

Caracterización geológica y petrológica de la Fonolita Jaboncillo, sierra de Valle Fértil, provincia de San Juan

Ricardo GÓMEZ^{1,2}, Brígida CASTRO DE MACHUCA^{3,4}, María Gimena LÓPEZ^{3,4} y Gladis PALACIO BALDERRAMO^{3,4}

¹Museo de Historia Natural de San Rafael, Mendoza.

²Instituto de Investigaciones en Paleobiología y Geología - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas - Universidad Nacional de Río Negro.

³Instituto de Geología, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de San Juan.

⁴Centro de Investigaciones de la Geósfera y la Biósfera - Consejo Nacional de Investigaciones de Científicas y Técnicas - Universidad Nacional de San Juan.

Email: rgomez@unrn.edu.ar

Editor: Pablo Caffè

RESUMEN

En el sector central de la sierra de Valle Fértil, aflora un domo fonolítico, aquí llamado Fonolita Jaboncillo, rodeado por una brecha discontinua compuesta por fragmentos de rocas del basamento y clastos ígneos juveniles. La fonolita exhibe textura porfírica con feldespato alcalino (principalmente anortoclasa) como mineral dominante y egrina subordinada, ambos como feno- y microfenocristales. Es una roca subsaturada en sílice, Ne-normativa y se proyecta en el campo de las fonolitas en el límite con las traquitas según la clasificación Total Alkali Silica. Los valores del índice de alcalinidad la relacionan con el campo peralcalino. El patrón de tierras raras (REE) normalizado al condrito se caracteriza por el enriquecimiento en tierras raras livianas (LREE) con relación a las tierras raras pesadas (HREE) con un diseño de pendiente abrupta para las primeras y casi plano para las últimas. El fraccionamiento cristalino dominado por plagioclasa y feldespato potásico se infiere a partir del empobrecimiento en Sr y Ba y de la anomalía negativa de Eu. Asimismo, las anomalías negativas extremas en P y Ti manifiestan el importante papel del apatito y la titano-magnetita durante el fraccionamiento del fundido. Se sugiere una relación petrogenética entre la fonolita y basaltos alcalinos (Ne-normativos) presentes en el área mediante fraccionamiento cristalino en un marco tectónico extensional de intraplaca continental. Las evidencias petro-estructurales indican que la Fonolita Jaboncillo representa un criptodomo que se emplazó en la brecha freatomagmática endógena (diatrema) producida por el ascenso y contacto del magma con agua subterránea.

Palabras clave: *Criptodomo, roca peralcalina, cristalización fraccionada, intraplaca continental, Triásico.*

ABSTRACT

Geologic and petrographic features of the Jaboncillo Phonolite, Sierra de Valle Fértil, Province of San Juan.

In the central section of the Sierra de Valle Fértil, outcrops dome-shaped phonolite, called Jaboncillo Phonolite, surrounded by a disrupted breccia composed by basement and juvenile igneous rock fragments. The phonolite exhibits porphyritic texture with dominant alkali feldspar (main anorthoclase) and minor aegirine, both as pheno- and microphenocrysts. The rock is silica-subsaturated, Ne-normative, and it plots in the phonolite field close to the trachyte boundary in the Total Alkali Silica classification scheme. The values of the alkalinity index relate the rock to the peralkaline field. The chondrite-normalized rare-earth elements (REE) pattern is characterized by enrichment of light rare-earth elements (LREE) related to the heavy rare-earth elements (HREE), with a remarkably steep pattern for the first and almost flat for the last. Mostly plagioclase and K-feldspar crystal fractionation can be inferred from the depletions in Sr and Ba and negative Eu anomaly. Moreover, extreme negative P and Ti-anomalies underscore the important role of apatite and titanium-magnetite during melt fractionation. A petrogenetic relationship is suggested between alkali Ne-normative basalts found in the area and the phonolite, by fractional crystallization within an extensional intraplate continental setting. Petro-structural evidence indicates that the Jaboncillo Phonolite represents a cryptodome-like intrusion emplaced into the endogenous phreatomagmatic breccia (diatrema) generated by ascension and contact of the magma with underground water.

Keywords: *Cryptodome, peralkaline rock, fractional crystallization, continental intraplate, Triassic.*

INTRODUCCIÓN

Como resultado de la tectónica extensional que afectó el borde occidental de Gondwana a partir del Pérmico Tardío y que se prolongó durante todo el Triásico (Grulbanson *et al.* 2015), se emplazaron en la sierra de Valle Fértil (Sierras Pampeanas Occidentales, provincia de San Juan), diversas manifestaciones de vulcanismo alcalino. Entre ellas, se encuentra la litología objeto de estudio, que representa uno de los términos más evolucionados de una *suite* de rocas alcalinas estrechamente asociadas en tiempo y espacio.

El área de trabajo (Fig. 1a) se ubica en el sector central de la sierra de Valle Fértil, distante unos 265 km de la ciudad capital de San Juan. Desde la localidad de San Agustín de Valle Fértil, cabecera del departamento homónimo, se deben transitar unos 14 km en dirección al suroeste hasta llegar a la desembocadura de la quebrada del Jaboncillo y, a partir de allí, se necesitan recorrer por dicha quebrada aproximadamente 12 km hasta alcanzar el afloramiento objeto de estudio, ubicado próximo a las nacientes del río homónimo (30°41'27,24" S - 67°39'36,84" O).

En este trabajo se dan a conocer los resultados del estudio geológico-petroológico de un cuerpo ígneo al que hemos denominado Fonolita Jaboncillo, más conocido por los lugareños como *Horco Bola*, nombre aborígen cuyo significado es cerro Bola debido a su forma.

La investigación desarrollada, que aporta al conocimiento de los episodios magmáticos acaecidos en la sierra de Valle Fértil durante el evento extensional triásico, tuvo como soporte diferentes técnicas que permitieron obtener nuevos datos acerca de la naturaleza, composición y procesos petrogenéticos que dieron origen a este cuerpo ígneo, que contaba con muy escasa información previa. Asimismo, se propone un mecanismo de emplazamiento y se incluye un modelo que lo ilustra.

MARCO GEOLÓGICO

La sierra de Valle Fértil y su prolongación austral, la sierra de La Huerta, constituyen una unidad orográfica de rumbo NNO de 140 km de longitud por 30 km de ancho,

ubicada entre los 29°55' y 31°28' de latitud Sur y 67°15' y 68°10' de longitud Oeste (Fig. 1a), cuya morfología es la de bloques segmentados y elevados diferencialmente por la tectónica andina. El cordón montañoso está siendo levantado por una falla buzante al este que se ubica en el borde occidental del mismo y que coincide, a escala regional, con el lineamiento Valle Fértil (Jordan y Allmendinger 1986). Las sierras están constituidas por un basamento ígneo-metamórfico (Complejo Valle Fértil, Cuerda *et al.* 1984) integrado por paragneises y migmatitas de alto grado intruidas por rocas plutónicas predominantemente máficas, asignado al Paleozoico inferior (Pankhurst *et al.* 2000; Ducea *et al.* 2010; Otamendi *et al.* 2009, 2012). Las rocas ígneas son producto de la actividad magmática del orógeno Famatiniano, en tanto las rocas metamórficas, que derivan de protolitos sedimentarios, alcanzaron su pico térmico durante el mismo estadio magmático. El cinturón orogénico Famatiniano corresponde a un arco magmático que se generó y creció durante el Ordovícico Inferior a Medio (\approx 495-460 Ma) en el borde occidental de Gondwana (Toselli *et al.* 1996, Pankhurst *et al.* 1998, Otamendi *et al.* 2009, 2012). La colisión continente-continente entre una microplaca alóctona (terreno Cuyania) y el margen occidental de Gondwana, provocó el cierre y la exhumación temprana de este arco y su emplazamiento en la corteza superior (Thomas y Astini 1996, Ramos *et al.* 1996).

En algunos sectores y en discordancia sobre el basamento ígneo-metamórfico, se disponen depósitos continentales del Neopaleozoico y continentales-volcánicos del Triásico, entre los que se encuentra la Fonolita Jaboncillo. Este vulcanismo se asocia a procesos extensivos en la litósfera continental debido a los esfuerzos generados durante la extensión triásica que afectó el borde occidental del continente de Gondwana (Ramos y Kay 1991).

Las manifestaciones de este vulcanismo alcalino fueron descritas por Mirré (1976), quien se refirió al conjunto de rocas ígneas como "escasos afloramientos de reducida extensión de distintos tipos de rocas volcánicas cuya composición general indica la existencia de una Asociación Volcánica Continental no orogénica de

edad triásica incierta". Este trabajo es el único antecedente donde se menciona al afloramiento de fonolita aquí estudiado. Según Mirré (1976), las rocas alcalinas comprenden desde basaltos alcalinos, basaltos olivínicos y traquibasaltos, hasta fonolitas, traquitas y riolitas alcalinas, que suprayacen o intruyen al Complejo Valle Fértil. Asimismo, dicho autor distinguió dos ambientes de emplazamiento de estas rocas, la zona de afloramientos de fonolitas y traquitas dentro del cuerpo principal de la Sierra de Valle Fértil, y la zona de afloramientos de basaltos olivínicos alcalinos y traquibasaltos en el interior de la depresión intermontana del Potrero y en el borde oriental del bloque serrano, al este de dicha depresión (Fig. 1a).

