

CONTROL ESTRUCTURAL SOBRE EL PLUTÓN LOS RATONES Y LA MINERALIZACIÓN DE URANIO EN LA SIERRA DE FIAMBALÁ, SIERRAS PAMPEANAS, CATAMARCA

Fernando HONGN¹, Luis FERREIRA², Orquídea MORELLO³, Nora RUBINSTEIN³, Alicia KIRSCHBAUM¹, Franco GUIDI² y Jorge ANESA²

¹ IBIGEO (Conicet-Universidad Nacional de Salta), Salta. Email: fhongn@conicet.gov.ar, alikir2003@yahoo.com.ar

² Comisión Nacional de Energía Atómica, Salta. Email: cneasalta@arnetbiz.com.ar, morello@cnea.gov.ar

³ CONICET-Universidad de Buenos Aires, Departamento de Ciencias Geológicas, Buenos Aires. Email: nora@gl.fcen.uba.ar

RESUMEN

El Granito Los Ratones, de edad carbonífera, está compuesto por dos facies principales: porfírica y equigranular. La mineralización de uranio alojada en la caja metamórfica sobre el borde NO del plutón se interpreta asociada a un *greisen* abierto rico en flúor vinculado con las facies equigranular. La cartografía detallada de la roca de caja del plutón, de parte de los bordes del intrusivo y de las manifestaciones uraníferas muestra un marcado control estructural sobre el emplazamiento del plutón, particularmente de la facies porfírica, y sobre la circulación de los fluidos mineralizantes. Cuatro juegos de fracturas participan de este control. Los dos principales de rumbo N y NE coinciden nítidamente con los bordes oeste y noroeste de la facies porfírica y con las expresiones más notables de la mineralización de uranio. El tercer juego corresponde a fracturas de rumbo E-O que son secundarias respecto a las anteriores considerando su frecuencia y longitud, al igual que el cuarto de rumbo NO. Los buzamientos de los juegos de fracturas N y NE son próximos a la vertical, orientación corroborada por estudios geofísicos en la zona dominada por las fracturas NE. Además de los rasgos mencionados, los diques básicos y ácidos que acompañan al plutón siguen preferentemente estas orientaciones. Las estructuras que controlan el magmatismo y la mineralización estarían vinculadas con un sistema de fallas meridianas con movimiento horizontal derecho principal y normal subordinado que parcialmente reactivaron heterogeneidades del basamento metamórfico, básicamente la foliación principal. Flexiones y quiebres a lo largo de estas estructuras generaron zonas dilatantes en las que se concentraron el magmatismo y la mineralización.

Palabras clave: *Control estructural, fracturas, granito, uranio, Fiambalá, Sierras Pampeanas.*

ABSTRACT: *Structural control on the Los Ratones pluton and the uranium mineralization at the Fiambalá range, Sierras Pampeanas, Catamarca.*

The Carboniferous Los Ratones pluton is composed by two main facies: equigranular and porphyric. The uranium mineralization hosted by the metamorphic rock on the NW border of the pluton is related to a fluor-rich *greisen* related to the equigranular facies. The detailed mapping of the pluton host rock and the uranium mineralization shows a well-defined structural control on both the granite emplacement, particularly on the porphyric facies, and on the migration of the mineralized fluids. Four sets of fractures participate on this control. The two main with N and NE trends coincide clearly with the west and northwest border of the pluton as well as with the high-grade uranium manifestations. The third and fourth ones respectively corresponds to E-W and NW striking fractures, which are less developed in relation to the main fractures considering their frequency and size. Fractures of the four sets are high dipping close to vertical, attitude corroborated by geophysical studies in the area where the NE fractures are the best developed. In addition to the mentioned features, granite-related acidic and basic dikes follow mainly these orientations. The fracture sets seem to be related to a high-east dipping meridian fault system with right horizontal main movement component and subordinate normal displacement. These faults partially reactivated heterogeneities of the metamorphic rocks, mainly the dominant foliation. Changes on the strike of these fractures formed dilatant zones where magmatism and related mineralization were concentrated.

Keywords: *Structural control, fractures, granite, uranium, Fiambalá, Sierras Pampeanas.*

INTRODUCCIÓN

El proyecto Las Termas se encuentra localizado sobre el flanco occidental de la sierra de Fiambalá (Fig. 1), la cual forma

parte de las Sierras Pampeanas Septentrionales (Caminos 1979). La mineralización de uranio en la sierra de Fiambalá constituye uno de los proyectos de exploración con mayor potencial que des-

arrolla la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA).

La sierra de Fiambalá contiene manifestaciones de Pb-Zn, W y Sn que han sido motivo de explotaciones menores princi-

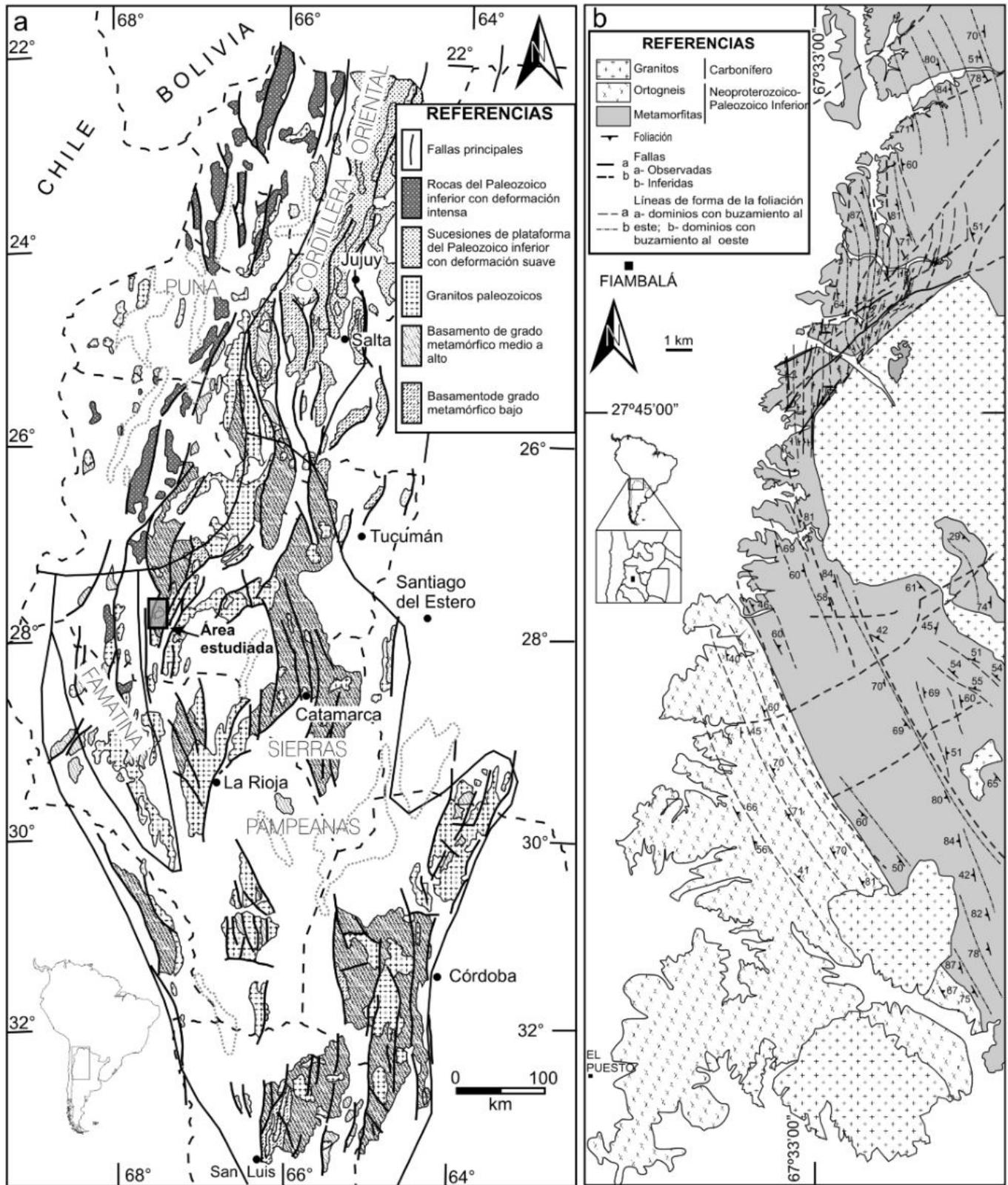


Figura 1: a) Mapa regional del basamento de las Sierras Pampeanas con ubicación de la sierra de Fiambalá; b) mapa simplificado del tramo centro-sur del faldeo occidental de la sierra de Fiambalá (Modificado de González Bonorino 1972, Page *et al.* 1992 y Grissom *et al.* 1998). Los datos y líneas de forma de foliación según información de Grissom *et al.* (1998).

palmente durante la parte media del siglo XX. Los trabajos de Tezón y Fernández Lima (véase revisión de estos antecedentes en González Bonorino 1972) y Arrospide (1985) presentan las primeras síntesis sobre estas manifestaciones. Los programas de geofísica aérea de la CNEA identificaron anomalías en la sierra de Fiambalá, las que fueron posteriormente corroboradas por los equipos de exploración (Burgos y Maidana 1989, Guidi *et al.* 1990, Burgos *et al.* 1992). Las relaciones entre las diferentes mineralizaciones y los intrusivos epizonales a través de sistemas de *greisen* han sido postuladas frecuentemente en la bibliografía (Arrospide 1985, Gorustovich y Guidi 1998, Burgos 1999, Rubinstein *et al.* 2001, Ferreira *et al.* 2008a). Las manifestaciones minerales son mayoritariamente vetiformes con un marcado control estructural, lo que ha motivado investigaciones sobre este control con escalas y nivel de detalle variables, tanto para los *greisen* con Sn y W (Ávila 1982, Arrospide 1985, Baalman 1998) como además para las manifestaciones uraníferas y los plutones (Burgos 1996, Japas *et al.* 2004), que advierten sobre juegos principales de fracturas a distintas escalas, las que de forma general siguen rumbos N, NO, NE y E-O. Esta contribución presenta los primeros resultados del análisis estructural que se lleva a cabo en la zona del prospecto uranífero Las Termas para ajustar las relaciones entre la estructura y la mineralización de uranio; la cartografía de estructuras discretas (fracturas y foliaciones) a escala de afloramiento forma las bases de este trabajo. Además de la zona mineralizada, nuestro análisis se extendió a los bordes de los principales plutones, y muestra que parte de las estructuras que controlaron la mineralización estaban activas al tiempo de emplazamiento de los granitos. Este trabajo brinda nuevos elementos para conocer el control estructural sobre la mineralización y para discutir hipótesis acerca de los mecanismos que favorecieron la concentración mineral con el objetivo de ajustar los modelos de exploración regional y local, en éste último caso para contribuir a dia-

gramar las futuras perforaciones que se llevarán a cabo en el proyecto para determinar su potencial económico.

Esta investigación resulta de convenios de cooperación establecidos por la Comisión Nacional de Energía Atómica con la Universidad Nacional de Salta y con la Universidad de Buenos Aires.

MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

la sierra de Fiambalá (Fig. 1) integra las Sierras Pampeanas Septentrionales (Caminos 1979) y está constituida por metamorfitas de grado y composición variables (filitas, esquistos, gneises, mármoles, metagabros-anfibolitas y migmatitas) que alojan intrusivos (Penck 1920, González Bonorino 1972) que a grandes rasgos pueden dividirse en dos grandes grupos de acuerdo con sus relaciones de campo y edad: a) Plutones del Neoproterozoico-Paleozoico temprano, con edades entre 545 y 480 Ma (Grissom *et al.* 1998) que corresponden a cuerpos deformados generalmente concordantes con la foliación de las metamorfitas, y b) Plutones del Paleozoico tardío con edades próximas a 330 Ma (Arrospide 1985, Grissom *et al.* 1998, Ávila *et al.* 2008) discordantes con la estructura interna de la roca de caja y emplazados en niveles corticales más someros que el grupo anterior; a estos intrusivos se han vinculado las mineralizaciones. El plutón de Los Ratones (González Bonorino 1972) al que se asocia la mineralización de U del proyecto Las Termas aflora en el tramo medio de la sierra de Fiambalá.

GEOLOGÍA DEL TRAMO MEDIO DE LA SIERRA DE FIAMBALÁ

El prospecto de U Las Termas se ubica entre las quebradas de Los Árboles y Los Ratones, y corresponde a un sistema vetiforme relacionado a un *greisen* abierto en flúor (Rubinstein *et al.* 2001) alojado en metamorfitas que encajan intrusivos a los que se relacionaría genéticamente

la mineralización (Fig. 2). Diques ácidos y básicos intruyen al conjunto.

Basamento metamórfico

Este está constituido por esquistos, gneises y migmatitas. Entre estas litologías dominantes se disponen cuerpos menores de granitoides, rocas básicas y niveles carbonáticos de formas tabulares o lenticulares concordantes con la foliación principal. La cartografía llevada a cabo no permite una diferenciación precisa de las diferentes litologías aunque sí indica que las rocas de menor metamorfismo (esquistos) son dominantes en el área con mayor concentración de uranio, las que se distribuyen en una faja aproximadamente meridiana a partir de la cual aumenta el grado metamórfico tanto al este como al oeste como ya lo habían detectado los trabajos previos de González Bonorino (1972) y Grissom *et al.* (1998). La distribución de la facies metamórficas está vinculada con el apilamiento de láminas de basamento a través de las fajas miloníticas de alta temperatura que se reconocen en la región (Neugebauer y Miller 1993, Höckenreiner *et al.* 2003) y a pliegues mayores con flancos invertidos como lo sugieren las relaciones entre la orientación de la estructura principal y las variaciones graduales en el metamorfismo, por ejemplo en el tramo medio-superior de la quebrada Los Ratones se advierte un aumento gradual del metamorfismo hacia el este en secciones en las que la foliación principal de las metamorfitas buza en ese sentido.

Los datos de edades absolutas disponibles indican que la evolución del basamento ocurrió entre aproximadamente 600 y 400 Ma, aunque los principales eventos ígneo-metamórficos se desarrollaron entre 550 y 450 Ma. La sedimentación sería neoproterozoica de acuerdo con las edades de cristalización de granitoides deformados similares al ortogneis de La Puntilla (ca. 550-540 Ma, U/Pb sobre circón, Grissom *et al.* 1998). Entre el Cámbrico y el Ordovícico Temprano tuvo lugar un período extenso que incluyó eventos metamórficos, magmáticos y deformativos (Pa-

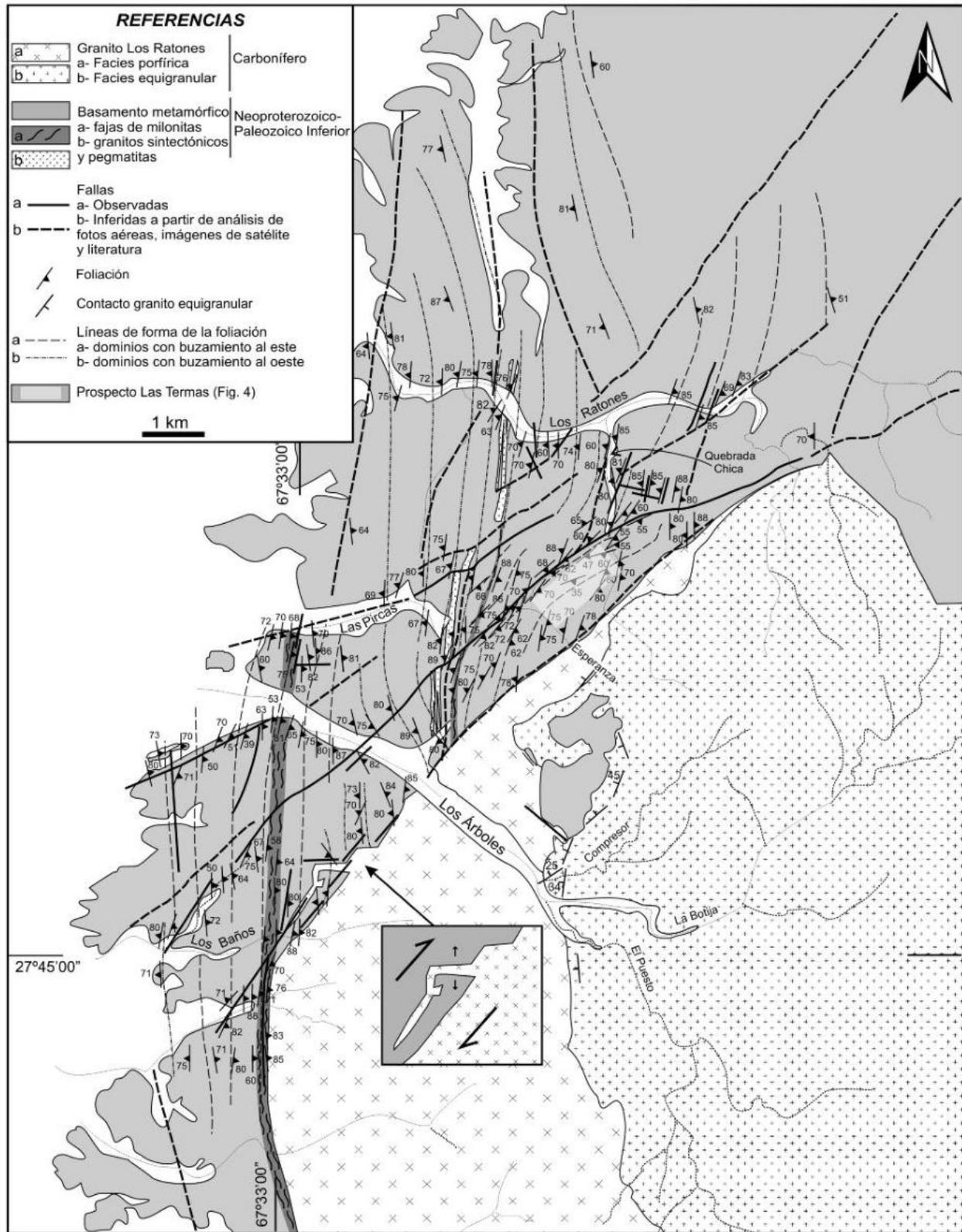


Figura 2: Mapa de detalle entre las quebradas de Los Ratones y Los Baños. Modificado con observaciones propias de González Bonorino (1972), Arrospide (1985), Neugebauer y Miller (1993) y Grissom *et al.* (1998). El esquema del recuadro muestra la geometría del dique granítico que sugiere componente de movimiento horizontal derecha sobre las estructuras de rumbo NE que controlaron parcialmente el emplazamiento de las facies porfíricas. Más detalles en el texto.

ge *et al.* 1992) durante cuyo pico entre 520 y 470 Ma (edades U/Pb en monacita y circón, Grissom *et al.* 1998) se definieron rasgos característicos del basamento, como la litología (principales rocas metamórficas e intrusivos concordantes ácidos y básicos) y la estructura interna principal. Los episodios de deformación dúctil y metamorfismo póstumos serían del Devónico inferior de acuerdo con las edades de Höckenreiner *et al.* (2003). A partir del Devónico-Carbonífero temprano comenzó la relajación térmica y mecánica que exhumó parcialmente el basamento (Page *et al.* 1992, Grissom *et al.* 1998, Höckenreiner *et al.* 2003, Japas *et al.* 2004).

Intrusivos neopaleozoicos

Los intrusivos neopaleozoicos de la sierra de Fiambalá están representados por cuerpos en general discordantes emplazados en una roca de caja con variaciones metamórficas marcadas, hecho que documenta su carácter post-orogénico respecto a la orogenia paleozoica inferior. El plutón Los Ratones (González Bonorino 1972) que aflora en el tramo medio de la sierra de Fiambalá (Figs. 1 y 2) es el exponente más conspicuo de este magmatismo.

El plutón Los Ratones está integrado por dos facies (Fig. 2): la más extendida corresponde a un granito equigranular con variaciones texturales a pórfidos en sus zonas de borde y la de menor representación está constituida por granitos claramente porfíricos rosados a rojos (Arrospide 1985). Si bien el análisis de plutón no está dentro de los objetivos principales de este trabajo, las observaciones llevadas a cabo permiten destacar algunos rasgos que se tratan con mayor detalle. Relaciones de campo como enclaves y contactos (Fig. 3a y b), ya observadas por González Bonorino (1972) y Arrospide (1985), indican que la facies equigranular intruye a la porfírica. Las variaciones litológicas en la zona de borde del granito equigranular advierten sobre la posibilidad de separar subfacies de texturas porfírica, pegmatítica y aplítica (Fig. 3a). Todos los contactos observados (*eg.* Fig. 3a

y b) confirman la hipótesis de que el contacto aflorante de la facies equigranular representa el techo del plutón, tal como lo postularon otros autores (Arrospide 1985, Guidi 1999). El contacto es de buzamiento variable, aunque en general dominan buzamientos entre 20° y 50° con direcciones centrífugas, definiendo a escala del plutón una forma cómica. Así, en la margen sur de la quebrada El Puesto, el buzamiento es hacia el sur-suroeste (Fig. 3a), en la margen norte de la quebrada del Compresor el buzamiento es hacia el oeste (Fig. 3b) mientras que en las cabeceras de la quebrada La Esperanza el buzamiento es hacia el noroeste (Fig. 2). Los estudios geoquímicos sobre el plutón Los Ratones (Arrospide 1985, Rubinstein y Morello 1999, Guidi 1999, Rubinstein *et al.* 2001) sugieren que la mineralización de U está vinculada con la facies más evolucionada representada por los granitos equigranulares. Asimismo, advierten sobre el carácter calcoalcalino de la facies porfírica y una tendencia alcalina, típica de los granitoides postorogénicos, de la equigranular.

La edad del plutón Los Ratones está acotada al Carbonífero. Grissom *et al.* (1998) presentan un grupo de edades (Ar/Ar, U/Pb) sobre el plutón Los Ratones y otro que aflora en el extremo sur de la sierra de Fiambalá, y concluyen que la edad de intrusión de estos cuerpos es próxima a 335 Ma confirmando la edad de 330 ± 10 Ma, K/Ar sobre biotita hidrotermal, comunicada previamente por Arrospide (1985). Estas edades y otras provenientes de otros plutones y mineralizaciones asociadas (340 ± 8 Ma, K/Ar en el granito Ayacucho y 339 ± 8 Ma, K/Ar en mica hidrotermal asociada a mineralización de W, Ávila *et al.* 2008) indican que el pico de intrusividad neopaleozoico ocurrió en torno a 340-330 Ma. La facies porfírica del plutón Los Ratones carece de dataciones. Siguiendo a otros autores (González Bonorino 1972, Arrospide 1985) se interpreta que las dos facies son contemporáneas aunque deberían profundizarse las investigaciones para explicar las variaciones de alcalinidad como lo sugieren las

investigaciones geoquímicas preliminares (Rubinstein *et al.* 2001). Cabe mencionar que Japas *et al.* (2004) dejan planteada la discusión sobre una edad más antigua para la facies porfírica de acuerdo con rasgos geoquímicos y estructurales.

