

REDEFINICIÓN ESTRATIGRÁFICA DE LA IGNIMBRITA PULULUS (PUNA NORTE): IMPLICANCIAS VOLCANOLÓGICAS Y METALOGENÉTICAS

Diego FRACCHIA¹, Liza POLO², Pablo J. CAFFE¹ y Beatriz COIRA¹

¹ CONICET e Instituto de Geología y Minería, Universidad Nacional de Jujuy, Jujuy. E-mail fracchiadiego@yahoo.com.ar.

² Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, Brasil. E-mail lizapolo@usp.br.

RESUMEN

La Ignimbrita Pululus -situada en la Puna norte de Argentina, cerca de la frontera con Bolivia- fue previamente definida como un escudo ignimbrítico relativamente joven (Plioceno-Pleistoceno) cuya erupción había sucedido por varios millones de años al colapso de la caldera Vilama. Estas inferencias estaban basadas principalmente en los rasgos morfológicos del cerro Pululus, localidad en donde aflora la ignimbrita homónima. En esta contribución se presentan argumentos estratigráficos, petrográficos y geoquímicos que invalidan la existencia de dicho centro eruptivo, y que permiten concluir que la Ignimbrita Pululus es en realidad la Ignimbrita Vilama, principal unidad eruptada durante el colapso de la caldera Vilama. A partir de ello resulta necesario rectificar el esquema estratigráfico de la región, por lo que se propone el abandono del término "Ignimbrita Pululus" y que sus afloramientos sean considerados como parte de la Ignimbrita Vilama. Se identificaron además nuevas unidades estratigráficas en el cerro Pululus, de las cuales se describen su posición estratigráfica y características litológicas y petrográficas. Entre ellas se destaca un intrusivo subvolcánico cuyo emplazamiento produjo una notable estructura dómica en la zona apical del cerro Pululus, al cual proponemos denominar Dacita Pululus. A partir del cambio del esquema estratigráfico propuestos surgen importantes consecuencias que modifican el conocimiento geológico de la región. Ellas pueden resumirse en: a) la forma de "escudo" del cerro Pululus sería un carácter sobreimpuesto por deformación (por intrusión) debajo de la Ignimbrita Vilama, por lo tanto se deja de lado la hipótesis de erupción en escudo; b) se define un nuevo borde topográfico de la caldera Vilama; y c) la mineralización de estaño del cerro Pululus estaría asociada a la intrusión de la Dacita Pululus, hecho que permitiría descartar el modelo metalogénico previo vinculado a la desgasificación de la ignimbrita.

Palabras clave: *Estratigrafía, Volcanismo, Puna, Ignimbrita Pululus, Ignimbrita Vilama, Dacita Pululus.*

ABSTRACT: *Stratigraphic redefinition of the Pululus Ignimbrite (Northern Puna): Volcanological and metallogenic implications.* The Pululus Ignimbrite -located in the north Puna of Argentina, near the international border with Bolivia- was previously defined as a relatively young (Pliocene-Pleistocene) ignimbritic shield which erupted several millions of years after the collapse of the Vilama caldera. This conclusion was mainly based on the morphology of the cerro Pululus, the location where the ignimbrite crops out. In this contribution we present stratigraphic, petrographic and geochemical arguments which refute the existence of such an eruptive centre and so give support to the conclusion that the Pululus Ignimbrite is actually the Vilama Ignimbrite, *i.e.* the principal stratigraphic unit erupted during the collapse of the Vilama caldera. In order to rectify the stratigraphic framework of the region, we propose to abandon the term "Pululus Ignimbrite" and to consider their outcrops as being part of the Vilama Ignimbrite. Some new stratigraphic units in Cerro Pululus were also identified; their stratigraphic position is here described, as well as lithologic and petrographic characteristics. The most important of these units is a subvolcanic intrusive -to which we propose to name Pululus Dacite- whose emplacement deformed the Vilama Ignimbrite in the shape of a dome in the highest zone of cerro Pululus. The proposed change in the stratigraphic framework also bears important consequences for volcanological and metallogenic issues in the region. They are summarised in: a) the "shield" shape of Cerro Pululus is an superimposed character due to intrusion under the Vilama Ignimbrite, then the hypothesis of a central eruption is no longer valid; b) a new topographic border of the Vilama caldera is defined; and c) the tin mineralization at cerro Pululus is probably associated to the intrusion of the Pululus Dacite, so the previous metallogenic model which linked the tin to the degassing of the ignimbrite could be discarded.

Keywords: *Stratigraphy, Volcanism, Puna, Pululus Ignimbrite, Vilama Ignimbrite, Pululus Dacite.*

INTRODUCCIÓN

El cerro Pululus se encuentra en la Puna norte argentina, en el departamento Rincona-

da de la provincia de Jujuy, cerca de la frontera con Bolivia (Fig. 1). Esta zona forma parte de una provincia volcánica neógena de gran extensión areal en Argentina, Bolivia

y Chile a lo largo del segmento central de los Andes Centrales (Coira *et al.* 1993, Coira y Kay 2004), dentro de la cual de Silva (1989) diferenció el Complejo Volcánico Altipla-

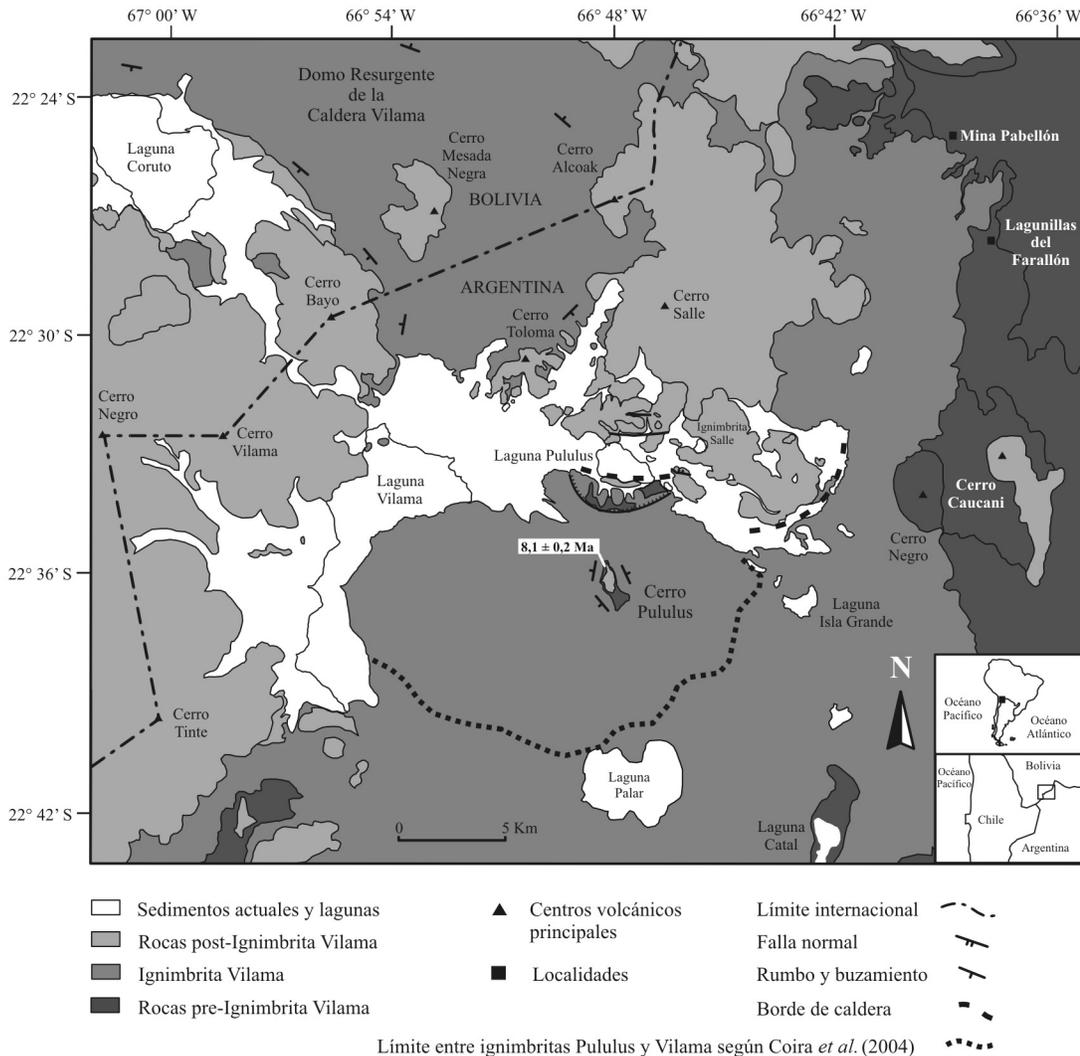


Figura 1: Mapa geológico del cerro Pululus y sus alrededores.

no-Puna.

