

PETROGRAFÍA DEL MAGMATISMO ALCALINO EN LA CUENCA NORTE URUGUAYA (DEPARTAMENTO DE SALTO)

PETROGRAPHY OF ALKALINE MAGMATISM IN THE URUGUAYAN NORTE BASIN (SALTO DEPARTMENT)

Olivera, L. ⁽¹⁾; Muzio, R. ⁽¹⁾

¹Facultad de Ciencias, Iguá 4225 esquina Mataojo, Montevideo 11400, Uruguay
lucia.olivera.ichazo@gmail.com

Editores: Dra. Elena Peel; MSc. Fernando Scaglia
revista@sociedadgeologiauy.org

PEDECIBA Isidoro de María 1614, piso 6 – Montevideo – Uruguay Tel: 2929 0318-Int. 1612/161
3 www.sociedadgeologiauy.org

RESUMEN

El magmatismo de la Cuenca Norte uruguaya está relacionado a la apertura del Océano Atlántico Sur hacia el Cretácico Temprano. Los registros de esta actividad están representados por derrames de basaltos tholeínicos de la Formación Arapey, y por cuerpos intrusivos máficos de la Formación Cuaró. Estudios recientes señalaron la existencia de rocas volcánicas máficas en los alrededores de Pepe Núñez (Salto), con rasgos petrográficos y geomorfológicos diferentes a las unidades volcánicas mesozoicas de la Cuenca Norte. Se presentan resultados del estudio morfológico, textural, estructural y petrográfico realizado en los cuerpos denominados como cerro de la Virgen, Bonito y Picazo, ubicados 6 km al norte de la localidad de Pepe Núñez. Estos presentan alturas de hasta 325 metros sobre el nivel del mar (s.n.m.), y una geometría circular a elipsoidal en planta. Las rocas son afaníticas, de color negro oscuro y masivas, con desarrollo de disyunción columnar. Petrográficamente, los fenocristales de augita y de olivino magnesiano están inmersos en una matriz fina de augita, olivino magnesiano, nefelina, apatito y minerales opacos. El estudio con Microscopio Electrónico de Barrido permitió la identificación de nefelina en la matriz, así como la caracterización de minerales opacos, Ti-magnetita y pirita. Los tres cuerpos fueron caracterizados como *plugs* subvolcánicos compuestos por tefritas con nefelina, según las características petrográficas, estructurales y morfológicas que reúnen. Asimismo, las relaciones de campo que

presentan con la Formación Arapey, y la baja tasa de erosión respecto a los basaltos circundantes, sugieren que este magmatismo alcalino sea posterior a esta unidad geológica.

Palabras clave: petrografía; magmatismo alcalino; Cuenca Norte; Uruguay.

ABSTRACT

The magmatism of the Uruguayan Norte Basin is related to the opening of the South Atlantic Ocean towards the Early Cretaceous. The records of this activity are represented by tholeiitic basaltic flows of the Arapey Formation, and by mafic intrusive bodies of the Cuaró Formation. Recent studies point out the existence of mafic volcanic rocks around Pepe Núñez (Salto), with petrographic and geomorphological features which differ from the Mesozoic volcanic units of the Norte Basin. This contribution presents the results of the morphological, textural, structural and petrographic study carried out in the bodies named as De la Virgen, Bonito and Picazo hills, located 6 km north of Pepe Núñez village. They reach out heights up to 325 meters above sea level (a.s.l.), and a circular to ellipsoidal geometry in plan. The rocks are aphanitic, black colored, and massive textured, with development of columnar disjunction. Petrographically, the phenocrysts of augite and magnesian olivine are immersed on a fine matrix of augite, magnesian olivine, nepheline, apatite and opaque minerals. The Scanning Electron Microscope study allowed the identification of nepheline in the groundmass, as well as the characterization of opaque minerals, Ti-magnetite and pyrite. The three bodies were characterized as subvolcanic *plugs*, according to structural and morphological features that they gather. Likewise, the field relations they present with the Arapey Formation, and the low erosion rate in relation with the surrounding basalts, suggest that this alkaline magmatism is subsequent to this geologic unit.

Keywords: petrography; alkaline magmatism; Norte Basin; Uruguay.

INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

El magmatismo presente en la Cuenca Norte uruguaya forma parte de uno de los mayores eventos eruptivos a nivel intraplaca continental, ubicándose en el extremo sur de la Provincia Magmática Paraná - Etendeka (PMP-E, Peate, 1997) (Figura 1). En Sudamérica, esta provincia ígnea cubre un área aproximada de $1.2 \times 10^6 \text{ km}^2$, con registros en Brasil, Paraguay, Uruguay y Argentina (Piccirillo et al., 1988). Se encuentra predominantemente conformada por derrames de basaltos y por cuerpos intrusivos máficos, de carácter tholeítico. Sin embargo, existen abundantes registros de actividad magmática alcalina coetánea y posterior, al evento magmático principal de naturaleza tholeítica, caracterizados por su gran diversidad desde el punto de vista composicional (Ulbrich y Gomes, 1981;

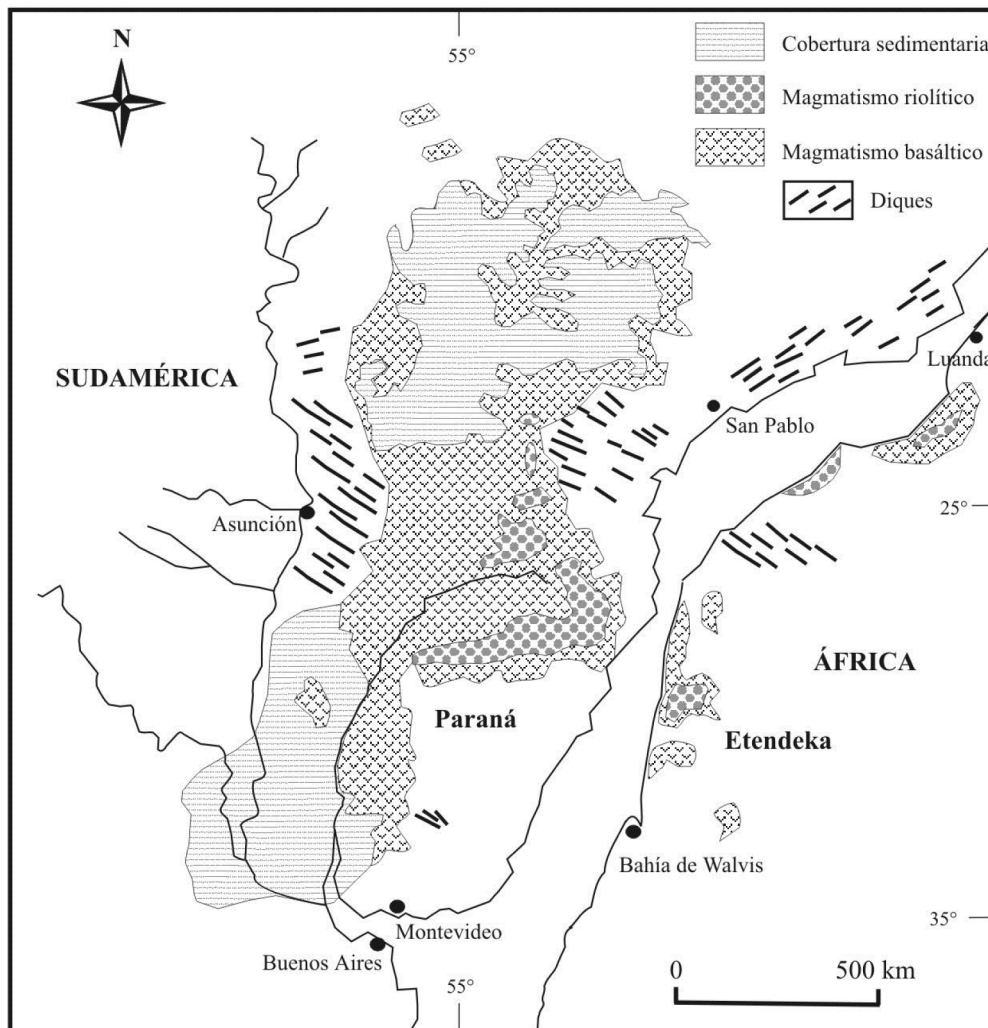


FIGURA 1. Distribución de PMP-E en relación al rift proto-Atlántico (latitud y longitud actual). (Muzio 2004; modificado de Peate 1997).

FIGURE 1. Distribution of PMP-E in relation to the proto-Atlantic rift (present latitude and longitude). (Muzio 2004; modified after Peate 1997).

Milner et al., 1995; Huang et al., 1995; entre otros autores).

Estos registros, asociados principalmente a los eventos tectono-magmáticos del Cretácico Temprano, se encuentran representados por rocas félsicas insaturadas en SiO_2 (fonolitas, a sienitas nefelínicas), y sobresaturadas en SiO_2 de manera subordinada (cuarzo-sienitas y granitos), adicionando la existencia de rocas alcalinas máficas (basanitas, ankaramitas, gabros, carbonatitas y kimberlitas) (Fletcher y Beddoe-Stephens, 1987; Beccaluva et al., 1992; Toyoda et al., 1994; Huang et al., 1995; Comin-Chiaramonti et al., 1999; Gibson et al., 1999; Morbidelli et al., 2000; Lustrino et al., 2005; Conceição et al., 2019).

En Uruguay, una de las ocurrencias alcalinas asociadas al magmatismo Cretácico, localizada en la región SE del país, es el macizo Alcalino de Valle Chico conformado por rocas plutónicas y volcánicas sobresaturadas en SiO_2 (Lustrino et al., 2005). Estos autores indican edades K-Ar de 120 ± 2 Ma (basalto, roca total), y de 133 ± 3.1 Ma (riolita, roca total). A su vez, existen otros registros de ocurrencias alcalinas-subalcalinas localizados dentro del corredor tectónico Santa Lucía – Aiguá – Merín, (SaLAM; Rossello et al., 1999) y cercanos a la Laguna Merín, representados por traquiandesitas y traquidacitas agrupadas como Serie alcalina Lascano, presentando edades entre 128 y 127 Ma (^{40}Ar – ^{39}Ar , en plagioclasas) (Cernuschi et al., 2015).

