y se encuentra incluida en plagioclasa y muscovita primaria. La fluorita púrpura es escasa, menor de 0,3 mm, anhedral y se encuentra asociada a minerales opacos. Por último, la muscovita tiene grano fino, es anhedral a subhedral y se asocia a cuarzo y microclino. Como minerales secundarios se observa muscovita reemplazando a biotita y en cristales fibrosos radiales, con escaso cuarzo de grano fino. El uranofano está asociado a fluorita púrpura; presenta color amarillento a pardo, hábito fibroso radial o terrroso. También se encuentra como inclusión dentro del cuarzo secundario.

### Minerales de uranio

Se determinaron mediante estudios petrográficos y autorradiografías  $\alpha$  de secciones delgadas minerales secundarios o de alteración portadores de uranio. Además las características petrográficas y químicas del plutón indican la probable presencia de uraninita como fase mineral primaria.

Es común observar, en especial en la facies equigranular, estructuras de forma circular rodeadas por un mosaico de minerales de origen secundario como sericita, muscovita, minerales opacos y uranofano. Posiblemente estos espacios fueron ocupados por cristales de uraninita que produjeron un disturbio en el retículo cristalino del mineral hospedante y luego fueron lixiviadas (Figs. 10a y b).

En secciones delgadas de testigos de perforación se describieron diminutos cristales opacos de formas circulares y cuadrangulares con bordes redondeados y halos pleocroicos incluidos en fluorita, biotita y plagioclasa, o bien en contactos intergranulares. Posiblemente se trate de uraninita que ha sido preservada de los procesos de meteorización.

El mineral de uranio más abundante es uranofano que se presenta como diminutos cristales de color amarillento a pardo,

de hábito acicular, depositados en microfracturas y espacios intergranulares.

Las autorradiografías  $\alpha$  realizadas muestran que la mayor cantidad de impactos provienen de la biotita, fluorita y óxidos secundarios de Fe y probablemente de Mn (Fig. 10c), depositados entre las láminas de biotita, contactos intergranulares y microfracturas. Se observa una relación directa entre la cantidad de fluorita y óxidos secundarios y los valores de uranio químico y radimétrico.

Los análisis de química mineral de la fluorita (Grosse 2007) muestran que este mineral accesorio es significativo en cuanto a su capacidad como receptora de REE y otros elementos incompatibles como U e Y.

Es importante destacar la presencia de mineral secundario de uranio proveniente de un óxido de U - Nb y Ta, perteneciente a la serie de la columbita-tantalita o al grupo del pirocloro (betafita) de posible origen pegmatítico, siendo el primer hallazgo de esta especie para la sierra de Velasco (Morello 2009). Finalmente debemos agregar los minerales accesorios portadores de uranio y/o torio como monacita y cirkón.

## FACIES GRANÍTICAS: CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA

### Geoquímica

El plutón La Chinchilla es un granito rico en sílice, álcalis y pobre en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , MgO y CaO (Grosse *et al.* 2005). En este trabajo se comparan geoquímicamente las distintas facies graníticas mapeadas a fin de investigar la relación entre la evolución magmática y el contenido de uranio de las mismas. Del total de 24 muestras analizadas 18 corresponden a la facies equigranular, 4 a la facies porfírica y 2 a la facies de borde de grano fino (Cuadro 2). La sílice presenta valores semejantes para las tres facies ( $\text{SiO}_2 = 74,1-76,4\%$ ; cuadro 1). La relación  $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$  es menor en la facies equigranular (1,50), con valores de 1,64 y 1,68 para la facies porfírica y la facies de borde respectivamente, lo que indica un leve enriquecimiento en álcalis para la facies equi-