En base a similitudes petrológicas y geoquímicas con los basaltos de la cuenca de Ischigualasto - Villa Unión, al norte del área de estudio, las vulcanitas alcalinas de la Sierra de Valle Fértil fueron incluidas en la Formación Baldecitos (Triásico Medio) por Limarino *et al.* (2008 y referencias allí citadas). La petrología de las rocas basálticas de la Formación Baldecitos fue documentada por Page *et al.* (1997), quienes identificaron una serie magmática que varía desde tefritas y basanitas hasta tefrifonolitas, con escasos basaltos y traquiandesitas, donde los distintos tipos de lavas están relacionados por procesos de asimilación y cristalización fraccionada. Estos autores destacan que el magmatismo básico es fuertemente alcalino en los sectores más alejados de la cuenca y en la parte más baja de la secuencia estratigráfica triásica, en tanto que los basaltos intercalados en los sectores cuspidales de la sucesión son de tendencia subalcalina. A partir de ese estudio, sugieren dos asociaciones magmáticas diferentes, ambas con un origen común, pero producto de diferentes grados de fusión y, por lo tanto, con una evolución independiente.

Trabajos recientes de Castro de Machuca *et al.* (2012, 2013), López *et al.* (2014), López y Castro de Machuca (2015), Castro de Machuca y López (2016) y Gómez *et al.* (2015), proporcionaron nueva información acerca de las características petrográficas-petroológicas de las diversas manifestaciones del magmatismo alcalino al que se vincula la Fonolita Jaboncillo, y aportaron las primeras dataciones ra-

dimétricas en vulcanitas de la sierra de Valle Fértil que confirman su edad triásica ($238,1 \pm 0,4$ Ma, López *et al.* 2015; 218 ± 7 Ma, Castro de Machuca *et al.* 2015).

METODOLOGÍA

Considerando los escasos antecedentes bibliográficos existentes, la Fonolita Jaboncillo se localizó mediante imágenes satelitales del software libre *Google Earth*, tomando como base la hoja geológica 19e-Valle Fértil (Mirré 1976).

En el campo, se efectuó la descripción de los aspectos geométricos, estructurales y texturales de las distintas facies que conforman el afloramiento fonolítico y su relación con las rocas encajonantes (tipo de contactos, evidencias de metamorfismo de contacto, etc.). Se determinaron dimensiones y espesores aproximados y se midieron rasgos estructurales, tales como bandeamiento, rumbo y buzamiento de las capas. Finalmente, se procedió a la toma de muestras georeferenciadas mediante un sistema de posicionamiento global (GPS) y de fotografías de vista panorámica y de detalle.

Las muestras recolectadas se describieron con lupa binocular y se seleccionaron las más representativas para la confección de cortes delgados que fueron estudiados con un microscopio de polarización para luz transmitida Leica DMP 750 con cámara digital para la toma de fotomicrografías. En dos secciones delgadas, se aplicaron técnicas de tinción con cobaltinitrito de sodio, azul de metileno y verde de malaquita, para confirmar la presencia de feldespato potásico y nefelina. En base al estudio petrográfico, se eligieron las cuatro muestras más frescas (FJ2, FJ3, FJ10-20 y FJ11-20) para análisis geoquímico de roca total. Los óxidos mayoritarios fueron determinados por espectrometría de emisión atómica con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-AES), en tanto para los elementos traza y tierras raras, se aplicó espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-MS). La precisión analítica fue de 0,01 % para Al_2O_3 , CaO, Fe_2O_3 , MgO y SiO_2 , y de 0,001 % para BaO, Cr_2O_3 , K_2O , MnO, Na_2O , P_2O_5 y SrO. Para los elementos traza y tierras raras, la precisión del análisis fue 5 ppm (V),

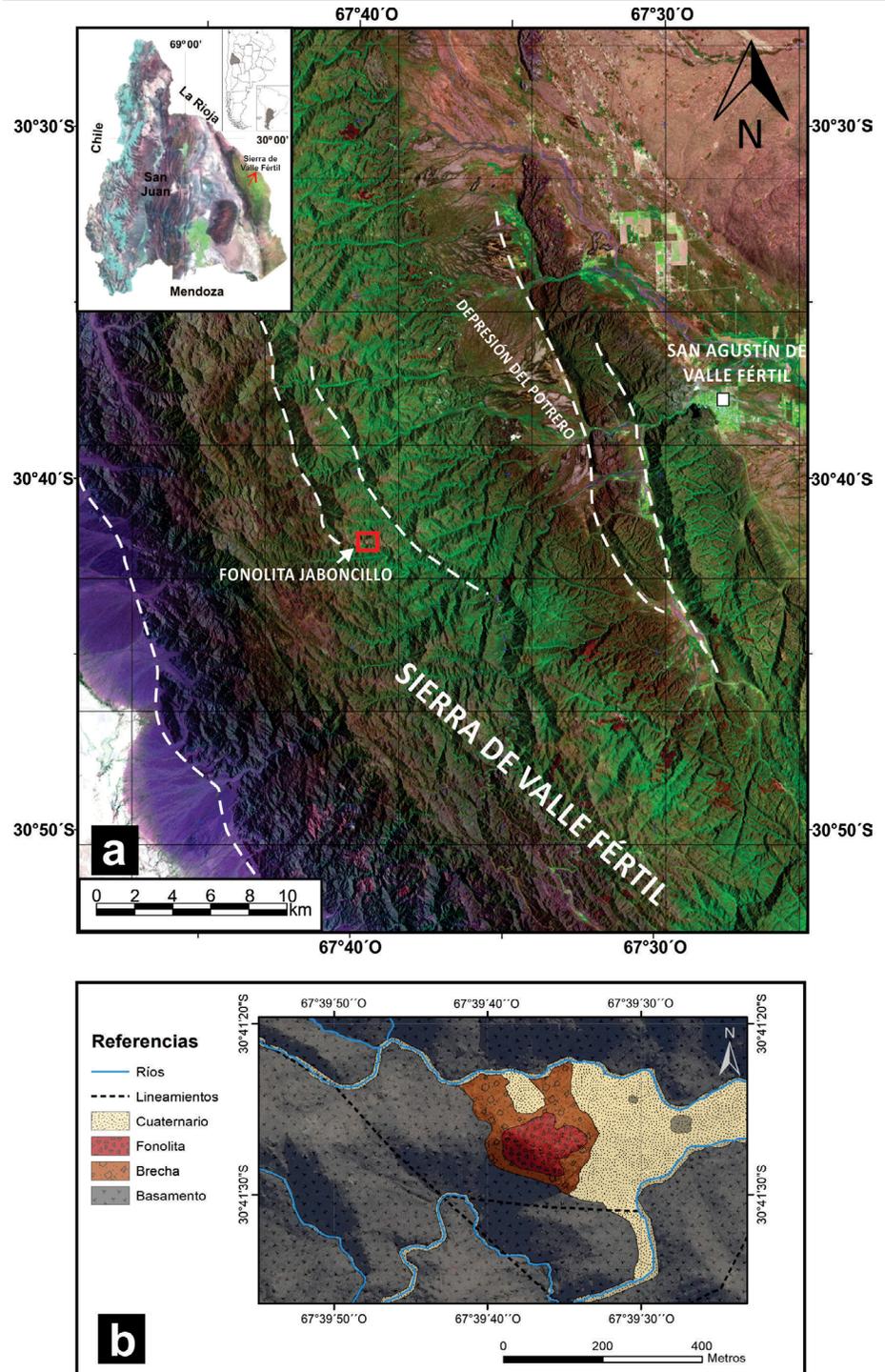


Figura 1. a) Imagen satelital *Landsat 7* combinación de banda 742 de la sierra de Valle Fértil (georeferenciación Posgar 94-WGS 84) con ubicación de la Fonolita Jaboncillo. Las líneas de puntos blancos indican lineamientos interpretados; b) Mapa geológico de la Fonolita Jaboncillo.

2 ppm (Mo, Zr), 1 ppm (W), 0,5 ppm (Ba, Ce, Co, La, Tl, Y), 0,2 ppm (Hf, Nb, Rb), 0,1 ppm (Ga, Nd, Sr, Ta), 0,05 ppm (Dy, Gd, Th, U), 0,03 ppm (Er, Eu, Pr, Sm, Yb) y 0,01 ppm (Cs, Ho, Lu, Tb, Tm). Los análisis se realizaron en los laboratorios ALS *Minerals* (Canadá y Perú) y los resultados

se procesaron con los programas *IGPET* 2014 y *GCDkit* 3.0.

Para las determinaciones químicas de las fases minerales, se utilizó una microsonda *JEOL JXA-8230* perteneciente al Laboratorio de Microscopía Electrónica y Análisis por Rayos X, Universidad Nacional de

Córdoba y Consejo de Investigaciones Científicas y Técnicas (LAMARX), equipada con un espectrómetro de dispersión de energía de rayos X (EDS) y otro de dispersión de longitud de onda de rayos X (WDS). Las condiciones operativas del instrumento fueron 15kV de potencia eléctrica y 10 nA de intensidad de corriente, con un haz de electrones de diámetro promedio de 10 μm . Los datos obtenidos fueron procesados con planillas de cálculo Excel (GabbroSoft 2011).

