



Caracterización petrológica de las rocas subvolcánicas del área Los Gemelos, Cordillera Frontal, San Juan, Argentina

Petrology of the subvolcanic rocks in the Los Gemelos region, Frontal Cordillera, San Juan, Argentina

Mariana S. BUGUEÑO MANRIQUE¹, Lorena C. PREVILEY², María V. BASTÍAS TORRES³, Nora A. RUBINSTEIN⁴

¹ Universidad Nacional de San Juan. Departamento de Geología, Gabinete de Exploración y Evaluación de Recursos Minerales. buguenoms@gmail.com

² Universidad Nacional de San Juan. Departamento de Geología, Gabinete de Exploración y Evaluación de Recursos Minerales. lorepreviley@gmail.com

³ CONICET – Universidad Nacional de San Juan. Gabinete de Exploración y Evaluación de Recursos Minerales, Departamento de Geología, San Juan. verobastias.geo@gmail.com

⁴ IGEBA (UBA-CONICET), Departamento de Ciencias Geológicas, Universidad de Buenos Aires, CABA. narubinstein@gmail.com

RESUMEN

El área Los Gemelos (31°58'26"S, 69°36'7"O) se enmarca en la provincia geológica de Cordillera Frontal de la provincia de San Juan, en la porción sur del segmento de subducción horizontal pampeano de los Andes Centrales. Estudios petro-mineralógicos de muestras de superficie permitieron establecer la presencia de un cuerpo subvolcánico dacítico (Intrusivo Occidental) y otro dacítico-andesítico (Intrusivo Oriental) ambos hospedados en rocas volcánicas de edad pérmica media. Mediante un estudio geoquímico comparativo se pudieron establecer similitudes entre las rocas aflorantes en el área de estudio y rocas miocenas del ámbito de Cordillera Frontal, Principal y Precordillera Occidental. Esto permitió determinar que el Intrusivo Occidental se asemeja a las unidades de Divisadero Sur y Cerro Puntas Negras, ambas asignadas al Mioceno medio. Estos magmas se habrían originado en una corteza de espesor normal donde no hubo fraccionamiento de plagioclasas debido a condiciones de elevada pH_2O . Por otra parte, el Intrusivo Oriental presenta un comportamiento geoquímico similar a El Altar, Chita, Cerro Bola y Cerro Ne-

► Ref. bibliográfica: Bugueño Manrique, M.; Previley, L. C.; Bastías Torres, M. V.; Rubinstein, N. A. 2021. Caracterización petrológica de las rocas subvolcánicas del área Los Gemelos, Cordillera Frontal, San Juan, Argentina. *Acta Geológica Lilloana* 33 (1): 25-42. doi: <https://doi.org/10.30550/j.agl/2021.33.1/2021-05-03>

► Recibido: 10 de agosto 2020 – Aceptado: 3 de mayo 2021



► URL de la revista: <http://actageologica.lillo.org.ar>

► Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución – No Comercial – Sin Obra Derivada 4.0 Internacional.

gro, unidades del Mioceno superior y su mineralogía residual está constituida por anfíbol en transición a granate y evidencia un engrosamiento cortical durante este periodo.

Palabras clave — Petrografía, geoquímica, magmatismo mioceno, Cordillera Frontal.

ABSTRACT

Los Gemelos area (31°58'26"S, 69°36'7"W) is located in the Frontal Cordillera of San Juan province, Argentina, over the southern part of the Pampean flat slab segment of the Central Andes. Petro-mineralogical studies of surface samples allowed establishing the presence of a dacitic and a dacitic-andesitic subvolcanic bodies, both hosted in Middle Permian volcanoclastic rocks. By means of a comparative geochemical study, similarities could be established between the subvolcanic rocks of the study area and Miocene rocks from Frontal and Main Cordillera, and Western Precordillera. This allowed determining that the dacitic-andesitic body (Western Intrusive) resembles the Divisadero Sur and Cerro Puntas Negras units, both assigned to the Middle Miocene. These rocks would have originated in a normal thickness crust where there was no fractionation of plagioclase due to high pH_2O conditions. On the other hand, the dacitic body (Eastern Intrusive) shows geochemical characteristics similar to those of El Altar, Chita, Cerro Bola and Cerro Negro Upper Miocene units with an amphibole in transition to garnet residual mineralogy equilibrated under crustal thickening conditions.

Keywords — Petrography, geochemistry, Miocene magmatism, Frontal Cordillera.

INTRODUCCIÓN

El blanco de exploración denominado Los Gemelos (31°58'26"S, 69°36'7"O) forma parte del Proyecto Minero Cerro Blanco. Se encuentra ubicado en la provincia geológica de Cordillera Frontal, en el flanco oriental de la Cordillera del Tigre, 45 km al suroeste de la localidad de Barreal, San Juan, Argentina. Dicho proyecto comprende diferentes sectores con evidencias de mineralización en superficie como Despoblados, Los Gemelos y Morro del Cobre (Figura 1a). En el año 1968, la Dirección General de Fabricaciones Militares llevó a cabo las primeras tareas de exploración en el área. Éstas incluyeron tareas de muestreo, estudios petrográficos, geoquímica de roca total y tres sondajes en el área del Morro del Cobre, que permitieron identificar un cuerpo intrusivo con efectos de alteración hidrotermal y sulfuros diseminados (Barrionuevo y Reververí, 1968). Posteriormente, la empresa Entropy Resources S.A. (ERSA), emprendió tareas de exploración que permitieron concluir que el Morro del Cobre es un pórfido de Cu-Mo-Au (\pm Ag) con leyes hipogénicas que alcanzan valores de 0,84% Cu y 0,025% Mo (Pugliese, 2012).

Desde el punto de vista geotectónico, el área de estudio (Figura 1b) se emplaza en la porción sur del segmento de subducción subhorizontal (flat slab) pampeano