**Figura 10:** a y b) Microfotografías de estructuras circulares relicticas posiblemente producidas por uraninita. Se encuentran incluidas en cuarzo y plagioclasa rodeadas de halos pleocroicos y minerales de alteración (sericita, opacos y uranofano). Nícoles cruzados. La barra negra equivale a 0,5 mm. c) Impactos de partículas  $\alpha$  en papel radiográfico de una sección delgada e identificación con microscopio petrográfico de los minerales portadores de elementos radioactivos. La primera fotografía de izquierda a derecha corresponde a una autorradiografía  $\alpha$ , junto a ella su correspondiente corte delgado, indicando en círculos verdes, las agrupaciones de impactos. Las dos figuras de la derecha corresponden a microfotografías mostrando en detalle el origen de los impactos.

granular. Las tres facies se encuentran empobrecidas en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , MgO y CaO teniendo la facies equigranular y la facies porfírica valores levemente superiores a la facies de borde (Cuadro 2). Los valores de  $\text{P}_2\text{O}_5$  son muy bajos en la facies equigranular (0,09) y ligeramente superiores en la facies porfírica y en la de borde (0,18 y 0,13 respectivamente). El índice de saturación de alúmina (Shand 1943) exhibe

para las distintas facies valores proyectados tanto en el campo metaluminoso como en el peraluminoso ( $\text{ISA} = 0,88-1,17$ ) mostrando la facies equigranular una leve tendencia al campo peralcalino (Fig. 11). En el diagrama de clasificación geoquímica TAS (Le Maitre 2002, Fig. 12) las muestras analizadas para las tres facies caen en el campo de los sienogranitos, difiriendo con la clasificación mineraló-

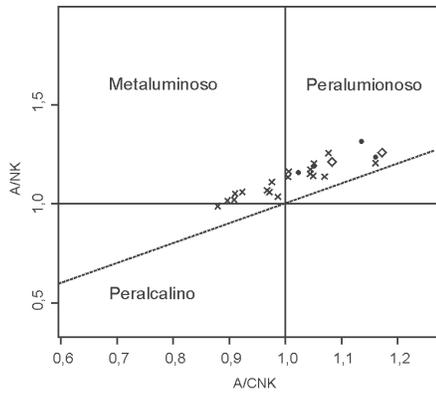


Figura 11: Diagrama de índice de saturación de alúmina (Shand 1943). Las referencias son las mismas de la figura 6.

gica. Por otro lado todas las muestras se proyectan dentro del campo subalcalino según la división propuesta por Irvin y Baragar (1971).

Con respecto a los valores de elementos traza, si bien el U y el Th se encuentran en proporciones elevadas en las tres facies, es la facies equigranular la que presenta mayor contenido de uranio y torio químico (119 ppmU y 32 ppm Th promedio), mientras la facies porfírica y la de borde alcanzan valores medios de 28 ppmU; 20 ppmTh y 71 ppm U; 15 ppmTh, respectivamente. Se destaca el amplio desvío estándar que presentan los valores de uranio químico en todas las facies analizadas. Las relación Th/U promedio para la facies porfírica es de 1,6 para la equigranular es de 0,38 y para la de borde 0,29 (Fig. 13). El Mn, Rb, Sn y Sb son otros elementos traza que se encuentran en elevadas proporciones en todas las facies estudiadas, por el contrario, presentan un marcado empobrecimiento en Sr y Ba en relación al Rb (Cuadro 2; Fig. 14).

Se debe destacar que los análisis de composición de las micas (Grosse 2007, Morello 2009) muestran a la variedad zinnwaldita como especie micácea dominante (mica rica en Li y Mn).

DISCUSIÓN

La fluorita púrpura sería uno de los principales minerales hospedantes de la uraninita. Esta adquiere su color debido al impacto que este mineral radioactivo le produce en su estructura cristalina (Pi et

CUADRO2: Análisis químicos de seis muestras (dos de cada facies granítica) y el valor promedio.