CARACTERÍSTICAS DE CAMPO

El afloramiento estudiado es aproximadamente circular en planta y cubre un área restringida de unos 0,05 km² (Fig. 1b). A partir de las observaciones de campo, se distinguieron dos secciones claramente diferenciables: una inferior y otra superior (Fig. 2a, b).

La sección inferior corresponde a una brecha matriz sostén, que tiene un espesor máximo aflorante de aproximadamente 50 m, es de color pardo amarillento y posee abundantes fragmentos angulosos a subangulosos de tamaño heterogéneo (0,5 cm a 2 m), que ocupan aproximadamente el 43 % del volumen total de la roca. Presenta una composición polimítica, caracterizada por fragmentos de la roca de caja (metagabro de grano grueso) y fragmentos juveniles macizos de fonolita (Fig. 2c). La distribución de los fragmentos mencionados, muy alterados hidrotermalmente en la matriz fragmentaria es errática y en ocasiones han sido removidos por procesos erosivos generando cavidades de tamaño variado (Fig. 2d). En algunos sectores, se aprecia marcado diaclasamiento subvertical.

La sección superior corresponde a la Fonolita Jaboncillo *sensu stricto*. Se trata de un cuerpo con forma dómica que intruye al basamento cristalino y está confinado por la pared de brecha que forma un anillo discontinuo alrededor del mismo (Fig. 2b). La fonolita tiene unos 20 m de espesor total aflorante, pendientes abruptas y un diámetro máximo que oscila entre 140 y 170 m. La roca es maciza, de grano medio a fino y color gris oliva claro en superficie fresca que varía a pardo amarillento

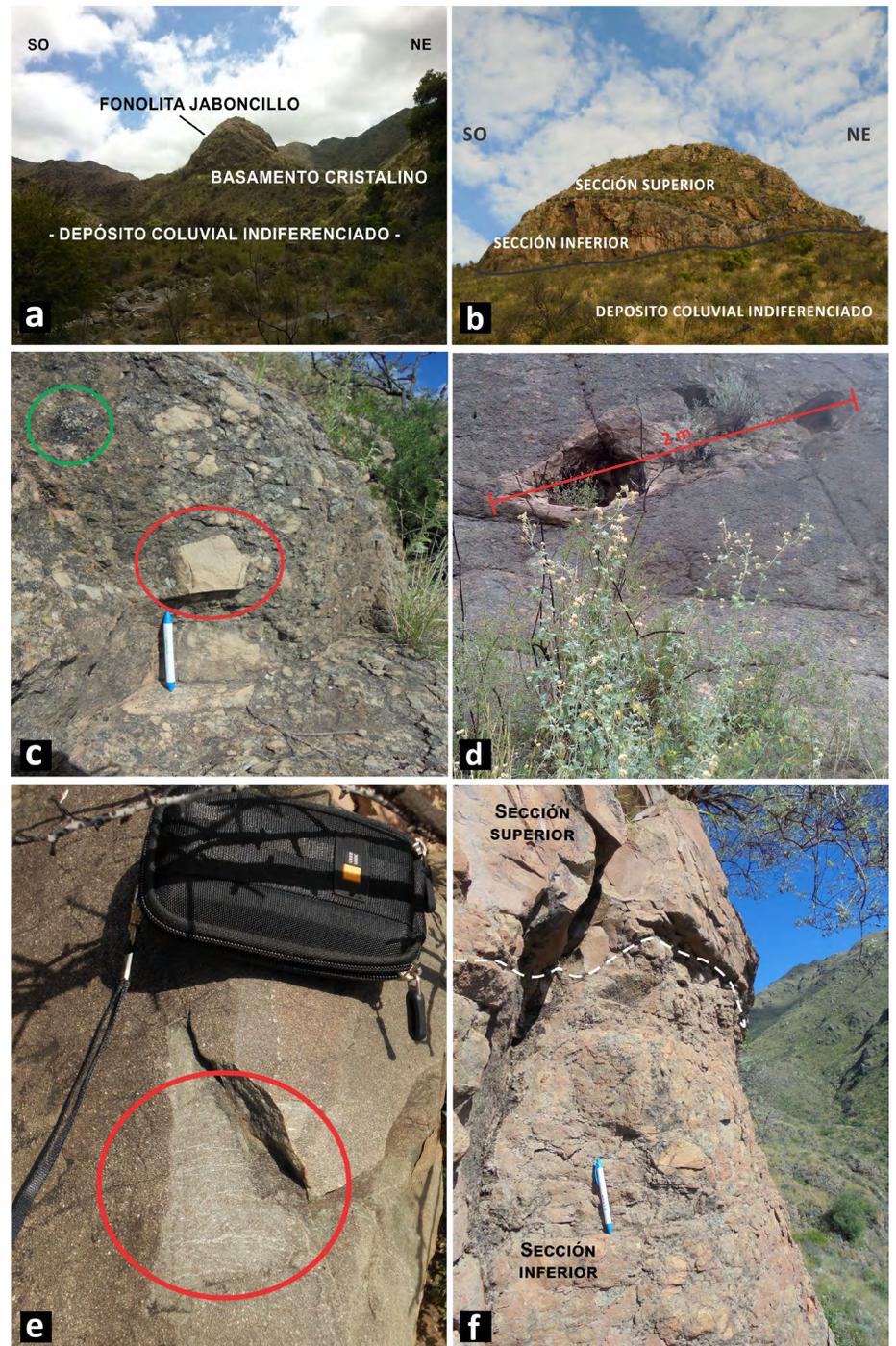


Figura 2. a) Vista panorámica del cerro Horco Bola (Fonolita Jaboncillo). Se aprecia la forma dómica del afloramiento; b) Litologías que conforman el afloramiento: sección inferior: brecha y sección superior: fonolita *sensu stricto*. En la base, depósito coluvial indiferenciado; c) Detalle de la brecha. Fragmento juvenil de fonolita marcadamente anguloso (círculo rojo) y fragmento de metagabro (círculo verde); d) Cavidad en la brecha producto de la remoción parcial de un clasto juvenil de fonolita; e) Líneas de flujo en un bloque de fonolita; f) Contacto neto entre la sección inferior y la sección superior.

claro en las rocas más alteradas. Tiene textura porfírica, con fenocristales de feldespato alcalino fuertemente orientados en una pasta afanítica. La orientación de los fenocristales se da normalmente en dirección Este-Oeste, aunque por secto-

res se disponen de manera vertical. En algunos bloques caídos de la fonolita, la meteorización ha resaltado el bandeamiento de flujo (Fig. 2e) y acentuado una incipiente disyunción catafilar. Los contactos entre ambas secciones de

la fonolita (Fig. 2f), y entre ellas y el basamento cristalino, son netos. Hacia el este, el afloramiento ígneo está en contacto con depósitos coluviales recientes (Figs. 2a, b), no cementados, que lo cubren en parte e incluyen bloques de rocas del basamento, de la fonolita y de la brecha.

PETROGRAFÍA

Brecha

Se trata de una brecha matriz sostén (Fig. 3a) con fragmentos de la roca de caja y fragmentos ígneos juveniles. Los primeros corresponden a un metagabro olivínico de grano grueso y textura granoblástica compuesto por plagioclasa fuertemente sericitizada, olivino alterado a minerales serpentínicos, piroxeno y hornblenda (Figs. 3b, c). Los fragmentos juveniles poseen escasos fenocristales en una mesostasis formada por tablillas orientadas de feldespato alcalino con textura traquítica (Fig. 3b) y en menor proporción por egirina.

La matriz de la brecha es de tipo fragmentaria, de granulometría ceniza gruesa a lapilli fino (1-5 mm), tiene la misma composición que los fragmentos, con minerales derivados de las rocas del basamento (piroxeno, anfíbol, plagioclasa), clastos de fonolita y minerales opacos diseminados.

El cemento representa el 10 % del volumen total, es de color gris oliva, grano muy fino y consiste en un agregado de minerales del grupo de las zeolitas a los que se asocian calcita, clorita y minerales arcillosos. El contacto entre los fragmentos y el material aglutinante es neto, sin evidencias de reacción.

Fonolita

La roca es holocristalina, con textura porfírica variable por sectores a glomeroporfírica. El feldespato alcalino es el mineral más abundante y se presenta como feno y microfenocristales subhedrales a euhedrales, fuertemente orientados con textura traquítica y tamaños que varían entre 0,1 a 1,5 mm y 0,05 a 0,1 mm, respectivamente (Fig. 3d). Los fenocristales y microfenocristales constituyen aproximadamente el 20 % del volumen total de la roca. La mayoría tiene maclas combinadas de Car-

lsbad y polisintéticas en enrejado (rasgo característico de la anortoclasa), siendo también frecuentes las maclas de penetración, la textura en cola de pez y los intercrecimientos micropertíticos en sanidina (Figs. 3e, f). En raras ocasiones, se observaron abanicos de fibras divergentes del feldespato alcalino (esferulitas). El otro mineral esencial es clinopiroxeno rico en Na (egirina), que se encuentra como microfenocristales euhedrales de color verde oscuro, con fuerte pleocroísmo y zonación en reloj de arena típica de los piroxenos de rocas alcalinas (Fig. 3g). Con frecuencia el clinopiroxeno presenta bordes más oscuros por tener estructura zonal.