El plutón Los Ratones produce sobre la metamorfita una aureola de contacto a la que se superponen los procesos de alteración hidrotermal (Rubinstein *et al.* 2001).

Tanto las rocas plutónicas como las metamórficas alojan diques ácidos y básicos. Morello y Rubinstein (2000) estudiaron con mayor detalle estos diques y establecieron dos grupos: el compuesto por diques subalcalinos riolíticos y andesíticos estaría vinculado con el plutón Los Ratones; en cambio, el integrado por mugearitas y hawaitas alcalinas sería posterior y asociado con procesos de *rifling* continental.

Mineralización de uranio

La mineralización de uranio, próxima al contacto noroeste de la facies porfírica del plutón Los Ratones (Figs. 2 y 4), se aloja en la caja metamórfica, con la cual no guarda relación genética. Está asociada a fajas de alteración hidrotermal que muestran diferentes relaciones geométricas (concordancia-discordancia) con la foliación principal de las metamorfitas, compuestas principalmente por esquistos micáceos y/o cuarzosos, cuarcitas y gneises. La mineralización presenta formas lenticulares dentro de las fajas de alteración. El mineral principal es pechblenda. En la roca es intensa la oxidación; se observa hematización en venas asociada con jarosita y yeso, este último como principal vehículo de disseminación de minerales supergénicos de uranio (Morello 1990). Estudios de detalle permitieron determinar una paragénesis de mena constituida principalmente por pechblenda y pirita (Morello 1990, Morello *et al.* 1996) con participación de fluorita, la cual está espacialmente relacionada con la mineralización de uranio (Morello y Rubinstein 2002). Entre los minerales accesorios se determinó uraninita, así como otros minerales ra-

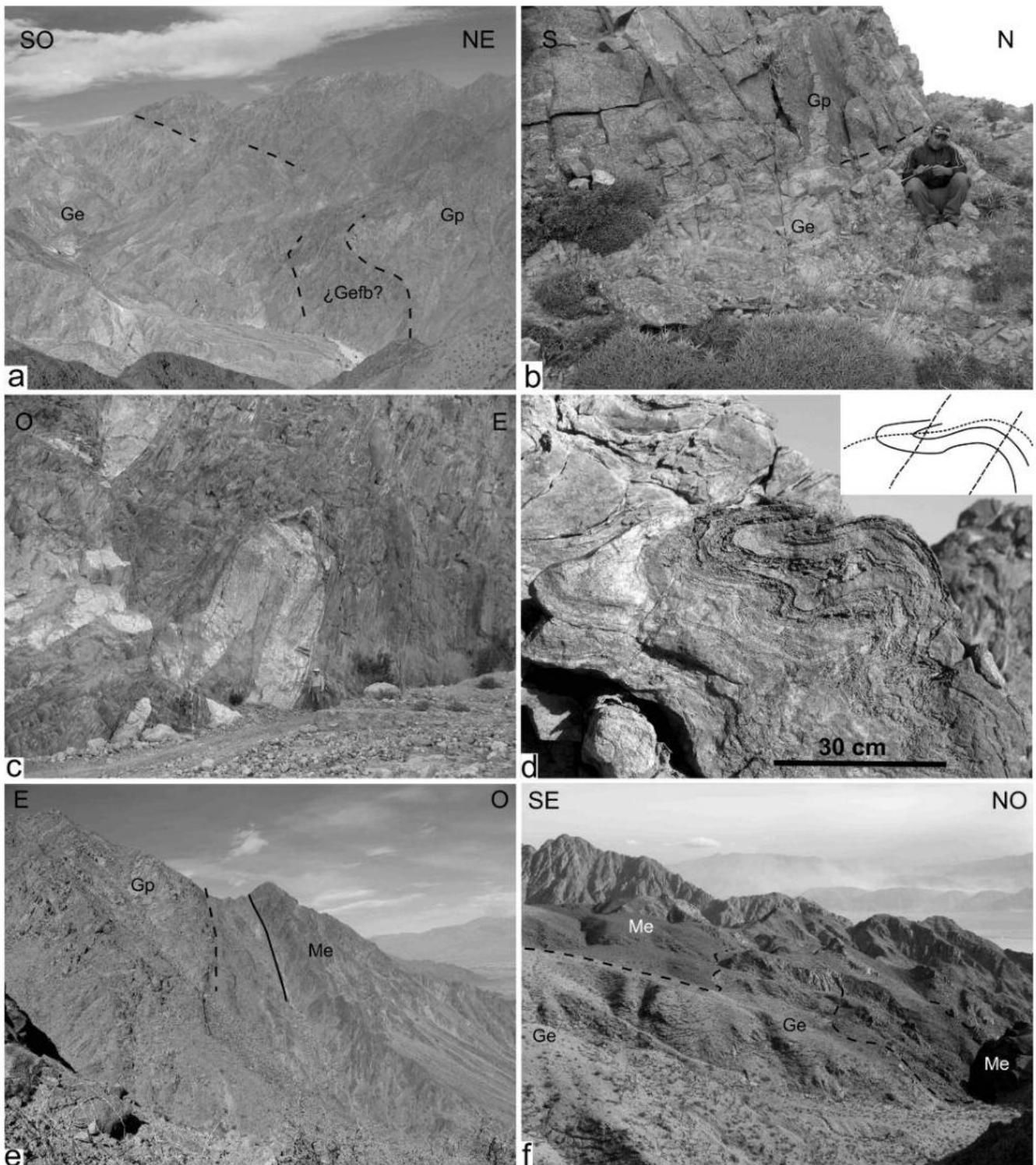


Figura 3: Litologías y estructuras. Ge- Facies equigranular, Gp- Facies porfírica, Me- Caja metamórfica. a) Vista del contacto con buzamiento hacia el S-SO entre facies equigranular y porfírica sobre margen sur de la quebrada El Puesto. Entre las facies típicas se dispone una faja de granitos de grano más fino con abundantes diques de pegmatita-aplita y pórfidos que quizá correspondan a una zona de borde de la facies equigranular (¿Gefb?); b) detalle de contacto con buzamiento bajo hacia el oeste entre facies porfírica y equigranular. Quebrada del Compressor; c) pliegue isoclinal de dique granítico-pegmatítico competente. El pliegue es intrafolial respecto a la foliación principal. Diques o bancos más delgados o menos competentes son transpuestos por la foliación. Quebrada Los Ratones; d) preservación de pliegues previos a la foliación principal en áreas en que ésta se desarrolla con menor intensidad. Interferencia de pliegues. Quebrada Los Árboles; e) contacto granito porfírico-metamorfito concordante con la foliación hacia el sur de la quebrada Los Baños; f) relaciones irregulares entre caja metamórfica y techo del plutón equigranular. Entre quebradas Los Árboles y La Esperanza.

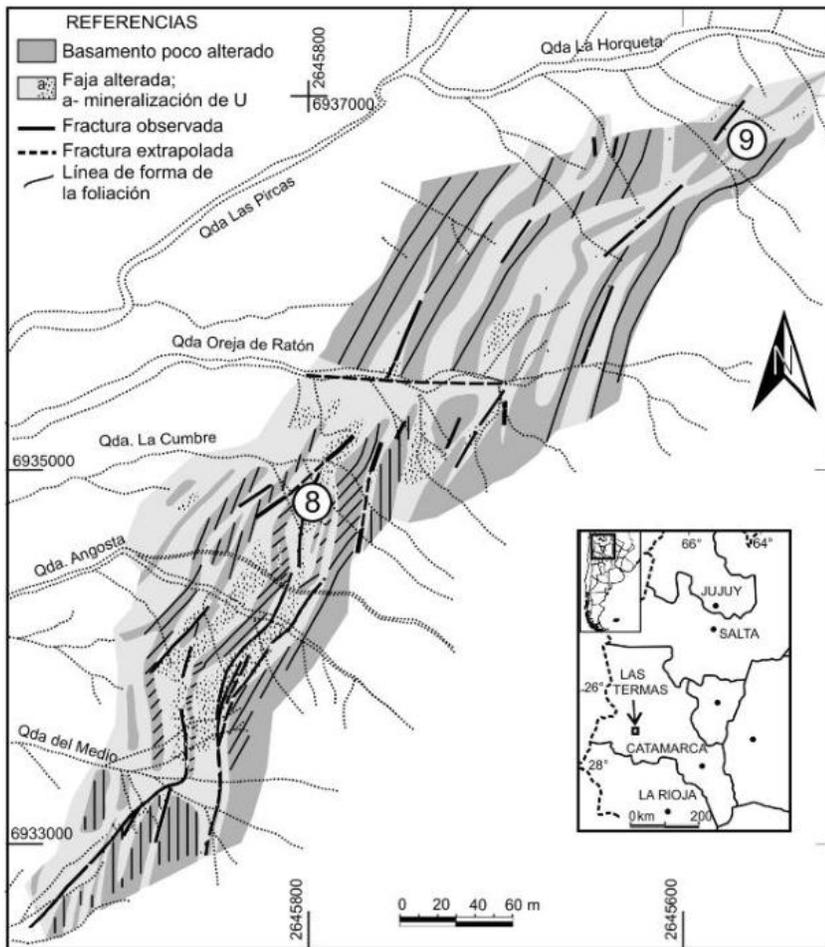


Figura 4: Bosquejo de zonas mineralizadas del prospecto Las Termas. Simplificado de Ferreira *et al.* (2008a). Los números en círculos ubican la trincheras analizadas en figura 9.

diactivos, parcialmente lixiviados por procesos de alteración temprana. Cabe mencionar que la uraninita también aparece como mineral accesorio de la facies granítica equigranular.

De acuerdo con relaciones espaciales observadas en las áreas de alteración, este depósito se definió inicialmente como formando parte de un sistema tipo *greisen* abierto rico en flúor, por lo tanto se lo vinculó genéticamente a las facies más evolucionadas y fértiles en uranio del plutón Los Ratones (Rubinstein y Morello 1999) que corresponden al granito equigranular carbonífero. Considerando esta relación espacial, también puede caracterizarse como un yacimiento perigranítico (Dahlkamp 2009). Sin embargo, las recientes dataciones U/Pb sobre pechblenda que arrojan edades cretácica y paleó-

gena (Morello 2008) advierten sobre una historia geológica-metalogenética posiblemente más compleja que incluye períodos de removilización de la mineralización.

ESTRUCTURA

El análisis estructural llevado a cabo enfocó principalmente la relación espacial entre las fajas de alteración con mineralización de uranio y las fracturas que controlaron su localización. En este marco se prestó también atención a la estructura interna del basamento metamórfico para establecer el control de la estructura de las metamorfitas (foliación) sobre las fracturas que controlaron la mineralización y a las relaciones entre los cuerpos magmáticos (diques y plutones) con las fracturas.

Las observaciones estructurales se concentraron en la región mineralizada y sus alrededores (Figs. 2 y 4) y se complementaron con datos de la literatura, en particular Baalman (1998) y Grissom *et al.* (1998) para su integración a escala de la sierra de Fiambalá.

Estructura del basamento

El basamento metamórfico muestra una foliación principal (Fig. 3c) formada durante el último evento de deformación dúctil intensa que ocurrió principalmente en el Ordovícico (Grissom *et al.* 1998, Höckenreiner *et al.* 2003) período en el que se desarrollaron las principales fajas miloníticas de la región (Neugebauer y Miller 1993) cuyas mejores exposiciones se encuentran en las quebradas de Los Baños y Los Árboles. Previo al desarrollo de esta foliación principal ocurrieron deformaciones que generaron pliegues y foliaciones como lo documenta la interferencia de pliegues preservados en las zonas donde el desarrollo de la foliación principal no alcanzó a transponer en grado avanzado las estructuras anteriores (Fig. 3d).