Las principales expresiones volcánicas y subvolcánicas, vinculadas a la Provincia Magmática Paraná, se encuentran representadas por la Formación Arapey (Bossi, 1966), y por los cuerpos hipoabisales (diques y sills) correspondientes a la Formación Cuaró (Preciozzi et al., 1985) ([Figura 2](#)), ambas unidades de naturaleza química tholeítica (Turner et al. 1999; Muzio et al. 2017). Dentro del área de estudio, la principal unidad volcánica aflorante es la Formación Arapey, caracterizada por derrames basálticos con texturas equigranulares y microporfíricas, ofíticas a subofíticas e intersertales, ocasionalmente interdigitados con las areniscas eólicas de la Formación Tacuarembó (Bossi, 1966). La mineralogía de estas rocas volcánicas es: plagioclasa + piroxeno $\pm$ olivino $\pm$ hornblenda $\pm$ cuarzo $\pm$ minerales opacos (Bossi y Schipilov, 1998), con edades entre 132.9 ± 1.3 y 129.9 ± 1.1 Ma ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en plagioclasas; Féraud et al., 1999).

Estudios recientes realizados por Soto (2014) y Eguía (2014), han señalado la existencia de “litotipos y estructuras poco frecuentes” para la Formación Arapey, particularmente en los alrededores de la localidad de Pepe Núñez (E del depto. de Salto). Soto (2014), realiza una primera descripción de estos



FIGURA 2. Magmatismo Mesozoico en Cuenca Norte (Modificado de Muzio et al., 2013).

FIGURE 2. Mesozoic magmatism in the Norte Basin (Modified from Muzio et al., 2013).

cuerpos que alcanzan cotas cercanas a los 300 metros sobre el nivel del mar (s.n.m.), siendo descritos como basaltos afaníticos de color negro. Trabajos posteriores iniciados por Olivera et al. (2018) y Muzio et al. (2019), confirman los primeros datos de un evento volcánico alcalino en tres puntos de esta zona. Olivera (2019), realiza un estudio petrológico detallado de estos cuerpos, conocidos localmente como Cerro de la Virgen, Cerro Bonito y Cerro Picazo.

El objetivo del presente trabajo es presentar los resultados del análisis morfológico, estructural y textural/mineralógico de las rocas que conforman los cuerpos denominados como Cerro de la Virgen Cerro Bonito y Cerro Picazo. Para ello, se realizaron perfiles en campo de cada uno de ellos, relevamientos de datos estructurales y estudios petrográficos. A su vez, se añade la descripción petrográfica del denominado Cerro Charrúa, localizado a 7 km de la zona de trabajo (coordenadas: 31°28'45.62" S – 56°20'46.68" W), debido a que Soto (2014) señala que el mismo presenta afloramientos

con características morfológicas similares a los tres cuerpos de principal interés en el presente estudio.

METODOLOGÍA

Para la caracterización petrográfica se confeccionaron 23 láminas delgadas (siete para el Cerro de la Virgen, cinco para el Cerro Bonito, nueve para el Cerro Picazo, y dos láminas delgadas para el Cerro Charrúa), para su análisis con microscopio petrográfico NIKON-Eclipse 50iPOL con cámara fotográfica acoplada NIKON DS-Fi-1 (Instituto de Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias, Uruguay). La abundancia relativa de los cristales presentes fue estimada a partir de comparadores visuales (Terry y Chilingar, 1955; Philpotts, 1989), y la composición de plagioclasas presentes fue determinada por el método de Michel-Levy (Kerr, 1965).

Además, se confeccionaron 6 bloques de roca pulidos (dimensiones: 5 cm x 3 cm x 0,5 cm), para la caracterización mineralógica, y específicamente, la identificación de los cristales que componen la matriz y minerales opacos presentes, utilizando Microscopio Electrónico de Barrido SEM-EDS (JEOL JSM-5900lv, Facultad de Ciencias, Uruguay). Los espectros de rayos X obtenidos sobre los diferentes cristales, durante el análisis en el SEM-EDS, fueron comparados con estándares de minerales presentes en Severin (2004) y Reed (2005).

GEOLOGÍA DEL ÁREA

El área del estudio se encuentra ubicada 6 km al norte de la localidad de Pepe Núñez, en el departamento de Salto ([Figura 3A](#)), entre los paralelos 31°25'25.58" S – 31°22'32.16" S, y los meridianos 56°24'05.57" W – 56°20'16.27" W. Los cuerpos de interés se encuentran rodeados por derrames de basaltos tholeíticos correspondientes a la Formación Arapey ([Figura 3B](#)), intercalados ocasionalmente con areniscas eólicas de la Formación Tacuarembó (Bossi, 1966). En esta región, la Formación Arapey se caracteriza por generar relieve levemente ondulado, y diferentes terrazas de derrames basálticos. Estas rocas poseen colores grises a violáceos, generalmente exhiben textura afanítica, ocasionalmente porfirítica, son vacuolares y amigdaloides, con ceolita y celadonita como relleno principal de las cavidades.

Las características estructurales, texturales y morfológicas que presentan estos cuerpos son

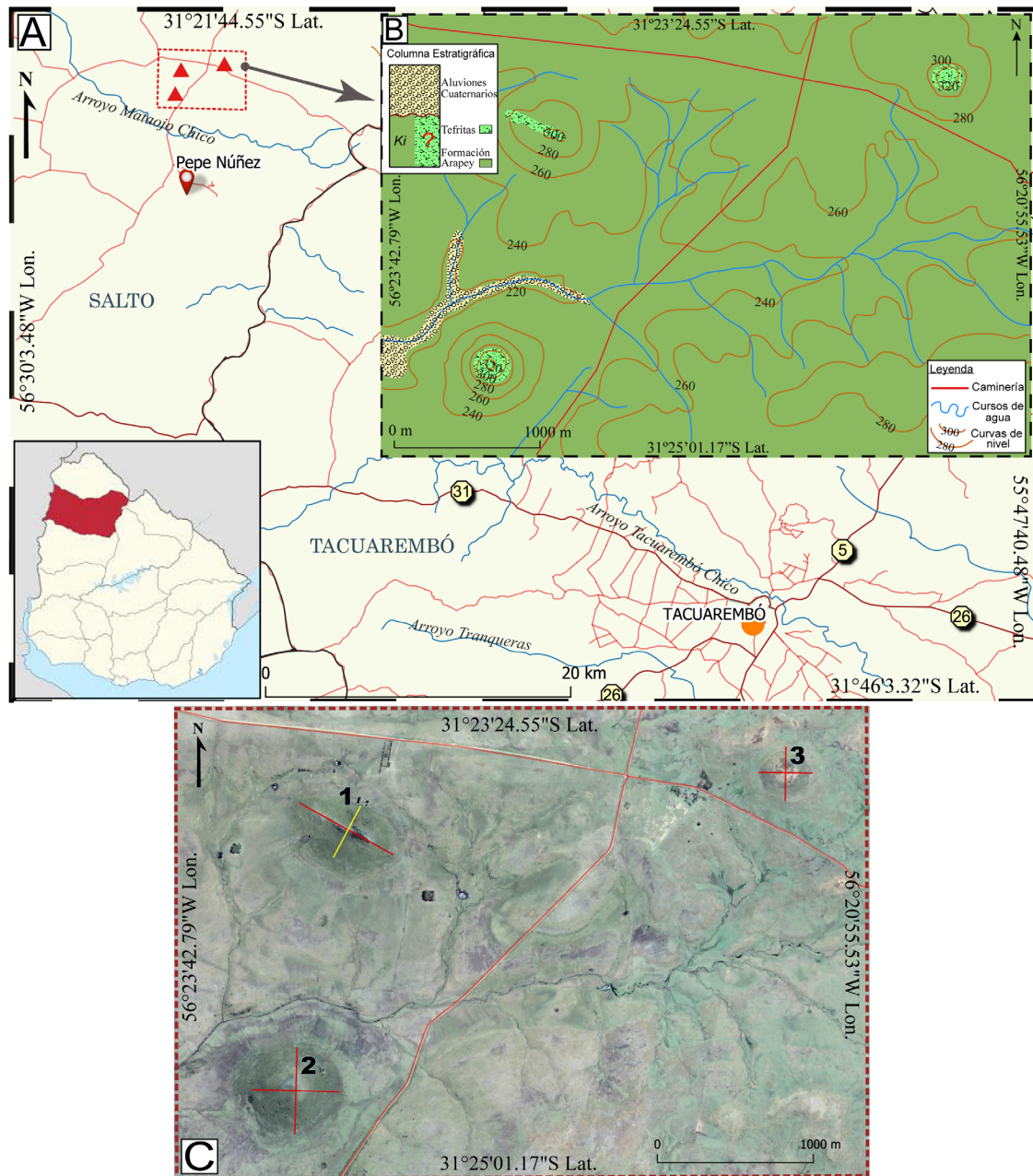


FIGURA 3. A) Localización general, área de estudio en recuadro rojo. B) Mapa geológico simplificado del área de estudio (modificado de Soto, 2014). C) Imagen satelital de los tres cuerpos estudiados, con sus respectivos diámetros (diámetro mayor en rojo, diámetro menor en amarillo): 1. *Plug* Cerro de la Virgen; 2. *Plug* Cerro Bonito; 3. *Plug* Cerro Picazo (Fuente: Google Earth, 2016).

FIGURE 3. A) General location, study area in red box. B) Simplified geological map of the study area (modified from Soto, 2014). C) Satellite image of the three studied bodies, with their respective diameters (major diameter in red, minor diameter in yellow): 1. *Plug* Virgen hill; 2. *Plug* Bonito hill; 3. *Plug* Picazo hill (Google Earth, 2016).

coherentes con la mayoría de los rasgos presentados por Roach et al. (1994) para *plugs*: disyunción columnar; alineamiento de fenocristales; presentan mayor cantidad de xenolitos/xenocristales que los flujos de lava que los rodean; son petrográficamente diferentes a los derrames de lava circundantes; poseen una menor tasa de meteorización que las litologías cercanas; poseen tope redondeado, son circulares a elipsoidales en planta; y están posiblemente asociados a lineamientos existentes en el