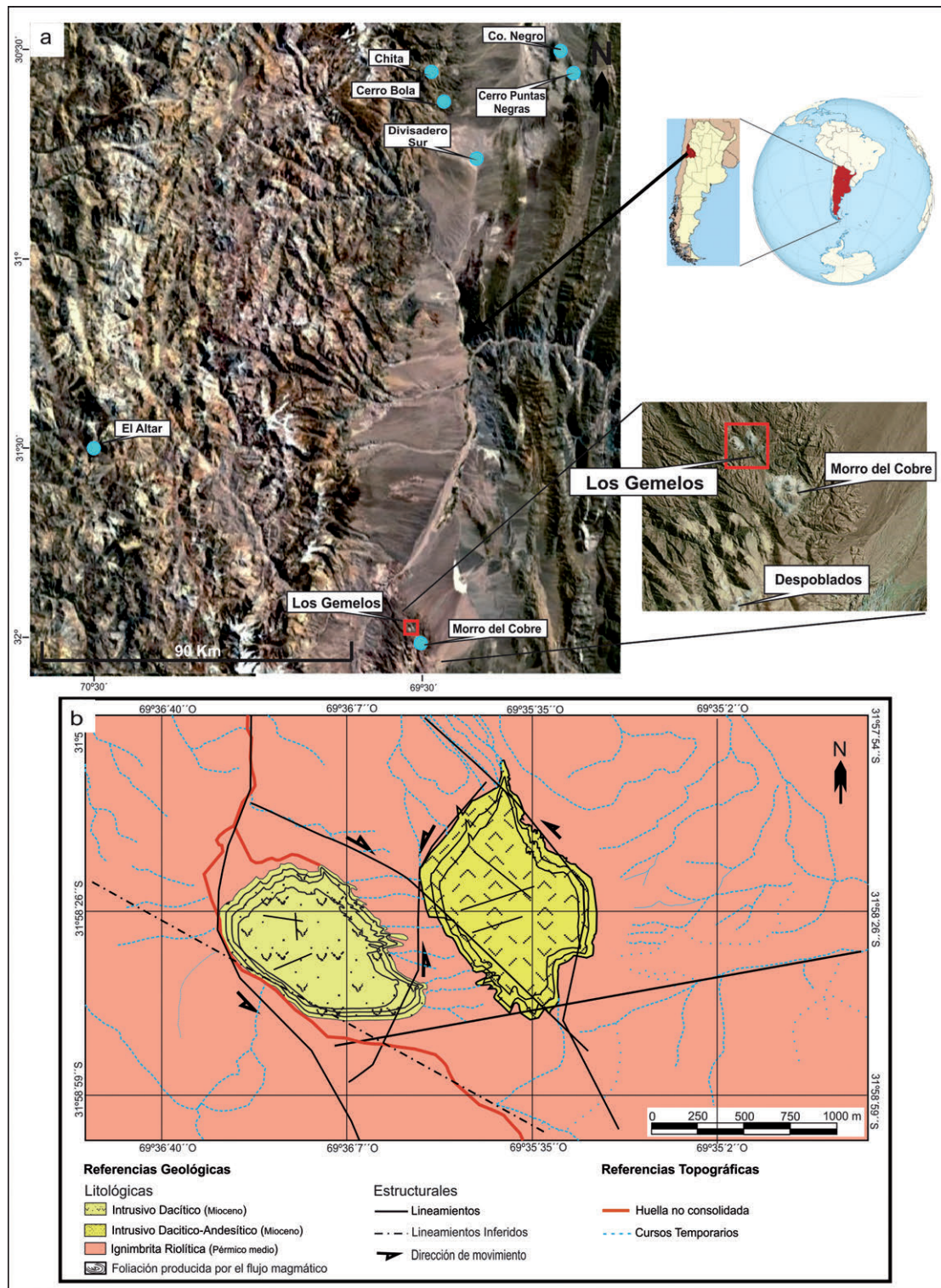


Figura 1. a) Ubicación del blanco de exploración “Los Gemelos” con respecto a otros intrusivos no mineralizados y mineralizados en el sector sur del flat-slab pampeano. b) Mapa geológico del área de estudio (Modificado de Bugueño, 2018).

de los Andes Centrales (28-33°S; Cahill y Isacks, 1992). Diferentes autores han descrito la existencia de numerosos cuerpos intrusivos mesosilícicos mineralizados y no mineralizados emplazados en dicho segmento durante el Ciclo Ándico. En el ámbito de Cordillera Principal y Cordillera Frontal entre los mineralizados, se destaca Quebrada de las Minas (El Altar), Chita y Morro del Cobre entre otros (Maydagan *et al.*, 2014; Poma *et al.*, 2017; Zurcher, 2008; Bertens *et al.*, 2006; Bastías Torres *et al.*, 2019); a los que se suman sistemas de menor desarrollo, no mineralizados, descritos en Cordillera Frontal y Precordillera Occidental como Cerro Bola, Divisadero Sur, Cerro Negro y Cerro Puntas Negras (Wetten, 2005; Cardó *et al.*, 2007; Rubinstein y Koukharsky, 1995; Simon *et al.*, 1997; D'Annunzio y Rubinstein, 2014; Poma *et al.*, 2017).

En el presente trabajo se aborda la caracterización petrográfica y geoquímica de los cuerpos intrusivos subvolcánicos Los Gemelos. Los datos obtenidos son evaluados en un contexto regional a fin de establecer posibles relaciones con el magmatismo cenozoico de Cordillera Principal, Frontal y Precordillera y de estimar su potencial económico.

MÉTODOS DE ESTUDIO

Se realizó un muestreo selectivo de las zonas de interés y de la roca hospedante, recolectando un total de diez muestras para estudios petro-mineralógicos y geoquímicos. El estudio petrográfico macroscópico se llevó a cabo con lupa binocular (Kyowa SDZ) a fin de observar y describir asociaciones minerales diagnósticas, variaciones texturales y ocurrencia de la mineralización en las muestras obtenidas en superficie. Para el análisis microscópico se confeccionaron cortes delgados de las mismas, los que fueron analizados en el laboratorio de mineralogía y petrología del Departamento de Ciencias Geológicas de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (UNSJ), utilizando microscopio petrográfico convencional.

Para el análisis geoquímico se seleccionaron tres muestras representativas de la litología objeto de estudio, Intrusivo Or-4 (3024) e Intrusivo Occ-1 (3026), correspondientes al Intrusivo Oriental y Occidental respectivamente, y otra perteneciente a la roca de caja (R001). Los análisis de roca total, elementos mayores y trazas se realizaron en el laboratorio SGS ARGENTINA S.A., mediante espectrometría de emisión atómica en plasma acoplado inductivamente (ICP-AES) para la determinación de los elementos mayores, y espectrometría de masa en plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) para los elementos traza. Este último método detecta elementos en bajas concentraciones, del orden de ppb-ppm, haciéndolo un análisis ideal para determinar elementos trazas. En todos los casos las muestras fueron analizadas previa fusión con metaborato de litio.

GEOLOGÍA DEL ÁREA

En el área de estudio afloran dos cuerpos ígneos (Figura 1b) que por su posición en el terreno se denominan Intrusivo Occidental y Oriental, respectivamente. Su

eje mayor alcanza 1.000 metros de largo promedio y se destacan en el paisaje por su color gris blanquecino, altura (~ 3.000 m.s.n.m) y resistencia a la erosión. Estos cuerpos muestran marcada foliación magmática en sus bordes (Figura 1b) con valores de buzamiento que superan los 50° promedio y contactos discordantes con la roca de caja, por lo que se infiere que corresponden a stocks. Ambos cuerpos intruyen al miembro superior de la Formación El Horcajo, definido por Mirré (1966) como riolita La Escondida. Si bien la génesis de este miembro ha sido ampliamente debatida, recientemente Rocher *et al.* (2015) determinaron, con base en sus relaciones de campo y estudios petrológicos, que corresponde a una ignimbrita de composición riolítica, rica en cristales y con moderado grado de soldadura de edad pérmica media-guadalupiana (265 ± 2 Ma, U-Pb SHRIMP en circón).

Ignimbrita riolítica La Escondida

Esta unidad presenta amplia distribución areal, en afloramiento es de color rojo violáceo y está afectada por una serie de fracturas rectas o diaclasas de orientación $170^\circ/65^\circ$ SO (Figura 2a). Macroscópicamente presenta aspecto masivo, está constituida por cristaloclastos de cuarzo, feldespato, biotita y minerales máficos (Figura 2b). Los litoclastos están representados por volcanitas y fragmentos de rocas sedimentarias, con tamaños que varían desde escasos milímetros hasta medio metro de largo. La presencia de vitroclastos (Figura 2c) representados por fragmentos de pómez colapsados de hasta 40 cm de largo, es escasa. La matriz es de color rojo y presenta textura pseudo-fluidal. Si bien no se realizó el análisis modal de esta roca, a través de la estimación visual se pudo establecer que está constituida aproximadamente por 15% de fragmentos tamaño bloque (≥ 64 mm de largo), 10% de fragmentos tamaño lapilli (entre 64 y 2 mm de largo) y el resto de los componentes posee tamaño ceniza (≤ 2 mm de largo), por lo que desde el punto de vista granulométrico y según la clasificación de Fisher (1966) esta roca grafica en el límite entre el campo de las tobas y tobas lapillíticas.

Al microscopio (Figura 3a y 3b) exhibe textura eutaxítica e incluye cristaloclastos principalmente de cuarzo con bordes engolfados y microfracturas y de plagioclasa maclados, con bordes corroídos y afectados por una suave alteración sericítica. Además, se observan láminas de biotita flexuradas y secciones basales de hornblenda. Los minerales máficos exhiben segregación de minerales opacos en los bordes y en el centro. Los litoclastos son subangulosos y están representados por volcanitas con textura porfírica y por fragmentos de roca sedimentaria (probablemente vaques). La matriz desvitrificada está compuesta por un agregado microcristalino de cuarzo y feldespato.