La mesostasis está conformada por un agregado microgranular de feldespatos alcalinos alterados y egirina, con tamaño de grano $\leq 0,05$ mm. La presencia de nefelina intersticial y como microfenocristales euhedrales (Fig. 3h) se corroboró mediante tinción con soluciones de azul de metileno y verde de malaquita (Fig. 3i). Esta técnica reveló, asimismo, la estructura zonal del feldespatoide. Otros minerales accesorios identificados son circón y opacos.

Abundantes minerales del grupo de las zeolitas, minerales arcillosos y calcita, formados por la descomposición de los minerales primarios, son los principales productos de alteración rellenando intersticios en la pasta y obliterando la mineralogía original de la roca.

QUÍMICA MINERAL

Se realizaron análisis de química mineral en piroxeno y feldespatos alcalinos de una muestra de la fonolita (FJ3). Los resultados obtenidos para el piroxeno se descartaron debido al elevado error de medida de los análisis. Pese a ello, se efectuó un mapeo composicional que puso en evidencia variaciones composicionales principalmente en los elementos Na, Mn y Ca, este último catión con una nítida disminución hacia los bordes de los cristales. También se obtuvieron imágenes de electrones retrodispersados en falso color que resaltan la estructura zonal del piroxeno (Fig. 4a).

Para determinar la composición del feldespato, se efectuaron análisis microquímicos tanto de los fenocristales como de

la mesostasis. Los datos analíticos de un fenocristal de feldespato zonado (Cuadro 1, Fig. 4b, c) indican una variación composicional desde Ab94 en el núcleo hasta Ab42 en el borde, es decir que abarca el espectro completo entre albita (punto Kfs 5), anortoclasa (puntos Kfs 6-7-8) y sanidina (puntos Kfs 1-2-3-4). Este hecho refleja un incremento paulatino en el contenido de potasio desde el interior del cristal hacia los bordes, así como la presencia de intercrecimientos micropertíticos. El análisis con espectrómetro de dispersión de energía y de longitud de onda de rayos X, muestra en los mapeos composicionales variación en los contenidos de los elementos Na y K. El Na decrece en tanto el K se incrementa hacia los bordes del fenocristal en concordancia con el análisis cuantitativo que indica mayor contenido en el componente sanidina hacia los bordes. Los análisis en feldespatos alcalinos de la pasta (puntos Kfs 9-10-11-12-13-14) revelan una composición más homogénea con sanidina dominante.

GEOQUÍMICA DE ROCA TOTAL

Las muestras de la fonolita tienen contenidos de SiO_2 acotados entre 58,6 y 59,7 %, de Al_2O_3 relativamente altos entre 18,9-19,15 %, Na_2O entre 8,69 a 9,37 % y K_2O entre 4,28-4,73 % (Cuadro 2). Los contenidos de MgO , CaO y TiO_2 son muy bajos (0,05 - 0,18 %; 0,76 - 0,96 % y 0,02 - 0,04 %; respectivamente). Para clasificar la roca, se utilizó el diagrama TAS (SiO_2 vs. $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) de Le Maitre *et al.* (1989) para rocas volcánicas (Fig. 5a). Los elementos mayoritarios se recalcularon sobre una base 100 % libre de volátiles. En el diagrama, las muestras se proyectan por encima de la línea de Irvine y Baragar (1971) que separa el campo alcalino del subalcalino, confirmando la afinidad alcalina de esta litología. Las muestras FJ2 y FJ3 se disponen en el campo de las fonolitas, mientras que las muestras FJ10-20 y FJ11-20 se agrupan en el límite con el campo de las traquitas. Este hecho puede explicarse por la mayor alteración de estas últimas cuyo *lost on ignition* (LOI) es considerablemente alto, entre 4% y 5%, lo que sugiere movili-

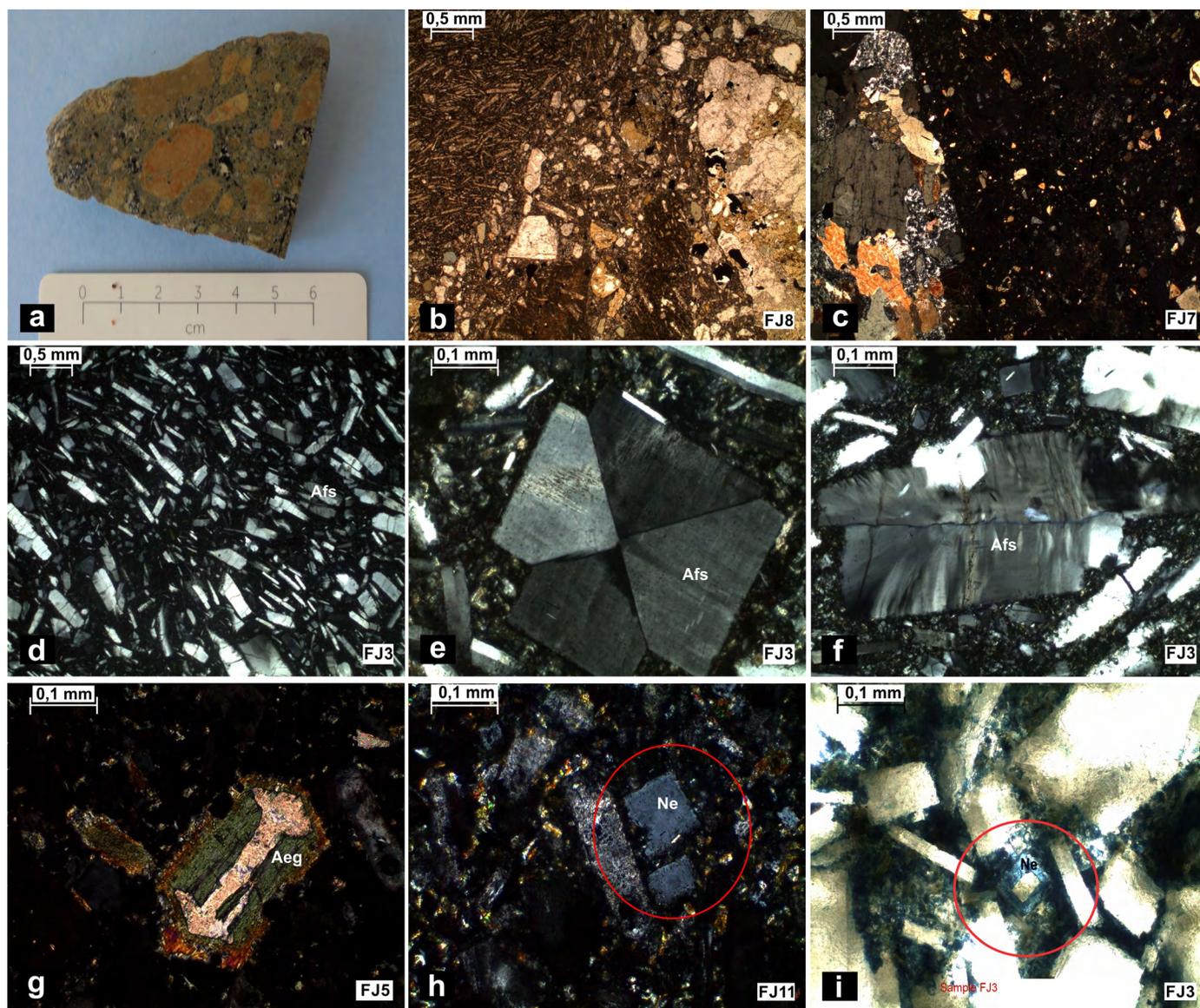


Figura 3. a) Muestra de mano de la brecha en la que se observa la disposición caótica de los fragmentos. Fotomicrografías: b) Fragmento de roca de caja (derecha) y fragmento juvenil fonolítico con textura traquítica (izquierda) inmersos en una matriz de la misma composición que este último (nicoles paralelos); c) Clasto de metagabro en contacto con matriz + cemento (nicoles cruzados); d) Feno- y microfencristales de feldespato alcalino orientados con textura traquítica (nicoles cruzados); e) Macla en cuña en fenocristal de anortoclasa y maclado en enrejado difuso (nicoles cruzados); f) Textura en cola de pez en fenocristal de anortoclasa (nicoles cruzados); g) Microfenocristal euhedral de egirina con estructura zonal (nicoles cruzados); h) Microfenocristales euhedrales de nefelina en círculo rojo (nicoles cruzados); i) Ensayo de tinción con solución de azul de metileno que resalta la estructura zonal del feldespatoide; las partes sin teñir son más ricas en SiO₂ (nicoles paralelos). Abreviaturas minerales (Kretz 1983): Aeg: Egirina, Feldespato alcalino: Afs, Ne: Nefelina.