El cerro Pululus se destaca sobre el terreno que lo rodea como una gran loma o escudo de 150 km² de extensión y 550 m de desnivel. Está rodeado por numerosas lagunas y salares, todas ellas situadas aproximadamente a 4.500 m s.n.m., entre las que se destacan Vilama (al oeste), Pululus (al norte), Isla Grande (al noreste) y Palar (al sur). La mayor parte del cerro está formado por ignimbritas gris-rosadas con abundantes fragmentos juveniles y escasos fragmentos líticos, conocidas formalmente como "Ignimbrita Pululus" (Coira *et al.* 1996). Hacia el este y sur los mapas geológicos regionales (Turner 1982, Coira *et al.* 2004) muestran contactos con la Ignimbrita Vilama, y hacia el norte con la Ignimbrita Salle (Fig. 1).

Las rocas del cerro Pululus se conocen desde los trabajos de Sgross (1943) y Ahlfeld (1948). Este último autor las describió como lavas, y consideró que su edad era probablemente Pleistoceno. Turner (1982) también consideró a estas rocas como lavas; las incluyó en la Formación Galán de edad pliocena, ubicándolas estratigráficamente *por debajo* de la Formación Lipiyoc (Turner 1978), unidad de la cual formaban parte los afloramientos actualmente asignados a las Ignimbritas Vilama y Salle. En el informe de la empresa Aquater (1979) fueron identificadas y mapeadas como "ignimbritas del cerro Pululus", de edad pliocena, e interpretadas yaciendo por encima de las "ignimbritas de la laguna Vilama" y de las "ignimbritas del cerro Salle". Estas tres unidades

fueron más tarde definidas y descritas formalmente como Ignimbrita Vilama, Ignimbrita Salle, e Ignimbrita Pululus por Coira *et al.* (1996, 2004). Estos autores otorgaron a la Ignimbrita Pululus una edad plioceno-pleistocena, y la ubicaron dentro de un cuarto ciclo en la evolución del "Complejo Calderico Vilama-Coruto". Los últimos trabajos realizados en el cerro Pululus corresponden a Polo (2004; 2008), quien realizó estudios petrológicos de sus niveles ignimbríticos. En los trabajos mencionados se advierte que los investigadores interpretaron al cerro Pululus como una unidad distinta a la unidad que lo rodea por el este y sur -la Ignimbrita Vilama-, ya sea considerándolo previo o posterior. Pensamos que esto se debe a la

diferencia morfológica: mientras el cerro Pululus sobresale en el terreno como un escudo, las ignimbritas a su alrededor tienen morfología de meseta. A través de un nuevo estudio del área hemos advertido que las ignimbritas en las unidades Pululus y Vilama son muy similares. Asimismo, que a pesar de las diferencias morfológicas no existe entre ellas cambio alguno en la continuidad espacial y estratigráfica. De esta manera, en el presente trabajo presentamos los argumentos estratigráficos, petrográficos y geoquímicos que permiten afirmar que forman parte de *una misma* unidad, y sobre dicha base proponemos el abandono del término "Ignimbrita Pululus".

METODOLOGÍA

Se realizaron nuevas visitas al campo para chequear los contactos estratigráficos señalados en los mapas previos, observar características litológicas y morfológicas, y tomar muestras para estudios petrográficos, geoquímicos y radimétricos.

Los nuevos análisis de elementos mayores y traza fueron realizados en el Laboratorio de Fluorescencia de Rayos X del Instituto de Geología y Minería de la Universidad de Jujuy (analista: Patrocinio Flores). Se utilizó un espectrómetro secuencial Rigaku FX2000, provisto de un tubo de anticátodo de Rh de 3 kW de potencia, trabajando a 50 kv y 40mA. Los elementos mayores se analizaron sobre perlas vítreas preparadas mediante fusión de la roca a 1000 °C, utilizando como fundente tetraborato de litio y logrando una completa homogeneización del fundido. Los elementos traza se analizaron sobre pellets de polvo de roca, aglutinados con metacrilato de metilo y prensados bajo una carga puntual de 20 Tn. Las concentraciones de óxidos y elementos se determinaron a partir del método empírico usual, comparando la muestra problema con curvas de calibrado preparadas con patrones estándares anhidros o totales homologados por los servicios geológicos de Estados Unidos o de Japón.

La datación radimétrica se realizó sobre una muestra de biotita separada con un separador magnético y luego a mano (a fin de des-

cartar eventuales cristales deshidratados) por el método K/Ar, en el laboratorio comercial Actlabs (Canadá), en donde se obtiene la concentración de K mediante ICP y se analiza la proporción de Ar por dilución isotópica en un espectrómetro de gas noble.

GEOLOGÍA DE LA REGIÓN

Gran parte de la región de nuestro interés está caracterizada por la presencia de la Ignimbrita Vilama, una extensa unidad piroclástica de composición dacítica que se considera asociada al colapso de la caldera Vilama (Soler 2005, Soler *et al.* 2007). Su edad ha sido acotada en el lapso 8,5-8,4 Ma (Soler 2005, Soler *et al.* 2007). En Argentina la Ignimbrita Vilama aflora como un extenso manto, que no supera los 100 m de espesor, desde Mina Pabellón por el norte hasta el Complejo Volcánico Pairique por el sur (fuera del mapa en Fig. 1); hacia el este alcanza la localidad de Lagunillas del Farallón y el borde occidental del bloque de Piriquitas, mientras que por el oeste desaparece por debajo de los volcanes que offician de límite internacional (cerros Bayo, Vilama, Negro, y Tinte). En Bolivia tiene amplia extensión hasta poco más allá de los 67° O. Sobre el límite internacional, entre los cerros Bayo y Alcoak, aflora en un domo resurgente de grandes dimensiones (aproximadamente 30 x 10 km), dentro del cual pueden observarse facies más soldadas, de intracaldera (Soler 2005, Soler *et al.* 2007).

El sustrato sobre el que se apoya la Ignimbrita Vilama se observa en forma adecuada en el sector oriental (Fig. 1). Las principales unidades que lo forman son la Formación Acoite (Turner 1964), integrada por sedimentitas marinas ordovícicas, que afloran en Mina Pabellón y en el bloque de Piriquitas; el Grupo Salta (Turner 1959), integrado por sedimentitas continentales cuya edad general es cretácica inferior-eocena, aflorantes en la zona de Mina Bonanza (Coira *et al.* 2004); y varias unidades de rocas volcánicas miocenas, siendo las principales: el Complejo Volcánico Pairique (Caffe *et al.* 2007); las Ignimbritas Granada (Aquater 1979, Coira *et al.* 1996) y Lagunillas (Soler 2005, Caffe *et al.* 2008); y algunas lavas y pi-

roclastitas de los cerros Caucani, Colorado y Solterío (Ramírez *et al.* 2008).

Por encima de la Ignimbrita Vilama se emplazan varios centros volcánicos andesíticos y dacíticos (Fig. 1). Algunos de ellos forman parte de la etapa de postcolapso de la caldera Vilama (Fracchia 2009). También se identifican tres unidades piroclásticas: las ignimbritas Salle, Bonanza (Coira *et al.* 1996) y Panizos (Ort 1993). La primera de ellas está asociada a la etapa de postcolapso de la caldera Vilama, mientras que las otras dos al colapso de sendas calderas vecinas.

GEOLOGÍA DEL CERRO PULULUS

El cerro Pululus es una loma o escudo de formas relativamente suaves, en cuya superficie afloran ignimbritas asignadas a la "Ignimbrita Pululus". De acuerdo a los trabajos y mapas geológicos previos, esta unidad sería un escudo ignimbrítico dispuesto sobre la Ignimbrita Vilama en forma concordante a lo largo de una superficie aproximadamente horizontal. En nuestros trabajos de campo no hemos podido observar dicho contacto a lo largo de la periferia del cerro Pululus. Por el contrario, hemos observado que la Ignimbrita Vilama continúa en superficie, pasando lateralmente a la Ignimbrita Pululus. De esta forma, la Ignimbrita Vilama no queda sepultada bajo las ignimbritas del cerro Pululus.

El esquema estratigráfico observado en el cerro Pululus también resulta distinto al expuesto en los trabajos previos. En la base de la columna estratigráfica, visible en la costa sudeste de la laguna Pululus (Fig. 1), se hallan rocas volcánicas afectadas por intensa alteración hidrotermal, fracturación y venilleo. Entre ellas identificamos dos unidades: "ignimbritas grises", y un depósito de flujos de bloques y ceniza. La relación estratigráfica entre estas dos unidades es difícil de catalogar debido a los factores mencionados. El depósito de flujos de bloques y ceniza se restringe a un pequeño sector dentro del área de alteración. Tiene textura clasto-sostén, y está formado por clastos angulosos de lavas con fenocristales de plagioclasa y biotita, inmersos en una matriz

fina completamente alterada. Finalmente, hacia el oeste del área de alteración y sin mediar un contacto claro con los depósitos piroclásticos se observan rocas porfíricas de color verde oscuro (probablemente por alteración propilítica). Todas estas rocas habían sido previamente asignadas a la Ignimbrita Salle, la cual se consideraba infrayacente a la "Ignimbrita Pululus" (Coira *et al.* 1996).