Plutón La Chinchilla	Facies equigranular			Facies porfírica			F. de borde de grano fino		
	Muestra 5248	Muestra 5211	Media (n=18)	Muestra 4730-b	Muestra 4921	Media (n=4)	Muestra 5195	Muestra 5218	Media (n=2)
SiO <sub>2</sub>	74,5	75,1	74,91	74,3	74,1	74,40	76	75,1	75,55
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13	13,7	13,19	13,7	14	13,98	14	14	14
Fe total (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1,7	1,5	1,69	1,6	1,45	1,54	1,3	1,2	1,25
TiO <sub>2</sub>	0,05	0,11	0,08	0,1	0,11	0,12	0,07	0,08	0,08
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	<0,03	0,09	0,09	0,19	0,2	0,18	0,11	0,14	0,13
CaO	1,05	0,9	0,76	0,85	0,85	0,75	0,45	0,75	0,6
MgO	0,07	0,04	0,06	0,1	0,07	0,08	0,05	0,04	0,05
Na <sub>2</sub> O	4,5	4,1	4,31	4,3	4	4,00	4	4,2	4,1
K <sub>2</sub> O	4,6	4,3	4,47	4,4	4,8	4,50	4,2	4,3	4,25
MnO	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,03	0,03	0,03
LOI	0,36	0,04	0,26	0,26	0,31	0,265	0,06	0,05	0,055
U	160	40	119	16	80	28	42	100	71
Cu	<10	<10	35,00	<10	<10	<10	<10	<10	<10
Zn	40	40	39,72	40	30	37,50	30	20	25
Mn	390	420	401,11	360	380	397,50	270	210	240
Pb	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50
Sr	<10	10	11,43	20	10	16,25	10	15	12,5
Mo	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
V	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20
Rb	370	300	330,56	280	290	297,50	260	220	240
Th	40	30	31,67	20	20	20,00	20	10	15
Sn	70	70	61,67	40	50	50,00	30	30	30
Ba	20	20	38,89	70	50	70,00	60	50	55
Sb	20	140	60,00	20	140	92,50	90	200	145
W	20	30	24,71	30	30	40,00	10	20	15

Elementos mayores y pérdida por calcinación en g/100g; elementos traza en ppm.

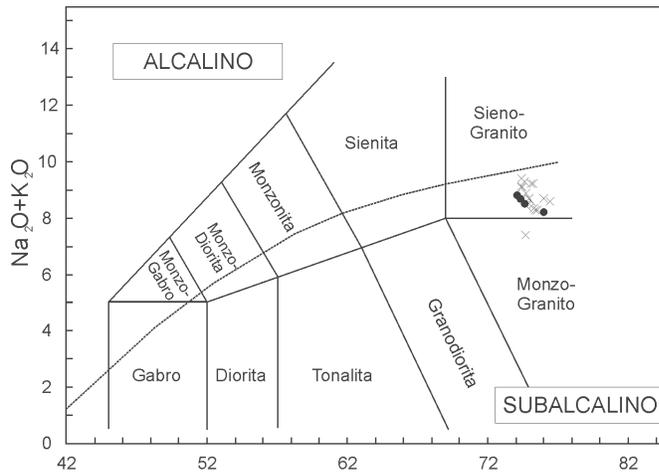
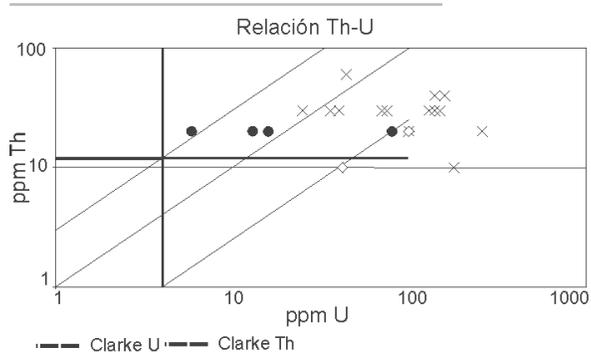