Intrusivo Dacítico (Occidental)

Este cuerpo (Figura 2d) presenta morfología oval y su eje mayor se dispone con una orientación predominante NO-SE (320°). La roca tiene color gris claro, presenta textura porfírica y está compuesta en orden decreciente de abundancia por fenocristales

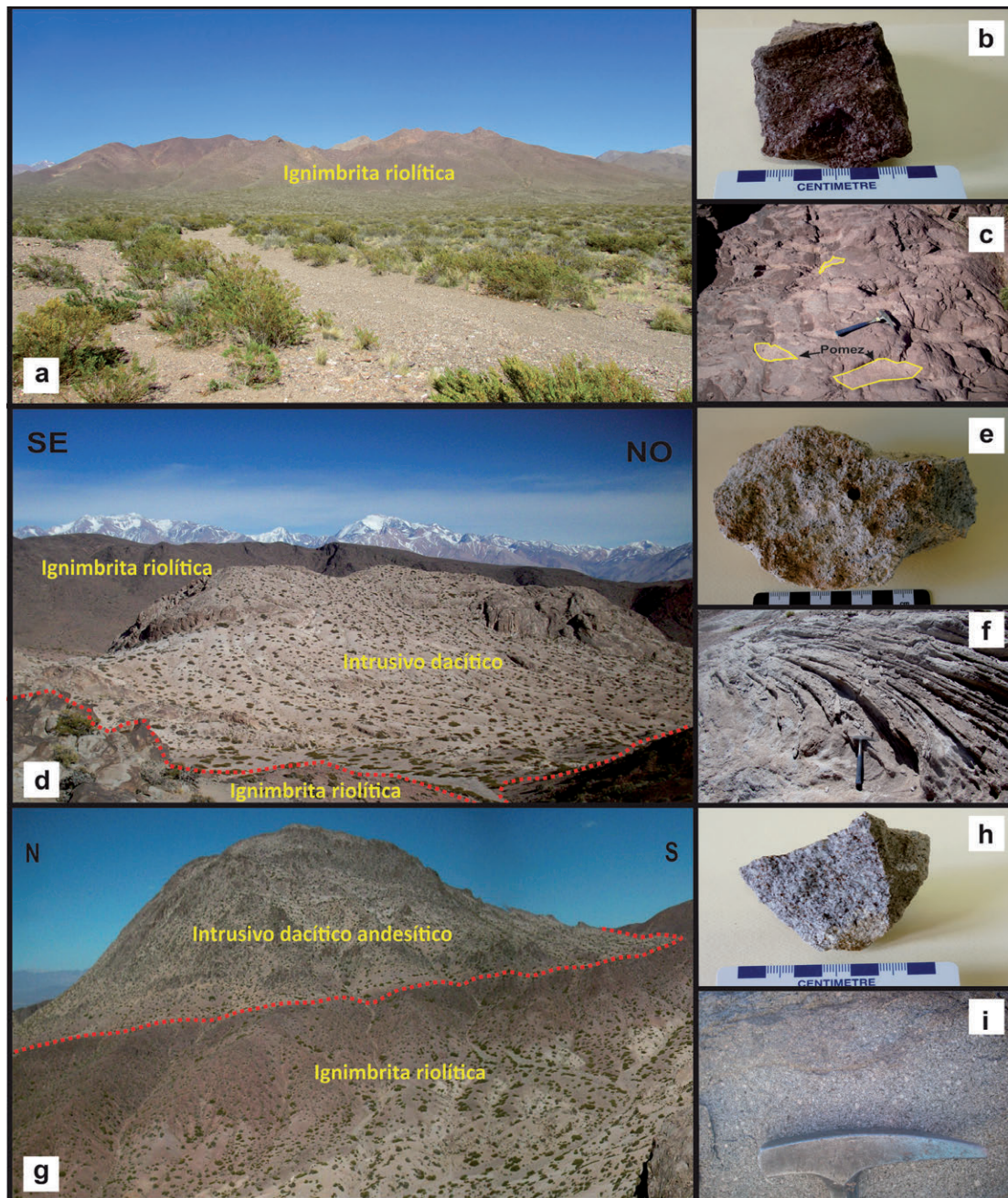


Figura 2. Fotografías a escala mesoscópica y macroscópica de las unidades litológicas del área Los Gemelos: **a-c)** Ignimbrita riolítica La Escondida: **a)** Vista de la unidad en el terreno, **b)** Muestra de mano donde se observa la textura masiva y **c)** Detalle de los fragmentos pumíceos (fiammes). **d-f)** Intrusivo Occidental: **d)** vista del contacto del intrusivo con la Ignimbrita riolítica, **e)** Detalle de los fenocristales de plagioclasa, cuarzo y biotita, inmersos en una pasta afanítica, por sectores con suave alteración sericítico-arcillosa y **f)** Bandedamiento de flujo en el borde del intrusivo. **g-i)** Intrusivo Oriental: **g)** contacto del intrusivo con la roca de caja representado en línea punteada de color rojo, **h)** Detalle de los fenocristales de plagioclasa, anfíbol y biotita inmersos en una pasta afanítica a fanerítica e **i)** Afloramiento adonde se muestra la textura porfírica.

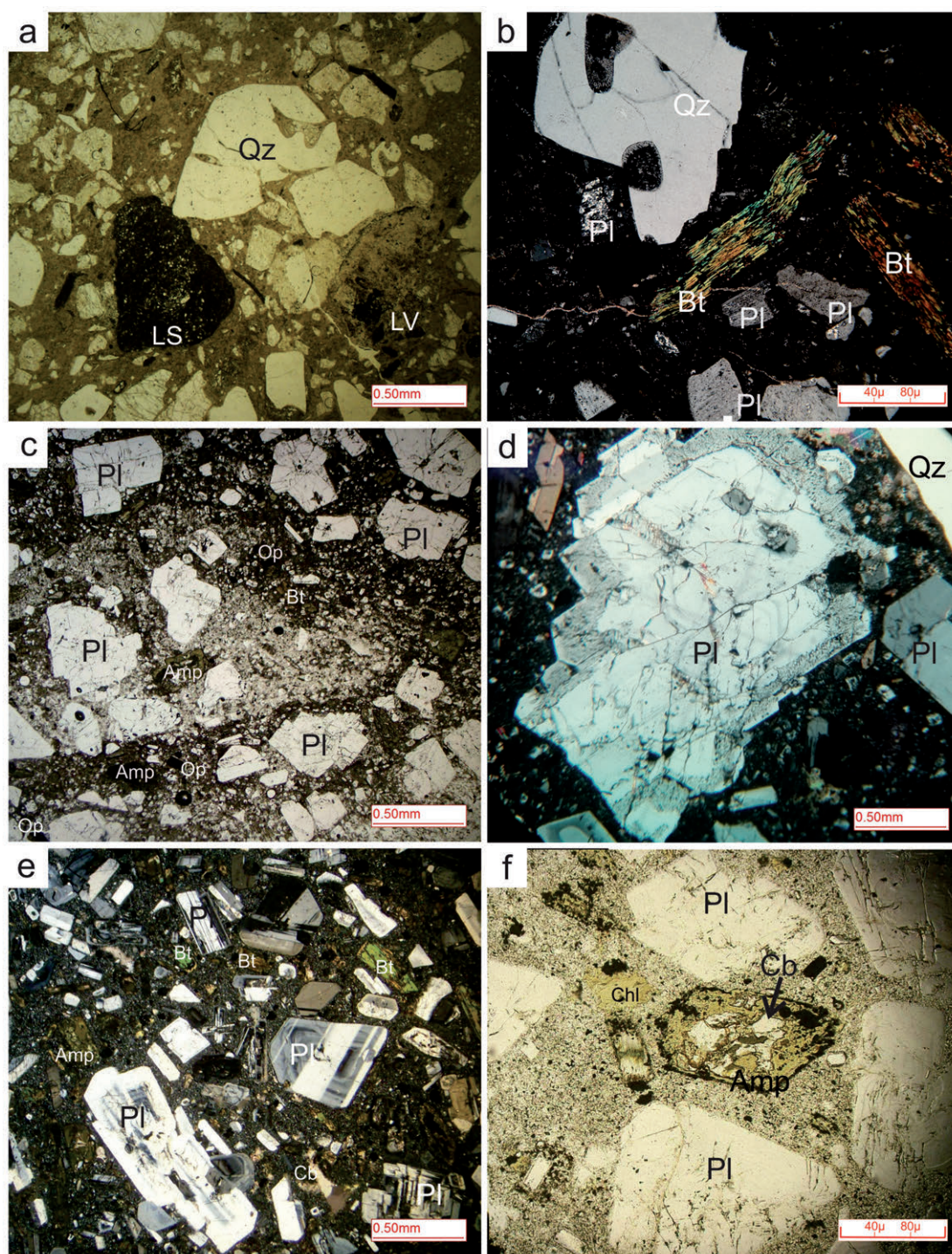


Figura 3. a-b) Ignimbrita riolítica constituida por cristaloclastos de cuarzo (Qz), plagioclasa (Pl) y biotita (Bt), y litoclastos de rocas sedimentarias (LS) y volcanitas porfíricas (LV) inmersos en matriz microcristalina (sin y con analizador, respectivamente). c-d) Intrusivo Occidental: c) textura porfírica compuesta por fenocristales de plagioclasa con bordes corroídos (Pl), biotita (Bt) y anfíbol (Amp) inmersos una pasta microcristalina de composición similar con escasos minerales opacos (Op) finamente diseminados (con analizador) y d) Detalle de fenocristal de plagioclasa (Pl) con el borde reemplazado por agregado sericítico-arcilloso (con analizador); e-f) Intrusivo Oriental: e) textura porfírica compuesta por fenocristales de plagioclasa (Pl), anfíbol (Amp) y biotita (Bt) inmersos en una pasta microcristalina (con analizador) y f) Detalle de anfíbol (Amp) parcialmente reemplazado por carbonato (Cb) y biotita reemplazada por clorita (Chl) (sin analizador). Abreviaturas minerales según Whitney y Evans (2010).