Por encima de estas unidades de roca yace la "Ignimbrita Pululus", que como ya se explicó, pasa lateralmente a la Ignimbrita Vilama.

En el tope del cerro Pululus hemos advertido la presencia de una pequeña estructura dómica elongada en sentido NNO-SSE (Fig. 2), cuyos flancos inclinan aproximadamente 30°. Si bien esta estructura es *morfológicamente* un anticlinal, preferimos no utilizar este término para evitar una connotación tectónica. Dentro de la estructura dómica se observan, de techo a piso: a) la denominada "Ignimbrita Pululus"; b) un paquete de "ignimbritas grises" (la misma unidad que aflora en el área de alteración de laguna Pululus); y c) un pórfiro dacítico. En esta localidad las ignimbritas grises se observan frescas y sin indicios de alteración hidrotermal, moderadamente soldadas, con *fiamme* blancas y abundantes fragmentos líticos porfíricos de hasta 1-2 cm, conformando un estrato de no más de 10 m de espesor. Por su parte, el pórfiro dacítico está formado por rocas de color gris claro con fenocristales de plagioclasa, biotita, y cuarzo, e incluye enclaves microgranulares oscuros. Estas rocas se correlacionan en base a sus características petrográficas con las rocas porfíricas de color verde oscuro que afloran en la costa sur de la laguna Pululus. Proponemos denominar a esta unidad, la cual no había sido identificada hasta la fecha, como "Dacita Pululus". Una datación K/Ar en biotita de esta roca dio como resultado $8,1 \pm 0,2$ Ma (muestra H-03, tomada de la cima del cerro Pululus: 7,34 % K; 2,283 nl/gr $^{40}\text{Ar}_{\text{rad}}$; 43,9 % $^{40}\text{Ar}_{\text{atm}}$). A partir de estos datos consideramos a la Dacita Pululus como un intrusivo subvolcánico de edad más joven que la Ignimbrita Vilama.

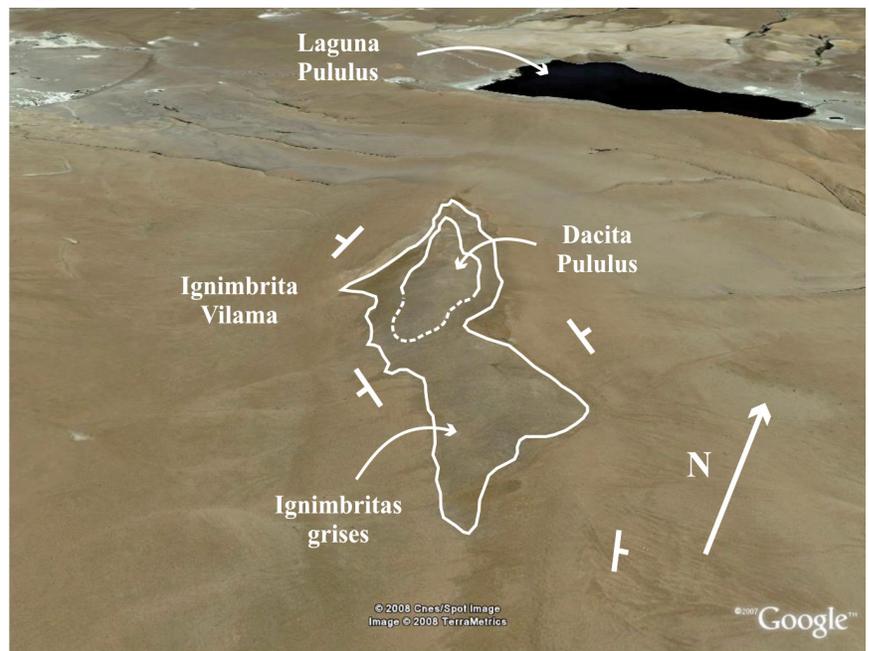


Figura 2: Vista de la estructura dómica del cerro Pululus desde el SSE (modelo digital de elevaciones, modificado de *Google Earth*). Para una noción de la escala, considérese que la longitud de la laguna Pululus en sentido este-oeste es de 3,1 km.

COMPARACIÓN ENTRE LAS UNIDADES IGNIMBRITA VILAMA E IGNIMBRITA PULULUS

Características petrográficas

A los fines de demostrar la similitud litológica de las Ignimbritas Vilama y Pululus, a continuación se hace una descripción conjunta de las características petrográficas de mayor representación en ambas unidades. Las rocas de la Ignimbrita Vilama y de la Ignimbrita Pululus tienen aspecto semejante: su color en superficie meteorizada es rojizo hasta grisáceo con tintes violetas, mientras que en superficie fresca es gris claro con tintes rosados (Fig. 3a). En muestra de mano se identifican, según su abundancia, plagioclasa, biotita y cuarzo; la biotita es muy característica, pues siempre se presenta muy oxidada. Los fragmentos juveniles son de dos tipos. El más común es ligeramente redondeado según formas elipsoidales, de hasta 20 o 30 cm de diámetro (excepcionalmente mayor), de color muy claro, y muy porfírico (Fig. 3a). No tiene vesicularidad manifiesta, si bien su forma indica cierto aplastamiento y una consecuente pérdida postdeposicional de las vesículas. En las facies

más soldadas dichos fragmentos se presentan aplastados como *fiamme* (en el sentido de Bull y McPhie 2007) muy cristalinas, en general de color más claro que el de la matriz. En el otro tipo los fragmentos juveniles son siempre aplastados, a veces desflecados, de hasta 20 cm de largo, de color rojo intenso, menos porfíricos que el anterior y con fenocristales muy pequeños (Fig. 3a). Los fragmentos líticos son escasos, aproximadamente 1 % del volumen total de la roca (pueden llegar hasta 8 % en la base de algunos afloramientos); la mayor parte de ellos son sedimentitas ordovícicas.

Al microscopio, la similitud entre rocas de las ignimbritas Pululus y Vilama es notable (Figs. 3b y 3c). Ambas son ignimbritas muy cristalinas, con 40 a 60 % de cristaloclastos. La mineralogía principal está compuesta por plagioclasa, biotita, cuarzo y piroxeno. La plagioclasa constituye el 40 a 60 % en volumen del ensamble mineralógico. La mayor parte de sus cristales son idiomórficos a subidiomórficos, éstos últimos por resorción de su borde. Casi todos son limpios, mientras que los cribados son escasos. Su zonación, a veces imperceptible, puede ser normal, oscilatoria, o irregular. También

se presentan en forma frecuente como grandes fragmentos angulares (<2 mm) con núcleos y/o zonas de su interior intensamente afectados por procesos de disolución o resorción, rodeados de un fino sobrecrecimiento irregular. Le sigue en abundancia la biotita, formando un 18 a 30 % del total. Ocurre principalmente en cristales subidiomórficos con bordes cribados y/o quebrados. La mayoría se encuentra alterada (probablemente por deshidratación) a lo largo de las trazas del clivaje, según un reemplazo de pequeños cristales de óxidos de hierro y plagioclasa. También pueden aparecer cristales con bordes corroídos y rodeados por una corona de plagioclasa. El cuarzo constituye entre un 10 y 25 %. Se presenta en cristales muy fracturados, típicamente redondeados y/o con engolfamientos, pero a veces es bipiramidal idiomórfico. El piroxeno, tanto rómbico como monoclinico, aparece hasta en un 5 % (excepcionalmente 10 % en algunas pómez). El ortopiroxeno es más abundante, y aparece en cristales idiomórficos a xenomórficos, raramente zonados. El clinopiroxeno está representado principalmente por augita, con raras apariciones de pigeonita, y puede presentar inclusiones del ortopiroxeno. Ambos piroxenos casi siempre tienen desarrollado un fino borde opacítico, que se atribuye a alteración por fase vapor. La aparición de anfíbol es esporádica: como microcristales (<0,02 mm) idiomórficos de color verde y marrón, siempre asociado a concentraciones de minerales máficos en algunos fragmentos de pómez, o como restos de cristales inestables y reemplazados por coronas de óxidos. Por último, en forma accesoria se hallan apatita, circón, allanita y opacos.

La matriz de la roca presenta textura vitrocrystaloclástica, y muestra desvitrificación con texturas poiquilítica y microgranofírica y desarrollo de esferulitas.

Como fragmentos líticos se observan, además de las sedimentitas ordovícicas mencionadas, volcanitas de textura felsítica.