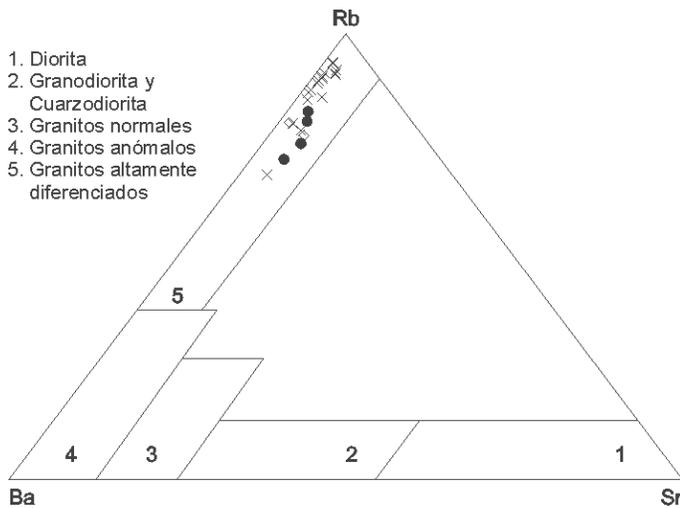
Figura 12: Diagrama TAS para rocas plutónicas (Le Maitre 2002) con las divisiones de series alcalinas y subalcalinas propuestas por Irvine y Baragar (1971) (línea discontinua). Las referencias son las mismas de la figura 6.

al. 2007). Cuando el fluido del cual precipita la fluorita contiene decenas de ppm de uranio, como es el caso del plutón La Chinchilla, estos no pueden ser acomodados en la estructura de la fluorita cristalizando como inclusiones en microfracturas y caras de crecimiento de la misma. En los granitos con relaciones Th/U in-

termedias (entre 1 y 4), el uranio puede encontrarse hospedado en minerales accesorios como uraninita y monacita. Para relaciones Th/U bajas ( $\leq 1$ ), como es el caso de la facies equigranular y la de grano fino, la proporción de uranio atribuible a uraninita incrementa hasta un 80% (Friedrich et al. 1989). Para confirmar la



**Figura 13:** Diagrama de relación Th vs. U. Las referencias son las mismas de la figura 6.



**Figura 14:** Diagrama triangular Ba-Rb-Sr (El Bouseily y El Sokkary 1975). Las referencias son las mismas de la figura 6.

existencia de uraninita se deberán realizar análisis por difracción de rayos X y microscopía electrónica de barrido.

La prospección radimétrica gamma muestra claramente una mayor concentración de los valores más elevados vinculados a la facies equigranular (Cuadro 1; Fig. 5), los cuales tienen una buena correspondencia con los mayores tenores de uranio químico.

La diferencia observada entre la clasificación mineralógica y la clasificación geoquímica (diagrama TAS) puede deberse a un enriquecimiento tardío en álcalis mejor evidenciado en la facies equigranular, representado por una albitización incipiente de feldespato y plagioclasa.

De acuerdo con el diagrama de índice de saturación de alúmina (Shand 1943) las muestras analizadas evidencian un carácter peraluminoso a metaluminoso con una tendencia hacia el campo peralcalino (Fig. 11).

La facies equigranular es la que muestra un grado de evolución mayor represen-

tando magmas altamente fraccionados como se observa en el diagrama Ba-Rb-Sr (El Bouseily y El Sokkary 1975, Fig. 14) y en la relación  $Al_2O_3/(Na_2O+K_2O)$ . Esto refleja una mayor evolución del magma vinculada a un enriquecimiento en álcalis de los feldespatos.

Por otro lado el mayor enriquecimiento en elementos incompatibles como U, Rb, Sn (Cuadro 2), F, Li y Be (Grosse *et al.* 2009; Morello 2009) respecto a las otras facies, sugieren un grado de evolución y diferenciación mayor. La relación Th/U es otro indicador del mayor fraccionamiento de la facies equigranular (Fig. 13). Se debe aclarar que si bien la relación Th/U es menor en la facies de borde, el tenor químico de uranio siempre es mayor en la facies equigranular.