A escala de la sierra de Fiambalá, la foliación principal muestra un rumbo N-S a NO-SE con buzamientos altos tanto al este como al oeste (Baalman 1998, Grissom *et al.* 1998). En las figuras 1b y 2 se esquematizan las líneas de forma de la foliación fuera de la zona estudiada en detalle de acuerdo con la información de Grissom *et al.* (1998). La orientación de la foliación en la zona donde se concentra la mineralización de uranio es diferente dado que domina el rumbo NE-SO con buzamiento hacia el SE (Figs. 2 y 5) como ya había sido advertido por Maidana (1989). Nuestra información indica que entre las quebradas de Las Pircas y el contacto NO de la facies porfírica, la orientación de la foliación manifiesta una marcada flexión derecha o en sentido horario con respecto a las regiones que se encuentran hacia el norte y el sur (Fig. 2). El interés de caracterizar la orientación de la foliación radica en que algunas hipótesis proponen que la foliación consti-

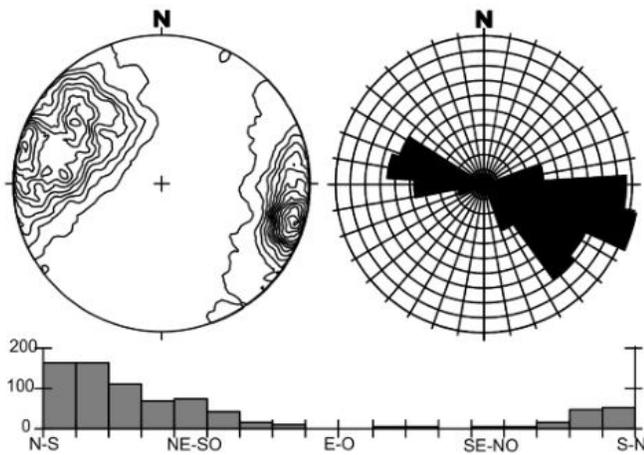


Figura 5: Orientación de la foliación. Se muestra un diagrama de frecuencia de polos a los planos, un diagrama en rosa que sintetiza la dirección de buzamiento y un histograma que representa la frecuencia de los rumbos, $n=796$; 14 líneas de frecuencia entre 0,38 y 8,54%.

tuyó una heterogeneidad cuya reactivación tectónica generó brechas cataclásticas que fueron las principales estructuras frágiles que facilitaron el ascenso y precipitación de los fluidos mineralizados (entre otros, Burgos 1996, Japas *et al.* 2004).

Fracturas

En la cartografía de las fracturas se incluyeron fallas y diaclasas. Si bien la mayoría de los datos provienen de la zona que contiene la mineralización de U, también se llevó a cabo un relevamiento preliminar de las fracturas en rocas metamórficas sin mineralización y en el granito. En esta última litología además se controlaron algunas fajas de greisen. La figura 6 sintetiza: el total de fracturas medidas en la región (Fig. 6a), las fracturas medidas en metamorfita (Fig. 6b) y en granito (Fig. 6c). Los datos de fracturas en el plutón Los Ratones, si bien escasos en relación con los obtenidos en la metamorfita, brindan elementos para comparar con los estudios más detallados que llevaron a cabo Arrospide (1985) y Baalman (1998).

Del análisis de la figura 6 surge que las fracturas representan un abanico amplio de orientaciones. De acuerdo con las orientaciones dominantes y con las observaciones llevadas a cabo durante la cartografía (persistencia de las fracturas, la importancia en la definición de rasgos geológicos de primer orden para la zona de estudio como contactos, fallas y estructuras mineralizadas) se diferencian tres juegos principales J1, J2 y J3, respectivamente

con rumbos N-S, NE-SO y E-O; un cuarto juego de rumbo NO-SE (J4) se define de forma secundaria en las fracturas medidas en metamorfita (Fig. 6b). El rango de orientación definido para cada juego es amplio, de hasta 30°; por ello, para cada juego se incluyen fracturas cuyos rumbos varían entre N345° y N15° (J1, N-S), N30° a N60° (J2, NE-SO), N75° a N105° (J3, E-O) y N125° a N155° (J4, NO-SE). La gran mayoría de las fracturas es de buzamiento alto, dominando los cercanos a la vertical como muestran los diagramas de frecuencia cuyos máximos de polos se distribuyen próximos a la primitiva de la red estereográfica.

La figura 7 sintetiza la orientación de fracturas en la metamorfita discriminadas en fallas y diaclasas, también de acuerdo con su relleno mineral (sin relleno, con rellenos de cuarzo, calcita, fluorita, yeso y mineralización de uranio visible o con anomalía radiométrica mayor a 1500 cuentas/segundo determinada con escintilómetro, valor que correlaciona con un grado de concentración de U moderado a alto de acuerdo con los estudios llevados a cabo por la Comisión Nacional de Energía Atómica). Además se muestra la orientación de los diques básicos alojados en la caja metamórfica. De igual modo, la figura 8 reseña las orientaciones de fallas y diaclasas en el granito, así como la orientación de fajas de greisen con mineralizaciones de Sn y W y la de los diques básicos encajados en granito.

De la observación y comparación de es-

tas figuras surge que los juegos principales de fracturas señalados en el total de estructuras relevadas (Fig. 6) se distinguen también en los diferentes grupos de estructuras cuando se las discrimina por sus características (fallas, diaclasas) y propiedades (naturaleza del relleno, mineralización, diques). Sin embargo, en el análisis discriminado de las estructuras se advierte que algunos de estos juegos está mejor definido en un grupo que en otro, como el caso de las fracturas este-oeste que constituyen la orientación principal de aquellas cuyo relleno está definido por fluorita (Fig. 7d), por cuarzo (Fig. 7e) y por calcita (Fig. 7f) mientras que su expresión es mínima en las fajas de greisen alojadas en granito (Fig. 8c). Otro rasgo que se destaca es el de las fracturas ocupadas por los diques básicos en la metamorfita (Fig. 7h) y en el granito (Fig. 8d) dado que éstos siguen estructuras de los tres juegos principales aunque los buzamientos dominantes de los diques son hacia el E para el juego 1, hacia el SE para el juego 2 y hacia el S para el juego 3. En las fracturas rellenas con cuarzo (Fig. 7e) también se observa buzamiento dominante hacia el SE y S respectivamente para los juegos 2 y 3. Otro hecho a señalar está dado por las estructuras de rumbo NO-SE en la población de fracturas con mineralización de U moderada a fuerte (Fig. 7c), constituyendo el único registro claro de una orientación frecuentemente mencionada en la bibliografía como dominante (Burgos 1996, Baalman 1998). Como apreciación general, es posible mencionar que los ángulos de buzamiento alto (mayores de 60°) son los preponderantes tanto en el análisis genérico (Fig. 6) como particular de las fracturas (Figs. 7 y 8).

El análisis de la relación entre fracturas y mineralización de uranio se complementó con el levantamiento de secciones detalladas en ocho trincheras. Para cada una se estableció una línea de perfil entre los extremos a lo largo de una cinta métrica, sobre la que se colectaron datos sobre orientación de foliación y de fracturas. Para estas últimas además se determinó su relleno y su jerarquía dada por el espe-

sor de la zona de falla. También se definieron grados de fracturación y alteración de la roca. Para la alteración, los grados 1, 2 y 3 respectivamente indican alteraciones baja, moderada e intensa. En el grado 1 la roca de caja preserva claramente sus rasgos litológicos y estructurales, en el 2 estos rasgos están obliterados pero aún se distinguen de forma nítida, mientras que para el grado 3 la alteración modifica sustancialmente la roca metamórfica. En cuanto a los grados de fracturación, 1, 2 y 3 indican, respectivamente, rocas con fracturas aisladas y poco frecuentes, rocas con fracturas interconectadas y por último una red de fracturas que dan aspecto brechoso a la roca, aunque sin rotación de los fragmentos ni desarrollo de una matriz por trituración como ocurre en las brechas de falla. La figura 9 muestra los resultados de dos trincheras en los que se observa una fuerte correlación entre la mineralización de uranio y la intensificación de los procesos de fracturación y alteración, si bien en algunos casos se manifiestan picos radiométricos en zonas escasamente alteradas o fracturadas. También se distingue una relación marcada entre picos radiométricos y fallas aunque no todas las fallas muestran anomalías ni todas las anomalías están vinculadas con fallas. En este análisis detallado de las trincheras se aprecia además que las estructuras que contienen la mineralización son principalmente de rumbo N y NE, en menor medida las de rumbo E-O y NO (véase también Fig. 7c), dominando los buzamientos altos. La concordancia de las estructuras mineralizadas con la foliación sólo ocurre en las áreas en las que la foliación muestra buzamientos altos, por ejemplo en la trinchera 9 (Fig. 9).

Los juegos de fracturas reconocidos a partir del análisis de las estructuras medidas en los afloramientos tienen también expresión en rasgos geológicos mayores de la zona estudiada. El mapa de la figura 2 muestra que las estructuras de rumbo N y NE han jugado un rol fundamental en el control del emplazamiento de la facies porfírica del plutón Los Ratonés, la

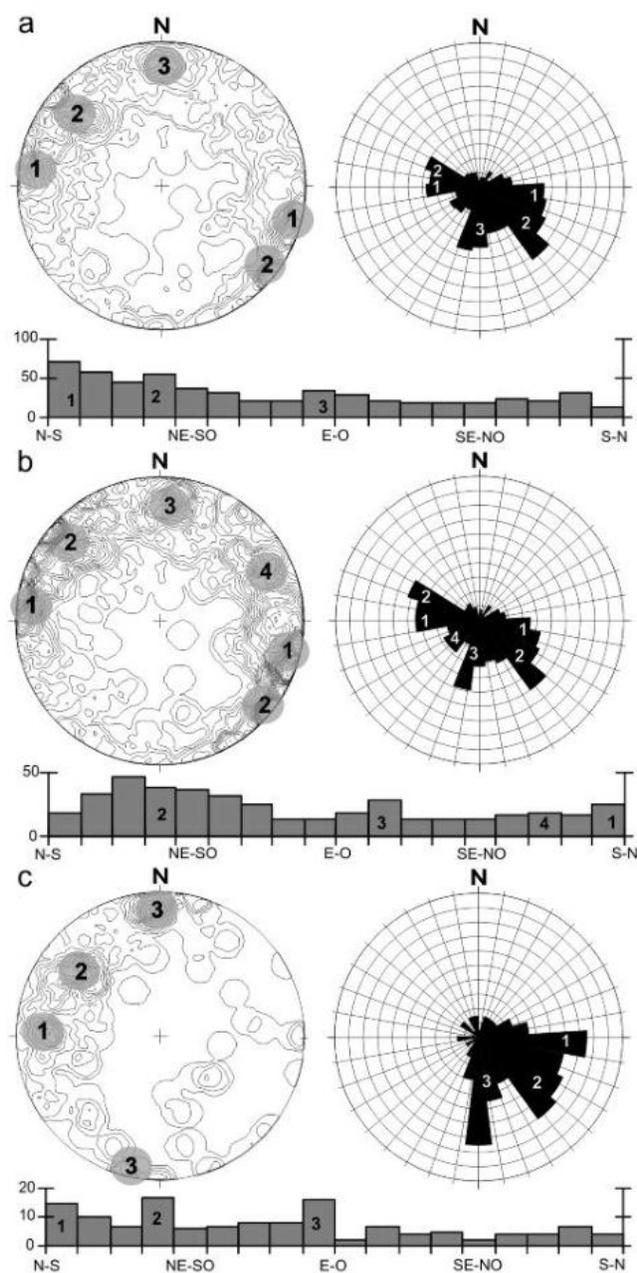


Figura 6: Orientación de fracturas. Para cada grupo de datos se muestra un diagrama de frecuencia de polos a los planos, un diagrama de rosas que sintetiza la dirección de buzamiento y un histograma que representa la frecuencia de los rumbos; a) total de fracturas cartografiadas en la región de estudio, $n=566$; 15 líneas de frecuencia entre 0,35 y 5,48%; b) fracturas en rocas metamórficas, $n=433$, 10 líneas de frecuencia entre 0,69 y 6,93%; c) fracturas en granito, $n=133$, 13 líneas de frecuencia entre 0,75 y 9,77%. Para cada grupo de datos se indican los tres juegos principales de fracturas (números en círculos); en las fracturas en metamorfita además se indica el cuarto juego de rumbo NO-SE. Más detalles en el texto.

que presenta un contacto paralelo a la foliación de rumbo aproximado N (Fig. 3e) hacia el sur de la quebrada de Los Baños y un tramo de dirección NE entre ésta y la quebrada Chica. En esta última porción, el contacto es en ocasiones primario (intrusivo y subparalelo a las estructuras) y en otras representado por una falla, hecho que advierte sobre reactivaciones de las estructuras NE que controlaron el emplazamiento del plutón. El control de los diferentes juegos de fracturas sobre el

emplazamiento de la facies porfírica, sobre los diques, y sobre los fluidos primarios que transportaron uranio indica que los juegos de fracturas existían ya al tiempo del emplazamiento del plutón y de la circulación de los fluidos asociados.