ción de los elementos mayoritarios. En el diagrama multicatiónico de De la Roche *et al.* (1980) (no incluido en este trabajo), las muestras más alteradas, consecuentemente se localizan en el campo de las traquifonolitas. A partir de estas observaciones, los análisis se procesaron en el diagrama de clasificación de Winchester y Floyd (1977) que utiliza como parámetros elementos considerados “inmóviles” ante la alteración/meteorización, y en el cual la totalidad de las muestras se pro-

yecta en el campo de las fonolitas (Fig. 5b). El índice de peralcalinidad basado en la relación molar $(Na_2O+K_2O)/Al_2O_3 \geq 1$ es $\approx 1,03$ lo que determina el carácter levemente peralcalino. El número de magnesio $Mg\# = [100 * (MgO / (FeO + MgO))] \text{ mol.}\%$ entre 2,5 a 8,5, al igual que la concentración de Cr ≤ 20 ppm y de CaO son muy bajos, mientras que el contenido de Al₂O₃ es alto ($\approx 19\%$), valores típicos de la naturaleza evolucionada de esta litología y consistentes con

un fraccionamiento sustancial de olivino y piroxeno en el magma parental. El cálculo de la norma CIPW indica una mineralogía típica de rocas volcánicas alcalinas subsaturadas en sílice. La Fonolita Jaboncillo es acmita-(Ac) y nefelina-(Ne) normativa con contenidos de hasta 4,5 % de acmita y 16 % de nefelina. La presencia de estos minerales en la norma es coherente con la mineralogía identificada al microscopio: feldespato alcalino, egirina y nefelina. Los diagramas

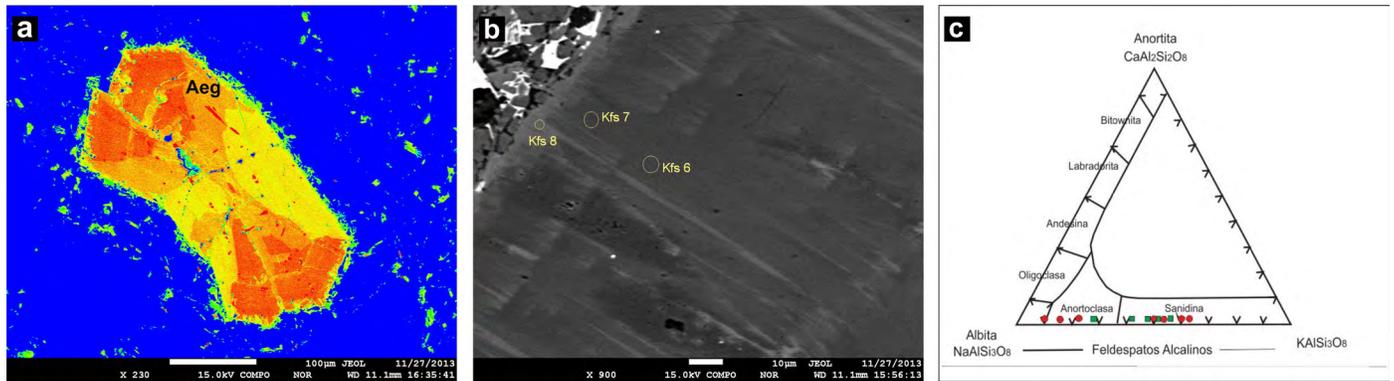


Figura 4. a) Imagen de electrones retrodispersados en falso color de un fenocristal de clinopiroxeno. Se destaca la estructura zonal en reloj de arena; b) Imagen de detalle de electrones retrodispersados de un fenocristal de feldespato microperítico con puntos de análisis; c) Diagrama triangular Ab-An-Or de clasificación de los feldespatos. Los círculos de color rojo corresponden a fenocristales y los cuadrados de color verde a feldespatos de la mesostasis. Abreviaturas: Aeg: Egirina, Feldespato potásico: Kfs.

ternarios de Irvine y Baragar (1971) 'Ne-Or-Q' y 'Ab-An-Or' (no incluidos), sugieren que se trata de una roca alcalina predominantemente sódica.

En el diagrama de tierras raras (REE) normalizado al condrito de Nakamura (1974, Fig. 5c) se aprecia enriquecimiento en las tierras raras livianas (LREE) de hasta 500 veces el valor del condrito, y una concentración baja y uniforme ($\approx 20\text{-}30$ veces el valor condritico) de los elementos de tierras raras pesadas (HREE). El patrón de tierras raras (REE) muestra una pendiente negativa abrupta para las tierras raras livianas (LREE) y un diseño casi plano y homogéneo para las tierras raras pesadas (HREE). El grado de fraccionamiento de las tierras raras (REE) expresado por las razones $(La/Lu)_N$ entre 14,30 a 15,36, $(La/Sm)_N > 1$ (6,3-6,9), $(Sm/Yb)_N > 1$ (2,2-2,3) y $(La/Yb)_N$ entre 14,7 y 15,5, determinan la pendiente negativa del diagrama. Se observa también una anomalía negativa muy acentuada de Europio con la relación Eu/Eu^* ($Eu^* = [(SmN+GdN)/2]$) comprendida entre 0,20 a 0,25.

En el diagrama de multielementos normalizado al condrito de Sun y McDonough (1989), se aprecian anomalías negativas muy pronunciadas de Ba, Sr, P y Ti (Fig. 5d). La fonolita está enriquecida en algunos elementos litófilos de gran radio iónico (LILE) como Cs y Rb, así como en algunos elementos de alto potencial iónico (HFSE) como Th, U, Ta y Zr. La inusual anomalía positiva de Zr se justifica por la presencia de circón observado en las secciones delgadas.

CUADRO 1. Puntos de análisis (Kfs) con microsonda electrónica de un fenocristal (Kfs 1 a 8) de feldespato (Muestra FJ3) y de feldespatos en la mesostasis (Kfs 9 a 14), con los porcentajes de los óxidos mayoritarios y resultados obtenidos con las tablas de cálculo Excel GabbroSoft 2011. Abreviatura: Feldespato potásico: Kfs.

FONOLITA JABONCILLO							DATOS PROCESADOS			
MUESTRA FJ3										
Puntos de Análisis (Kfs)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TOTAL	An	Ab	Or
1	66.13	18.99	0.28	0.02	6.22	7.68	99.32	0.12	55.13	44.76
2	66.36	13.12	0.28	0.02	6.22	7.68	99.68	0.12	55.13	44.76
3	66.41	19.26	0.19	0.06	5.77	8.02	99.7	0.27	52.09	47.63
4	65.59	19.23	0.19	0.06	4.86	9.85	99.88	0.28	42.72	57
5	70.64	19.9	0.03	0.1	9.8	0.86	101.33	0.55	94.01	5.43
6	66.61	19.64	0.13	0.26	9.05	2.86	98.63	1.29	81.72	16.99
7	62.68	19.82	0.25	0.2	9.72	1.73	99	1.03	88.57	10.4
8	65.69	19	0.57	0.02	4.91	9.11	99.31	0.1	45.01	54.89
9	65.48	18.4	0.21	0.11	5.95	7.61	97.76	0.53	54.05	45.43
10	66.43	18.79	0.15	0.15	6.46	7.11	99.07	0.73	57.59	41.68
11	66.63	19.04	0.2	0.21	7.1	6.34	99.56	1	62.38	36.62
12	65.4	18.48	0.43	0.09	5.64	8.33	98.43	0.45	50.48	49.08
13	66.25	19.01	0.34	0.11	6.45	7.07	99.21	0.54	57.79	41.67
14	66.38	19.87	0.13	0.37	8.44	3.63	98.81	1.83	76.49	21.68

Para la discriminación del ambiente tectónico de emplazamiento se utilizó el diagrama triangular La-Y-Nb de Cabanis y Lecolle (1989). En este diagrama (Fig. 5e), las muestras de la fonolita se agrupan en el campo de *rift* de intraplaca continental. En el diagrama de discriminación de Pearce *et al.* (1984) para rocas félsicas basado en los elementos Nb vs. Y (Fig. 5f), las muestras se ubican claramente en el interior del campo de intraplaca.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Por su forma de yacer, estructura y características texturales, se considera que la Fonolita Jaboncillo se intruyó como un cuerpo subvolcánico próximo a la superficie (criptodomo) y quedó expuesto por la subsecuente actividad tectónica y los procesos erosivos. El contacto neto con la roca de caja, donde no hubo reacción o mezcla entre los materiales es indicativo,

entre otras causas, del estado muy viscoso del magma fonolítico.

El emplazamiento de la fonolita se puede sintetizar en cuatro etapas. La primera etapa (Fig. 6a) corresponde al ascenso del magma fonolítico y sobreenfriamiento del mismo en contacto con el encajante, con desarrollo de una facies de grano fino a muy fino. Durante la segunda etapa, (Fig. 6b) se produce la fracturación del borde sobreenfriado y la cubierta metamórfica. La naturaleza explosiva de la actividad eruptiva puede ser atribuida a la interacción entre el agua subterránea y el magma, lo que daría por resultado una diatrema. Los fragmentos de fonolita de granulometría muy fina provienen tanto de los bordes sobreenfriados (fragmentos líticos congñatos) como de niveles más profundos de la cámara magmática aún en estado fundido (fragmentos juveniles). La tercera etapa (Fig. 6c) consiste en el aglutinamiento del material fragmentado por minerales hidrotermales, generándose la brecha. La brecha corresponde a una brecha freatomagmática endógena (diatrema) debido al nivel de emplazamiento del cuerpo ígneo (Sillitoe 1985, Lawless y White 1990). El ascenso final del magma fonolítico taponó el conducto volcánico y generó el cuerpo con forma de domo (criptodomo). Por último, el cuerpo ígneo y la brecha quedaron expuestos en superficie como respuesta a la actividad tectónica de la región y a los procesos erosivos que afectaron el área desde el Mesozoico a la actualidad (Fig. 6d).