Los dos tipos de fragmentos juveniles mencionados tienen la misma mineralogía que el resto de la roca. Sin embargo, las texturas en cada uno son distintas. Los del pri-

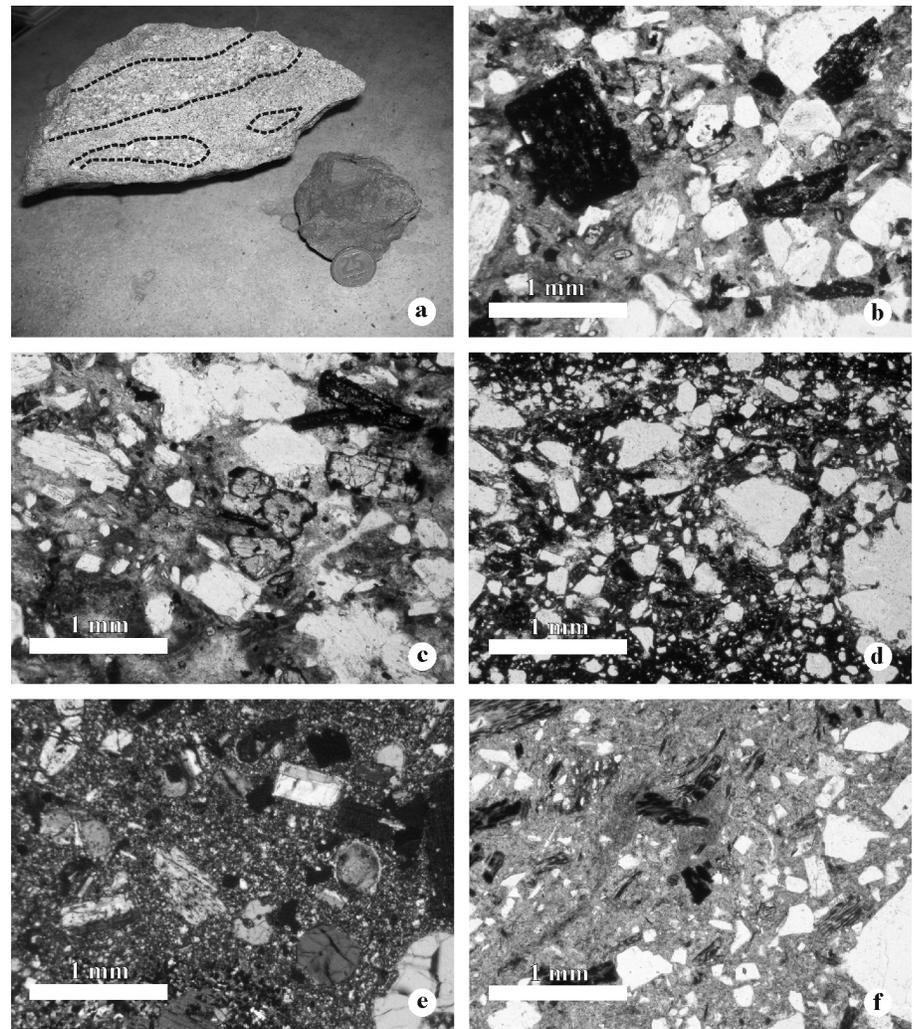


Figura 3: a) Aspecto macroscópico de la Ignimbrita Vilama. A la izquierda, fragmento de la roca típica, en la que se han destacado con línea de puntos grandes fragmentos juveniles; a la derecha, fragmento de *fiamme roja*; b) y c) Microfotografías en donde puede observarse la similitud textural y mineralógica de ambas unidades; se destacan la opacitización en biotita y ortopiroxeno. La roca en b) fue tomada al sudeste del cerro Salle, mientras que la c) en el cerro Pululus; d) Aspecto microscópico de las *fiamme rojas* (nicoles paralelos); nótese la fragmentación de los cristales y la tonalidad más oscura de la matriz; e) Aspecto textural de la Dacita Pululus (nicoles cruzados); f) Aspecto textural de las ignimbritas grises.

mer tipo son muy porfíricos (50 a 68 %), tienen fenocristales poco fragmentados, y su matriz es vítrea y de aspecto finamente granular, homogéneamente desvitrificada, con esferulitas dispersas. En cambio, los del segundo tipo son menos porfíricos (15 a 20 %), tienen fenocristales muy fragmentados, a veces redondeados, y su matriz es algo vesiculada y de color muy oscuro (Fig. 3d). Consideramos a los fragmentos juveniles del primer tipo como verdadera pómez, fragmentos de magma muy porfírico y con un porcentaje bajo de vesículas, tal como es característico en las ignimbritas de

la Puna. Los del segundo tipo también serían pómez, pero como mantienen la misma composición geoquímica que las anteriores (ver más abajo) es probable que su aspecto se deba a modificación causada por procesos de cizalla en el conducto durante la erupción (cf. Arnosio 2002, Rosi *et al.* 2004).

Características geoquímicas

Con el objeto de sumar argumentos y así fortalecer la correlación aquí propuesta se realizó una comparación geoquímica de las rocas de ambas unidades. Para ello se utilizaron análisis geoquímicos presentados por

Coira *et al.* (1996), Soler (2005) y Soler *et al.* (2007). Del primer trabajo se utilizaron los análisis de las muestras MY-24 y P18-5; del segundo, M-180p, M-183p, M-185p, M-203p2, M-205, M-208p1, M-217, FO2, P86-30, V2 y V-8; del tercero, M-186p, M-194, M-203p1, y M-216. También se utilizaron datos inéditos presentados en Polo (2004) y Fracchia (2009) (Cuadro 1). La localización de los puntos de muestreo puede consultarse en cada uno de los trabajos mencionados. Los análisis pertenecientes a la Ignimbrita Vilama corresponden a sus facies de extracaldera, predominantes en la región.

Los contenidos de elementos mayoritarios (Fig. 4) y traza (Fig. 5) de la Ignimbrita Pululus fueron proyectados junto a los datos correspondientes a la Ignimbrita Vilama. En dichos gráficos también se agregaron análisis correspondientes a las *fiamme* rojas y a la Dacita Pululus.

Las Ignimbritas Pululus y Vilama son rocas dacíticas metaluminosas a levemente peraluminosas, pertenecientes a la serie calcoalcalina de alto-K (Polo 2004, Soler 2005, Polo 2008). Como puede verse en las figuras 4 y 5, ambas ignimbritas tienen una composición semejante. Los datos de la Ignimbrita Pululus se solapan con los de la Ignimbrita Vilama, e incluso en la mayor parte de los casos varían menos que en la misma. Las *fiamme* rojas (provenientes del cerro Pululus y de la zona al sudeste del cerro Salle) tienen composiciones muy cercanas entre sí y comprendidas dentro del rango de variación del conjunto. Se destaca asimismo que dicha composición es francamente similar a la de la pómez, si bien se advierte que su contenido de $\text{FeO}_{(t)}$ es ligeramente más alto.

Los valores de elementos traza (*e.g.* Y= 17-22 ppm, Sr= 223-269 ppm y Ba= 596-657 ppm en Ignimbrita Pululus, e Y= 14-26 ppm, Sr= 228-352 ppm y Ba= 543-810 ppm en Ignimbrita Vilama) coinciden de la misma manera que los elementos mayores. Es destacable la coincidencia en los valores de Sn.

Por último, las pendientes de los patrones de elementos de las Tierras Raras también son similares: $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}} = 3,3$ y $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} =$

CUADRO 1: Análisis geoquímicos de las unidades Ignimbrita Pululus, Ignimbrita Vilama, y Dacita Pululus.

Tipo de muestra	Ignimbrita Pululus						Ignimbrita Vilama			Dacita Pululus
	Pómez						Fiamme rojas	Pómez	Roca total	
Análisis	PUL-15pi	PUL-23p	PUL-29	PUL-33p	PUL-36	PUL-44	E-024	E-025	E-027	H-03
SiO ₂	64,94	64,00	66,10	65,50	65,36	64,52	65,44	64,80	65,41	63,67
TiO ₂	0,95	0,97	0,85	0,94	0,95	0,96	0,94	1,00	0,87	0,86
Al ₂ O ₃	15,99	16,05	16,04	16,10	16,78	16,40	16,12	16,48	16,19	16,30
FeO _(t)										
Fe ₂ O _{3 (t)}	4,82	4,73	4,38	4,69	4,72	5,07	5,27	5,60	4,92	4,72
MnO	0,05	0,05	0,06	0,06	0,06	0,08	0,06	0,07	0,04	0,05
MgO	1,44	1,62	1,28	1,76	0,47	1,86	1,49	1,42	1,67	1,82
CaO	4,03	4,07	4,04	3,96	3,72	4,78	3,94	4,26	4,19	4,13
Na ₂ O	2,30	2,41	2,63	2,57	2,72	2,44	2,11	2,44	2,43	2,49
K ₂ O	4,15	4,25	3,94	3,96	3,99	3,48	3,71	3,57	3,91	3,61
P ₂ O ₅	0,21	0,22	0,20	0,19	0,20	0,20	0,21	0,22	0,20	0,20
LOI	0,90	0,53	0,46	0,61	0,74	0,25	1,02	0,62	0,70	0,92
Total	99,77	98,88	99,98	100,32	99,70	100,02	100,30	100,47	100,54	98,77
Y	17	18	18	18	18	22	19	18	17	18
Rb	165	166	159	154	145	134	156	130	160	149
Sr	240	228	229	223	231	225	260	235	235	275
Ba	617	639	633	607	612	596	661	693	581	624
U	4	4	5	4	3	4	3	3	4	4,4
Th	12	13	13	13	13	12	13	12	12	12,2
Hf	5	6	5	5	5	5	5	5	5	5
Zr	157	156	150	154	161	155	169	166	169	181
Nb	12	13	13	12	13	12	14	15	13	14
Cr	14	11	11	15	77	8	36	36	57	48
Ni	0	0	0	0	0	0	1	2	<1	nd
Co	65	44	42	43	34	34	26	34	29	17
Cu	2	12	5	3	6	1				5
Pb	18	20	19	20	58	19	25	20	20	21
Sn	2,1	1	5,7	3,4	3					
Zn									119	100