(~3,5 mm de largo promedio) de plagioclasa, cuarzo y biotita inmersos en una pasta afanítica que por sectores presenta una suave alteración sericítico-arcillosa (Figura 2e) y una fina diseminación de piritita \pm magnetita. En el borde del cuerpo porfírico se observa una estructura de bandeamiento de flujo (Figura 2f).

Al microscopio, exhibe textura porfírica (Figura 3c y 3d) que está compuesta por fenocristales subhedrales de plagioclasa zonados, con textura cribada en los bordes y suave sericitización. También se reconoce cuarzo con bordes engolfados, folias de biotita con suave cloritización y bordes reabsorbidos, además se observan secciones basales de hornblenda. Como minerales accesorios se distinguen apatito como inclusión en plagioclasa, titanita y circón. La pasta consiste en un mosaico microcristalino de cuarzo-feldespatos y biotita que por sectores presenta una suave alteración carbonática en forma de parches.

Intrusivo Dacítico-Andesítico (Oriental)

El cuerpo presenta morfología oval (Figura 2g) con su eje mayor elongado en dirección NNO-SSE (350°), presenta textura porfírica y está compuesto en la zona de borde por fenocristales (< 6 mm de largo promedio) de plagioclasa, anfíbol y biotita inmersos en una pasta afanítica a fanerítica de color gris verdoso, mientras que en la parte central tiene color gris blanquecino, presenta fenocristales de cuarzo, plagioclasa, biotita, anfíbol y escasa bornita y arsenopirita diseminadas (Figura 2h y 2i). Esta variación en la composición mineralógica del intrusivo podría interpretarse como un cambio de facies (Llambías, 2015), que en este caso gradúa desde fenoandesítica en los bordes a fenodacítica en la parte central del intrusivo.

Al microscopio, la roca presenta textura porfírica (Figura 3e) y está compuesta por fenocristales euhedrales de plagioclasa con bordes definidos, con zonación y/o macla y suave a moderada alteración sericítico-arcillosa y carbonática. También se observan secciones basales y prismáticas de hornblenda parcialmente reemplazadas por tremolita-actinolita + clorita \pm carbonato y láminas de biotita flexuradas y parcialmente cloritizadas (Figura 3f). La pasta consiste en un agregado microcristalino compuesto por plagioclasa, anfíbol y cuarzo. Por sectores se observa reemplazada por clorita + carbonatos \pm tremolita-actinolita \pm minerales arcillosos \pm minerales opacos. La facies fenodacítica presenta semejanzas texturales y composicionales con la andesítica, diferenciándose de ésta última por la presencia de fenocristales de cuarzo y disminución en el contenido de minerales máficos, especialmente anfíbol. El cambio composicional gradual entre ambas facies indicaría que el intrusivo fue emplazado como un pulso discreto, aunque heterogéneo.

GEOQUÍMICA

Los resultados obtenidos del análisis geoquímico realizado sobre las rocas aflorantes en el área de estudio se presentan en la Tabla 1.

De acuerdo al diagrama TAS (Figura 4a) el Intrusivo Oriental clasifica como andesita, el Intrusivo Occidental como traquidacita y la roca de caja como riolita.

Tabla 1. Resultado de los análisis químicos de elementos mayoritarios, minoritarios (%), trazas y tierras raras (ppm) para las rocas subvolcánicas y volcanoclásticas del área de estudio. Se indica el límite de detección del método analítico empleado.

Muestras		Intrusivo Oriental 3024	Intrusivo Occidental 3026	Ignimbrita R001	Muestras		Intrusivo Oriental 3024	Intrusivo Occidental 3026	Ignimbrita R001
Coordenadas (Lat. S, Long. O)		31°58'31" 69°35'42"	31°58'39" 69°36'19"	31°57'39" 69°36'27"	Coordenadas (Lat. S, Long. O)		31°58'31" 69°35'42"	31°58'39" 69°36'19"	31°57'39" 69°36'27"
OM-ET-TR / Límite de detección					OM-ET-TR / Límite de detección				
SiO ₂	0,01	60,61	65,72	71,8	Nd	0,1	21,3	16,7	29,7
Al ₂ O ₃	0,1	18,02	15	13,7	Sm	0,1	3,6	3,4	5,38
Fe ₂ O ₃	0,01	4,33	2,62	2,11	Eu	0,05	1,88	1,69	0,9
CaO	0,01	4,77	3,61	1,45	Gd	0,05	3,01	2,62	4,48
MgO	0,01	1,66	0,85	0,3	Tb	0,05	0,32	0,33	0,68
Na ₂ O	0,01	5,82	6,42	3,65	Dy	0,01	1,54	1,62	3,81
K ₂ O	0,01	1,77	3,22	4,2	Ho	0,05	0,3	0,35	0,91
MnO	0,01	0,08	0,06	0,05	Er	0,05	0,82	0,85	2,81
TiO ₂	0,01	0,73	0,37	0,28	Tm	0,05	0,12	0,18	0,41
P ₂ O ₅	0,01	0,33	0,14	0,08	Yb	0,1	0,6	1,1	2,92
Cr ₂ O ₃	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	Lu	0,01	0,1	0,18	0,45
LOI	0,2	1,87	1,52	1,4	Mo	0,05	9,1	7,03	0,4
Ba	10	653	818	789	Cu	0,5	12	13,7	1,2
Be	0,1	<1	<1	4	Pb	0,5	11,9	11,7	4,4
Co	0,1	7,7	4,8	1,1	Zn	5	86	78	28
Cs	0,05	0,9	0,9	4	Ni	0,5	15	6,4	0,6
Ga	0,1	25	25	16,8	As	1	3	1	4
Hf	0,02	4	4	5,8	Cd	0,02	0,1	0,02	<0,1
Nb	0,1	6	6	10,1	Sb	0,05	0,38	0,22	0,2
Rb	0,2	30,5	43,2	109,9	Bi	0,04	<0,1	<0,1	<0,1
Sn	0,3	<1	<1	2	Ag	0,02	<0,1	0,1	<0,1
Sr	10	1132	806,8	94,4	Ti	0,01	<0,1	<0,1	<0,1
Ta	0,05	0,6	0,5	0,7	Se	2	<0,5	2	<0,5
Th	0,2	2	1,9	8,6	Sm/Yb	---	6	3,1	1,7
U	0,1	0,47	0,87	1,3	La/Sm	---	5,1	4,4	6,7
V	1	46	7	12	Ba/Ta	---	1088,3	1636	888,75
W	0,1	6	0,2	0,5	La/Ta	---	30,33	30	46
Zr	10	126,3	78,5	217	Eu/Eu*	---	1,74	1,73	1,81
Y	10	7,1	8,1	22,4	La/Yb	---	30,33	13,63	11,25
La	0,1	18,2	15	36,6	Sr/Y	---	159,43	99,06	2,46
Ce	0,5	38,1	33,7	63,6	(La/Yb)N	---	20,45	9,19	7,58
Pr	0,05	5,01	4,16	8,09	(La/Sr)N	---	6,22	7,19	201,2