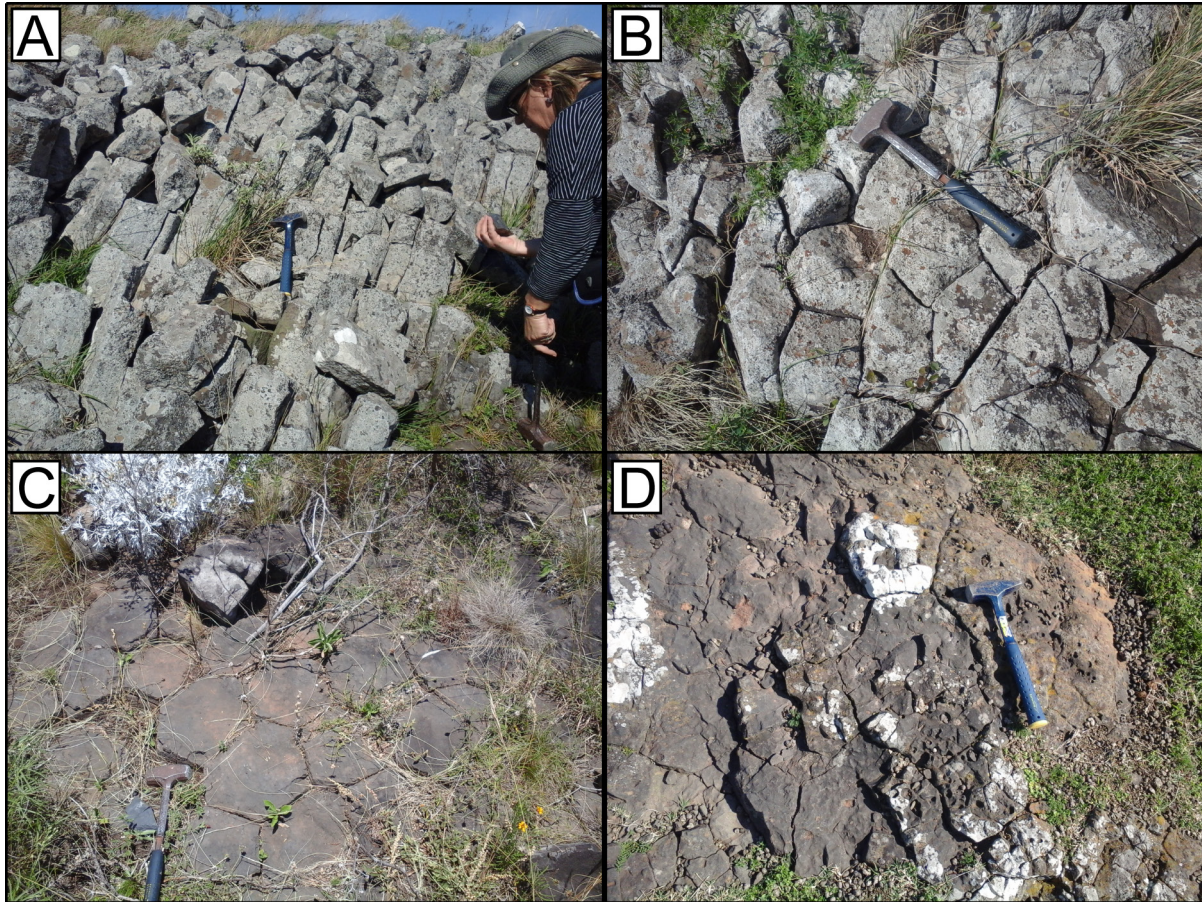


FIGURA 4. A) Vista lateral de la disyunción columnar presente en el *plug* Cerro de la Virgen. B) Vista en planta de fracturación poligonal - hexagonal en el *plug* Cerro de la Virgen. C) Bases hexagonales en disyunción columnar del *plug* Cerro Bonito. D) Fracturación poligonal a hexagonal a nivel del suelo, en *plug* Cerro Picazo.

FIGURE 4. A) Lateral view of the columnar disjunction present in the Cerro de la Virgen plug. B) Plan view of the polygonal - hexagonal fracturing in the Virgen Hill plug. C) Hexagonal bases in columnar disjunction of the Bonito Hill plug. D) Polygonal to hexagonal fracture at ground level, in Picazo Hill plug.

basamento. Los *plugs* estudiados poseen forma circular a elipsoidal en planta (Figura 3C), alcanzando alturas de 303 a 325 metros (s.n.m.), siendo la cota de base del área de estudio de 220 metros (s.n.m.), aproximadamente. Los *plugs* denominados localmente como Cerro Bonito (diámetro de 570 metros (s.n.m.)) y Cerro Picazo (diámetro de 360 metros (s.n.m.)), tienen forma circular y tope redondeado. Sin embargo, el *plug* correspondiente al Cerro de la Virgen presenta forma elipsoidal, con un eje mayor en sentido NW-SE de 800 metros de longitud aproximada (s.n.m), y un eje menor de 460 metros (s.n.m), en sentido NE-SW. El cuerpo denominado Cerro Charrúa presenta forma casi circular, con una altura aproximada de 260 metros (s.n.m.), y 90 metros de diámetro (s.n.m.). Las relaciones de contacto entre los *plugs* y los derrames de la Formación Arapey no fueron observadas en campo debido a la cobertura de suelo y depósitos de coluvión presentes en la base de cada uno de ellos.

El conjunto de *plugs* estudiados presenta, desde el punto de vista estructural, el desarrollo de

disyunción columnar, generando en planta diversas secciones poligonales, siendo el Cerro de la Virgen el que mejor presenta esta característica (Figura 4A y 4B). En este último, se encuentran cuatro niveles de columnas de hasta un metro de altura por encima del nivel del suelo (s.n.m.). El *plug* Cerro Bonito posee disyunción columnar hacia el tope, exhibiendo bases hexagonales perfectamente desarrolladas (Figura 4C), sin embargo, el Cerro Picazo pobremente manifiesta una fracturación poligonal irregular a nivel del suelo (Figura 4D). Las dimensiones que presentan estas estructuras poligonales varían en los tres cuerpos estudiados entre 15 y 40 cm.

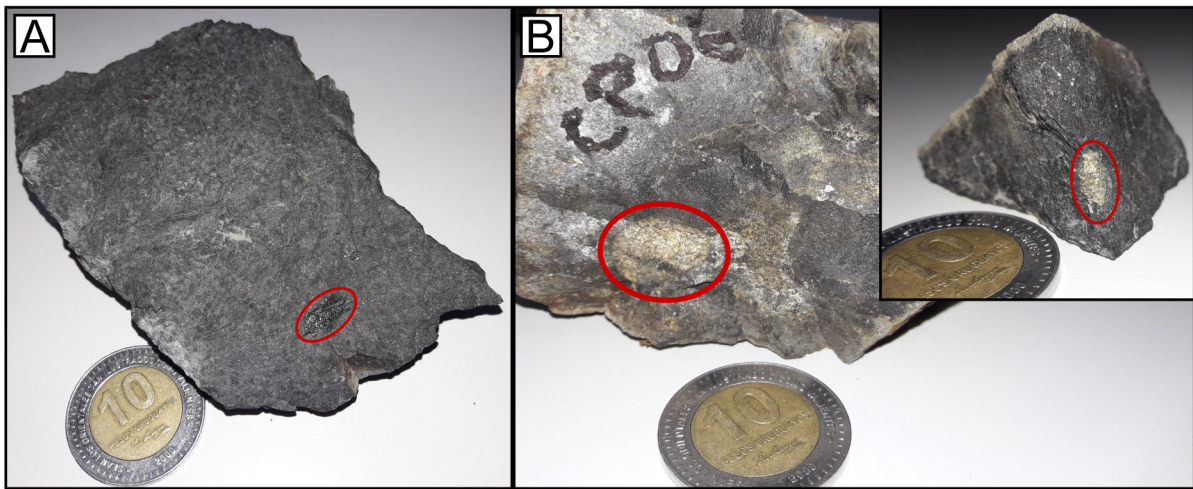


FIGURA 5. A) Fenocristal de piroxeno en muestra del Cerro Bonito. B) Xenocristal / Xenolito en muestras del Cerro Picazo.

FIGURE 5. A) *Pyroxene phenocryst in a sample from Bonito Hill.* B) *Xenocrystal / Xenolite in Picazo Hill samples.*

En muestra de mano y en afloramiento, las rocas pertenecientes a los *plugs* son de color negro y masivas, con textura afanítica, hipocristalina, presentando ocasionalmente fenocristales de piroxeno (Figura 5A). A su vez, se identificaron xenolitos/xenocristales de hasta 1 cm de diámetro, de color verde (Figura 5B). Las rocas que conforman el cuerpo del Cerro Charrúa presentan textura afanítica y son de color gris oscuro con tonalidades rojizas.

RESULTADOS

Como resultado del análisis petrográfico, se observa que las rocas presentes en los *plugs* exhiben textura inequigranular porfírica (Figura 6A), ocasionalmente glomeroporfírica, subidiomórfica a idiomórfica y, según su grado de cristalinidad observado en lámina delgada, se caracterizan como hipocristalinas. Los fenocristales presentes, fueron identificados como cristales de augita (Figura

6B), y olivino. La augita corresponde a los fenocristales de mayor tamaño (entre 0,12 mm y 2 mm), y abundancia (20%), siendo la misma subautomorfa a automorfa. Los fenocristales de olivino presentan un tamaño entre 0,12 mm a 0,20 mm, y una abundancia de un 7%, el mismo es xenomorfo, (Figura