Fuentes: Pul-15pi, Pul-23p, Pul-29, Pul-33p, Pul-36 y Pul-44, Polo (2005); E-024, E-025 y E-027, Fracchia (2009). La localización de las mismas puede consultarse en los respectivos trabajos. Observación: la muestra Pul-36 tiene un valor muy bajo de MgO, que probablemente sea un resultado espurio.

18,33 en Ignimbrita Pululus, y $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}} = 2,8-3,5$ y $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 18,4-20,5$ en Ignimbrita Vilama. Los datos originales de Coira *et al.* (1996) y Soler (2005) aquí fueron normalizados con el mismo condrito (Boynton 1984).

Composición química de las fases minerales

Los trabajos realizados por Soler (2005) y Polo (2008) contienen gran cantidad de análisis geoquímicos de las principales fases minerales de las Ignimbritas Vilama y Pululus, realizados mediante microsonda electrónica. Debido a que no es posible detallar aquí la información referente a la metodo-

logía empleada, procedencia de las muestras analizadas y normalizaciones utilizadas, se remite al lector interesado a dichos trabajos. De acuerdo a la compatibilidad de los resultados expuestos en ambos casos (*i.e.*, estilo de notación de los mismos) se realizó una comparación cuali y (cuando fue posible) cuantitativa de la composición química de la mineralogía principal en ambas unidades. **Plagioclasa:** Los datos de Soler (2005) señalan que las plagioclasas de la Ignimbrita Vilama en facies extracaldera tienen composiciones variables entre An_{46} y An_{85} . Por su parte, en las ignimbritas del cerro Pululus se han medido composiciones entre An_{43} y An_{86} (Polo 2008).

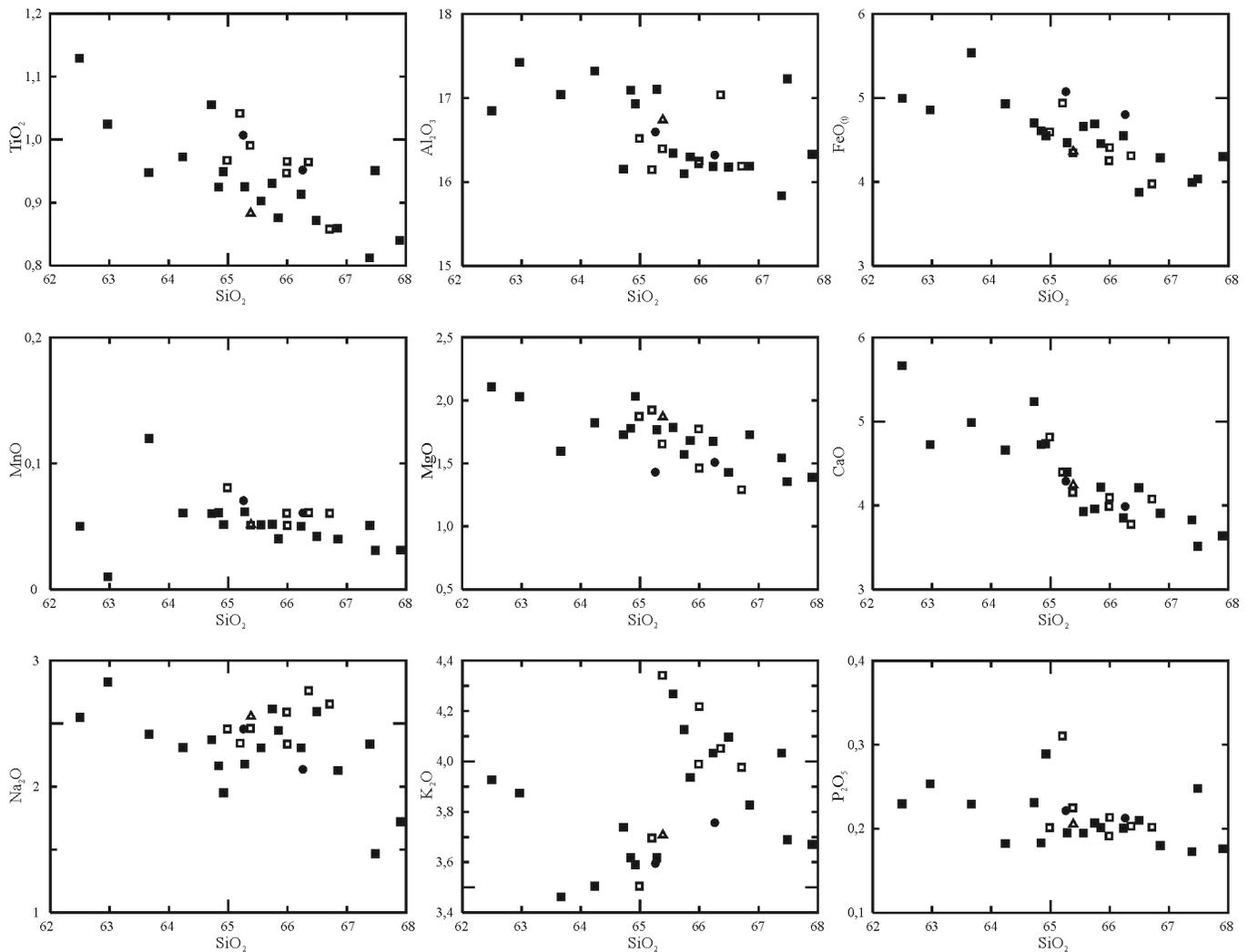


Figura 4: Comparación de elementos mayores en fragmentos juveniles y roca total de las unidades Ignimbrita Pululus (cuadrados vacíos) e Ignimbrita Vilama (cuadrados llenos); las *fiamme* rojas se presentan como círculos llenos. Los datos correspondientes a la Dacita Pululus están representados por un triángulo vacío.

Biotita: Los contenidos de Ti, Mn, Mg y Fe de las biotitas han sido utilizados por algunos autores como excelentes herramientas para correlacionar los extensos depósitos ignimbíticos del segmento central de los Andes Centrales (*e.g.* de Silva y Francis 1989, Lindsay *et al.* 2001).

De acuerdo con Soler (2005) y Soler *et al.* (2007), las biotitas pertenecientes a la Ignimbrita Vilama se caracterizan por presentar gran variabilidad en su contenido de Fe y Mg mientras que homogeneidad en el contenido de Ti y Mn, característica que les permitió utilizarla como parámetro de correlación. Sin embargo, dichas características no son comparables con los datos obtenidos por Polo (2008) para las biotitas del cerro

Pululus. En los diagramas comparativos realizados (Fig. 6) se observa que las biotitas en el cerro Pululus presentan contenidos más altos de Mn, Ti y Fe^{+2} que las biotitas de la Ignimbrita Vilama seleccionadas por Soler *et al.* (2007) como más características de la unidad. Además, las concentraciones de Ti, Mg y Fe^{+2} de las biotitas en el cerro Pululus son más uniformes, mientras que por el contrario el Mn se comporta de forma más variable. Sin embargo, al comparar los datos del cerro Pululus con los análisis pertenecientes a la muestra M-51 de Soler (2005) se nota que las composiciones son más semejantes, presentando una mayor variabilidad en el contenido de Ti y Mn. Es probable que esta semejanza se deba al

bajo grado de alteración que presentan tanto las biotitas de la muestra M-51 como aquellas del cerro Pululus analizadas por Polo (2008), hecho que sugiere que las diferencias observadas son en realidad producto de la fuerte alteración que en general muestra la biotita en la Ignimbrita Vilama.

Piroxeno: Según los datos de Soler (2005) el ortopiroxeno de la Ignimbrita Vilama tiene una composición principalmente enstatítica (aproximadamente entre 45 y 75 % del término En) y su #Mg varía aproximadamente entre 0,48 y 0,68. Por su parte el clinopiroxeno se clasifica como augita.