Los intrusivos miocenos son mesosilícicos (61,77 y 62,26 % SiO₂ en base anhidra) y metaluminoso ($A/CNK < 1$). El Intrusivo Oriental clasifica como subalcalino, mientras que el Intrusivo Occidental se proyecta en el límite entre los campos subalcalino y alcalino de Irvine y Baragar (1971) (Figura 4a). Composicionalmente se asemejan a otras volcanitas miocenas de Cordillera y Precordillera, de composición dominan-

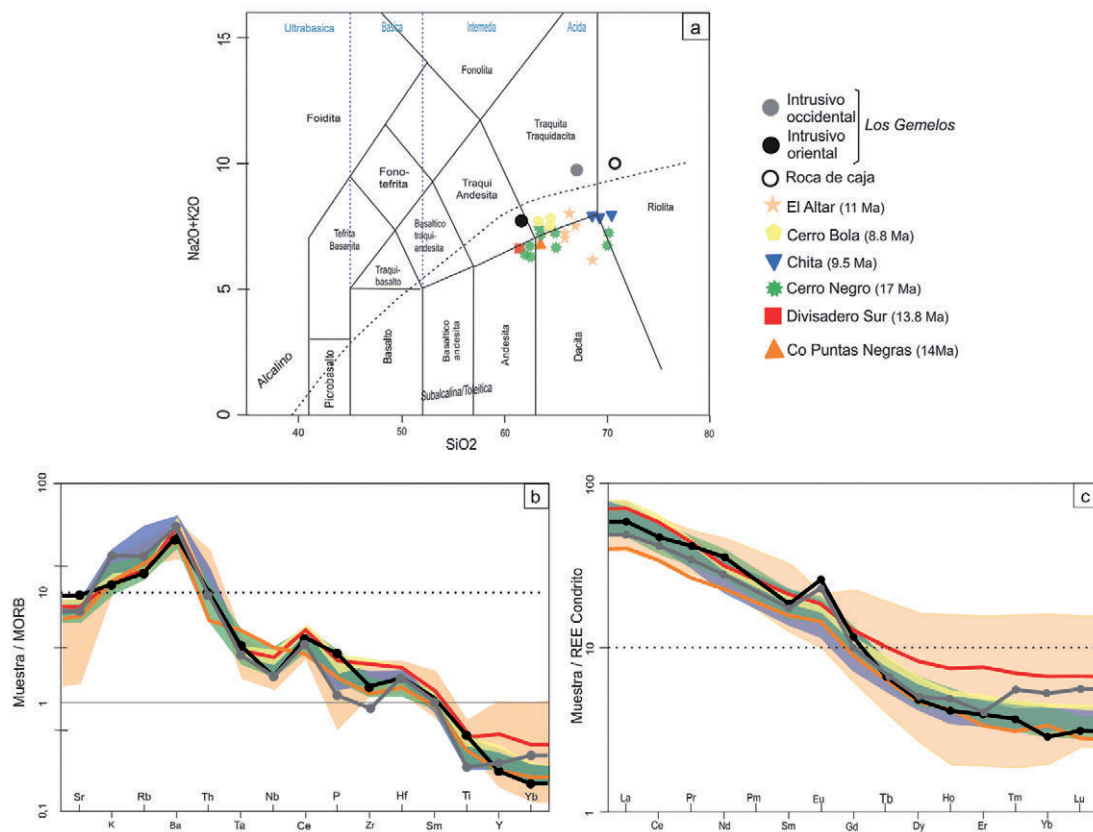


Figura 4. a) Diagrama de clasificación TAS (Le Bass, *et al.*, 1986), con división entre las series alcalina y subcalina (Irvine y Baragar, 1971). b) Diagrama multielemento normalizado a MORB según el orden y los factores de normalización de Pearce (1983). c) Diagrama de tierras raras normalizado a condrito (Boynton, 1984). En los gráficos se representan las muestras de rocas pertenecientes al área Los Gemelos y de otras rocas volcánicas del ámbito de Cordillera y Precordillera. Se incluyen datos de El Altar (Maydagan *et al.*, 2011); Cerro Bola, Divisadero Sur, Chita, Cerro Puntas Negras y Cerro Negro (Poma *et al.*, 2017).

temente andesítico-dacítico, subcalinas (Figura 4a) y de carácter metaluminoso ($A/CNK > 1$).

El diagrama multielemento de los intrusivos miocenos (Figura 4b), exhibe un patrón aserrado y pendiente negativa, lo que evidencia un enriquecimiento relativo en los elementos litófilos de alto radio iónico (LILE) con respecto a los elementos de las tierras raras y los elementos de alto potencial iónico (HFSE). Por otra parte, se destaca una marcada anomalía negativa de Nb y Ta, característica típica de magmas de arco calco-alcalinos. La ausencia de las anomalías negativas de P y Ti en el Intrusivo Oriental podría deberse a que no hubo fraccionamiento temprano de apatita y Ti-magnetita. Por otro lado, en el intrusivo occidental se observa una anomalía negativa en Rb que podría ser resultado de la alteración sericítico-arcillosa que afecta a esta roca. En el diagrama de tierras raras (Figura 4c) se observa que todas las muestras analizadas están enriquecidas con respecto al condrito, sin embargo se reconoce un moderado enriquecimiento relativo en las tierras raras livianas (LREE) con respecto a las pesadas (HREE). El Intrusivo Oriental presenta una curva de fuerte pendiente con una anomalía positiva de Eu (Figura 4c), altas relaciones La/Yb y Sm/Yb y $La/Ta > 20$ (Tabla 1). Por otra parte, el Intrusivo Occidental presenta

una curva de moderada pendiente, con una anomalía positiva de Eu (Figura 4c), moderadas relaciones La/Yb y Sm/Yb y $La/Ta > 20$ (Tabla 1). Las unidades seleccionadas del ámbito de Cordillera y Precordillera presentan por lo general altas relaciones La/Yb (entre 15 y 20) excepto Divisadero sur y Cerro Puntas Negras (~ 10), relaciones Sm/Yb moderadas a altas (entre 3 y 6), anomalías positivas de Eu y $La/Ta > 20$, con excepción del Cerro Puntas Negras (Figuras 4d y 5a).

DISCUSIÓN

Considerando que los intrusivos, objeto de estudio están emplazados en el miembro superior de la Formación El Horcajo, definido por Mirré (1966) como riolita La Escondida y asignado al Pérmico medio por Rocher *et al.* (2015), puede considerarse que su edad es post pérmica-triásica. Por su textura y contactos con la roca de caja se puede clasificar a estos cuerpos como intrusivos subvolcánicos, probablemente de tipo stocks.