Las texturas identificadas en la fonolita reafirman el emplazamiento somero de la misma. La alineación paralela a sub-paralela de los feno y microfenocristales (textura traquítica) se relaciona con el movimiento del magma parcialmente cristalino y es producto principalmente de flujo en el magma. Es muy importante para su formación, una tasa de enfriamiento alta que facilite un rápido incremento de la nucleación. Asimismo, las esferulitas se forman por desvitrificación o por cristalización esquelética cercana a la temperatura de transición del vidrio (Breitkreuz 2013).

La composición Ac- y Ne-normativa de la fonolita es indicativa de su naturaleza subsaturada en sílice y del carácter alcalino predominantemente sódico, siendo esto coherente con la mineralogía identificada

CUADRO 2. Análisis químicos de óxidos mayoritarios y minoritarios en % en peso, elementos traza y tierras raras en ppm, Fe total expresado como Fe₂O₃.

FONOLITA JABONCILLO				
Muestra	FJ2	FJ3	FJ10-20	FJ11-20
SiO ₂	58.6	59.7	58.8	59.2
Al ₂ O ₃	18.95	19.15	18.95	18.9
Fe ₂ O ₃	3.83	3.77	3.78	3.8
CaO	0.96	0.84	0.81	0.76
MgO	0.18	0.09	0.09	0.05
Na ₂ O	9.04	9.37	8.69	9.12
K ₂ O	4.62	4.73	4.49	4.28
TiO ₂	0.03	0.02	0.04	0.03
MnO	0.22	0.2	0.2	0.2
P ₂ O ₅	0.01	0.01	0.06	0.05
LOI	2.01	1.46	5.02	4.42
TOTAL	98.5	99.3	100.93	100.81
Ba	17.9	15.6	25.8	15.5
Ce	264	263	267	266
Co	0.5	0.5		
Cr	<10	20	20	20
Cs	9.62	8.24	11.7	11.85
Dy	11.85	12	12.2	12.05
Er	6.77	6.73	7.32	7.27
Eu	1.06	1.1	0.99	0.91
Ga	50.4	51.4	50.4	50.4
Gd	11.7	11.35	12.65	12.3
Hf	41.4	40.7	43.1	42.4
Ho	2.4	2.28	2.36	2.43
La	144	139.5	152	149
Lu	1.03	0.97	1.02	1.01
Mo	15	17		
Nb	223	215	230	221
Nd	86.4	85.9	92	91.3
Pr	26.7	26.6	26.6	26.7
Rb	242	245	224	214
Sm	13.95	14.25	14.15	15.05
Sn	19	19	18	18
Sr	52.9	17.9	25.8	21.4
Ta	21.3	21	18.8	18.7
Tb	1.88	1.9	2.09	1.98
Th	52.8	49.9	53.4	50.5
Tl	0.5	<0,5		
Tm	0.99	0.99	1.15	1.08
U	14.15	14.25	14.3	14.85
V	<5	<5	13	9
W	4	5	3	3
Y	65.9	65.8	70.5	69.4
Yb	6.63	6.8	7.13	7.22
Zr	1690	1670	1870	1880

en las observaciones petrográficas y en el análisis microquímico: feldespato alcalino (albita, anortoclasa y sanidina), clinopiroxeno (egirina) y nefelina. La zonación observada en el feldespato alcalino y en el clinopiroxeno es un fenómeno común que indica condiciones fluctuantes de composición en la solución sólida de los cristales durante el proceso de cristalización (MacKenzie *et al.* 1982). En el caso de los fenocristales de feldespato los bordes son más ricos en K que los núcleos y composicionalmente similares al feldespato de la pasta (sanidina), lo que sugiere una posible evolución por cristalización fraccionada. Las rocas volcánicas peralcalinas como la Fonolita Jaboncillo, son volumétricamente minoritarias pero están ampliamente distribuidas a nivel mundial y se emplazan comúnmente en ambientes de *rift* continentales (Shao *et al.* 2015 y referencias allí citadas). Las mismas se caracterizan por la abundancia de los elementos más incompatibles especialmente Nb y Ta, y los muy bajos contenidos de Ba, Sr y Eu. La petrogénesis de las rocas volcánicas peralcalinas continúa siendo tema de debate, aunque uno de los modelos más aceptados considera que serían los productos finales de la cristalización fraccionada prolongada de magmas parentales basálticos de composición alcalina (Shao *et al.* 2015 y referencias allí citadas).

El grado de fraccionamiento de las tierras raras expresado por las relaciones $(La/Lu)_N$ entre 14,3 y 15,36 y $(La/Yb)_N$ entre 14,7 y 15,5, evidencia enriquecimiento de las tierras raras livianas (LREE) respecto de las tierras raras pesadas (HREE), una de las características de los magmas alcalinos de intraplaca. Las tierras raras livianas (LREE) se enriquecen en el fundido durante la fusión parcial, particularmente a bajas tasas de fusión. La fuerte anomalía negativa de Europio (Eu/Eu^* entre 0,20 y 0,25) refleja la sustitución de Ca de la plagioclasa por Eu, lo que implica el fraccionamiento y la retención de este elemento por la plagioclasa durante la cristalización fraccionada. Esta anomalía es un buen indicador de que el líquido estuvo en equilibrio con la plagioclasa, ahora ausente (fraccionamiento críptico; Davidson *et al.* 2007). Del mismo modo, el fraccionamiento críptico de feldespato potásico y de plagioclasa sería la expli-

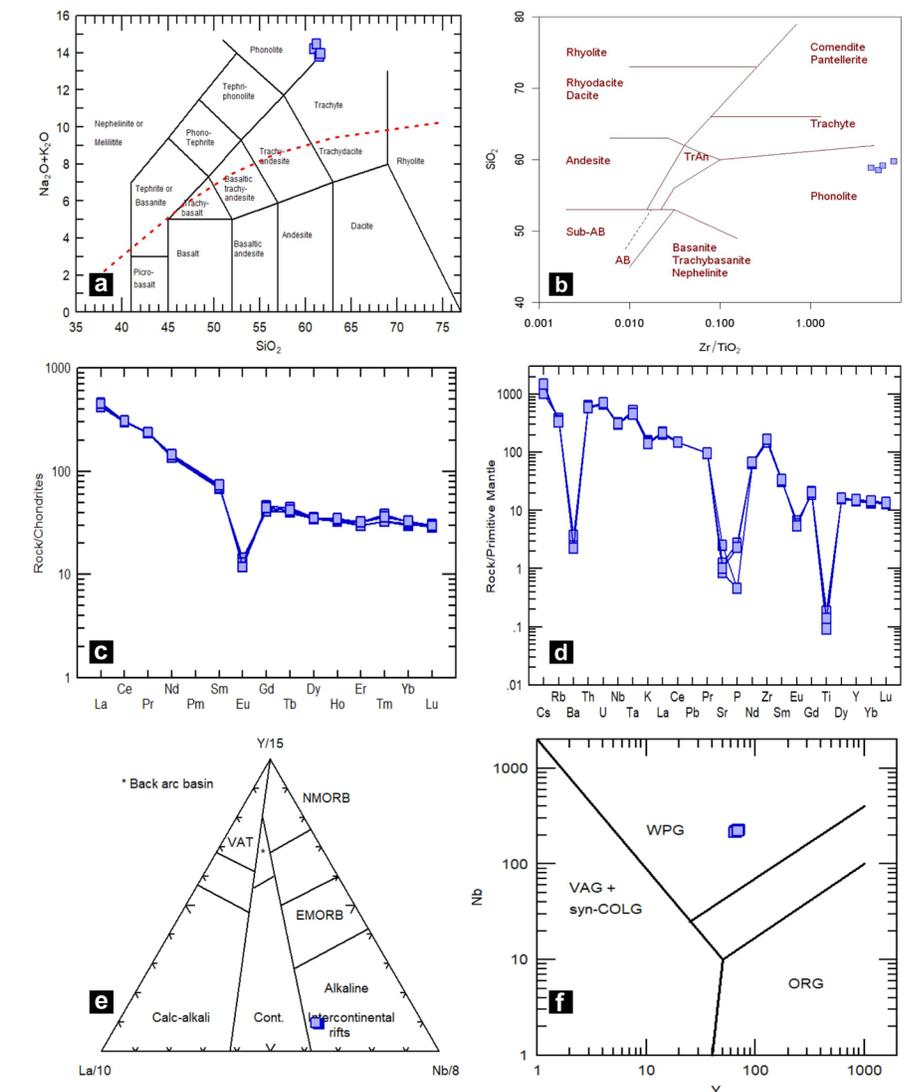


Figura 5. a) Diagrama de clasificación K_2O+Na_2O versus SiO_2 para rocas volcánicas (Le Maitre *et al.* 1989) con la curva divisoria de campos de Irvine y Baragar (1971); b) Diagrama de clasificación de rocas volcánicas de Winchester y Floyd (1977); c) Diagrama de tierras raras normalizado al condrito de Nakamura (1974); d) Diagrama multielementos normalizado a manto primitivo de Sun y McDonough (1989); e) Diagrama triangular de Cabanis y Lecolle (1989). f) Diagrama de discriminación de ambiente tectónico para rocas félsicas Nb vs. Y (Pearce *et al.* 1984). Abreviaturas: E-MORB: basaltos de dorsal mesoceánica enriquecidos, *Back-arc basin*: basaltos de cuenca de retroarco, *Calc-alkali*: basaltos calcoalcalinos de zonas de subducción; N-MORB: basaltos de dorsal mesoceánica; VAT: toleitas de arco volcánico; WPG: granitos de intraplaca; ORG: granitos orogénicos; VAG+Syn-COLG: granitos de arco volcánico y granitos sin-colisionales.