En las ignimbritas del cerro Pululus, Polo (2008) obtuvo composiciones $En_{44-59}Wo_2$ Fs_{54-39} y #Mg de 0,45-0,59 en cristales idio-

mórficos de ortopiroxeno, mientras que $En_{67-76}Wo_2Fs_{31-22}$ y $\#Mg$ de 0,70-0,77 en cristales xenomórficos con zonación inversa (de enstatita a ferrosilita en sentido centro-borde). El clinopiroxeno resultó augita, con $\#Mg$ entre 0,54 y 0,64.

Anfibol: Los cristales de anfíbol de la Ignimbrita Vilama en facies extracaldera se clasifican como magnesiohornblenda (Soler 2005), con $\#Mg$ variable entre 0,56 y 0,64. En el cerro Pululus, Polo (2008) obtuvo composiciones de magnesiohornblenda y tschermakita, con valores de $\#Mg$ entre 0,55 y 0,66.

DESCRIPCIÓN DE OTRAS UNIDADES QUE INTEGRAN EL CERRO PULULUS

Dacita Pululus

Las rocas que afloran en el núcleo de la estructura dómica del cerro Pululus tienen textura porfírica, con matriz felsítica completamente cristalina (Fig. 3e). Presentan fenocristales de: plagioclasa, en su mayor parte límpida, aunque también la hay cribada; cuarzo, redondeado y con profundos engolfamientos; biotita, esencialmente fresca, pero en algunos casos resorbida y con un manto de reacción por deshidratación (compuesto por plagioclasa + ortopiroxeno + opacos); por último, ortopiroxeno. Dentro de estas rocas se encuentran enclaves microgranulares con textura diktitaxítica, con fenocristales de ortopiroxeno, plagioclasa límpida, y cuarzo, flotando en un tramado de cristales aciculares de plagioclasa y un manto completamente oxidado.

Las rocas porfíricas de color verde oscuro que se observan en la margen norte del cerro Pululus son petrográficamente comparables, en cuanto a textura y mineralogía, a las lavas recién descriptas. La única diferencia es que en este último sector las rocas están alteradas, especialmente los fenocristales de biotita y los piroxenos. Asimismo se ven reemplazos de carbonatos sobre la plagioclasa. Desde el punto de vista geoquímico la Dacita Pululus es una dacita metaluminosa de casi 65,5 % de SiO_2 , perteneciente a la serie calcoalcalina de alto-K. Su contenido de elementos mayores y traza es indistinguible

del de la Ignimbrita Vilama (Figs. 4 y 5; Cuadro 1), hecho que sugiere su pertenencia a la etapa de postcolapso de la caldera Vilama (Fracchia 2009).

Ignimbritas grises

Se trata de rocas de textura eutaxítica, con *fiamme* vítreas, algo vesiculadas, con escasos fenocristales de plagioclasa, biotita, y apatita. La matriz es netamente piroclástica, con alta proporción (aproximadamente 40-45 %) de cristaloclastos de plagioclasa, biotita, y cuarzo (Fig. 3f). Las plagioclasas son límpidas, con zonación y/o macas; en forma escasa aparecen cristales con centros cribados. La biotita es marrón, ligeramente manchada por óxidos a lo largo de los planos de clivaje, se encuentra muy desflecada y presenta quiebres y *kink-bands*. Los minerales accesorios son apatita, opacos, y circón; de ellos se destaca la apatita, que aparece en cristales grandes, con bordes oscuros y un *parting* abundante y muy marcado que la hace característica.

En estas ignimbritas son también muy característicos los fragmentos líticos, casi todos ellos de una roca volcánica de textura porfírica con pasta felsítica. Sus fenocristales son de plagioclasa, biotita, cuarzo, y apatita (similar a la descrita en el párrafo anterior). En escasa proporción aparecen fragmentos líticos sedimentarios, similares a las rocas del basamento ordovícico.

La ignimbrita identificada en el área de alteración tiene *fiamme* de pequeño tamaño, siempre cloritizadas, y cristaloclastos de plagioclasa (alterada), biotita y cuarzo. La biotita, los fragmentos líticos, y los cristales de apatita, permiten correlacionarla con las ignimbritas grises que afloran en la estructura dómica del cerro Pululus.

Depósito de flujos de bloques y ceniza

Los clastos en esta unidad tienen textura porfírica, con pasta totalmente desvitrificada. Sus fenocristales son de cuarzo, biotita y ortopiroxeno. La biotita aparece fresca, mientras que el ortopiroxeno está completamente cloritizado. También se observan glomérulos de cuarzo + biotita + apatita. En forma accesoría aparecen

opacos, apatita y circón.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Previamente (Aqater 1979, y trabajos subsiguientes) se interpretaba que la Ignimbrita Vilama se extendía tabularmente por debajo de la Ignimbrita Pululus, y que al sur de la laguna Pululus mediaba entre ambas la Ignimbrita Salle. Por el contrario, nuestras nuevas observaciones permiten afirmar que la Ignimbrita Vilama y la Ignimbrita Pululus conforman un mismo manto de ignimbritas de amplia extensión, y que por debajo se hallan unidades de rocas volcánicas previamente desconocidas, tanto previas como posteriores a la Ignimbrita Vilama. La continuidad espacial reconocida entre la Ignimbrita Vilama y la Ignimbrita Pululus también se corresponde con una similitud litológica. Localidades donde aflora la Ignimbrita Vilama, como por ejemplo el sudeste del cerro Salle, Mina Pabellón, y el noreste del cerro Bayo, muestran ignimbritas con similares composición mineralógica, texturas, y tipo de fragmentos juveniles que las ignimbritas mapeadas anteriormente como Ignimbrita Pululus en, *e.g.* en la esquina sudoeste del cerro Pululus, cerro Pululus, y sur de laguna Pululus. El seguimiento de la Ignimbrita Vilama en el campo se puede realizar fácilmente según caracteres texturales de muestra de mano y/o afloramiento, tales como tipo y forma de fragmentos juveniles, escasa proporción de líticos, color y estilo de meteorización, y alteración de la biotita.

Morfología volcánica

La forma del cerro Pululus se explicaba previamente como un escudo ignimbrítico, formado por la erupción de las ignimbritas a partir de un centro eruptivo puntual. Esta hipótesis implicaba un mayor espesor de las ignimbritas en su sector más alto. Por el contrario, nuestras observaciones indican que el espesor de la Ignimbrita Vilama no supera los 80 m en el borde norte del cerro Pululus, mientras que en los flancos de la estructura dómica dicho espesor sería algo menor. Tampoco se observa algún tipo de