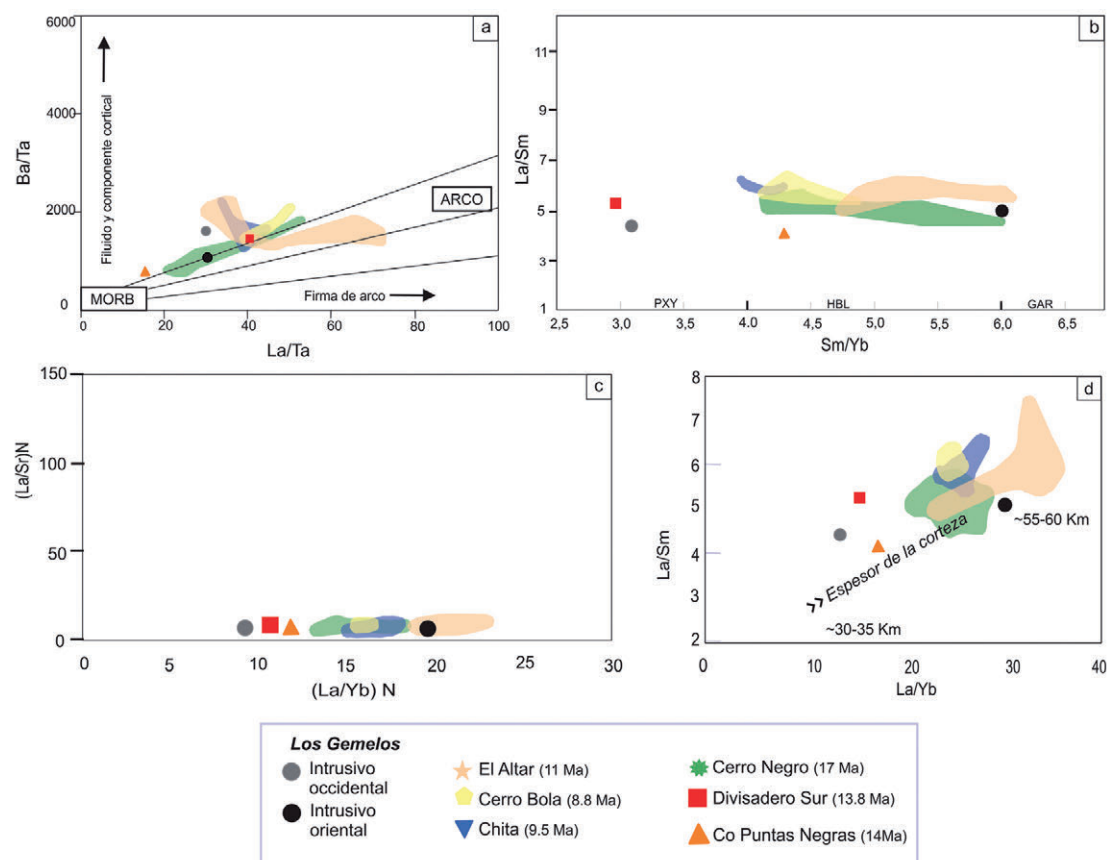


Figura 5. a) Diagrama La/Ta vs. Ba/Ta (Kay y Mpodozis, 2002). b) Diagrama Sm/Yb vs. La/Sm (Kay *et al.*, 1991) PXY (píroxeno), HBL (hornblenda), GAR (granate). c) Diagrama (La/Yb)N vs (La/Sr)N (Kay *et al.*, 1991). En los gráficos se representan las muestras de rocas pertenecientes al área Los Gemelos y de otras rocas volcánicas del ámbito de Cordillera y Precordillera. Se incluyen datos de El Altar (Maydagan *et al.*, 2011); Cerro Bola, Divisadero Sur, Chita, Cerro Puntas Negras y Cerro Negro (Poma *et al.*, 2017).

Ambos intrusivos presentan semejanzas en cuanto a su yacencia, textura, composición mineralógica y química con rocas subvolcánicas miocenas, que afloran en el ámbito de Cordillera Frontal, Principal y Precordillera Occidental. A unos 5 km al sur del área de estudio, Bastías Torres *et al.* (2019) describen en el área del Morro del Cobre ($32^{\circ}0'3,86''S$, $69^{\circ}34'14,88''O$) un pórfiro andesítico pre-mineral ($14,8 \pm 0,4$ Ma, K/Ar en roca total, JICA-MMAJ, 1999) intruido por un pórfiro dacítico sin-mineral ($9,66 \pm 0,43$ Ma, U/Pb SHRIMP en circones, Bastías Torres *et al.*, 2021), ambos hospedados en rocas volcánicas pérmicas. En dirección norte, en el ámbito de Cordillera Frontal, Wetten (2005) describe para el Cerro Bola ($30^{\circ}35'S$, $69^{\circ}30'O$) una serie de cuerpos subvolcánicos de $8,8 \pm 0,3$ Ma (K-Ar en roca total), con textura porfírica y composición andesítica; en tanto que Poma *et al.* (2017) describen para el mismo sitio rocas porfíricas de composición dacítica de $4,6 \pm 0,8$ Ma (K-Ar en anfíbol). Bastías (1991) describe para el área de la Quebrada de Chita ($30^{\circ}32'56''S$; $69^{\circ}33'02''O$), cuerpos porfíricos andesíticos y dacíticos mineralizados emplazados en rocas del Grupo Choiyoi para los cuales Jones *et al.* (2016) obtuvieron edades de $9,5 \pm 0,18$ Ma y $9,4 \pm 0,18$ Ma (U-Pb en circón). Por otra parte, en el sector occidental de Precordillera Occidental en el Valle de Iglesia, Poma *et al.* (2017) describen un conjunto de andesitas y dacitas aflorantes en el área del Cerro Negro de 17 ± 5 Ma (K-Ar en biotita; Leveratto, 1976). Hacia el sur afloran rocas piroclásticas conocidas como Cerro Puntas Negras de $11 \pm 0,5$ Ma (K-Ar, en roca total, Kay y Abruzzi, 1996) y en dirección sudoeste se emplazan las dacitas de Divisadero Sur de $13,8 \pm 1,0$ Ma (K-Ar en anfíbol, Poma *et al.*, 2017). En Cordillera Principal, en el sector norte del proyecto El Altar, Maydagan *et al.* (2017) describen en el área de la Quebrada de la Minas ($31^{\circ}29'S$, $70^{\circ}30'O$) la presencia de un stock dacítico mineralizado de $11,91 \pm 0,33$ Ma (LA-ICPMS U-Pb en circón).

Las rocas del área de estudio presentan altas relaciones La/Ta (> 20) lo que es propio de una fuente de arco (Hickey *et al.*, 1986; Kay y Mpodozis 2002; Kay, 2006), tal como ocurre con otras rocas de edad miocena en el ámbito de Cordillera Principal, Frontal y Precordillera Occidental (Figura 5a).

El comportamiento geoquímico del Intrusivo Occidental se asemeja al de Divisadero Sur (13,8 Ma) y al de Cerro Puntas Negras (14 Ma). Estas unidades presentan bajas a moderadas relaciones Sm/Yb (Figura 5b), bajas relaciones La/Yb y La/Sr (Figura 5c) y una anomalía positiva de Eu. Las relaciones obtenidas para estas unidades indicarían que no hubo fraccionamiento de plagioclasa en la fuente, a pesar de que las condiciones de profundidad de la cámara son aptas para su fraccionamiento (Figura 5d, ver Loucks, 2014). La ausencia de plagioclasa residual podría deberse a condiciones de pH_2O elevadas (ver Frey *et al.*, 1978; Kay *et al.*, 1991; Lang y Titley, 1998 y Richards *et al.*, 2001). Por otra parte, el Intrusivo Oriental, junto con el resto de las unidades consideradas (El Altar, Chita, Cerro Bola y Cerro Negro), presentan altas relaciones Sm/Yb (Figura 5b), un incremento de la relación La/Yb vs una baja relación La/Sr (Figura 5 c) y una anomalía positiva de Eu. Según Kay *et al.* (1991), valores altos de $(La/Yb)_N$ y bajos valores de $(La/Sr)_N$, asociados a pequeñas anomalías positiva o nulas de Eu, sugieren que no hubo fraccionamiento de plagioclasa en la fuente lo que es consistente con la mineralogía residual de anfíbol en transición a granate (Figura 5b). Teniendo en cuenta el comportamiento del conjunto de

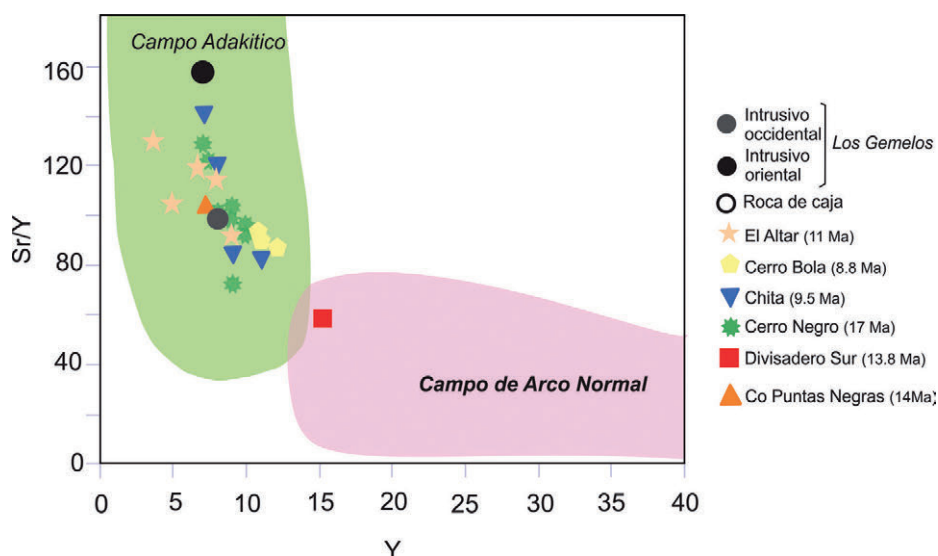


Figura 6: Diagrama de Y vs. Sr/Y que discrimina los magmas de arco normal y los de adakita (Castillo, 2006). Se representan las muestras del área de estudio y se incluyen datos de El Altar (Maydagan *et al.*, 2011); Cerro Bola, Divisadero Sur, Chita, Cerro Puntas Negras y Cerro Negro (Poma *et al.*, 2017).

muestras analizadas se observa un cambio en la mineralogía residual que varía de piroxeno a anfíbol-granate, lo que evidencia un incremento en la profundidad de la cámara magmática. Además, se observa en general un incremento en la relación La/Sm vs La/Yb conforme disminuye la edad de los intrusivos (Figura 5d), lo que estaría indicando un incremento del espesor cortical en el tiempo (Poma *et al.*, 2017). Solamente el intrusivo de Cerro Negro por su edad escaparía a esta tendencia, lo que podría deberse a que su edad esté sobreestimada (Poma *et al.*, 2017).