**CONCLUSIONES**

El plutón La Chinchilla se encuentra conformado por tres facies dominantes, las cuales modalmente corresponden a mon-

zogranitos. La facies porfírica aflora en el sector centro, sur y sudeste del cuerpo y abarca la mayor extensión superficial, la facies equigranular, ubicada en el sector noroeste del plutón y por último la facies de borde de grano fino, de escasa representación areal, desarrollada entre el límite oeste de la facies equigranular y el granito Huaco.

La elevada concentración de uranio químico y relaciones Th/U promedio <1 sugieren la presencia de uraninita como principal mineral portador de este elemento. Si bien no se han realizado aún determinaciones por difracción de rayos X, los estudios petrográficos y autorradiografías  $\alpha$  indican su probable presencia como pequeñas inclusiones en microfisuras y límites de granos de fluorita púrpura, en biotita y plagioclasa. Además la existencia de estructuras relícticas circulares con halos pleocroicos situadas dentro de plagioclasa y espacios intergranulares podrían representar antiguos cristales de uraninita lixiviados por procesos de alteración supergénica.

Se identificó uranofano depositado en microfracturas y espacios intergranulares y oxi-hidróxidos de hierro y manganeso provenientes de la muscovitización de la biotita (variedad zinnwaldita) relacionados con elevados contenidos de uranio químico.

Si bien las tres facies estudiadas presentan valores elevados de uranio químico, es la facies equigranular la que alcanza un mayor grado de diferenciación magmática y enriquecimiento en uranio. Esta distribución heterogénea del uranio en las distintas facies permite que la radimetría gamma de superficie pueda ser aplicada como herramienta complementaria para el mapeo de facies graníticas.

Por último, debemos mencionar que a partir de un granito fértil como lo es el plutón La Chinchilla es necesaria la coexistencia de varios factores geológicos posteriores para poder generar un yacimiento de uranio económicamente explotable, como pueden ser la reestructuración magmática y/o hidrotermalismo capaces de concentrar el uranio que se encuentra disperso en la masa granítica.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Comisión Nacional de Energía Atómica, Gerencia de Exploración de Materias Primas por permitirnos presentar esta contribución. Al geólogo Ricardo Blasón (CNEA-Regional Centro) por sus valiosas contribuciones y desinteresada participación. Al Dr. Sergio Gorustovich (CNEA-Regional Noroeste) y al Dr. Leandro D'Elia (CIG-CONICET) por la lectura crítica y revisión del manuscrito. Finalmente a los técnicos mineros Héctor Gelati y Pablo Ferreyra (CNEA-Regional Centro) por sus aportes tanto en los trabajos de campo como de gabinete. Este trabajo forma parte del Simposio de Uranio realizado en el marco del 18° Congreso Geológico Argentino.

## TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Báez, M.A., Rossi de Toselli, J. y Sardi, F. 2002. Consideraciones preliminares sobre los granitoides del norte de la sierra de Velasco, La Rioja, Argentina. 15° Congreso Geológico Argentino, Actas 2: 69-74, El Calafate.
- Báez, M.A. y Basei, M. 2005. El plutón San Blas, magmatismo postdeformacional carbonífero en la Sierra de Velasco, La Rioja, Argentina. En Aceñolaza, F.G., Hünicken, M., Toselli, A.J. y Aceñolaza, G.F. (eds). Simposio Bodenbender, Instituto Superior de Correlación Geológica, Serie Correlación Geológica 19: 239-246, Tucumán.
- Belcastro, H. 1974. Relevamiento Aeroradimétrico detallado y regular de la Sierra de Velasco, provincia de La Rioja. Informe interno, Comisión Nacional de Energía Atómica, (inédita), 7 p., Córdoba.
- Debon, F. y Le Fort, P. 1983. A chemical-mineralogical classification of common plutonic rocks and associations. Transactions of the Royal Society of Edimburg, Earth Sciences 73: 135-149.
- El Bouseily, A.M. y El Sokkary, A.A. 1975. The relationship between Rb, Ba and Sr in granitic rocks. Chemical Geology 16: 207-219.
- Friedrich, M.H. y Cuney, M. 1989. Uranium enrichment processes in peraluminous magmatism. En Uranium deposits in magmatic and metamorphic rocks, Internacional Atomic Energy Agency: 11-35, Vienna.
- Grosse, P. y Sardi, F.G. 2005a. Geología de los granitos Huaco y Sanagasta, sector centro-oriental de la Sierra de Velasco, La Rioja. En Aceñolaza, F.G., Aceñolaza, G., Hünicken M., Rossi, J.N. y Toselli, A.J. (eds.) Simposio Bodenbender, Instituto Superior de Correlación Geológica, Serie Correlación Geológica 19: 221-238, Tucumán.
- Grosse, P., Larrovere, M., De La Rosa, J. y Castro, A. 2005b. Petrología y origen del Stock La Chinchilla, Sierra de Velasco, La Rioja (Argentina). 16° Congreso Geológico Argentino, Actas 3: 447-553, La Plata.
- Grosse, P. 2007. Los granitos porfíricos y orbiculares del sector centro-oriental de la Sierra de Velasco: génesis y significación regional. Tesis doctoral, Universidad Nacional de Córdoba, (inédita), 285 p., Córdoba.
- Grosse, P., Söllner, F., Báez, M., Toselli, A., Rossi, J. y De La Rosa, J.D. 2009. Lower Carboniferous post-orogenic granites in central-eastern Sierra de Velasco, Sierras Pampeanas, Argentina: U-Pb monazite geochronology, geochemistry and Sr-Nd isotopes. International Journal of Earth Science 98: 1001-1025.
- Irvine, T.N. y Baragar, W.R. 1971. A guide to chemical classification of the common volcanic rocks. Canadian Journal of Earth Sciences 8: 523-548.
- Le Maitre, R.W. 2002. Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms: Recommendations of International Union of Geological Sciences Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks. Cambridge University Press, 236 p., Cambridge.
- Morello, O. 2009. Informe mineralógico complementario - Cateo El Gallo. Informe interno, Comisión Nacional de Energía Atómica, (inédito), 1 p., Buenos Aires.
- Pi, T., Solé, J., Golzarri, J.I., Rickards, J. y Espinosa, G. 2007. Autoradiography of geological fluorite sample for determination of uranium and thorium using nuclear track methodology. Revista Mexicana de Física 53: 57-60.
- Peccerillo, A. y Taylor, S. 1976. Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. Contribution to Mineralogy and Petrology 58: 63-81.
- Rapela, C.W., Pankhurst, R.J., Dahlquist, J. y Fanning, C.M. 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. 2° South American Symposium on Isotope Geology, Actas: 264-267, Carlos Paz.
- Sánchez, D.L. 2008. Geología del Stock La Chinchilla, Sierra de Velasco, Provincia de La Rioja. Informe interno, Comisión Nacional de Energía Atómica, (inédito), 28 p., Córdoba.
- Shand, S.J. 1943. Eruptive rocks. Their Genesis, Composition, Classification, and Their Relations to Ore-deposits with a Chapter on Meteorite. John Wiley and Sons, 444 p., New York.
- 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. The Proto-Andean Margin of Gondwana, Geological Society of London, Special Publication 142: 259-281, London.
- Streckeisen, A. 1976. To each plutonic rock its proper name. Herat Science Reviews 12: 1-33.
- Zarco Ambrosio, J.J., Álvarez, J.O. y Sánchez, D.L. 2007. Informe Geológico de avance 1° semestre 2007 Cateo "El Gallo", Sierra de Velasco, Provincia de La Rioja. Informe interno, Comisión Nacional de Energía Atómica, (inédito), 18 p., Córdoba.

Recibido: 14 de febrero, 2013

Aceptado: 14 de mayo, 2013