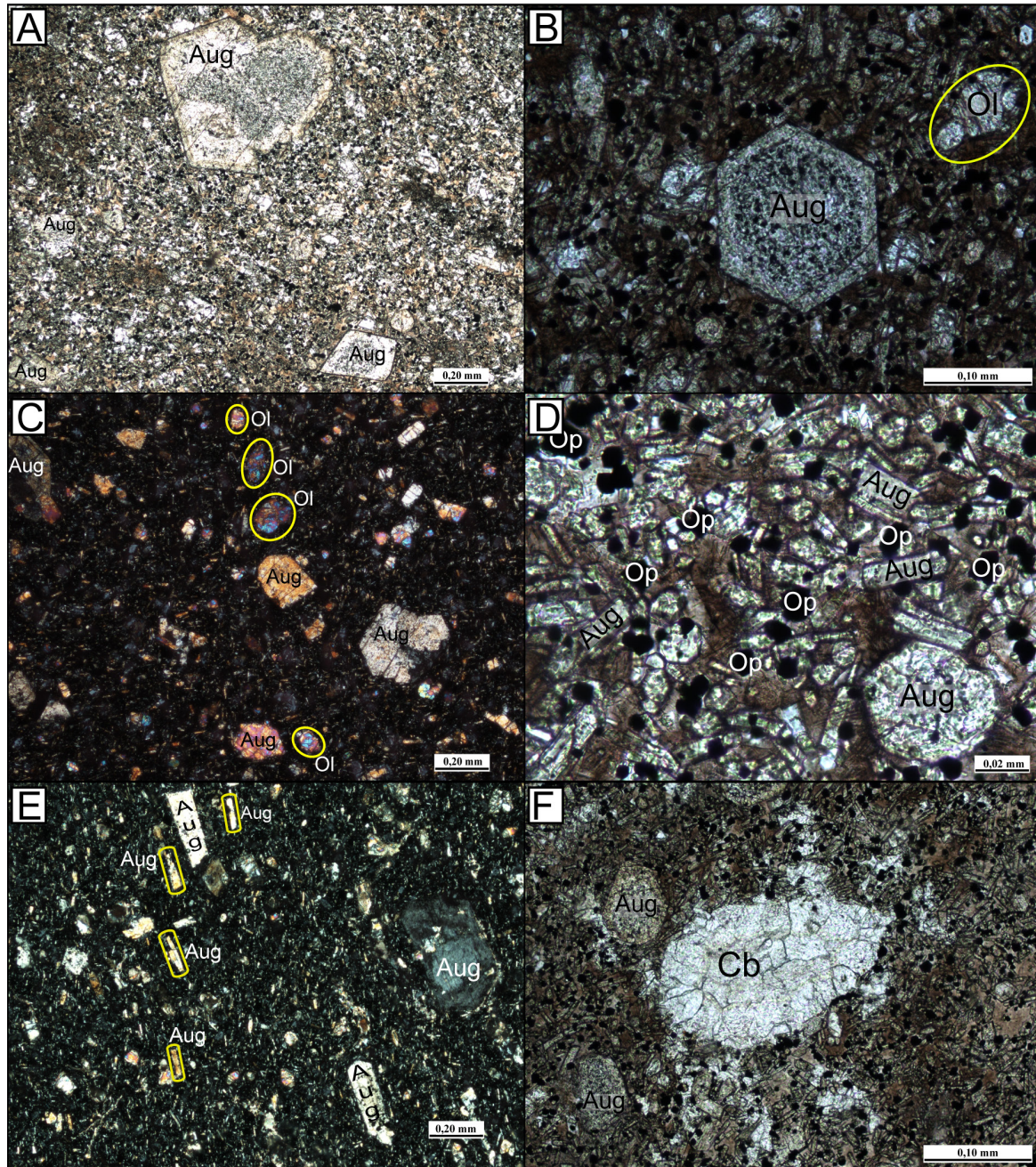


FIGURA 6. A) Textura inequigranular porfírica (Luz polarizada plana). B) Fenocristal automorfo de augita y cristal xenomorfo de olivino (Luz polarizada plana). C) Fenocristales de olivino y augita (Polarizadores cruzados). D) Matriz conformada por augita, minerales opacos y vidrio en color marrón (Luz polarizada plana). E) Textura de flujo (Polarizadores cruzados). F) Vacuola rellena por carbonato de calcio (Luz polarizada plana). Referencias: augita (Aug), olivino (Ol), mineral opaco (Op), carbonato (Cb).

FIGURE 6. A) Porphyritic texture (Plane-polarized light). B) Euhedral phenocryst of augite and xenomorphic crystal of olivine (Plane-polarized light). C) Olivine and augite phenocrysts (Cross-polarized light). D) Groundmass composed by augite, opaque minerals and brown glass (Plane-polarized light). E) Flow texture (Cross-polarized light). F) Vacuole filled with calcium carbonate (Plane-polarized light). References: augite (Aug), olivine (Ol), opaque mineral (Op), carbonate (Cb).

6C). A su vez, se encontraron minerales opacos de tamaños variables, encontrando un conjunto de cristales mayores, de entre 0,20 mm a 0,11 mm, y un conjunto de cristales menores de entre 0,11 mm a 0,05 mm. La matriz, presenta cristales con tamaño entre 0,02 mm a 0,11 mm, se encuentra conformada en términos de abundancia decreciente, por cristales prismáticos de augita subautomorfa, minerales opacos de secciones tabulares y pseudo hexagonales (aproximadamente un 25% del volumen total modal) (Figura 6D), olivino xenomorfo, y apatito automorfo. Como característica textural particular se destaca la presencia de fenocristales de augita alineados (Figura 6E), generando textura de flujo; a su vez, es común la presencia de vacuolas y vacuolas rellenas parcialmente por carbonato de calcio (Figura 6F), adquiriendo textura vacuolar y amigdaloides.

Las litologías muestreadas en la base del Cerro Picazo y en la base del Cerro de la Virgen, con nivel de base en cotas menores a 300 metros (s.n.m.) y 276 metros (s.n.m.), respectivamente, presentan una textura hipocristalina, inequigranular porfirítica y subidiomórfica. Los fenocristales más abundantes (en un 15%), corresponden a cristales de augita de hasta 0,50 mm de tamaño, siendo xenomorfos a subautomorfos (Figura 7A); los fenocristales automorfos de plagioclasa poseen un tamaño de hasta 0,40 mm, presentan una abundancia de un 10%, y corresponden a la variedad andesina/labradorita (valores medios An_{50}), y suelen generar textura glomeroporfirítica (Figura 7B). Además, presentan minerales opacos con un tamaño de hasta 0,20 mm, siendo los mismos xenomorfos y con una abundancia de hasta un 5%. La matriz, de hasta 0,11 mm, está compuesta por plagioclasa automorfa, augita subautomorfa a xenomorfa; minerales opacos xenomorfos a subautomorfos de secciones rectangulares, y olivino xenomorfo completamente alterado a iddingsita, (Figura 7C y 7D). Como característica particular, las rocas presentan textura vacuolar y amigdaloides (Figura 7E), comúnmente se observan vacuolas rellenas de carbonato de calcio, y a su vez, la presencia de textura intersertal, subofítica predominando frente a la ofítica.

Las rocas que conforman el Cerro Charrúa, presentan textura inequigranular porfirítica, subidiomórfica e hipocristalina. La mineralogía está dada por fenocristales de hasta 0,80 mm de plagioclasa automorfa y tabular (andesina, valores medios An_{30-50}), y fenocristales de clinopiroxeno subautomorfos de hasta 0,50 mm; ocasionalmente, se observan cristales intersticiales tardíos de cuarzo xenomorfo de hasta 0,20 mm, (Figura 8A). Los fenocristales de clinopiroxeno y plagioclasa suelen generar textura glomeroporfirítica, subofítica e intersertal, (Figura 8B). Estos se encuentran inmersos en una matriz

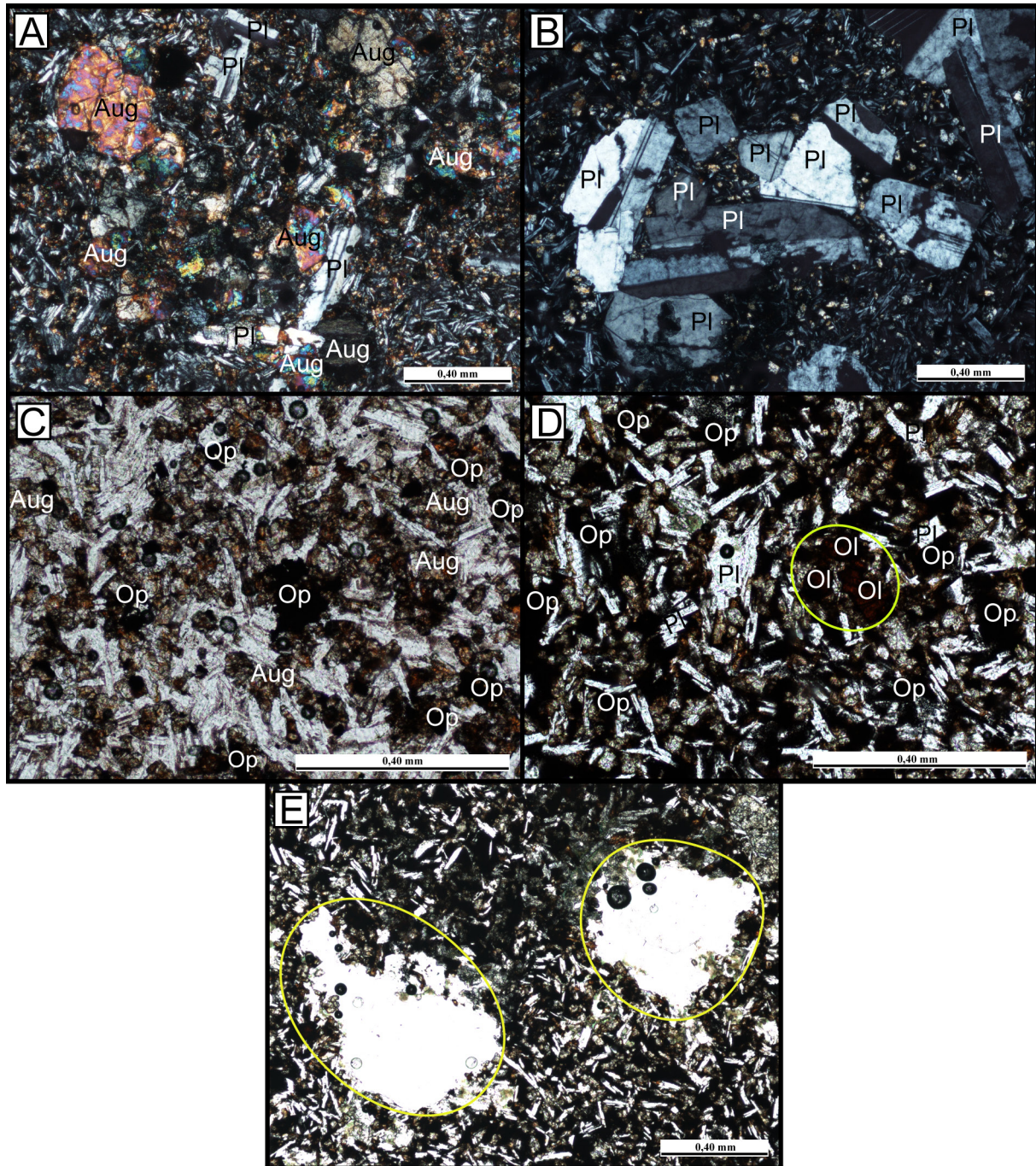


FIGURA 7. A) Fenocristales de augita y plagioclasa, en muestra de la base del *plug* Cerro de la Virgen (Polarizadores cruzados). B) Textura glomeroporfírica de fenocristales de plagioclasa, en muestra de la base del *plug* Cerro Picazo (Polarizadores cruzados). C) Matriz conformada por augita y opacos, base del *plug* Cerro de la Virgen (Luz polarizada plana). D) Matriz compuesta por opacos, plagioclasa y olivino alterado a iddingsita, base del *plug* Cerro Picazo (Luz polarizada plana). E) Textura vacuolar (Luz polarizada plana). Referencias: augita (Aug), plagioclasa (Pl), olivino (Ol), minerales opacos (Op)..