De la Figura 6 se desprende que el intrusivo oriental presenta el valor más alto para la relación Sr/Y (~160) del conjunto analizado. Acorde a Profeta *et al.* (2015) las relaciones Sr/Y y La/Yb son indicativas de la profundidad promedio en que se produjo la diferenciación magmática y de la mineralogía residual en la fuente, respectivamente. Postulan además que en arcos modernos existe una correlación positiva entre las relaciones antes mencionadas asociada a eventos de engrosamiento cortical. De igual manera Chiaradia y Caricchi (2017) refieren que el espesor de la corteza ejerce un control de primer orden sobre la variabilidad de la relación Sr/Y de los magmas de arco, de acuerdo a las fases minerales que fraccionan Sr (plagioclasa) e Y (anfíbol o granate). De hecho, la estabilidad de estas fases minerales es función de la presión a la que evoluciona el magma, que depende a su vez del grosor de la corteza.

Las características geológicas y petrológicas del magmatismo neógeno de los intrusivos del área de Los Gemelos y con los cuales se compara, están determinadas por el contexto geodinámico y evolución del segmento de subducción horizontal de los Andes Centrales (28°-33°S). La subhorizontalización de la placa de Nazca y los procesos derivados de este fenómeno generaron variaciones en las características geoquímicas espaciales y temporales del magmatismo cenozoico, que fueron docu-

mentadas en numerosos trabajos (Kay *et al.*, 1991; Stern y Skewes, 1995; Kay y Mpodozis, 2001 y 2002; Bissig *et al.*, 2003; Litvak *et al.*, 2007; D'Annunzio y Rubinstein, 2014; D'Annunzio *et al.*, 2018). Durante el Mioceno temprano tuvo lugar un régimen transtensivo a compresivo (20-16 Ma), seguido de un régimen netamente compresivo que dio lugar a engrosamiento cortical (<13-9 Ma). Este evento fue coetáneo con la migración y expansión continua hacia el este del frente magmático (Kay y Mpodozis, 2002 y Litvak *et al.*, 2007). Las características geoquímicas de las rocas analizadas en la presente contribución son consistentes con un ambiente geodinámico de engrosamiento cortical, que ha sido documentado desde Cordillera Principal (Maydagan *et al.*, 2017) hasta Precordillera Occidental inclusive (Poma *et al.*, 2017), lo que respalda la probable edad miocena del magmatismo del área de estudio.

CONCLUSIÓN

Los cuerpos intrusivos subvolcánicos del área Los Gemelos presentan semejanzas en cuanto al modo de yacer, textura, composición mineralógica y geoquímica con rocas subvolcánicas de edad miocena que afloran en el ámbito de la Cordillera y Precordillera Occidental de la provincia de San Juan. Del análisis geoquímico realizado se pudo establecer que los intrusivos estudiados proceden de magmas equilibrados en cortezas de diferente espesor, con distinta mineralogía residual, correspondiéndole al Intrusivo Occidental espesores de corteza normal (~30 km) y una mineralogía residual en equilibrio con piroxeno, mientras que al Intrusivo Oriental se asocia una corteza engrosada (~45 km) y una mineralogía residual en equilibrio con anfíbol en transición a granate. Dado que el comportamiento geoquímico del Intrusivo Occidental es análogo al de los intrusivos de Cerro Puntas Negras ($14,9 \pm 1.3$ Ma) y Divisadero Sur ($13,8 \pm 1.0$ Ma) y el del Intrusivo Oriental se asemeja al comportamiento de los intrusivos de la región norte del Altar ($11,91 \pm 0,33$ Ma), Chita ($9,5 \pm 0,18$ Ma), Cerro Bola ($8,8 \pm 0,3$ Ma) se podría establecer de forma preliminar que el Intrusivo Occidental es más antiguo que el Intrusivo Oriental. Es importante destacar que la edad de los intrusivos mineralizados analizados en este trabajo cae en el rango de los 11,9 a 9,5 Ma, por lo que se puede inferir que el pulso mineralizante en la región tuvo lugar en este periodo temporal, lo que desde el punto de vista económico hace más atractivo al Intrusivo Oriental, de confirmarse su edad.

AGRADECIMIENTOS

Las autoras agradecen a la empresa ENTROPY RESOURCES S.A. por el apoyo logístico en las tareas de campo, al Sr Linares y especialmente al Lic. Jorge Bastías por compartir sus vastos conocimientos sobre el Proyecto Cerro Blanco, como así también agradecen las sugerencias brindadas por parte de los revisores que contribuyeron significativamente en la calidad del trabajo. Esta investigación fue financiada con el proyecto CICITCA- Resolución 021/18-CS.

BIBLIOGRAFÍA

- Barrionuevo, L.A. y Reverberi, O.V. 1968. *Informe Final Zona El Leoncito, Área de Reserva N°49, Provincia de San Juan, República Argentina*. Dirección General de Fabricaciones Militares, 11 p (Inédito).
- Bastías, H.E. 1991. Complejo volcánico Olivares: un gran evento magmático mioplioceno en los Andes a 30° de latitud sur. 6° Congreso Geológico chileno. Resúmenes expandidos: 520-524. Chile.
- Bastías Torres, M.V, Rubinstein, N. y Previley, L. 2019. El yacimiento Morro del Cobre, San Juan, Argentina: estudio de la petrografía y asociaciones de alteración hidrotermal. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 76 (2): 109-114.
- Bastías Torres, M.V, Rubinstein, N., Previley, L. y Poole, G. 2021. Petrogenesis of the Miocene Morro del Cobre Cu (Mo)-porphyry deposit in the Frontal Cordillera over the Pampean flat-slab segment, Argentina. *Journal of South American Earth Science*. doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103343
- Bertens, A., Clark, A., Barra, F. y Deckart, K. 2006. Evolution of the Los Pelambres-El Pachón porphyry copper-molybdenum district, Chile/Argentina. 11° Congreso Geológico Chileno vol. 2, pp 179-181.
- Bissig, T., Clark, A.H., Lee, J.K.W. y von Quadt, A. 2003. Petrogenetic and metallogenic responses to Miocene slab flattening: New constraints from the El Indio-Pascua Au-Ag-Cu Belt, Chile/Argentina. *Mineralium Deposita* 38: 844-862.
- Boynton, W.V. 1984. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. En: Hendenon, P. Ed. *Rare Earth Element Geochemistry*, pp.63-114. Elsevier.
- Bugueño Manrique, M.S. 2018. *Caracterización Petrográfica, Geoquímica y Metalogénica del área Los Gemelos, Proyecto Cerro Blanco, Calingasta, San Juan*. Trabajo Final de Licenciatura. Universidad Nacional de San Juan (Inédito) 90 p. San Juan, Argentina.
- Cahill, T. y Isacks, B. 1992. Seismicity and shape of the subducted Nazca Plate. *Journal of Geophysical Research* 97: 503-529.
- Cardó R., Díaz I.N., Limarino C.O., Litvak V.D., Poma S. y Santamaria G. 2007. *Hoja Geológica 2969-III, Malimán, provincias de San Juan y La Rioja*. Boletín 320 ed. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino, Buenos Aires.
- Castillo, P.R., 2006. An overview of adakite petrogenesis. *Chinese Science Bulletin* 51 (3): 257-268.
- Chiaradia, M. y Caricchi, L 2017. Stochastic modelling of deep magmatic controls on porphyry copper deposit endowment. *Scientific Reports*, vol. 7, p. 44523.
- D'Annunzio, M.C y Rubinstein, N. 2014. Caracterización Geoquímica de las rocas pertenecientes al Complejo Ígneo Gualcamayo, Precordillera de San Juan. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 71 (3): 369-377.
- D'Annunzio, M.C., Rubinstein, N.A. y Rabbia, O., 2018. Petrogenesis of the Gualcamayo Igneous Complex: Regional implications of Miocene magmatism in the Precordillera over the Pampean flat slab segment, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*. doi.org/10.1016/j.jsames.2018.06.012