La facies porfírica más antigua del plutón Los Ratonés se extiende superficialmente en forma de cuña que se estrecha hacia el norte (Fig. 2). Esta forma se debe a que sus bordes occidental y noroccidental están claramente controlados por estructu-

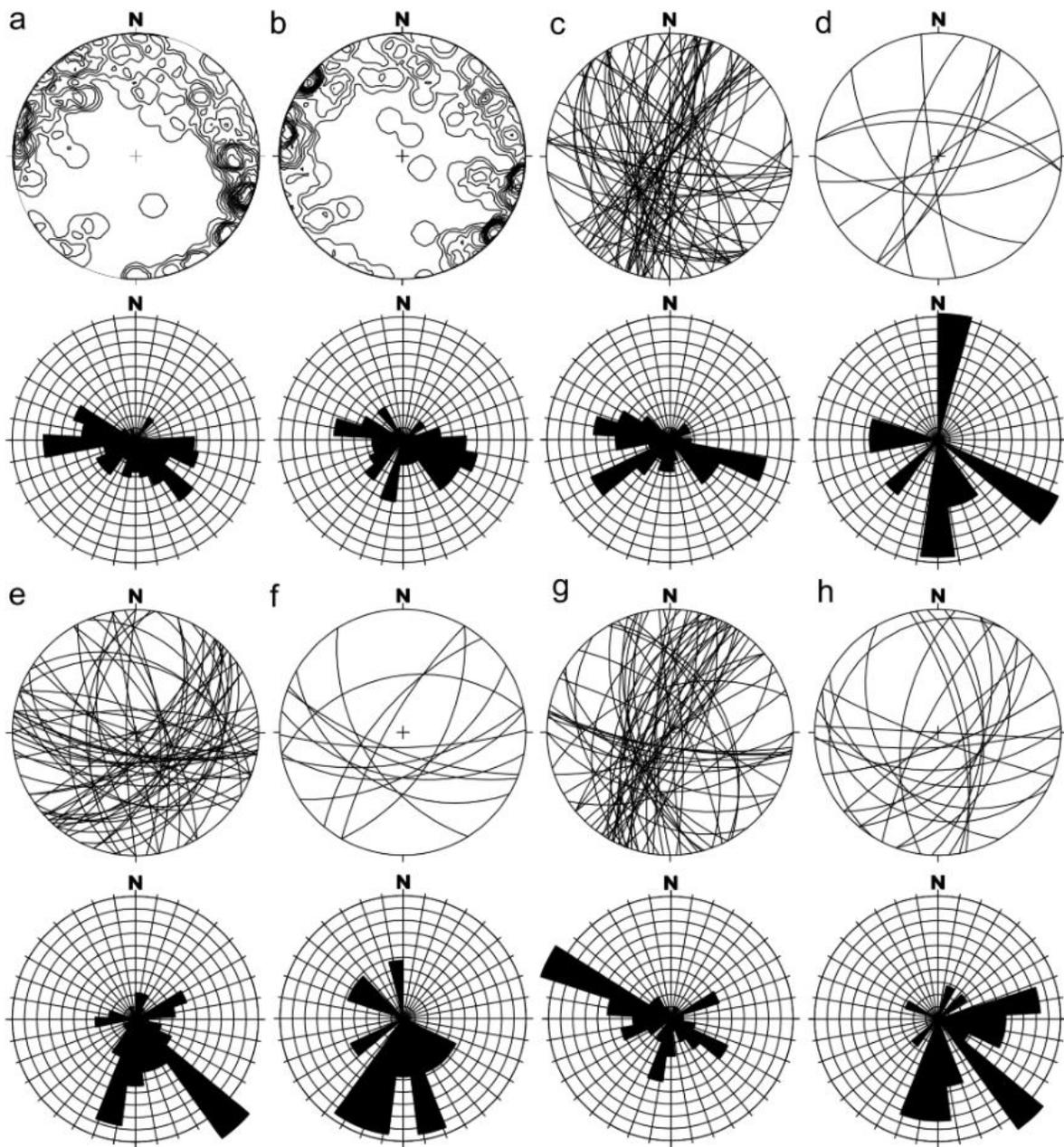


Figura 7: Orientación de fracturas (fallas y diaclasas) en rocas metamórficas. Para cada grupo de datos se presentan dos diagramas. Cuando los datos superan el número de 100 se muestran como líneas de frecuencia de polos y diagrama en rosa que sintetiza la dirección de buzamiento. Cuando los datos son menos de 100 se muestra la proyección ciclográfica de los planos y el diagrama en rosa. a) Fallas ($n=152$, 16 líneas entre $1,97$ y $10,53\%$); b) diaclasas sin relleno ($n=130$, 14 líneas entre $0,77$ y $10,77\%$); c) diaclasas con mineralización de U moderada a fuerte (mineralización visible o radiometría mayor a 1500 cuentas) ($n=75$); d) diaclasas con relleno de fluorita ($n=14$); e) diaclasas con relleno de cuarzo ($n=61$); f) diaclasas con relleno de calcita ($n=14$); g) diaclasas con relleno de yeso ($n=64$); h) diques básicos ($n=24$).

ras de rumbo N (Fig. 3e) y NE. El contacto N se reconoce hacia el sur de la quebrada de los Baños y más al sur adquiere rumbo NNO adaptándose a la foliación principal de la roca de caja (Fig. 1b), que allí está representada principalmente por las fajas miloníticas descritas

por Neugebauer y Miller (1993). La foliación del basamento representa una heterogeneidad que se reactivó de forma frágil a partir del Carbonífero y controló el emplazamiento de la facies porfírica. Las observaciones sobre tramos de este contacto con rumbo general N distinguieron

buzamientos altos hacia el este, próximos a la vertical, que siguen la orientación general de la foliación (Figs. 1 y 2). En inmediaciones de la quebrada Los Baños, el contacto concordante con la foliación adquiere rumbo NE y se torna netamente discordante con la fábrica de las meta-

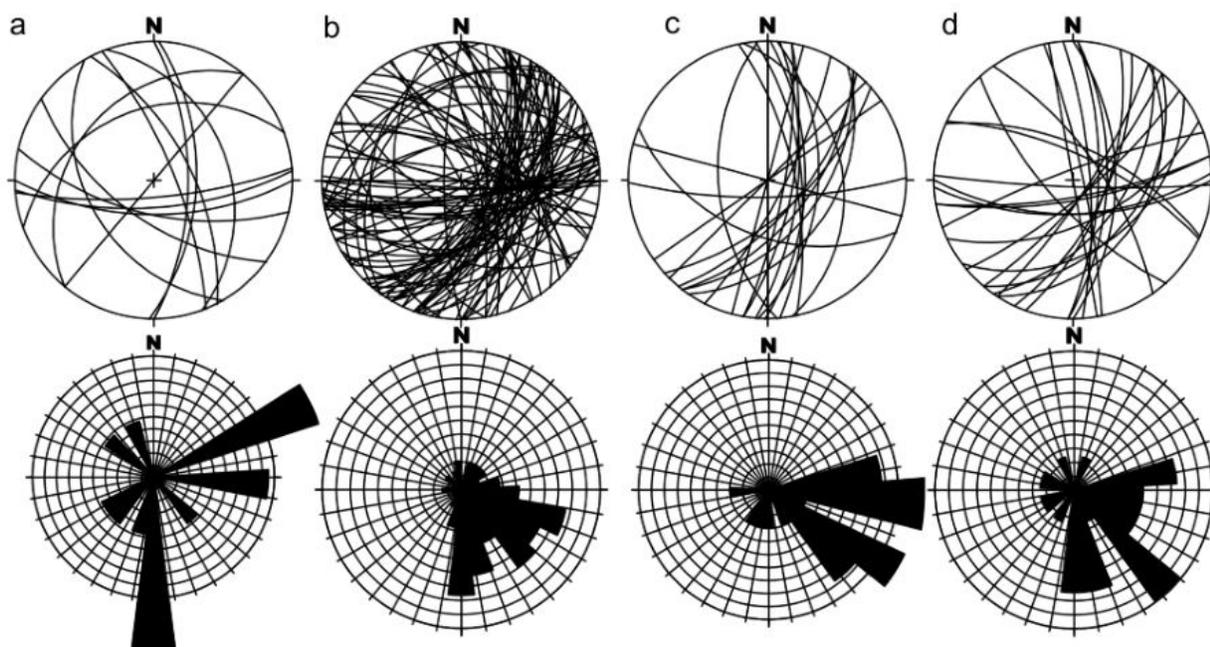


Figura 8: Orientación de fracturas (fallas y diaclasas) en rocas graníticas. Para cada grupo de datos se presentan dos diagramas, uno con la proyección ciclográfica de las estructuras y otro en rosa que sintetiza la dirección de buzamiento. a) Fallas (n=13); b) diaclasas (n=96); c) estructuras greisenizadas (n=24); d) diques básicos (n=27).

morfitas. Tal lo comentado previamente, este contacto es en parte primario y en otras está definido por fallas que reactivaron el contacto intrusivo. Localmente, los diques o apófisis que se originan en el granito principal tienen tramos de dirección este-oeste como se aprecia entre las quebradas de Los Baños y Los Árboles (Fig. 2), por lo que las fracturas E-O también estaban formadas al tiempo de la intrusión. El borde este de la cuña de granito porfírico corresponde al contacto con el granito equigranular, contacto que en general muestra buzamientos bajos (Fig. 3a y b) con direcciones centrífugas (Fig. 2) y que permiten delinear una forma de domo.