FIGURE 7. A) Augite and plagioclase phenocrysts, in sample from the base of the Virgen Hill plug (Cross-polarized light). B) Glomeroporphyritic texture with plagioclase phenocrysts, in a sample from the base of the Picazo Hill plug (Cross-polarized light). C) Groundmass composed by augite and opaque minerals, from the base of the Virgen Hill plug (Plane-polarized light). D) Groundmass composed by opaque minerals, plagioclase and olivine (altered to iddingsite), from the base of the Picazo Hill plug (Plane-polarized light). E) Vacuolar texture (Plane-polarized light). References: augite (Aug), plagioclase (Pl), olivine (Ol), opaque minerals (Op).

microcristalina de hasta 0,11 mm compuesta por la siguiente mineralogía: plagioclasa + clinopiroxeno (augita) $\pm$ clorita $\pm$ minerales opacos con secciones cuadradas, rectangulares y romboédricas, (Figura 8C).

La utilización del Microscopio Electrónico de Barrido (SEM-EDS) permitió confirmar la mineralogía anteriormente descrita para los tres *plugs* estudiados e identificar los cristales de nefelina presentes en la matriz.

Los fenocristales de mayor abundancia y tamaño, fueron caracterizados como cristales de augita según los espectros de rayos X obtenidos (Figura 9A), siendo similares a espectros estándar para dicho mineral. Las inclusiones presentes en estos fenocristales fueron identificadas como cristales de

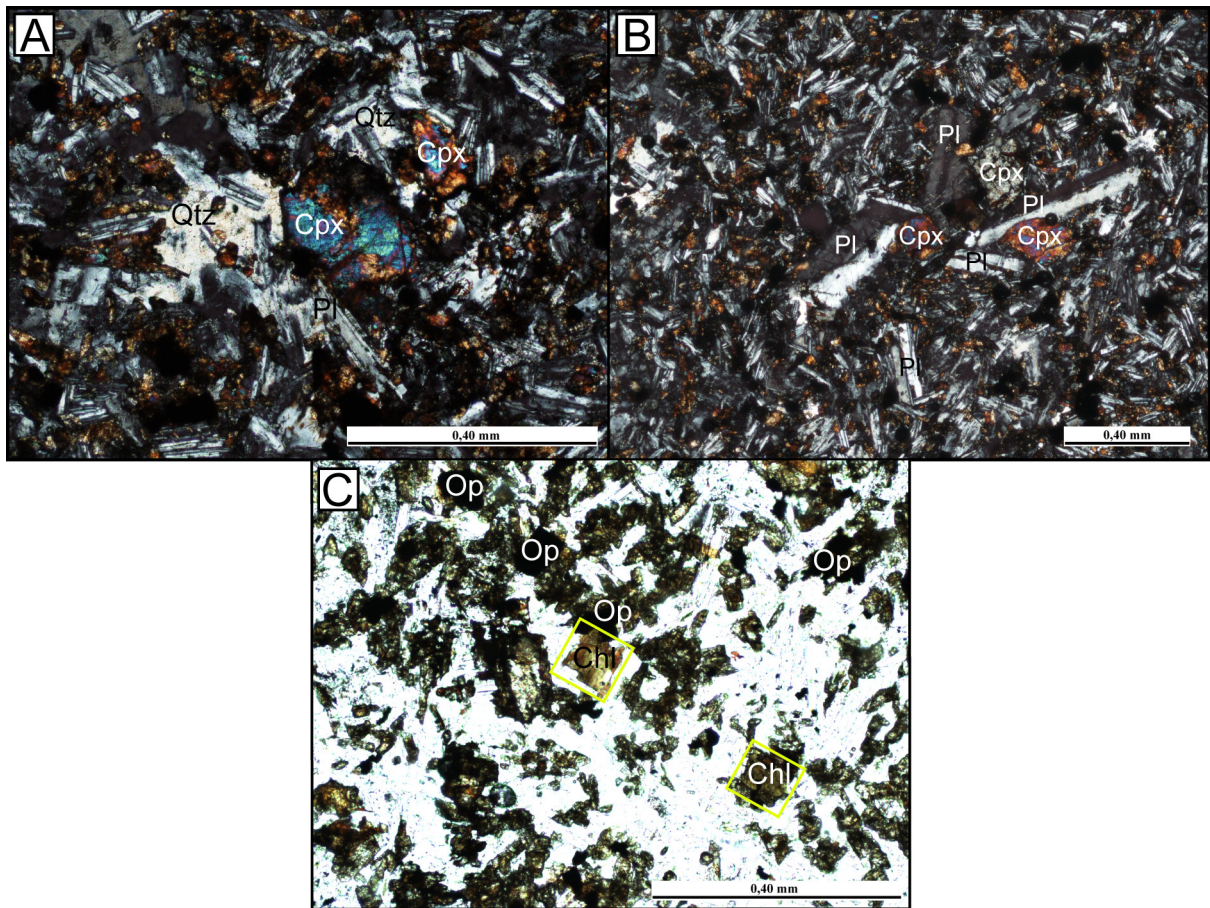


FIGURA 8. A) Fenocristales de clinopiroxeno y plagioclasa, y cristales intersticiales de cuarzo, en muestra del Cerro Charrúa (Polarizadores cruzados). B) Textura glomeroporfírica y subofítica (Polarizadores cruzados). C) Matriz conformada por opacos y clorita (Luz polarizada plana). Referencias: clinopiroxeno (Cpx), plagioclasa (Pl), cuarzo (Qtz), clorita (Chl), minerales opacos (Op)..

FIGURE 8. A) Clinopyroxene and plagioclase phenocrysts, and interstitial quartz in a sample from the Charrúa Hill (Cross-polarized light). B) Glomeroporphyritic and subophytic texture (Cross-polarized light). C) Groundmass with opaque minerals and chlorite (Plane-polarized light). References: clinopyroxene (Cpx), plagioclase (Pl), quartz (Qtz), chlorite (Chl), opaque minerals (Op).

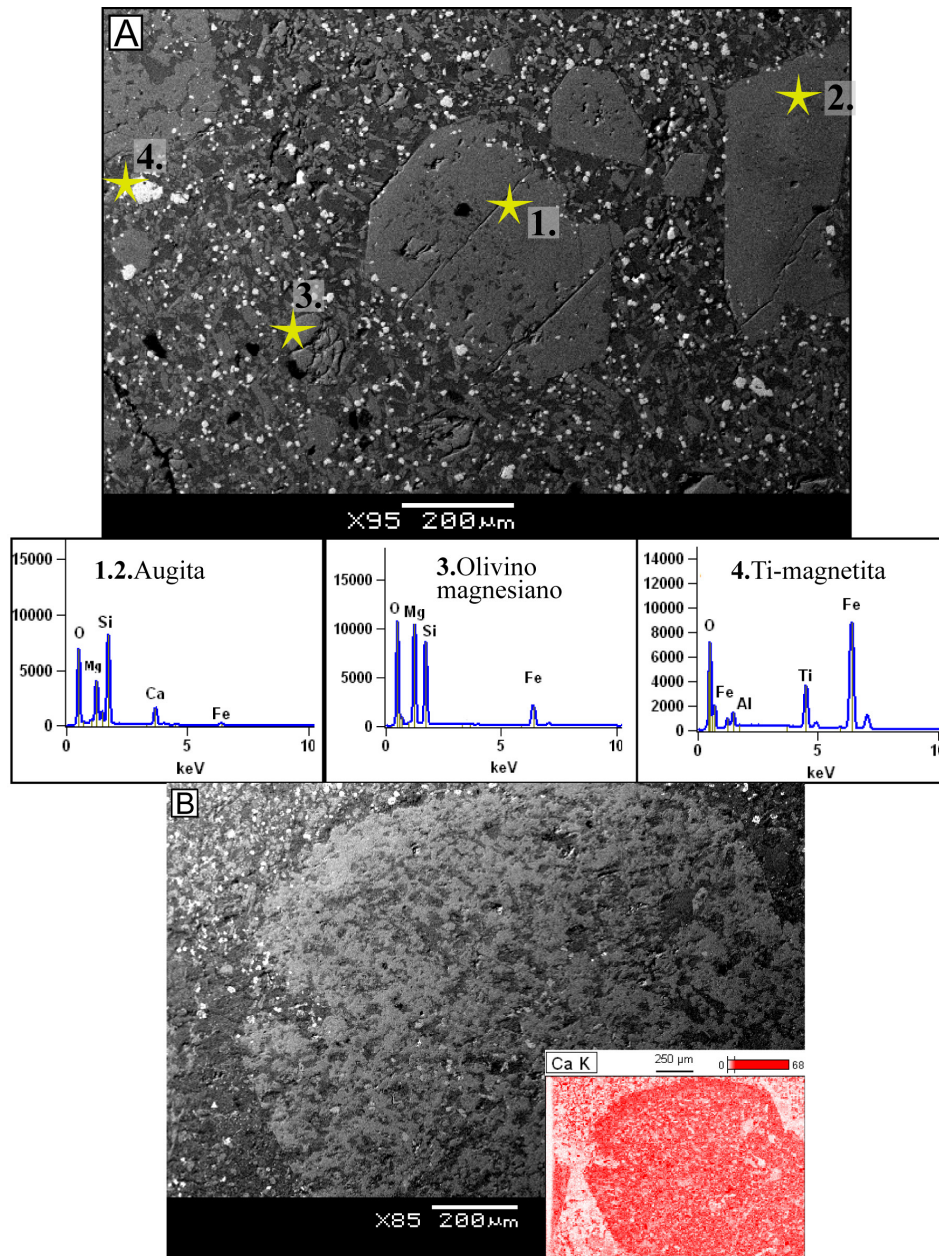


FIGURA 9. A) Fenocristales de augita y olivino, y cristal mayor de Ti-magnetita, con sus respectivos espectros de rayos X. B) Mapa composicional sobre fenocristal de augita, indicando mayor enriquecimiento de calcio hacia los bordes.

FIGURE 9. A) Augite and olivine phenocrysts and a larger Ti-magnetite crystal, with their respective X-ray spectra. B) Compositional map on augite phenocryst, showing calcium enrichment towards the edges.

olivino, clinopiroxeno y Ti-magnetita. El segundo fenocristal en abundancia relativa fue caracterizado como olivino magnesiano (Figura 9A), según comparación con estándares de espectros de rayos X para minerales de Severin (2004) y Reed (2005).

Las imágenes obtenidas sobre fenocristales de augita indican zonación concéntrica. Según el análisis realizado a través de mapas composicionales, se definió que corresponde a una mayor concentración de calcio hacia los bordes (Figura 9B).