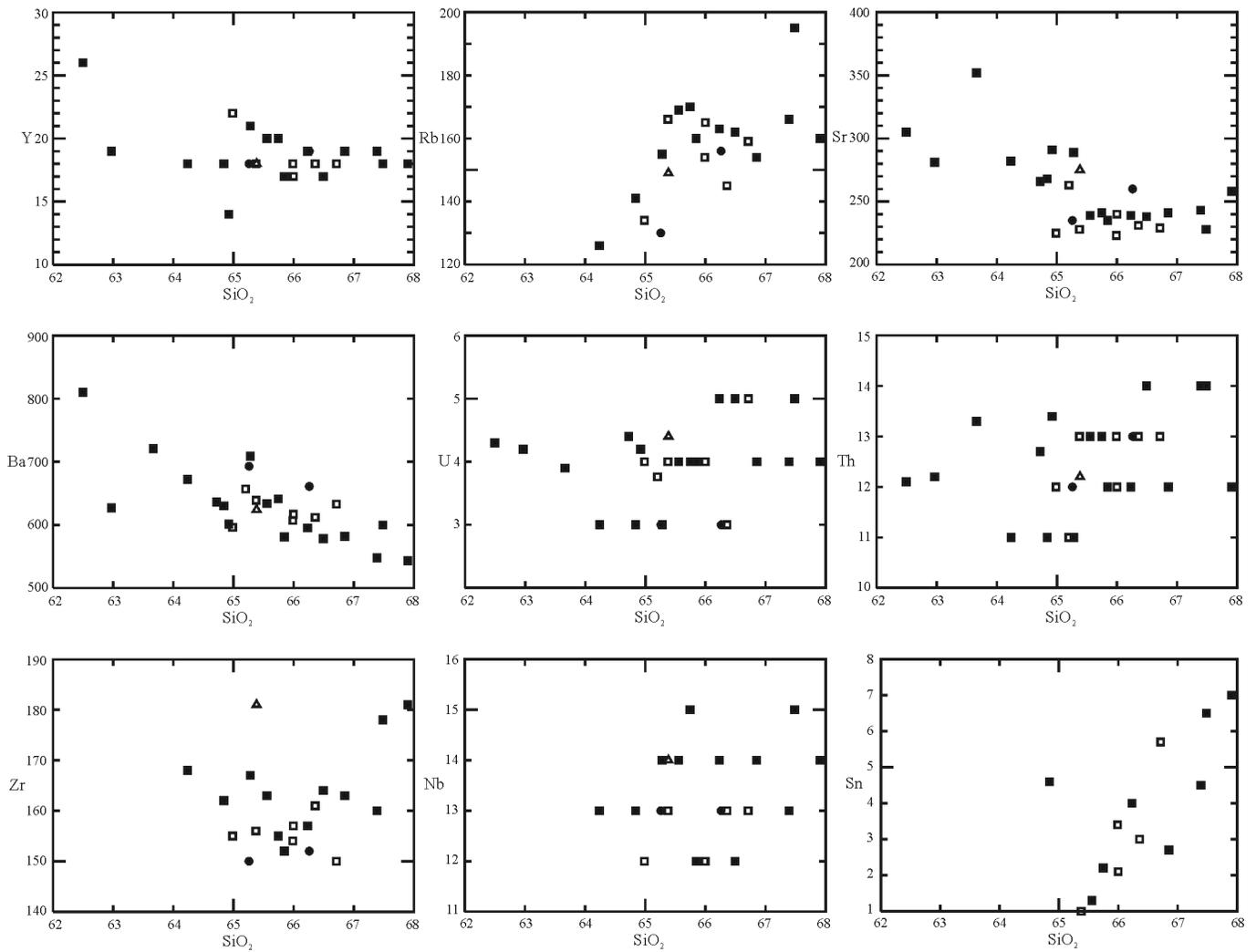


Figura 5: Comparación de algunos elementos traza en fragmentos juveniles y roca total de las unidades Ignimbrita Pululus (cuadrados vacíos) e Ignimbrita Vilama (cuadrados llenos); las *fiamme* rojas se presentan como círculos llenos. Los datos correspondientes a la Dacita Pululus están representados por un triángulo vacío.

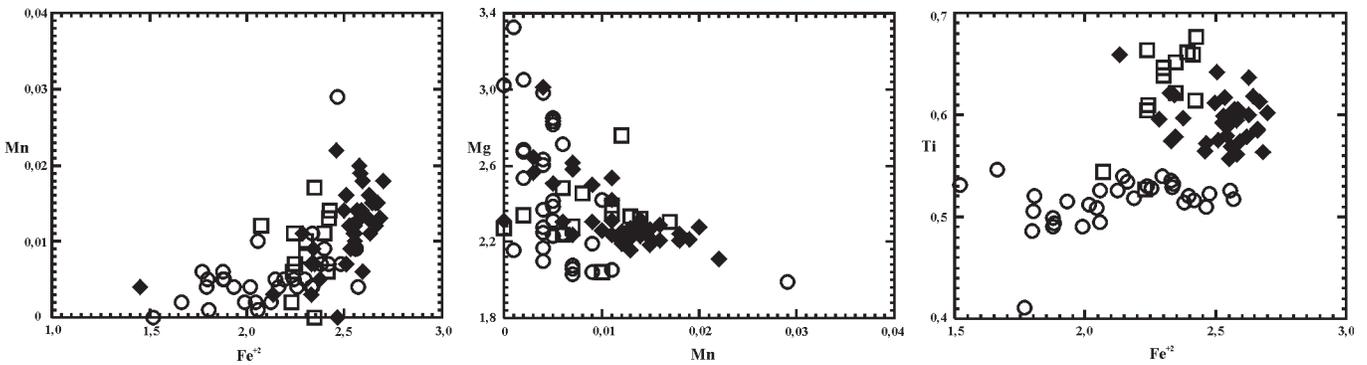


Figura 6: Comparación del contenido de Fe, Mn, Mg y Ti en biotitas de las unidades Ignimbrita Pululus (rombos) e Ignimbrita Vilama (círculos vacíos); los cuadrados vacíos corresponden a datos de una muestra de la Ignimbrita Vilama cuyas biotitas están frescas (muestra M-51, Soler 2005). Los datos originales fueron tomados de Soler (2005) y Polo (2008). Valores en unidad por fórmula unitaria (u.p.f.u) recalculados a 22 átomos de oxígeno y 2 oxhidrilos.

polaridad de proveniencia a partir del centro del cerro Pululus, por ejemplo aumen-

to de tamaño de los fragmentos juveniles o líticos en dirección al mismo.

Si se acepta nuestra correlación, la morfología en escudo del cerro Pululus podría atri-

buirse simplemente al manto de la Ignimbrita Vilama sobre una topografía previa. Sin embargo, consideramos como muy probable que la principal causa sea un domamiento posterior a la depositación de las ignimbritas. La presencia de la estructura dómica en la cima del cerro Pululus y su coincidencia con el afloramiento de la Dacita Pululus dentro de ella, señalan que la causa más probable de la morfología del cerro Pululus sería la intrusión del cuerpo subvolcánico de la Dacita Pululus. En este contexto, las numerosas quebradas rectilíneas que surcan las laderas del cerro podrían ser interpretadas como verdaderas fracturas radiales debidas a la intrusión de la Dacita Pululus. La edad y origen de este domamiento podrían ser asimilados al proceso de resurgencia magmática que más al norte se observa en el domo resurgente de la caldera Vilama.

Borde topográfico de caldera Vilama

Las rocas que subyacen a la Ignimbrita Vilama en el cerro Pululus y en el área de alteración (ignimbritas grises y depósitos de flujos de bloques y ceniza) son bastante distintas de las rocas asociadas a la caldera Vilama. Consideramos que se trata de unidades de precaldera, posiblemente correlacionables con las "ignimbritas grises indiferenciadas" que Soler (2005) describió en áreas cercanas. Junto a la presencia de algunas fallas normales (véase Fig. 1), este hecho separa netamente los sectores de extracaldera del de intracaldera: el primero hacia el sur, donde afloran las unidades de precaldera; el segundo hacia el norte, donde afloran ignimbritas más jóvenes que la Ignimbrita Vilama (secuencias volcánicas de postcolapso). De esta manera se define con mayor precisión el borde topográfico sur de la caldera Vilama (*cf.* Soler *et al.* 2007).

Mineralizaciones de estaño del cerro Pululus

Ahlfeld (1948) describió detalladamente varias manifestaciones de casiterita y angellita situadas en el cerro Pululus, que por ese entonces habían sido objeto de explotación minera. Dicha mineralización se presenta como costras delgadas sobre las paredes de diaclasas verticales. Atribuyó su

depositación a partir de gases de fumarolas a muy alta temperatura, desestimando una formación hidrotermal a bajas temperaturas (como sucede con el estaño madeira en otras zonas de la Puna norte).

Nuestro objetivo no es discutir dicho modelo de mineralización, sino la viabilidad de que el estaño haya estado relacionado a la desgasificación posteruptiva de la Ignimbrita Vilama. En primer lugar, la interpretación del origen fumarólico de las mineralizaciones de Pululus es inconsistente con la ausencia de mineralizaciones de este metal en otros afloramientos de la Ignimbrita Vilama, la cual se extiende por aproximadamente 4000 km². Asimismo, dicho mecanismo no explica el porqué de la presencia de la mineralización exclusivamente en los afloramientos del cerro Pululus. En los modelos de enriquecimiento fumarólico tipo Mexicano la mineralización se asocia a las zonas distales de los depósitos ignimbriticos. En segundo lugar, dicha hipótesis tampoco condice con la composición dacítica de la Ignimbrita Vilama, ya que las volcanitas asociadas a mineralización fumarólica de estaño son predominantemente riolitas alcalifeldespáticas de alto SiO₂ (*eg.*, Pan 1974, Christiansen *et al.* 1984, Duffield *et al.* 1990).

Pensamos en cambio que es más adecuado atribuir como fuente térmica (¿y metalífera?) de estos depósitos minerales a la Dacita Pululus. Un foco magmático puntual en profundidad explica adecuadamente la aparición del estaño sólo en los afloramientos de la Ignimbrita Vilama del cerro Pululus, como también abre la posibilidad de discutir otros procesos genéticos alternativos que expliquen la presencia de la casiterita. De esta forma se generan nuevas líneas de exploración en la zona, teniendo en cuenta que, de ser la Dacita Pululus la causa de la mineralización, se hallaría en profundidad un intrusivo subvolcánico que por sus dimensiones tendría mucha mayor potencialidad minera.

CONSIDERACIONES FINALES

A pesar de que los nombres de ambas uni-

dades -Ignimbrita Pululus e Ignimbrita Vilama- tienen igual orden de prioridad ya que fueron usados por primera vez en el mismo trabajo (Aqater 1979), consideramos que es más adecuado continuar utilizando la denominación "Ignimbrita Vilama". Ésta ha sido mucho más usada que la de "Ignimbrita Pululus" en la literatura geológica de los últimos años, especialmente a nivel internacional. Es también un epónimo de caldera Vilama, la cual es considerada su origen (Soler 2005, Soler *et al.* 2007).