Los resultados brindados por el análisis cinemático de fallas no permiten una interpretación clara debido a que los datos son escasos y en muchos casos con interpretaciones alternativas en cuanto al sentido de movimiento, al observarse en algunas zonas fallas paralelas y cercanas con indicadores de sentidos opuestos. Ésto quizá se deba a reactivaciones de las estructuras durante diferentes períodos. Los resultados de este análisis advierten sobre

una componente de movimiento derecho en las fallas de rumbo NE-SO según lo manifiestan la separación de rasgos litológicos como los granitos y pegmatitas sintectónicas concordantes con la foliación de las metamorfitas que afloran entre las quebradas de Los Árboles y Los Ratones (Fig. 2). A la vez, otros rasgos litológicos o tectónicos afectados por estas estructuras muestran un desplazamiento sensiblemente menor, por ejemplo algunas de las fajas miloníticas que se disponen al este de la faja de granitos y pegmatitas sintectónicas (Fig. 2), hecho que advierte sobre la transferencia de parte del desplazamiento horizontal de las estructuras NE hacia las de rumbo meridiano. A esta componente de movimiento horizontal derecha se asociaría la flexión de la foliación de las metamorfitas que muestra rumbo dominante NE en la zona de concentración de la mineralización de uranio. Se reconocieron 36 fallas con estrías, que si bien son escasas para una interpretación cinemática son suficientes para advertir que las fallas de rumbo N muestran componente de movimiento horizontal mejor definida que

las de rumbo NE y E-O (Fig. 10). Los datos de fallas de rumbo N provienen en su mayoría de la quebrada Los Ratones e inmediaciones, y generalmente corresponden a reactivaciones de los planos de foliación del basamento.

DISCUSIÓN

La mineralización de uranio del prospecto Las Termas corresponde a un yacimiento perigranítico de tipo *greisen* abierto rico en flúor vinculado con las facies equigranulares con tendencia alcalina del plutón Los Ratones de edad carbonífera (entre otros, Morello 1990, Burgos 1999, Guidi 1999, Rubinstein *et al.* 2001, Rubinstein y Morello 1999, Morello y Rubinstein 2002). La siguiente discusión contempla básicamente este modelo. Sin embargo, Morello (2008) comunicó edades cretácica y paleógena en pechblendas que alertan sobre probables períodos de removilización de la mineralización ampliando el marco de posibles interpretaciones que requieren de la revisión de la paragénesis y condiciones físicas de formación para detectar las zonas y estruc-

turas que alojan mineralización removili-
zada, objetivo con potenciales resultados
positivos de acuerdo con investigaciones
en curso (de la Hoz y Coniglio, *com. per.*).
Las fracturas del tramo medio del faldeo
occidental de la sierra de Fiambalá cons-
tituyeron zonas de debilidad que han con-
trolado de forma nítida el emplazamien-
to del plutón Los Ratones y de las mine-
ralizaciones asociadas. Si bien trabajos
previos han detectado el control estruc-
tural sobre las mineralizaciones tanto del
distrito minero Los Árboles-Los Ratones
en general (entre otros, Ávila 1982, Arrospide
1985, Burgos 1996, Baalman 1998,
Japas *et al.* 2004) como de la mineraliza-
ción de uranio en particular (Burgos 1999,
Rubinstein *et al.* 2001, Ferreira *et al.* 2008a)
menos atención se ha brindado al control
tectónico sobre el emplazamiento del plu-
tón los Ratones (Arrospide 1985, Burgos
1996, Baalman 1998, Japas *et al.* 2004).
Como se describió en la sección estructu-
ra, las fracturas de rumbo N y NE con-
trolaron el emplazamiento de la facies
porfírica, mientras que la facies equigra-
nular fértil que aportó la mineralización
de U no muestra un control estructural
tan marcado dada su geometría de domo
aunque el ascenso del magma debería haber
ocurrido a través de alguna de estas
direcciones estructurales. La zona de con-
tacto de las facies equigranulares registra
variaciones texturales típicas de las zonas
de borde, ya descritas por Arrospide
(1985) y Guidi (1999), y la revisión deta-
llada de este plutón, fuera de los objeti-
vos de esta contribución, quizá permita
su identificación cartográfica (*e.g.* Fig. 3a).
Hacia el norte de la quebrada de Los Ár-
boles afloran rocas metamórficas topo-
gráficamente por encima de las facies de
los plutones (Fig. 2). Estos afloramientos
se han interpretado como un colgajo (*roof
pendant*) desde los trabajos de Arrospide
(1985). Estas rocas metamórficas aisladas
presentan contactos netos con la facies
porfírica con control estructural nítido a
través de fracturas, las que también en-
marcan la mineralización de W vincula-
das con *greisen* de las minas El Cóndor y
Buena Suerte (Arrospide 1985). El con-

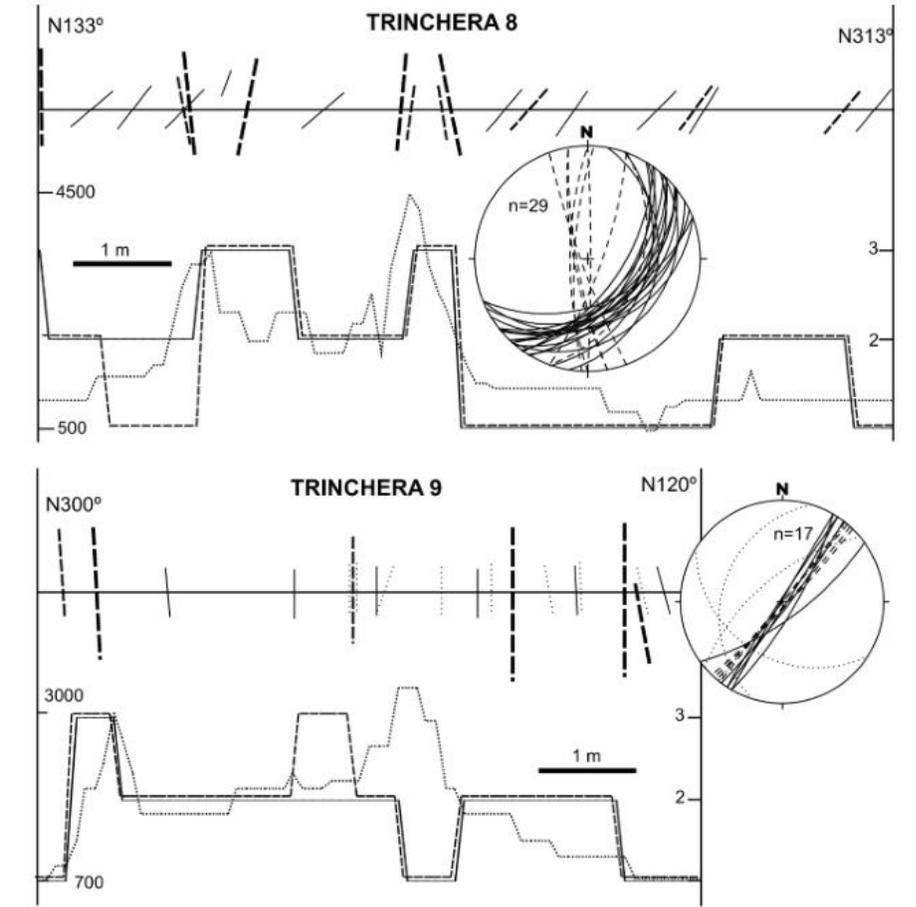


Figura 9: Perfiles detallados de trincheras. Sobre la línea de perfil se muestran fallas (línea entrecortada, el espesor de la línea representa la jerarquía de la falla), foliación (línea llena) y diaclasas rellenas con yeso (línea de puntos). Los buzamientos son los aparentes sobre la traza de la trinchera. En la parte inferior se muestran tres líneas que indican grados de fracturamiento (línea llena) y alteración (línea entrecortada) con escalas 1 a 3 sobre eje derecho. La línea de puntos marca la anomalía radiométrica medida con escintillómetro con escala sobre el eje izquierdo. Los diagramas estereográficos sintetizan la orientación de datos para cada trinchera (Foliación: línea llena; estructuras mineralizadas: línea entrecortada; vetillas de yeso: línea de puntos). La ubicación de las trincheras en figura 4.

junto metamorfita-facies porfírica forma la caja del techo de la facies equigranular. Si bien el contacto del techo es en general de bajo buzamiento y diseño centrífugo, localmente es irregular con abundantes apófisis de pequeño tamaño y forma irregular (Fig. 3f). Considerando las relaciones entre las facies del plutón Los Ratones, la roca de caja y la mineralización surge el interrogante de la continuidad de las facies equigranular en subsuelo, dado que si se proyecta el techo de buzamiento bajo hacia la zona mineralizada, es posible que estas facies se encuentren a escasa profundidad por debajo de ésta

(Fig. 11a). Superficies de buzamiento bajo a decenas de metros de profundidad sugeridas por los relevamientos geofísicos (Ferreira *et al.* 2008b) y escasos afloramientos aislados de rocas graníticas, aparentemente de la facies equigranular, en la zona de mayor potencial económico (quebradas del Medio y Oreja de Ratón) favorecen esta interpretación, aunque existen dudas sobre la composición de estas manifestaciones aisladas debido a su grado de alteración avanzado. Otra posible interpretación es que las facies equigranulares estén limitadas por las fracturas NE que controlaron el emplaza-

miento de las porfíricas (Fig. 11b). Los programas de perforación proyectados quizás permitan ajustar estas interpretaciones o den lugar a otras alternativas. Cualquiera de ellas brindará nuevas herramientas para ajustar la distribución y potencial de la mineralización.

Trabajos previos que analizan las estructuras y sus relaciones con la mineralización determinan diferentes orientaciones preferenciales. Arrospide (1985) vincula las mineralizaciones de W y Sn asociadas a *greisen* con fracturas NO, N y NE. Burgos (1996) describe orientaciones dominantes NO que constituyen zonas de desplazamiento de rumbo, con movimientos primero izquierdo y luego derecho que generaron estructuras menores dilatantes en las que se concentró la mineralización, entre ellas la faja de dirección NE que contiene las manifestaciones ricas en U. De acuerdo con este autor, los límites NE y SO de esta faja corresponden a fajas de cizalla. Baalman (1998) analiza las fracturas a través de imágenes de satélite con controles de campo y encuentra que la dirección NO tiene muy buena definición en las imágenes pero escasa exposición en los afloramientos. Nuestro análisis se concentró en las estructuras que tienen expresión en afloramientos e indica que tres de los juegos detectados (N, NE y E-O) estaban vigentes al tiempo de la intrusión de los granitos y de la circulación de los fluidos ricos en uranio como lo demuestran el estudio estructural del granito, en particular de la facies porfírica, y de las estructuras con diferentes rellenos minerales en la zona de mayor interés económico. El cuarto juego, de rumbo NO-SE, está bien definido sólo en las rocas metamórficas y contiene mineralización de U, por lo que también es posible caracterizarlo como integrado por fracturas activas al tiempo del magmatismo-mineralización. Al respecto, se destacan las estructuras con alta concentración de U (Fig. 7c) y las rellenas con fluorita (Fig. 7d) porque advierten sobre la existencia de estas fracturas al tiempo de la circulación de fluidos primarios mineralizados. Asimismo, la orientación de

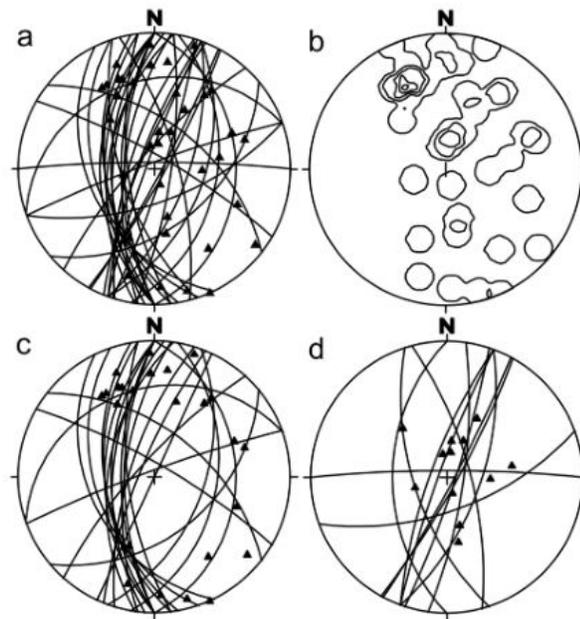


Figura 10: Diagramas estereográficos de fallas y estrías. a) Planos de fallas y estrías (triángulos); b) frecuencia de las estrías (n=36, 5 líneas entre 2,78 y 13,89%); c y d) fallas con estrías con inclinaciones menores y mayores a 45° respectivamente. Estos diagramas muestran que las fallas de rumbo general N-S tienen mayores componentes de desplazamiento horizontal que las de rumbo NE o E-O.