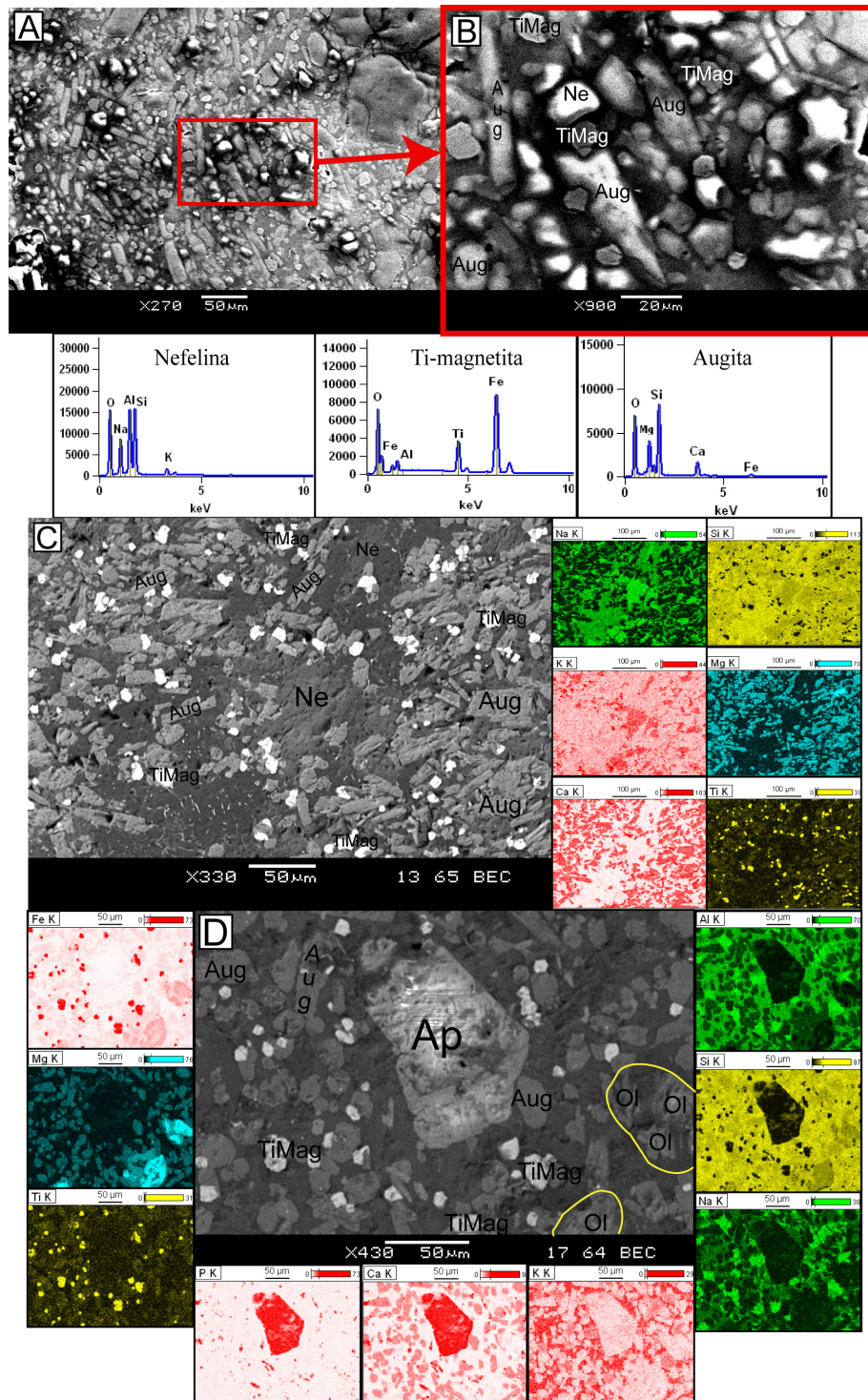


FIGURA 10. A) Sector de matriz analizado, en recuadro rojo. B) Acercamiento de recuadro rojo en 10A, matriz conformada por nefelina, Ti-magnetita, y augita, con sus respectivos espectros de rayos X. C) Sección de matriz conformada por nefelina, augita y Ti-magnetita, con mapas composicionales adjuntos. D) Sección de matriz conformada por apatito, olivino, augita y Ti-magnetita, con mapas composicionales adjuntos. Referencias: augita (Aug), olivino (Ol), Ti-magnetita (TiMag), apatito (Ap).

FIGURE 10. A) Matrix sector analyzed, in red box. B) Close-up of the red box at 10A, composed by nepheline, Ti-magnetite, and augite, with their respective X-ray spectra. C) Section of the groundmass with nepheline, augite and Ti-magnetite, with compositional maps. D) Matrix section made up of apatite, olivine, augite and Ti-magnetite, with compositional maps attached. References: augite (Aug), olivine (Ol), Ti-magnetite (TiMag), apatite (Ap).

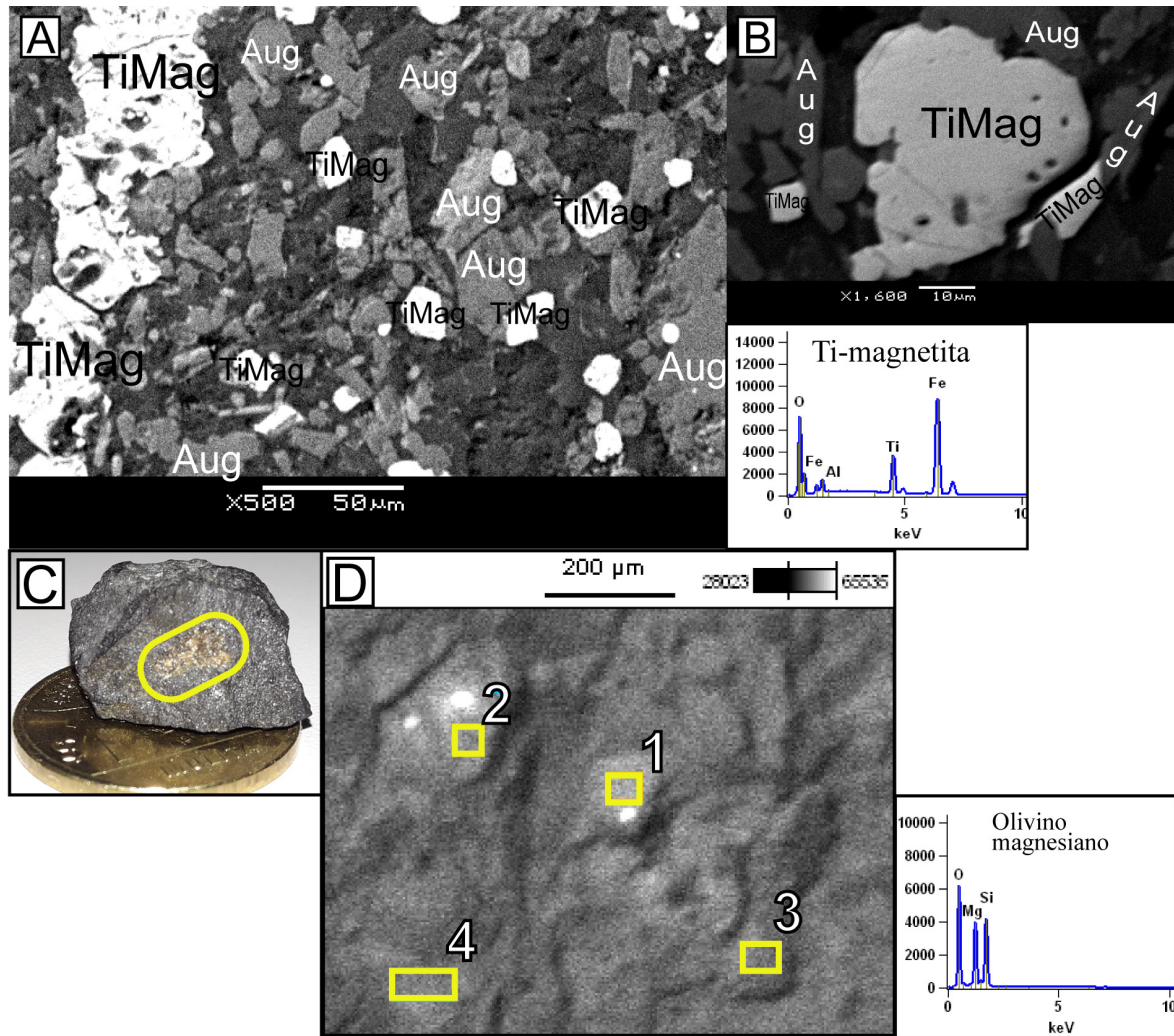


FIGURA 11. A) Minerales metálicos identificados como Ti-magnetita, con su respectivo espectro de rayos X. B) Cristal mayor y cristales menores de Ti-magnetita, con su respectivo espectro de rayos X. C) Muestra de mano con xenolito/xenocrystal. D) Imagen obtenida del Microscopio Electrónico de Barrido del xenolito/xenocrystal de 11C, espectro de rayos X adjunto. Referencias: augita (Aug), Ti-magnetita (TiMag).

FIGURE 11. A) Metallic minerals identified as Ti-magnetite, with their respective X-ray spectra. B) Large and minor crystals of Ti-magnetite, with their respective X-ray spectra. C) Hand sample with xenolite / xenocrystal. D) Image obtained from the 11C xenolite / xenocrystal, using the Scanning Electron Microscope; X-ray spectrum attached. References: Augite (Aug), Ti-magnetite (TiMag).

La matriz, (Figura 10A y 10B), se encuentra conformada en abundancia decreciente por cristales automorfos de augita prismática, cristales de secciones cuadradas de Ti-magnetita, cristales de olivino magnesiano, cristales xenomorfos de nefelina (con un tamaño de hasta 0,05 mm), y cristales automorfos de apatito.

Los análisis de mapas composicionales indican que la augita concentra las mayores cantidades de hierro y calcio; el olivino concentra mayor cantidad de magnesio respecto al hierro; la Ti-magnetita se identifica por su marcada concentración en titanio; la nefelina por su enriquecimiento en sodio y potasio; y el apatito por su alta concentración en potasio y calcio (Figura 10C y 10D). La matriz

microcristalina fue caracterizada a través de análisis de mapas composicionales, como una matriz de composición aluminosilicatada sódica.