- Fisher, R.V. 1966. Mechanism of deposition from pyroclastic flows. *American Journal Science* 264: 350-363.
- Frey, F.A., Chappell, B.W. y Roy, S.D. 1978. Fractionation of rare-earth elements in the Tuolumne intrusive series, Sierra Nevada Batholith, California. *Geology* 6: 239-242.
- Hickey, R.L., Frey, F. A., Gerlach, D. C. y López Escobar, L. 1986. Multiple sources for basaltic arc rocks from the southern volcanic zone of the Andes (348–418S): trace element and isotopic evidence for contributions from subducted oceanic crust, mantle and continental crust. *Journal of Geophysical Research* 91: 5963–5983.
- Irvine, T. y Baragar, W. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences* 8: 523-548.
- JICA-MMAJ. 1999. Informe de la exploración de mineral en la región Cordillera Oriental Andina, República Argentina.
- Jones, R.E., Kirstein, L.A., Kasemann, S.A., Litvack, V.D., Poma, S., Alonso, R.N., Hinton, R., EIMF. 2016. The role of changing geodynamics in the progressive contamination of Late Cretaceous to Late Miocene arc magmas in the southern Central Andes. *Journal Geophysical Sciences* 262: 169-191.
- Kay, S.M., Mpodozis, C., Ramos, V.A. y Munizaga, F. 1991. Magma source variations for mid-late Tertiary magmatic rocks associated with a shallowing subduction zone and a thickening crust in the central Andes (28 to 33°S). En: Harmon, R.S. y Rapela, C.W. Eds. Andean Magmatism and its Tectonic Setting. *Geological Society of America Special Papers* 265: 113-137. Boulder.
- Kay, M.S. y Abbruzzi, J.M. 1996. Magmatic evidence for neogene lithospheric evolution of the Central Andes “flat slab” between 30°S and 32°S. *Tectonophysics* 259: 15-28.
- Kay, S.M. y Mpodozis, C. 2001. Central Andean ore deposits linked to evolving shallow subduction systems and thickening crust. *Geological Society of America Today* 11: 4-9.
- Kay, S. M. y Mpodozis, C. 2002. Magmatism as a probe to the Neogene shallowing of the Nazca plate beneath the modern Chilean flat-slab. *Journal of South American Earth Sciences* 15(1): 39-57.
- Kay, S. M. 2006. Chemical and isotopic evidence for modification of the Central Andean arc mantle by crust removed by forearc subduction erosion. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 170: A385–A385.
- Lang, J.R. y Titley, S.R. 1998. Isotopic and geochemical characteristics of Laramide magmatic systems in Arizona and implications for the genesis of porphyry copper deposits. *Economic Geology* 93(2): 138-170.
- Le Bas, M., Le Maitre, R., Streckeisen, A. y Zanettin, B. 1986. A Chemical Classification of Volcanic Rocks Based on the Total Alkali-Silica Diagram. *Journal of Petrology* 27(3): 745-750.
- Leveratto, M.A. 1976. Edad de intrusivos cenozoicos en la Precordillera de San Juan y su implicancia estratigráfica. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 31(1): 53-58.

- Litvak, V.D., Poma, S. y Kay, S.M. 2007. Paleogene and Neogene magmatism in the Valle del Cura region: a new perspective on the evolution of the Pampean flat slab, San Juan province, Argentina. *Journal of South American Earth Science* 24: 117-137.
- Llambías, E.J. 2015. *Geología de los cuerpos ígneos*. Edición especial 70° Aniversario. Asociación Geológica Argentina-Serie B-Didáctica y complementaria (4ta Edición) N°32. ISSN 0328-2759.
- Loucks, R.R. 2014. Distinctive composition of copper-ore-forming arc magmas. *Australian Journal of Earth Sciences* 61: 5-16.
- Maydagán, L., Franchini, M., Chiaradia, M., Pons, J., Impiccini, A., Toohey, J. y Rey, R. 2011. Petrology of the Miocene igneous rocks in the Altar region, main Cordillera of San Juan, Argentina. A geodynamic model within the context of the Andean flat-slab segment and metallogenesis. *Journal of South American Earth Sciences* 32: 30-48.
- Maydagán, L., Franchini, M., Chiaradia, M., Dilles, J. y Rey, R. 2014. The Altar porphyry Cu-(Au-Mo) deposit (Argentina): a complex magmatic-hydrothermal system with evidence of recharge processes. *Economic Geology* 109: 621-641.
- Maydagan, L., Franchini, M., Chiaradia, M., Bouhier, V., Di Giuseppe, N., Rey, R. y Dimieri, L. 2017. Petrogenesis of Quebrada de la Mina and Altar North porphyries (Cordillera of San Juan, Argentina): Crustal assimilation and metallogenic implications. *Geoscience frontiers* 8: 1135-1159.
- Mirré, J. C. 1966. Geología del Valle del Rio Los Patos. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* XXI (4): 211 - 231.
- Pearce, J.A. 1983. Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. En: Hawkesworth C. J. and Norry M. J. Eds. *Continental Basalts and mantle xenoliths*. Shiva Publications: 230-249, Nantwich.
- Poma, S., Ramos, A., Litvak, V., Quenardelle, S., Maisonnave, E. y Diaz, I. 2017. Southern Central Andes Neogene magmatism over the Pampean Flat Slab: implications on crustal and slab melts contribution to magma generation in Precordillera, Western Argentina. *Andean Geology* 44 (3): 249-274.
- Profeta, L., Ducean, M., Chapman, J., Paterson, S., Henriquez, S.M., Kirsch, M., Petrescu, L. y DeCelles, P. 2015. Quantifying crustal thickness over time in magmatic arcs. *Scientific Reports* 5: 17786.
- Pugliese, L.E. 2012. *Cerro Blanco Proyect. San Juan Argentina*. Informe interno de la Empresa ERSA (Inédito), 20 p.
- Richards, J.P., Boyce, A.J. y Pringle, M.S. 2001. Geological evolution of the Escondida area, northern Chile: a model for spatial and temporal localization of porphyry Cu mineralization. *Economic Geology* 96: 271-305.
- Rocher, S., Vallecillo, G., Castro de Machuca, B., y Alasino, P. 2015. El Grupo Choiyoi (Pérmico temprano-medio) en la Cordillera Frontal de Calingasta, San Juan, Argentina: volcanismo de arco asociado a extensión. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 32: 415-432.
- Rubinstein, N. y Koukharsky, T., 1995. Edades K/Ar del volcanismo Neopaleozoico en la Precordillera Noroccidental Sanjuanina (Lat. 30°00'S, Long. 69°03'O). *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 50: 270-272.

- Simon, W., Sumay, C., Meissl, E. y Lanzilotta, M. 1997. Geología y petrografía del Distrito Minero Gualcamayo. San Juan, Argentina. 8° Congreso Geológico Chileno, Actas 2: 1153-1157, Antofagasta.
- Stern, C.R. y Skewes, M.A. 1995. Miocene to present magmatic evolution at the northern end of the Andean Southern Volcanic Zone, Central Chile. *Revista Geológica de Chile* 22: 261-272.
- Wetten, A.F. 2005. Andesita Cerro Bola: Nueva unidad vinculada al magmatismo mioceno de la Cordillera de Olivares, San Juan, Argentina (30°35´S; 69°30´O). *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 60 (1): 3-8.
- Whitney, D. y Evans, B. 2010. Abbreviations for names of rocks-forming minerals. *American Mineralogist* 95: 185-187.
- Zurcher, L., 2008. Geology of the los Azules Porphyry Copper Project, San Juan, Argentina. *Preliminary Progress Report*. ESMI, Tucson, 12 p.