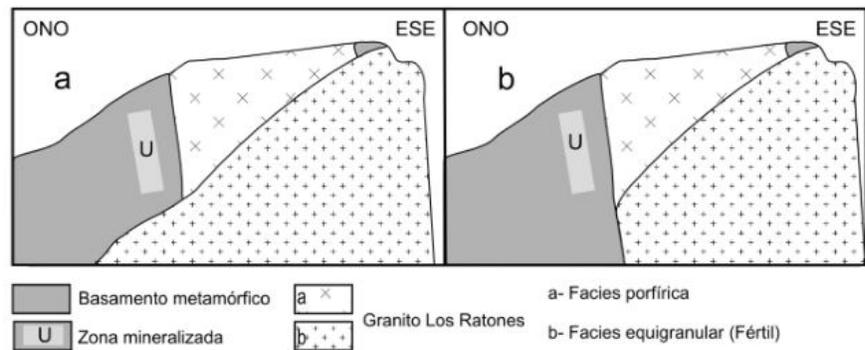


Figura 11: Esquemas mostrando hipótesis de relaciones geométricas entre facies equigranular y mineralización de uranio. Más detalles en texto.

las fracturas ricas en yeso con anomalías de uranio muestra que durante la removilización los fluidos también aprovecharon estas zonas de debilidad. Esta relación es significativa dada la propuesta de removilización y recristalización de pechblenda durante el Cretácico-Paleógeno (Morello 2008) porque sugiere que los fluidos secundarios utilizaron las mismas discontinuidades que los primarios. Las estructuras dominantes que controlan la mineralización son generalmente de buzamiento alto (más de 60°) y en la zona de mayor interés (Fig. 4) son discordantes a la foliación de las metamorfitas cuyo buzamiento es moderado hacia el E-SE (Figs. 2, 4-7). En esta región se observan áreas de aparente concordancia

entre foliación y estructuras mineralizadas porque coinciden en el rumbo aunque las fajas mineralizadas son discordantes porque buzando más que la foliación. Donde existe mayor concordancia entre foliación y estructuras mineralizadas es en las áreas en las que la foliación del basamento registra buzamiento alto, por ejemplo en la trinchera 9 (Fig. 9). Frecuentemente se ha mencionado que brechas cataclásticas producidas por la reactivación frágil de fajas miloníticas son las estructuras principales que contienen la mineralización (*e.g.* Burgos 1999, Rubinstein *et al.* 2001). Nuestras observaciones permiten ajustar esta interpretación dado que ese control es sólo local debido a que las estructuras mineralizadas más

significativas son de buzamiento alto y discordantes a la foliación, como lo confirman las investigaciones geofísicas del prospecto (Ferreira *et al.* 2008b). Las estructuras subverticales facilitaron la circulación de los fluidos portadores de la mineralización y a partir de estos canales los fluidos migraron en diferentes direcciones, en ocasiones siguiendo niveles litológicos más receptivos para la concentración de uranio (Fig. 12). Estas variaciones litológicas representan una alternancia primaria (estratificación) transpuesta en grado avanzado por las foliaciones tectónicas vinculadas con los episodios de deformación del Paleozoico inferior, en particular por la foliación dominante. Resulta que localmente las fajas mineralizadas se disponen subparalelas a la foliación aunque las estructuras principales son subverticales. Estas relaciones deberían ser consideradas al momento de llevar a cabo programas de sondeo para evaluar el potencial del prospecto.

El análisis integral de la estructura ofrece elementos para formular hipótesis acerca de la evolución tectomagmática del área. Burgos (1996) brindó un primer modelo en el que estructuras de rumbo NO-SE con componentes dominantes de movimiento horizontal generan estructuras secundarias dilatantes que albergan la mineralización. La distribución de la mineralización principal a lo largo de una faja de orientación NE en la que las estructuras mineralizadas muestran rumbos N y NE encaja en este sistema de cizalla NO. Japas *et al.* (2004) llevaron a cabo un análisis de fábrica deformacional e interpretaron la evolución tectomagmática neopaleozoica en el marco de procesos de relajación mecánica posteriores a la finalización del orógeno famatiniano que originaron un régimen transtensional izquierdo. La hipótesis de Japas *et al.* (2004) comprende la propuesta de Burgos (1996). La síntesis de nuestros datos para el objetivo de formular un modelo de evolución no resulta determinante. Sin embargo, indica: 1) Los tres juegos principales de estructuras muestran un diseño de fracturas entrelazadas (*linked fractures*) que se



Figura 12: Esquema de posibles relaciones entre litología (gris oscuro: poco favorable; gris claro: favorable), estructuras que canalizan fluidos (líneas gruesas) y alteración-mineralización (líneas delgadas entrecortadas). Más detalles en el texto.

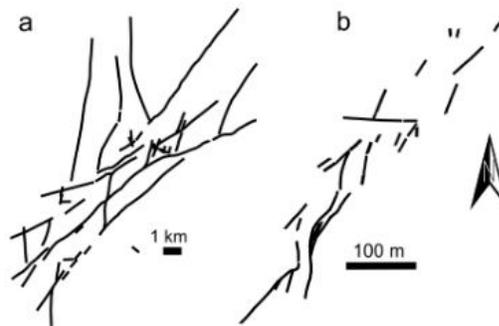


Figura 13: Esquema de fallas simplificados de mapas de figuras 2 (13a) y 4 (13b). Las fallas de rumbo N-S y NE-SO forman un sistema entrelazado a distintas escalas.

repite a distintas escalas (Figs. 2, 4 y 13); 2) los juegos de fracturas principales estaban definidos al momento del emplazamiento del granito porfirico y consecuentemente de la facies equigranular y de las mineralizaciones asociadas; 3) las fracturas de dirección N y NE (juegos 1 y 2 respectivamente) son las de mayor jerarquía por su participación en la definición de rasgos geológicos de primer orden para la zona estudiada, como son los contactos de los granitos y las fallas principales; 4) las fallas de rumbo NE muestran componente derecha de desplazamiento horizontal; aparentemente estas fallas tuvieron períodos de reactivación (contactos granito-caja de naturalezas intrusiva y tectónica con rumbos NE) y durante los diferentes períodos la cinemática fue comparable; 5) la zona con mayor concentración de uranio se encuentra asociada a la flexión marcada del rumbo de la foliación principal del basamento; 6) la foliación de basamento constituyó una heterogeneidad que fue reactivada, dado que en los pocos casos

en que se logró determinar se observó que paralela a esta superficie se disponen fallas que muestran una componente significativa de movimiento de rumbo (Fig. 10).

Un posible modelo evolutivo que integre estos datos está dado por fajas con marcadas componentes de movimiento horizontal que reutilizan los planos de la foliación principal (Fig. 14a). En este esquema, la orientación principal de la foliación era N a NNO y el buzamiento alto hacia el este según la información de Grissom *et al.* (1998) y la cinemática de las fajas miloníticas descrita por Neugebauer y Miller (1993). Líneas de debilidad de rumbo NNE a NE (dirección muy bien definida en las Sierras Pampeanas Septentrionales de acuerdo con el análisis estadístico de fracturas y lineamientos llevado a cabo por Baalman 1998) habrían promovido la formación de las flexiones dilatantes, que en parte reflejan situaciones del tipo *pull-apart*, a lo largo de estas fajas con componente principal de movimiento horizontal derecho. Parte

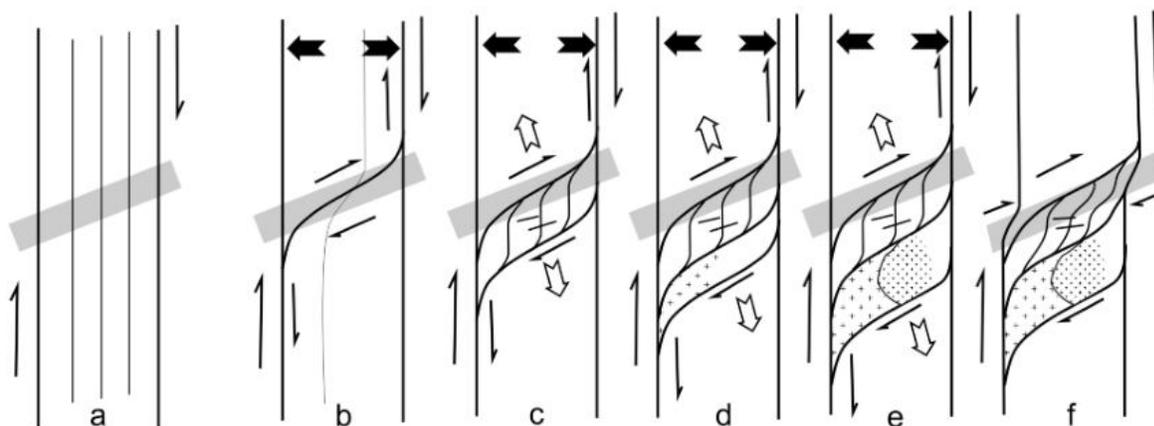


Figura 14: Síntesis de hipótesis de evolución. Las flechas robustas negras simbolizan extensión general; las sin relleno la extensión local. Las líneas delgadas en a y b representan la foliación. La franja gris esquematiza líneas de debilidad previas. Más detalles en el texto.

de la componente de movimiento horizontal sobre las estructuras meridianas se transfiere a las de rumbo NE, estructuras que muestran también componentes derechos de desplazamiento horizontal; los datos disponibles no son suficientes para precisar la naturaleza de esta transferencia, una posibilidad es mediante una configuración tipo *duplex* extensional u otra alternativa que considere que las estructuras NE con componente horizontal derecha terminan contra otras de rumbo meridiano (Fig. 14b). En las zonas de flexión cambia el rumbo y buzamiento de la foliación, la que adquiere direcciones NE con buzamientos moderados a altos hacia el SE. De esta forma se generaron fracturas de rumbos N paralelas a la foliación, NE en la zona de flexión y E-O como diaclasas extensionales vinculadas al movimiento derecho de las estructuras N-S y NE-SO (Fig. 14c); las fracturas NO, sólo presentes en la metamorfitas, serían secundarias respecto a las principales de rumbo N a NNO. En la zona de la flexión dilatante comenzó la intrusión de la facies porfírica calcoalcalina con marcado control estructural, principalmente de las fracturas N y NE, secundariamente de las E-O; los diques de tendencia calcoalcalina se intruyeron en esta etapa (Fig. 14d). La progresión de la extensión dio marco al emplazamiento de la facies equigranular fértil con mayor grado de alcalinidad y a la circulación de los fluidos que

generan los depósitos asociados a sistemas de *greisen* (Fig. 14e). No se incluyen en esta evolución los diques alcalinos que serían posteriores y desvinculados del plutón Los Ratones (Morello y Rubinstein 2000, Morello 2008). Las relajaciones mecánicas y térmicas ocurridas al final de la orogenia contraccional famatiniana desarrollada entre el Ordovícico y el Devónico (Höckenreiner *et al.* 2003) dieron lugar a inversiones cinemáticas como las propuestas por Japas *et al.* (2004). Estas ocurrirían en un ambiente tectónico de trasarco en el que se desarrolló la cuenca neopaleozoica de Paganzo (Salfity y Gorustovich 1983). El análisis del marco tectónico de la cuenca de Paganzo (Fernández Seveso y Tankard 1995, véase figura 17 de ese trabajo) sugiere que la zona de borde de cuenca representada por la sierra de Fiambalá formaba parte de una extensa región con desplazamiento derecho vinculado a reactivación de límites entre terrenos amalgamados en el Paleozoico Inferior; estos autores indican que en este marco ocurren sistemas de desplazamiento de rumbo divergentes a los que probablemente se asociarían cuenca de *pull-apart*. Finalmente, ocurrió una reactivación derecha (Japas *et al.* 2004) a lo largo de las fracturas NE y E-O que generó una rotación horaria de las estructuras y de la foliación (Fig. 14f). Parte de esta rotación ya se había acumulado durante las etapas iniciales que dieron mar-

co al emplazamiento de los plutones y al control estructural sobre los fluidos ricos en uranio.