Los minerales metálicos fueron identificados como pirita y, en mayor medida, Ti-magnetita (titano-magnetita) (Figura 11A y 11B). La mayoría de los xenolitos/xenocristales presentan una composición olivínica (Figura 11C y 11D), ocasionalmente, se encontró una minoría de composición augítica.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El análisis detallado de la petrografía, morfología y estructuras presentes en estos tres cuerpos subvolcánicos antes no caracterizados, ha permitido generar nueva información relacionada al magmatismo presente en la Cuenca Norte. Según la morfología de los cuerpos, se evidencia la topografía marcadamente positiva en relación a la Formación Arapey, indicaría una menor tasa de erosión respecto a los basaltos. En base a las relaciones que presentan en campo y a la tasa de erosión en comparación con los basaltos cretácicos de la base, se plantea la hipótesis de que estos *plugs* son más jóvenes o posteriores a las rocas volcánicas de la Formación Arapey. Si bien a nivel de campo no se pudo confirmar la existencia de un lineamiento estructural específico asociado al emplazamiento de estos magmas, Soto (2014) realizó un estudio de los fotolineamientos existentes en el área y describe un lineamiento principal N80E entre el *plug* Cerro de la Virgen y el *plug* Cerro Bonito, así como varios lineamientos menores de dirección N10E a N40E, asociados a ese lineamiento principal. Es de destacar la existencia de un lineamiento importante, al norte del Cerro de la Virgen, de sentido NW-SE, paralelo a la dirección de elongación de este cuerpo volcánico.

A su vez, los tres cuerpos presentan disyunción columnar. Este tipo de estructuras, en rocas volcánicas y subvolcánicas, se generan a partir de la propagación de fracturas durante el enfriamiento del magma, en flujos de lava o en intrusiones someras, debido a un mecanismo de transferencia de calor de tipo conductivo-convectivo (Budkewitsch y Robin, 1994). El magma pierde calor por conducción en los límites del cuerpo ígneo, disminuyendo su volumen y generando tensiones que son liberadas por relajación viscoelástica (Hetényi et al., 2012). Mientras la temperatura del magma sea menor a la T_g (*glass temperature*, $725 \pm 25^\circ\text{C}$ en tholeitas olivínicas (Ryan y Sammis, 1981)), se acumulan esfuerzos efectivos y; cuando éstos superan la resistencia de la roca, se inicia la generación de fracturas perpendiculares a las superficies de esfuerzos distensivos, y paralelas a las superficies de enfriamiento (Spry, 1962). Las fracturas se propagarán hacia el interior del cuerpo hasta que alcancen

la isoterma de T_G , debido a la transferencia de calor por convección (Budkewitsch y Robin, 1994). Por lo tanto, se propone que los tres *plugs*, han sufrido una tasa de enfriamiento más lenta que los flujos de lava que los rodean, correspondientes a la Formación Arapey.

En ocasiones, es posible encontrar estrías en las caras laterales y basales de las columnas de estos *plugs*. Ryan y Sammis (1978), indican que estas estrías se generan durante el desarrollo de la disyunción columnar, debido a diferentes ciclos de esfuerzos distensivos acumulados y liberados, durante el enfriamiento del cuerpo.

Budkewitsch y Robin (1994), indican que las fracturas evolucionan a partir de un patrón poligonal inmaduro, generando figuras geométricas irregulares en las primeras etapas de enfriamiento del magma, hasta evolucionar en un patrón más uniforme y estable, caracterizado por figuras basales hexagonales. Se estima que tanto el *plug* Cerro Bonito y el *plug* Cerro de la Virgen poseen un mayor grado de madurez respecto al *plug* Cerro Picazo, debido a una mayor tendencia de desarrollo uniforme de bases hexagonales, estando relacionado con una menor tasa de enfriamiento respecto al *plug* Cerro Picazo. Particularmente, en el Cerro de la Virgen se ha observado el desarrollo de hasta 4 niveles de columnas, de bases triangulares, pseudo hexagonales, y hexagonales, de hasta 1 metro de altura sobre el suelo (s.n.m.). Las rocas básicas con disyunción columnar pueden presentar asimismo dos facies, la facies “colonnade”, la cual se caracteriza por el desarrollo de columnas regulares con lados planares, y la facies llamada “entablature”, la cual posee columnas más pequeñas, menos regulares (por ejemplo, Tomkeieff, 1940; Spry, 1962). Saemundsson (1970), explica la presencia de la facies de entablature, en ausencia de la facies colonnade, por tasas de enfriamiento incrementadas por inundación de la superficie del flujo, permitiendo que el agua acceda al interior del mismo. Phillips et al. (2013), señalan que, tanto la propagación de fracturas de direcciones opuestas como la interacción con agua, pueden ser los causantes de la facies entablature. Consecuentemente, según lo observado en campo, se propone una menor tasa de enfriamiento para el magma que conformó las secciones actualmente visibles del *plug* Cerro Bonito y *plug* Cerro de la Virgen, respecto al *plug* Cerro Picazo. Este último posiblemente incrementó su tasa de enfriamiento debido a inundación de la superficie del flujo y/o por la intersección de dos sets de fracturas opuestas.

Desde el punto de vista petrográfico, las rocas de los tres cuerpos son afaníticas de color negro oscuro, indicando la rápida cristalización rica en minerales máficos, caracterizando a la roca como

subvolcánica y melanócrata (Le Maitre, 2002). Los xenolitos/xenocristales presentes indicarían el transporte de fragmentos de roca de composición máfica, de fuente posiblemente mantélica (Gill, 2010). Por otro lado, la ausencia de fragmentos de composición cortical descartaría, preliminarmente, una posible asimilación cortical.

En lámina delgada, las rocas de este estudio, presentan textura inequigranular porfirítica e hipocristalina, indicando una primera etapa de enfriamiento y cristalización de fenocristales, una segunda etapa de enfriamiento y cristalización de la matriz, y una tercera etapa de enfriamiento de material microcristalino y vidrio, y generación de cavidades. Asimismo, la textura subidiomórfica a idiomórfica, sugiere que la mayoría de los cristales tuvieron un tiempo suficiente de crecimiento y/o aporte de volátiles, permitiendo un alto porcentaje de caras cristalinas. La mineralogía presente sugiere el enfriamiento de un fundido poco diferenciado, de carácter alcalino y subsaturado, debido a la presencia de feldespatoides en la matriz. Tanto el clinopiroxeno (augita), como el olivino suelen encontrarse en rocas máficas y ultramáficas (Sial y McReath, 1984). A través de imágenes obtenidas del Microscopio Electrónico de Barrido (SEM-EDS), se identificó mayor concentración de calcio hacia los bordes de los fenocristales de augita, indicando una cristalización en desequilibrio, aumentando la concentración de calcio hacia las etapas finales de la cristalización. Se identificó que el olivino se encuentra particularmente enriquecido en magnesio, debido a su espectro de rayos X e imágenes de mapas composicionales, caracterizándolo como un olivino magnesiano.

La composición mineralógica presente en las litologías de los *plugs* Cerros de la Virgen, Cerro Bonito y Cerro Picazo permite clasificarlas, junto a los datos aportados por Olivera (2019) y Muzio et al. (2019), como tefritas con nefelina, de acuerdo a los criterios establecidos por Le Maitre (2002).

En síntesis, las principales conclusiones del trabajo son las siguientes:

1- El Cerro de la Virgen, Bonito y Picazo reúnen el conjunto de características estructurales y morfológicas para ser considerados como *plugs* subvolcánicos.

2- El presente análisis define un evento subvolcánico inédito, cuyas características petrográficas lo diferencian de las rocas volcánicas cretácicas presentes dentro de la Cuenca Norte uruguaya.

3- El análisis petrográfico de las muestras pertenecientes a los tres cuerpos subvolcánicos, confirmaron características diferentes respecto a las rocas volcánicas comúnmente asociadas a la Formación Arapey. Los tres *plugs* presentan la siguiente mineralogía: augita + olivino magnesiano +

nefelina $\pm$ clinopiroxeno $\pm$ apatito $\pm$ minerales opacos (Ti-magnetita/pirita). A su vez, estas rocas suelen presentar xenolitos/xenocristales de composición olivínica y augítica. Se trata del primer registro de magmatismo alcalino, insaturado en sílice y con presencia de feldespatoides, en la Cuenca Norte Uruguaya.

4- En base a las relaciones de campo y al grado de preservación que estos *plugs* presentan en comparación con los basaltos tholeílicos, se plantea que el emplazamiento de las rocas subvolcánicas estudiadas es posterior al magmatismo de la Formación Arapey.

Agradecimientos

El presente trabajo fue realizado gracias a la financiación del proyecto CSIC I+D, N° 152, (2017). A su vez, los autores agradecen los valiosos aportes de los revisores anónimos para la mejora del manuscrito.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BECCALUVA, L.; BARBIERI, M.; BORN, H.; BROTZU, P.; COLTORTI, M.; CONTE, A.; GARBARINO, C.; GOMES, C.B.; MACCIOTTA, G.; MORBIDELLI, L.; RUBERTI, E.; SIENA, F.; TRAVERSA, G. (1992) **Fractional crystallization and liquid immiscibility processes in the alkaline-carbonatite complex of Juquiá (São Paulo, Brazil)**. Journal of Petrology, 33(6), p.1371-1404.
- BOSSI, J. (1966) **Geología del Uruguay**. Departamento de Publicaciones, Universidad de la República. Montevideo. 469 pp.
- BOSSI, J. y SCHIPILOV, A. (1998) **Rocas ígneas básicas del Uruguay**. Volumen I. Facultad de Agronomía, Universidad de la República. Montevideo. 245 pp.
- BUDKEWITSCH, P., y ROBIN, P. Y. (1994). **Modelling the evolution of columnar joints**. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 59(3), pp. 219–239. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(94\)90092-2](https://doi.org/10.1016/0377-0273(94)90092-2)
- CERNUSCHI, F.; DILLES, J.H.; KENT, A.J.; SCHROER, G.; RAAB, A.K.; CONTI, B.; MUZIO R. (2015) **Geology, Geochemistry and Geochronology of the Cretaceous Lascano East Intrusive Complex and Magmatic Evolution of the Laguna Merín Basin, Uruguay**. Gondwana Research, (28), p. 837-857.
- COMIN-CHIARAMONTI, P.; CUNDARI, A.; DEGRAFF, J.M.; GOMES, C.B.; PICCIRILLO, E.M. (1999) **Early Cretaceous-Tertiary magmatism in the Eastern Paraguay (western Paraná basin): geological, geophysical and geochemical relationships**. Journal of Geodynamics 28, p. 375-391.
- CONCEIÇÃO, R. V., CARNIEL, L. C., JALOWITZKI, T., GERVASONI, F., CEDEÑO, D. G. (2019). **Geochemistry and geodynamic implications on the source of Paraná-Etendeka Large Igneous Province evidenced by the 128 Ma Rosário-6 kimberlite, southern Brazil**. Lithos, pp. 328–329, 130–145. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.01.012>
- EGUÍA RODRÍGUEZ, M. (2014) **Aportes al conocimiento de la génesis de algunas estructuras circulares en los Basaltos de la Formación Arapey**. Tesis de grado, Instituto de Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias, UdelaR, Montevideo, 120 pp.
- FÉRAUD, G.; BERTRAND, H.; MARTÍNEZ, M.; URES, C.; SCHIPILOV, A.; BOSSI, J. (1999) **$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age and geochemistry of the southern extension of Paraná traps in Uruguay**. En: II Simposio Sudamericano de Geología Isotópica, 1999, Córdoba, p. 57-59.
- FLETCHER, C.J.N. y BEDDOE-STEPHENS, B. (1987) **The petrology and crystallization history of the Velasco alkaline province, eastern Bolivia**. En: Fitton, J.G. y Upton, B.G.J. (eds.) **Alkaline igneous rocks**. Geological Society of London, Special Publication 30, p. 403-413.