cación más aceptable para los bajos contenidos de Ba y Sr, respectivamente. En los magmas alcalinos, la plagioclasa es la fase que puede simultánea y eficazmente fraccionar Eu y Sr (Niu y O'Hara 2009), dando por resultado el notorio empobrecimiento en estos elementos, lo que también caracteriza a la Fonolita Jaboncillo. El comportamiento del Mg, Fe, Ca, y Sr puede explicarse por el fraccionamiento de olivino, clinopiroxeno y plagioclasa rica en Ca en un magma parental de composición basáltica alcalina (Ne-normativo),

del cual hay numerosos exponentes en la Sierra de Valle Fértil (Castro de Machuca y López 2016). El mayor contenido de Al, Na y K es compatible con el proceso de diferenciación por cristalización fraccionada y consistente con los altos contenidos de elementos incompatibles (LILE y HFS), que son incorporados en las fases portadoras, como circón y nefelina, ambos minerales reconocidos en la Fonolita Jaboncillo. En estas rocas evolucionadas, los contenidos de P extremadamente bajos serían indicativos del fraccionamiento

y separación de apatito durante la cristalización fraccionada, hecho que también podría justificar los bajos contenidos en tierras raras pesadas (HREE), controlados por dicho mineral (Broom-Fendley *et al.* 2016). El fraccionamiento de óxidos de Fe-Ti habría provocado el agotamiento de Ti en estas vulcanitas, lo que se refleja en la notoria anomalía negativa observada en el diagrama de multielementos. El empobrecimiento en tierras raras pesadas (HREE) y el diseño casi plano en el diagrama de tierras raras (REE) normalizado al condrito es un rasgo típico de los magmas alcalinos de intraplaca. Los datos obtenidos permiten especular que la petrogénesis de la Fonolita Jaboncillo deriva de magmas basálticos alcalinos Ne-normativos mediante el proceso de cristalización fraccionada.

Las relaciones entre elementos altamente incompatibles se pueden utilizar no sólo para caracterizar fuentes de magma sino también para detectar fenómenos de asimilación cortical. Según Kieffer *et al.* (2004), valores bajos de la relación Nb/La (< 1) en las rocas volcánicas son un índice confiable de contaminación cortical. Tal característica está ausente en la Fonolita Jaboncillo (Nb/La: 1,48-1,55) por lo que se descarta una asimilación cortical significativa. Los valores Nb/U ($\approx 15,5$) más altos que el promedio de la corteza continental (Nb/U = 9 ± 3 Zhang *et al.* 2009), y otras relaciones entre elementos incompatibles como Th/La ($\approx 0,35$), La/Nb ($\approx 0,65$), Ba/Nb ($\approx 0,08$) y Zr/Nb (≈ 8), tampoco avalan la contaminación con rocas de la corteza continental como mecanismo de diferenciación. Además, la Fonolita Jaboncillo no posee la típica anomalía negativa de Nb-Ta en los diagramas de variación multielementales, que generalmente se interpreta como un indicador de contaminación cortical (Wilson 1993 y referencias allí citadas).

CONCLUSIONES

La Fonolita Jaboncillo se considera uno de los miembros más evolucionados de la serie volcánica alcalina de edad triásica a la que está espacial, temporal y geoquímicamente asociada. El carácter Ne-Ac normativo es indicativo de su génesis a partir de un magma subsaturado en SiO₂ del cual se derivó el magma fonolítico por

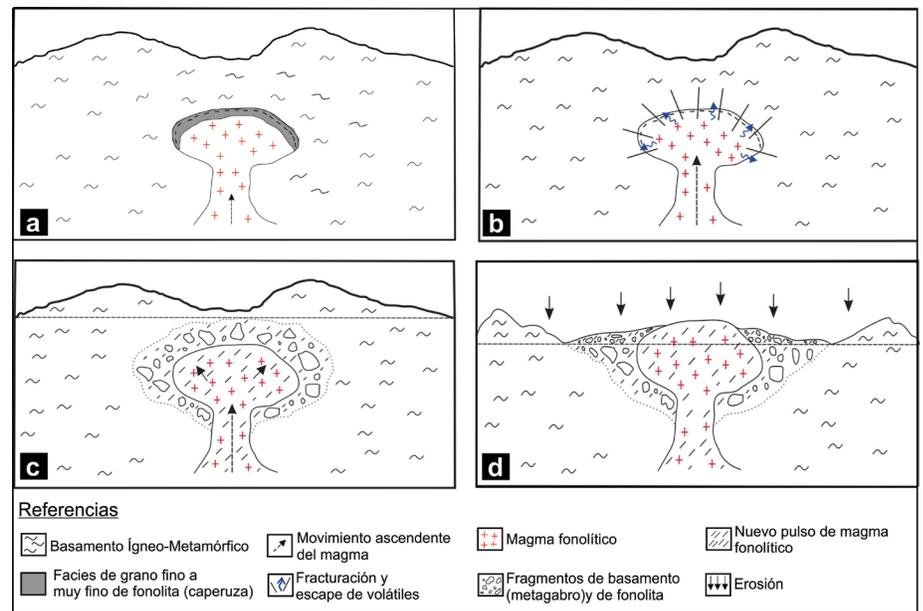


Figura 6. Modelo de emplazamiento propuesto (fuera de escala). a) Primera Etapa; b) Segunda Etapa; c) Tercera Etapa; d) Cuarta Etapa.

procesos de cristalización fraccionada, sin evidencias significativas de contaminación cortical.

Los diagramas de discriminación de ambiente tectónico ponen en evidencia la afinidad de la Fonolita Jaboncillo con rocas alcalinas emplazadas en ambiente de intraplaca continental. Las características petrográficas, geoquímicas y el ámbito geotectónico de la Fonolita Jaboncillo, son consistentes con los estadios finales del magmatismo alcalino asociado al evento extensional que afectó a las Sierras Pampeanas Occidentales a partir del Pérmico Tardío-Triásico Temprano.

El estudio realizado permitió reconstruir la dinámica de emplazamiento que es resultado de la intrusión subsuperficial del magma fonolítico y de la naturaleza explosiva de la actividad eruptiva atribuida a la interacción entre el agua subterránea y el magma. La inyección del magma en el basamento cristalino produjo la fragmentación de las rocas de caja y del borde sobreenfriado del cuerpo ígneo, con el subsecuente arrastre y cementación de los fragmentos producto de minerales hidrotermales, formando una brecha de origen freatomagmática que rodea a la fonolita. El magma no alcanzó la superficie y, al enfriarse, selló el conducto volcánico generando un criptodomo que afloró como consecuencia del tectonismo y la erosión,

preservándose, no obstante, buena parte de la morfología original.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos PIP 00294 CONICET, CICTA- UNSJ E995 y PUE-CONICET 2292016010. La presente contribución reseña el Trabajo Final de Licenciatura de R. Gómez (FCEFN-UNSJ, 2015). Se agradecen las acertadas críticas del Dr. Otamendi, de un revisor anónimo y del editor Dr. Caffè, que contribuyeron significativamente a mejorar el trabajo.

REFERENCIAS

Breitkreuz, C. 2013. Spherulites and lithophysae-200 years of investigation on high-temperature crystallization domains in silica-rich volcanic rocks. *Bulletin of Volcanology* 75: 705.

Broom-Fendley, S., Styles, M.T., Appleton, J.D., Gunn, G. y Wall, F. 2016. Evidence for dissolution-precipitation of apatite and preferential LREE mobility in carbonatite-derived late-stage hydrothermal processes. *American Mineralogist* 101: 596-611.