En síntesis, consideramos que las rocas que afloran en el cerro Pululus, conocidas hasta ahora formalmente como Ignimbrita Pululus, son las mismas que en sus inmediaciones se conocen como Ignimbrita Vilama. Por lo tanto proponemos el abandono del término "Ignimbrita Pululus", y que sus afloramientos sean considerados como parte de la Ignimbrita Vilama.

Este cambio en el esquema estratigráfico condujo hacia conclusiones que modifican el conocimiento geológico de la región, las cuales se resumen en: a) la forma de "escudo" del cerro Pululus sería un carácter sobreimpuesto por intrusión de un cuerpo subvolcánico debajo de la Ignimbrita Vilama, por lo tanto se deja de lado la hipótesis de erupción en escudo; b) se define un nuevo borde topográfico de la Caldera Vilama; y c) las mineralizaciones de estaño del cerro Pululus estarían asociadas a la intrusión de la Dacita Pululus, hecho que permitiría descartar el modelo exhalativo previamente aplicado.

AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer en primer lugar a Miguel Soler, quien gentilmente facilitó el uso de muchos datos de su tesis doctoral. Asimismo a los técnicos P. Cachizumba, P. Flores, y R. Liquín, del CONICET e Instituto de Geología y Minería, cuyo cuidadoso tratamiento de las muestras ha sido primordial para el éxito de nuestros trabajos. El arbitraje del Dr. Iván Petrinovic aportó puntos de vista que nos permitieron mejorar la calidad del manuscrito original. Este trabajo ha sido posible gracias a los proyectos y becas financiados por el

CONICET (PIP 2638) y la ANPCyT (PICT 07-12420).

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Ahlfeld, F. 1948. Estudios Geológicos de Yacimientos Minerales de la Provincia de Jujuy. Universidad Nacional de Tucumán, Instituto de Geología y Minería. Publicación 455: 1-85, Jujuy.
- Aquater 1979. Estudio del potencial geotérmico de la Provincia de Jujuy, República Argentina. Fase de reconocimiento. Secretaría de Estado de Minería, Contrato Saipen Argentina S.A.-Gobierno de Jujuy, informe inédito, 129 p., Jujuy.
- Arnosio, M. 2002. Volcanismo, Geoquímica y Petrología del Volcán Chimpa (24° LS - 66° LO), Provincia de Salta, República Argentina. Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Salta, (inédito), 139 p., Salta.
- Boynnton, W.V. 1984. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. En Henderson, P. (ed.) REE Geochemistry, Elsevier, 63-114, Amsterdam.
- Bull, K.F. y McPhie, J. 2007. Fiamme textures in volcanic successions: flaming issues of definition and interpretation. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 164 (4): 205-216.
- Caffe, P.J., Soler, M.M., Coira, B., Cabrera, A., y Flores, P.I. 2007. Estratigrafía y centros eruptivos de la región de Pairique, Puna Jujeña. *Asociación Geológica Argentina, Revista* 62(2): 242-256.
- Caffe, P.J., Soler, M.M., Coira, B.L., Onoe, A.T. y Cordani, U.G. 2008. The Granada ignimbrite: a compound pyroclastic unit and its relationship with Upper Miocene caldera volcanism in the northern Puna. *Journal of South American Earth Sciences* 25: 464-484.
- Christiansen, E.H., Bikun, J.V., Sheridan, M.F. y Burt, D.M. 1984. Geochemical evolution of topaz rhyolites from the Thomas Range and Spor Mountain, Utah. *American Mineralogist* 69(3-4): 223-236.
- Coira, B. y Mahlburg Kay, S. 2004. Central Andean plateau ignimbrites in the Puna Backarc Cenozoic Volcanic Province (PBVC). IAVCEI, General Assembly, Abstracts CD-ROM, Pucón.
- Coira, B., Caffé, P., Mahlburg Kay, S., Díaz, A., y Ramírez, S. 1996. Complejo Volcánico Vilama-Sistema caldérico del Cenozoico Superior en Puna, Jujuy. 13° Congreso Geológico Argentino y 3° Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Actas 3: 603-620, Buenos Aires.
- Coira, B., Caffé, P., Ramírez, A., Chayle, W., Díaz, A., Rosas, S., Pérez, A., Pérez, B., Orozco, O., y Martínez, M. 2004. Hoja Geológica 2366-I/2166-III, Mina Pirquitas, Provincia de Jujuy. Servicio Geológico Minero Argentino, Instituto de Geología y Recursos Minerales. Boletín 269, 123 p., Buenos Aires.
- Coira, B., Kay, S.M., Viramonte, J. 1993. Upper Cenozoic Magmatic Evolution of the Argentine Puna - A model for changing subduction geometry. *International Geology Review* 35(8): 677-720.
- de Silva, S.L. y Francis, P.W. 1989. Correlation of large volume ignimbrites - two case studies from the Central Andes of N. Chile. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 37(2): 133-149.
- de Silva, S.L. 1989. Altiplano Puna volcanic complex of the Central Andes. *Geology* 17: 1102-1106.
- Duffield, W.A., Reed, B.L., y Richter, D.R. 1990. Origin of rhyolite-hosted tin-mineralization: evidence from the Taylor Creek rhyolite, New Mexico. *Economic Geology* 85: 392-398.
- Fracchia, D. 2009. Volcanismo postcolapso de la Caldera Vilama, Mioceno superior, Puna argentino-boliviana: Mecanismos eruptivos y Petrogénesis. Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de la Plata, (inédito), La Plata.
- Lindsay, J.M., de Silva, S., Trumbull, R., Emmertmann, R. y Wemmer, K. 2001. La Pacana caldera, N. Chile: a re-evaluation of the stratigraphy and volcanology of one of the world's largest resurgent calderas. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 106(1/2): 145-173.
- Ort, M. 1993. Eruptive processes and caldera formation in a nested downsag-collapse caldera: Cerro Panizos, central Andes Mountains. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 56: 221-252.
- Pan, Y-S. 1974. The genesis of the Mexican type tin deposits in acid volcanics. Tesis Doctoral, Columbia University, 286 p., New York.
- Polo, L. A., 2008. Petrografia e Quimica dos ignimbritos do Cerro Pululus e sua correlação com os depósitos da Caldeira Vilama, Puna, Andes Centrais, NW da Argentina. Tesis de Maestría. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, (inédito), 191 p., São Paulo.
- Polo, L.A. 2004. Vulcanismo Tardío do Complexo de Caldeiras Vilama-Coruto, Puna Jujenha, Argentina: evolução vulcânica do Cerro Pululus". Tesis de Grado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, (inédito), 75p., São Paulo.
- Ramírez, A., Coira, B. y Díaz, A. 2008. Complejo Volcánico Caucani-Solterio-Colorado: su estratigrafía, evolución magmática y relación con eventos volcánicos terciarios en Puna jujeña. 17° Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 235-236, Jujuy.
- Rosì, M., Landì, P., Polacci, M., Di Muro, A. y Zandomenghi, D. 2004. Role of conduit shear on ascent of the crystal-rich magma feeding the 800-year-b.p. plinian eruption of Quilotoa Volcano (Ecuador). *Bulletin of Volcanology* 66: 307-321.
- Sgrosso, P. 1943. Contribución al conocimiento de la minería y geología del noroeste argentino. Dirección de Minas y Geología, Boletín 53: 1-30, Buenos Aires.
- Soler, M.M. 2005. Caldera Vilama (Mioceno Superior): Su Estratigrafía, Evolución Magmática y Relación con Eventos Ignimbritos Tempranos. Puna Argentina - Altiplano Boliviano. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Salta, (inédito), 358 p., Salta.
- Soler, M.M., Caffé, P.J., Coira, B.L., Onoe, A.T., y Mahlburg Kay, S. 2007. Geology of the Vilama caldera: A new interpretation of a large-scale explosive event in the Central Andean plateau during the Upper Miocene. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 164: 27-53.
- Turner, J.C.M. 1959. Estratigrafía del cordón de Escaya y de la Sierra de Rinconada (Jujuy). *Asociación Geológica Argentina, Revista* 13(1-2): 15-39.
- Turner, J.C.M. 1964. Descripción geológica de la Hoja 2c, Santa Victoria (Provincias de Salta y Jujuy). Instituto Nacional de Geología y Minería, Boletín 104, 83 p., Buenos Aires.
- Turner, J.C.M. 1978. Descripción geológica de las Hojas 1a y b, Santa Catalina y 2a, San Juan de Oro, Provincia de Jujuy. Servicio Geológico Nacional, Boletín 156-157, 56 p., Buenos Aires.
- Turner, J.C.M. 1982. Descripción geológica de la Hoja 3ab, Mina Pirquitas, Provincia de Jujuy. Servicio Geológico Nacional, Boletín 187, Buenos Aires.

Recibido: 29 de octubre, 2009.

Aceptado: 15 de diciembre, 2009.