- GIBSON, S.A.; THOMPSON, R.N.; LEONARDOS, O.H.; DICKIN, A.P.; MITCHELL, J.G. (1999) **The limited extent of plume-lithosphere interactions during continental flood-basalt genesis: geochemical evidence from Cretaceous magmatism in southern Brazil**. Contributions to Mineralogy and Petrology, 137, p. 147-169.
- GILL, R. (2010) **An introduction to magmas and magmatic rocks**. En: Gill, R (ed.) **Igneous Rocks and Processes: A Practical Guide**. Chichester, West Sussex, UK: Wiley-Blackwell. Cap. 1, p. 1-19.
- HETÉNYI, G., TAISNE, B., GAREL, F., MÉDARD, É., BOSSHARD, S., MATTSSON, H. B. (2012). **Scales of columnar jointing in igneous rocks: Field measurements and controlling factors**. Bulletin of Volcanology, 74(2), 457–482. <https://doi.org/10.1007/s00445-011-0534-4>
- HUANG, H-M.; HAWKESWORTH, C.J.; VAN CALSTEREN, P.; MCDERMOTT, F. (1995). **Geochemical characteristics and origin of the Jacupiranga carbonatites, Brazil**. Chemical Geology, 119, p. 79-99.
- KERR, P. F. (1965). **Mineralogía óptica**. 3 ed. New York, McGraw-Hill, 443 pp.
- LE MAITRE, R. W. (2002) **Classification and nomenclature**. En: R.W. LE MAITRE (Ed) **Igneous rocks – a classification and glossary of terms**. Recommendations of the IUGS subcommission on the Systematics of Igneous Rocks. Cambridge: Cambridge University Press. 2nd edn. Cap.2. p. 3-42.
- LUSTRINO, M.; MELLUSO, L.; BROTZU, P.; GOMES, C.B.; MORBIDELLI, L.; MUZIO, R.; RUBERTI, E.; TASSINARI, C.C.G. (2005) **Petrogenesis of the Early Cretaceous Valle Chico igneous complex (SE Uruguay): relationships with Paraná-Etendeka felsic rocks**. Lithos, 82, p. 407-434.
- MILNER, S.C.; IE ROEX, A.P.; O'CONNOR, J.M. (1995) **Age of Mesozoic igneous rocks in northwestern Namibia, and their relationship to continental break-up**, J. Geol. Soc. Lond., 152, p. 97-104.
- MORBIDELLI, L.; GOMES, C.B.; BROTZU, P.; D'ACQUARICA, S.; GARBARINO, C.; RUBERTI, E.; TRAVERSA, G. (2000) **The Paríquera Açú Kalkaline complex and southern Brazil lithospheric mantle source characteristics**. Journal of Asian Earth Sciences, 18, p. 129-150.
- MUZIO, R. (2004). **El magmatismo Mesozoico en Uruguay y sus recursos minerales asociados**. En Veroslavsky, G., Ubilla, M. y Martínez, S. (eds.) **Cuencas sedimentarias de Uruguay: geología, paleontología y recursos naturales-Mesozoico**, DIRAC-Facultad de Ciencias 4: pp. 77-102, Montevideo.
- MUZIO, R.; OLIVERA, L.; PEEL, E.; FORT, S. (2019) **Geochemical features of alkaline volcanism in the southern extreme of Paraná Basin, NW Uruguay**. Resumen, En: Goldschmidt Conference, Barcelona, <https://goldschmidt.info>.
- MUZIO, R.; PEEL, E.; PORTA, N.; SCAGLIA, S. (2017). **Mesozoic dykes and sills from Uruguay: Sr e Nd isotope and trace element geochemistry**. Journal of South American Earth Sciences, 77, pp. 92 – 107.
- MUZIO, R.; SCAGLIA, F.; MASQUELIN, H. (2013). **Titaniferous magnetite and barite from the San Gregorio de Polanco dike swarm, Paraná Magmatic Province, Uruguay**. Earth Sciences Research Journal, 17(2), pp. 151-158.
- OLIVERA, L. (2019) **Petrología de rocas volcánicas al Norte de Pepe Núñez (Depto. de Salto)**. Tesis de Grado, Instituto de Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias, UdelAR, Montevideo, 97 pp.
- OLIVERA, L.; MUZIO, R.; FORT, S.; PEEL, E.; MORALES, E. (2018). **Petrografía do vulcanismo alcalino do NW de Uruguai**. En: 49º Congresso Brasileiro de Geologia, Rio de Janeiro, Resumen.
- PEATE, D.W. (1997) **The Paraná–Etendeka Province**. En: **Large Igneous Provinces: Continental, Oceanic, and Planetary Flood Volcanism**. J.J. Mahoney. Coffin (eds.). American Geophysical Union. (100), p. 217-245.
- PHILLIPS, J. C.; HUMPHREYS, M. C. S.; DANIELS, K. A.; BROWN, R.J.; WITHAM, F. (2013). **The formation of columnar joints produced by cooling in basalt at Staffa, Scotland**. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Bull. Volcanology, 75 (6), pp. 715 - 732.
- PHILPOTTS, A.R. (1989). **Petrography of igneous and metamorphic rocks**. Prentice Hall (ed.). The University of Connecticut. 178 pp.
- PICCIRILLO, E.M.; MELFI, A.J.; COMIN-CHIARAMONTI, P.; BELLINI, G.; ERNESTO, M.; MARQUES, L.S.; NARDY, A.J.R.; PACCA, I.G.; ROISENBERG, A.; STOLFA, D. (1988) **Continental Flood Volcanism from the Paraná Basin (Brazil)**. En: Macdougall, J.D. (ed.). **Continental Flood Basalts: Petrology and Structural Geology**, San Diego, California, USA. pp. 195-238.
- PRECIOZZI, F.; SPOTURNO, J.; HEINZEN, W.; ROSSI, P. (1985) **Memoria Explicativa de la Carta Geológica del Uruguay a escala 1/500 000**. DINAMIGE-M.I.E.M. Montevideo, 90 pp.
- REED, J. (2005) **Electron Microprobe analysis and scanning electron microscopy in geology**. Cambridge University Press, New York, 216 pp.
- ROACH, I.C.; MCQUEEN, K.G.; BROWN M.C. (1994). **Physical and petrological characteristics of basaltic eruption sites in the Monaro Volcanic Province, southeastern New South Wales, Australia**. Journal of Australian Geology & Geophysics, 15 (3), pp. 381-394.
- ROSSELLO, E.A.; DE SANTA ANA, H.; VEROSLAVSKY, G. (1999) **El Lineamiento Santa Lucía-Aiguá-Merín**

- (Uruguay): Un rifting Transtensivo Mesozoico abortado durante la apertura Atlántica?** En: *ÚNESP/SBC, Serra Negra-Brasil, 5º Simpósio sobre o Cretáceo do Brasil y 1º Simposio sobre el Cretácico de América del Sur*, Anais: pp. 443-448.
- RYAN, M. P. y SAMMIS, C. G. (1978). **Cyclic fracture mechanisms in cooling basalt**, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 89, pp. 1295 – 1308.
- SAEMUNDSSON, K. (1970). **Interglacial lava flows in the lowlands of southern Iceland and the problem of two-tiered columnar jointing**. *Jokull* 20: pp. 62–77.
- SEVERIN, K.P. (2004) **Energy Dispersive Spectrometry of Common Rock Forming Minerals**. Department of Geology and Geophysics, University of Alaska Fairbanks, U.S.A. 228 pp.
- SIAL, A. N. y MCREATH, I. (1984) **Minerais do Manto Superior e das Rochas Ígneas**. En: Jurema F. da Silva y Hermes A. V. Inda (eds.) *Petrología ígnea volumen 1*. Cap 1.4 Minerais do manto superior e das rochas ígneas. Cap. 1.4, pp. 33-52.
- SOTO, M. (2014) **Geología, geofísica y geoquímica de la región de Pepe Núñez, Cuenca Norte (Uruguay)**. Tesis de Maestría en Geociencias, PEDECIBA, Facultad de Ciencias, UdelaR, Montevideo, 248 pp.
- SPRY, A. (1962). **The origin of columnar jointing, particularly in basalt flows**. *Aust J Earth Science*, 8, pp. 191–216.
- TERRY, R. y CHILINGAR, G. (1955). **Summary of “Concerning some additional aids in studying sedimentary formations,” by M. S. Shvetsov**. *Journal of Sedimentary Research*. 25. 229-234. 10.1306/74D70466-2B21-11D7-8648000102C1865D.
- TOMKEIEFF, S.I. (1940). **The basalt lavas of the Giant’s Causeway district of Northern Ireland**. *Bull. Volcanology*, 6, pp. 89–143.
- TOYODA, K., HORIUCHI, H.; TOKONAMI, M. (1994). **Dupal anomaly of Brazilian carbonatites: geochemical correlations with hotspots in the South Atlantic and implications for the mantle source**. *Earth and Planetary Science Letters*, 126, pp. 315-331.
- TURNER, S.P.; KIRSTEIN, L.A.; HAWKESWORTH, C.J.; PEATE, D.W.; HALLINAN, S.; MANTOVANI, M.S.M. (1999). **Petrogenesis of an 800 m lava sequence in eastern Uruguay: insights into magma chamber processes beneath the Paraná flood basalt province**. *Journal of Geodynamics*, 28, pp. 471-487.
- ULBRICH, H.H.G.J. y GOMES, C.B. (1981) **Alkaline rocks from continental Brazil**. *Earth Science Reviews*, 17, pp. 135-154.