Cabanis, B. y Lecolle, M. 1989. Le diagramme La/10-Y/15-Nb/8: un outil pour la discrimination des series volcaniques et la mise en

- evidence des processus de melange et/ou de contamination crustale. *Compte Rendus de l'Académie des Sciences Series 2: 2023-2029*.
- Castro de Machuca, B. y López, M.G. 2016. Revisión petrológica de la Formación Baldécitos (Triásico), Sierras Pampeanas Occidentales, provincia de San Juan. *Acta Geológica Lilloana* 28: 75-82.
- Castro de Machuca, B., Pontoriero, S., Conte-Grand, A., Morata, D., Lopez, M.G. y Domínguez, J.P. 2012. New finding of peralkaline volcanism in the eastern margin of the Sierra de Valle Fértil, Western Sierras Pampeanas, NW Argentina. 34° International Geological Congress, Abstracts, CD-ROM, Brisbane.
- Castro de Machuca, B., López, M.G. y Morata, D. 2013. San Agustín olivine alkali-basalt, sierra de Valle Fértil, San Juan: petrography and preliminary petrogenetic implications. 11° Congreso de Mineralogía y Metalogénea, Actas: 285-290, San Juan.
- Castro de Machuca, B., López M. G., Morata, D., Conte-Grand, A. y Pontoriero, S. 2015. La Aguadita Trachyte: new exponent of triassic alkaline magmatism in Sierra de Valle Fértil, Western Sierras Pampeanas, NW Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 72: 551-562.
- Cuerda, A.J., Cingolani, C.A., Varela, R. y Schauer, O.C. 1984. Descripción geológica de la Hoja 19 d-Mogna. Servicio Geológico Nacional, Dirección Nacional de Geología y Minería. Boletín 192, 82 p., Buenos Aires.
- Davidson, J., Turner, S., Handley, H., Macpherson, C. y Dosseto, A. 2007. Amphibole "sponge" in arc crust?. *Geology* 35: 787-790.
- De La Roche, H., Leterrier, J., Grandclaude, P. y Marchal, M. 1980. A classification of volcanic and plutonic rocks using R1R2-diagram and major element analyses – its relationships with current nomenclature. *Chemical Geology* 29: 183-210.
- Ducea, M.N., Otamendi, J.E., Bergantz, G., Stair, K., Valencia, V. y Gehrels, G. 2010. Timing constraints on building an intermediate plutonic arc crustal section: U-Pb zircon geochronology of the Sierra Valle Fértil, Famatinian Arc, Argentina. *Tectonics* 29: 1-30.
- Gómez, R., Castro de Machuca, B., López, M. G. y Balderramo Palacio, G. 2015. Geologic and petrographic features of the Jaboncillo Phonolite, Sierra de Valle Fértil, Province of San Juan, NW Argentina. 6° Simpósio de Vulcanismo e Ambientes Asociados. *Boletim de Resumos*, p. 42, São Paulo.
- Gulbranson, E., Ciccio, P., Montañe, I., Marenssi, S., Limarino, C., Schmitz, M. y Davydov, V. 2015. Paleoenvironments and age of the Talampaya Formation: The Permian-Triassic boundary in northwestern Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 63: 310-322.
- Irvine, T.N. y Baragar, W.R. 1971. A guide to the chemical classification of the common igneous rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences* 8: 523-548.
- Jordan T.E. y Allmendinger, R.W. 1986. The Sierras Pampeanas of Argentina: a modern analogue of Rocky Mountain foreland deformation. *American Journal of Science* 286: 737-764.
- Kieffer, B., Arndt, N., Lapierre, H., Bastien, F., Bosch, D., Pecher, A., Yirgu, G., Ayalew, D., Weis, D., Jerram, A.D., Keller F. y Meugniot, C. 2004. Flood and shield basalts from Ethiopia: magmas from the African superwell. *Journal of Petrology* 45: 793-834.
- Kretz, R. 1983. Symbols for rock-forming minerals. *American Mineralogist* 68: 277-279.
- Lawless, J.V. y White, P.J. 1990. Ore-related breccias: a revised genetic classification, with particular reference to epithermal deposits. 12° New Zealand Geothermal Workshop 1990: 197-202.
- Le Maitre, R.W., Bateman, P., Dudek, A. y Keller, J. 1989. A Classification of Igneous rocks and Glossary of Terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences. Le Maitre, R.W. (ed.), Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks. Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- Limarino, C., Page, S., Caselli, A., Net, L. Litvak, V., Pieters, P. y Lyons, P. 2008. Hoja Geológica 3166-I Chamental, Provincias de La Rioja y San Juan. Servicio Geológico Minero Argentino, Boletín 257, 75 p., Buenos Aires.
- López, M.G. y Castro de Machuca, B. 2015. Consideraciones sobre la petrografía y geoquímica del basalto Potrerillos, Sierra de Valle Fértil - La Huerta, Provincia de San Juan. 3° Congreso de Petrología Ígnea y Metalogénea Asociada, Actas: 98-99, Río Negro.
- López, M.G., Castro de Machuca, B. y Pontoriero, S. 2014. Consideraciones preliminares sobre la petrografía y geoquímica del basalto de Usno, Sierra de Valle Fértil, San Juan. 19° Congreso Geológico Argentino, Actas T8: 15, Córdoba.
- López M.G, Castro de Machuca, B., Gómez, R. y Palacio Balderramo, G. 2015. The Usno Basalt (Ladinian): a contribution to the geochronology of the Triassic magmatism in the Western Sierras Pampeanas, province of San Juan, Argentina. 6° Simposio de Vulcanismo e Ambientes Asociados. *Boletim de Resumos*, 51 p., São Pablo.
- MacKenzie, W.S., Donaldson, C. y Guilford, C. 1982. Atlas of igneous rocks and their textures. Longman Group Limited, 148 p., London.
- Mirrè, J.C. 1976. Descripción Geológica de la hoja 19e, Valle Fértil, provincias de San Juan y La Rioja. Ministerio de Economía, Secretaría de Estado de Minería. Boletín 147, 70p., Buenos Aires.
- Nakamura, N. 1974. Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 38: 757-775.
- Niu, Y. y O'Hara, M. 2009. MORB mantle hosts the missing Eu (Sr, Nb, Ta and Ti) in the continental crust: New perspectives on crustal growth, crust-mantle differentiation and chemical structure of oceanic upper mantle. *Lithos* 112: 1-17.
- Otamendi, J.E., Vujovich, G.I., de la Rosa, J.D., Tibaldi, A.M., Castro, A., Martino, R.D. y Pionotti, L.P. 2009. Geology and petrology of a deep crustal zone from the Famatinian paleoarc, Sierras de Valle Fértil and La Huerta, San Juan, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 27: 258-279.
- Otamendi, J.E., Ducea, M.N. y Bergantz, G.W. 2012. Geological, Petrological and Geochemical Evidence for Progressive Construction of an Arc Crustal Section, Sierra de Valle Fértil, Famatinian Arc, Argentina. *Journal of Petrology* 53: 761-800.
- Page, S., Caselli, A.T. y Limarino, C.O. 1997. Basaltos alcalinos en el Triásico de la Cuenca Ischigualasto-Villa Unión, provincias de La Rioja y San Juan. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 52: 202-208.
- Pankhurst, R.J., Rapela, C.W., Saavedra, J., Baldo, E., Dahlquist, J., Pascua, I. y Fanning, C.M. 1998. The Famatinian magmatic arc in the central Sierras Pampeanas: an Early to Mid- Ordovician continental arc on the Gondwana margin. En: Pankhurst, R.J. y Rapela, C.W. (eds.), *The Proto-Andean Margin of Gondwana*, Geological Society London, Special Publication 142: 43-368.

- Pankhurst, R.J., Rapela, C.W. y Fanning, C.M. 2000. Age and origin of coeval TTG, I- and S-type granites in the Famatinian belt of NW Argentina. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh, Earth Sciences* 91: 151-168.
- Pearce, J.A., Harris, B.W. y Tindle, A.G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology* 25: 956-983.
- Ramos, V. y Kay, S. 1991. Triassic rifting and associated basalt in the Cuyo Basin, central Argentina. En: Harmon, R. y Rapela, C. (eds.) *Andean magmatism and its tectonic setting*. Geological Society of America, Special Paper 265: 79-91.
- Ramos, V., Vujovich, G. y Dallmeyer, R. 1996. Los klippen y ventanas tectónicas preandínicas de la sierra de Pie de Palo (San Juan): edad e implicaciones tectónicas. 13° Congreso Geológico Argentino y 3° Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Actas 5: 377-391, Buenos Aires.
- Shao, F., Niu, Y., Regelous, M. y Cheng Zhu, D. 2015. Petrogenesis of peralkaline rhyolites in an intra-plate setting: Glass House Mountains, southeast Queensland, Australia. *Lithos* 216-217: 196-210.
- Sillitoe, R.H. 1985. Ore-related breccias in volcano plutonic Arcs. *Economic Geology* 80: 1467-1514.
- Sun, S.S. y McDonough, W.F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; implications for mantle composition and processes. En: Saunders, A.D. y Norry, M. J. (eds.) *Magmatism in the ocean basins*. Geological Society, Special Publications 42: 313-345, London.
- Thomas, W.A. y Astini, R.A. 1996. The Argentine Precordillera: A traveler from the Ouachita embayment of North American Laurentia. *Science* 273: 752-757.
- Toselli, A.J., Durand, F.R., Rossi de Toselli, J.N. y Saavedra, J. 1996. Esquema de evolución geotectónica y magmática Eopaleozoica del sistema de Famatina y sectores de Sierras Pampeanas. 13° Congreso Geológico Argentino y 3° Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Actas 5: 443-462, Buenos Aires.
- Wilson, M. 1993. *Igneous Petrogenesis: A Global Tectonic Approach*. Chapman & Hall, 466 p., London.
- Winchester, J.A. y Floyd, P.A. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology* 20: 325-345.
- Zhang, J.J., Zheng, Y.F. y Zhao, Z.F. 2009. Geochemical evidence for interaction between oceanic crust and lithospheric mantle in the origin of Cenozoic continental basalts in east-central China. *Lithos* 110: 305-326.

Recibido: 3 de mayo, 2018

Aceptado: 28 de agosto, 2018