El esquema descrito no ajusta todos los datos disponibles, por ejemplo una explicación adecuada a los límites de la zona de mayor interés económico, dado que hacia el NE de la quebrada de La Horqueta (Figs. 2 y 4) la mineralización disminuye notablemente aunque no el desarrollo de las estructuras principales N y NE que la contienen; en este caso quizá deban contemplarse también controles de otra naturaleza, por ejemplo litológicos, sobre la mineralización. El modelo discutido, si bien preliminar e incompleto, ofrece una alternativa válida para interpretar el control de las estructuras principales sobre el emplazamiento del plutón Los Ratones y sobre las mineralizaciones del área, en particular la de uranio del prospecto Las Termas.

CONCLUSIONES

Un sistema de fracturas entrelazadas con dos juegos principales de rumbo N y NE, y dos secundarios de rumbo E-O y NO controlaron el emplazamiento del plutón Los Ratones y de la circulación de fluidos asociados a greisenización a los que se relaciona la mineralización de uranio del prospecto Las Termas.

Las estructuras que concentran la mineralización en general tienen buzamiento

alto, con preferencia hacia el E y SE. Este rasgo debe considerarse en la diagramación de los programas de sondeo que se llevarán a cabo.

La evolución de las estructuras que controlan magmatismo y mineralización estaría vinculada con un sistema de fallas meridianas con movimiento horizontal derecho principal y normal subordinado que parcialmente reactivan heterogeneidades del basamento metamórfico, básicamente la foliación principal. Flexiones y quiebres a lo largo de estas estructuras generaron zonas dilatantes que favorecieron el ascenso y emplazamiento de los plutones y consecuentemente la circulación de los fluidos asociados ricos en uranio.

AGRADECIMIENTOS

Esta contribución resulta de cooperaciones técnicas establecidos por la Comisión Nacional de Energía Atómica con la Universidad Nacional de Salta y la Universidad de Buenos Aires. Los trabajos de FH se encuadran en los objetivos del P1679 del CIUNSA. Amalio Tapia y Beto Arias colaboraron en las tareas de campo. El manuscrito original fue mejorado sensiblemente gracias a las sugerencias de Silvia Japas y de los árbitros Augusto Rapalini y Graciela Vujovich. El manuscrito corresponde a la versión extensa del resumen presentado en el Simposio Tectónica de las Sierras Pampeanas realizado en el marco de la XIV Reunión de Tectónica que se llevó a cabo en Río Cuarto (Córdoba) en Abril de 2009.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Arrospide, A. 1985. Las manifestaciones de *greisen* de la sierra de Fiambalá, Catamarca. Revista de la Asociación Geológica Argentina 40 (1-2): 97-113.
- Ávila, J. 1982. Estructura y mineralización del yacimiento de estaño Vil-Achay, provincia de Catamarca, Argentina. 5° Congreso Latinoamericano de Geología, Actas 2: 633-651, Buenos Aires.
- Ávila J.C., Rubinstein N., Morello O. y Fogliata A. 2008. Edad y caracterización de una mica de litio asociada a un sistema de *greisen* en mina La Rosario, Sierra de Fiambalá. Revista de la Asociación Geológica Argentina 63(1): 43-48.
- Baalmann, I. 1998. Análisis comparativo de imágenes satelitarias, fotos aéreas y control de campo en relación con las mineralizaciones de la sierra de Fiambalá (Provincia de Catamarca). Revista del Instituto de Geología y Minería, Publicación Especial Universidad Nacional de Jujuy 3: 1-36.
- Burgos, J. 1996. El cizallamiento NO-SE que controla las mineralizaciones de estaño-wolframio y uranio. Delimitaciones de potenciales estructuras en la sierra de Fiambalá y áreas vecinas. Provincia de Catamarca. Informe interno, Comisión Nacional de Energía Atómica (inédito), 6 p., Buenos Aires.
- Burgos, J. 1999. Manifestación Las Termas, distrito uranífero Tinogasta, Catamarca. En Zappettini, E. (ed.) Recursos Minerales de la República Argentina. Segemar, Anales 35: 601-608.
- Burgos, J. y Maidana, J. 1989. Nuevos conceptos de interpretación para el área Los Ratones-Sierra de Fiambalá, provincia de Catamarca. Informe interno Comisión Nacional de Energía Atómica (inédito), 4 p., Buenos Aires.
- Burgos J., Gorustovich S. y Guidi F. 1992. Depósito Las Termas: Modelo filoniano de uranio en metamorfitas pampeanas (Fiambalá, provincia de Catamarca), Argentina. 4° Congreso Nacional y 1° Congreso Latinoamericano de Geología Económica, Actas 1: 13-14, Córdoba.
- Caminos, R. 1979. Sierras Pampeanas Noroccidentales -Salta, Tucumán, Catamarca, La Rioja y San Juan. En Turner, J.C. (ed.) Segundo Simposio de Geología Regional Argentina. Academia Nacional de Ciencias 1: 225 -291, Córdoba.
- Dahlkamp, F. 2009. Typology of Uranium deposits. En Dahlkamp, F. (ed.) Uranium Deposits of the World, Part I: 4-26, Springer, Berlín.
- Fernández Seveso, F. y Tankard, A. 1995. Tectonics and stratigraphy of the Late Paleozoic Paganzo Basin of Western Argentina and its regional implications. En Tankard, A.J., Suarez Soruco, R. y Welsink, H.J. (eds.) Petroleum basins of South America, American Association of Petroleum Geologists, Memoir 62: 285-301, Tulsa.
- Ferreira, L., Molina, J., Guidi, F., Hongn, F., Morello, O., Kirschbaum, A. y Rubinstein, N. 2008a. Aspectos metalogénicos del sector central del depósito de uranio Las Termas, provincia de Catamarca. 17° Congreso Geológico Argentino, Actas: 1485-1486, San Salvador de Jujuy.
- Ferreira, L., Rapalini, A., Geuna, S., Luterstein, R. y Molina, J. 2008b. Estudio geoelectrico y magnetométrico en el depósito de uranio Las Termas, provincia de Catamarca. 17° Congreso Geológico Argentino, Actas: 558-559, San Salvador de Jujuy.
- González Bonorino, F. 1972. Descripción geológica de la Hoja 13c, Fiambalá, provincia de Catamarca. Dirección Nacional de Geología y Minería, Boletín 127, 73 p., Buenos Aires.
- Gorustovich, S. y Guidi, F. 1998. Metalogénesis del uranio en la región sudoccidental de la provincia de Catamarca. Revista del Instituto de Geología y Minería, Publicación Especial, Universidad Nacional de Jujuy 3: 50-59.
- Grissom, G., Debari, S. y Snee, L. 1998. Geology of the Sierra de Fiambalá, northwestern Argentina: Implications for Early Paleozoic Andean tectonics. En Pankhurst, B. y Rapela, C. (eds.) The Proto Andean margin of Gondwana. Geological Society, Special Publication 142: 297-323, London.
- Guidi, F. 1999. Caracterización química y mineralógica del granito Los Ratones. 14° Congreso Geológico Argentino, Actas 2: 167-170, Salta.
- Guidi F., Burgos J., Capuccino, S. y Maidana, J. S. 1990. Depósitos uraníferos filonianos relacionados al basamento ígneo-metamórfico del área Los Ratones, Sierra de Fiambalá, provincia de Catamarca. 11° Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 319-323, San Juan.
- Höckenreiner, M., Söllner, F. y Miller, H. 2003. Dating the TIPA shear zone: an Early Devonian terrane boundary between the Famatinian and Pampean systems (NW Argentina). Journal of South American Earth Sciences 16: 45-66.
- Japas, S., Rubinstein, N. y Morello, O. 2004. Control estructural del distrito minero Los Ratones, sierra de Fiambalá, provincia de Catamarca. En Martino, R. y Gereschi, A. (eds.) Avances en Microtectónica y Geología Estructural, Asociación Geológica Argentina, Publicación Especial Serie D 7: 58-67.
- Maidana, J. 1989. Informe final de beca: Estudio petroológico, geoquímico y radimétrico de base del área "Los Ratones", Sierra de Fiambalá

- Departamento Tinogasta, Catamarca. Informe interno Comisión Nacional de Energía Atómica (inédito), 38 p., Buenos Aires.
- Morello, O. 1990 Estudio mineralógico sobre muestras de la Manifestación Las Termas-Fiambalá, Dpto. Tinogasta. Provincia de Catamarca. Informe Interno Comisión Nacional de Energía Atómica (inédito), DEE 30-90.
- Morello, O. 2008. Edad de la mineralización de uranio. Depósito Las Termas, Fiambalá, Catamarca. 17° Congreso Geológico Argentino, Actas: 641-642, San Salvador de Jujuy.
- Morello, O. y Rubinstein, N. 2000. Los diques alcalinos y subalcalinos del flanco occidental de la sierra de Fiambalá, Catamarca. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 55: 245-250.
- Morello, O. y Rubinstein, N. 2002. Controles de la mineralización de uranio del depósito Las Termas, Catamarca, Argentina. 15° Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 307-308, El Calafate.
- Morello O., Rubinstein N. y Burgos J. 1996. Nuevos avances sobre la metalogénesis de la Manifestación Las Termas-Fiambalá, Argentina. 3° Reunión de Mineralogía y Metalogénesis, Actas: 153-156, La Plata.
- Neugebauer, H., y Miller, H. 1993. Las milonitas de la sierra de Fiambalá: sutura oriental del sistema de Famatina (Catamarca, Argentina). 12° Congreso Geológico Argentino, Actas 3: 32-38, Buenos Aires.
- Page, S., Page, R. y Viruel, M. 1992. El basamento de la sierra de Fiambalá, provincia de Catamarca. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 47: 373-388.
- Penck, W. 1920. Der Südrand der Puna de Atacama (NW-Argentinien). *Abhandlungen Mathematisch-Physikalische Klasse der Akademie der Wissenschaften* 37, 420 p., Leipzig.
- Rubinstein, N. y Morello, O. 1999. Alteración hidrotermal del Granito Los Ratones, Catamarca. 14° Congreso Geológico Argentino, Actas 2: 327-329, Salta.
- Rubinstein, N., Morello, O. y Burgos, J. 2001. El yacimiento de uranio Las Termas, Catamarca, Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 56(1): 91-98.
- Salfity, J. y Gorustovich, S. 1983. Paleogeografía de la cuenca del Grupo Paganzo (Paleozoico superior). *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 28(3-4): 437-453.

Recibido: 25 de febrero, 2010

Aceptado: 3 de diciembre, 2010