

Informe final publicable de proyecto Procesos volcánicos y efectos térmicos relacionados en áreas clave de la Cuenca Norte uruguaya.

Código de proyecto ANII: FCE_1_2019_1_156437

14/09/2022

MUZIO SAUER, Rossana (Responsable Técnico - Científico)

VARELA LLANES, Emiliano (Investigador)

FORT, Santiago (Investigador)

OLIVERA ICHAZO, Lucía (Investigador)

PEEL CANABAL, Elena (Investigador)

SCAGLIA CORTELLEZZI, FERNANDO (Investigador)

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA. FACULTAD DE CIENCIAS (Institución Proponente)

Resumen del proyecto

La actividad magmática (volcánica, subvolcánica o intrusiva) presente en Uruguay, cuenta con un amplio registro en la escala del tiempo geológico; desde eventos muy antiguos (con más de 2000 Millones de años - Ma), hasta algunos más recientes en el tiempo, registrados en la Cuenca Norte uruguaya (en el entorno de los 132 Ma), asociados a las etapas finales de fragmentación del continente Gondwana e inicio de la apertura del océano Atlántico Sur. Como resultado del presente proyecto, se confirmó por primera vez la existencia de los registros subvolcánicos más jóvenes (entre 79 Ma y 51 Ma), no sólo para la Cuenca Norte sino también para el Uruguay, correspondientes a un evento magmático inédito por sus características químicas. Estas rocas presentes en el límite de los departamentos de Salto y Tacuarembó, derivan de magmas alcalinos subsaturados en sílice, lo que deriva en una mineralogía hasta ahora no presente en otras rocas conocidas en la geología uruguaya, como es la presencia de nefelina y analcima, además de otros minerales comunes en rocas ultramáficas (o con poco contenido de sílice en su composición). Este hallazgo conlleva, entre otras conclusiones, que a partir del período Cretácico Tardío y hasta parte del Paleógeno (períodos comprendidos para las edades mencionadas antes), la región que comprende a la cuenca estuvo sometida a reactivaciones tectónicas que provocaron la apertura y/o profundización de estructuras ya existentes en la misma (fracturas), para la emisión de estos magmas desde el manto terrestre hacia niveles corticales poco profundos. Adicionalmente, el confirmar la presencia de este tipo de rocas derivadas de magmas alcalinos subsaturados, le imprime un eventual potencial al área, que debería ser estudiada con mayor detalle, ya que ese tipo de magmatismo suele ser portador de concentraciones anómalas de elementos químicos de valor económico.

Ciencias Naturales y Exactas / Ciencias de la Tierra y relacionadas con el Medio Ambiente / Vulcanología / Petrología Ígnea

Palabras clave: petrología / química mineral / geocronología /

Introducción

La apertura del océano Atlántico Sur durante el período Cretácico está asociada con la erupción de derrames basálticos y, subordinadamente, riolíticos correspondientes a la Provincia Magmática Paraná – Etendeka (PMPE), en Sudamérica y África, respectivamente (Erlank et al., 1984; Bellieni et al., 1988). Adicionalmente a estos derrames volcánicos e intrusiones asociadas de afinidad tholeítica, han sido reconocidos y descritos cuerpos volcánicos y complejos alcalinos contemporáneos o posteriores (temporalmente), en Brasil, Bolivia, Paraguay, Uruguay y Namibia (p.e. Jacupiranga en Brasil, Provincia Velasco en Bolivia, Valle Chico en Uruguay y Provincia Damaraland en Namibia; Almeida 1983; Morbidelli et al. 1995; Comin-Chiaramonti et al. 1999; Gomes & Comin-Chiaramonti 2005; Cernuschi et al. 2015). El emplazamiento de magmatismo alcalino, dentro y en los bordes de la Cuenca de Paraná, ocurre principalmente a lo largo de estructuras tectónicas activas desde inicios del Mesozoico (Gomes & Comin-Chiaramonti 2005). Los complejos alcalinos a lo largo de la costa sureste de Uruguay intruyen a lo largo de rift abortados que componen el lineamiento Santa Lucía – Aiguá – Merín (Rossello et al. 2000), generando las Cuencas de Santa Lucía y Laguna Merín. Los principales complejos alcalinos y carbonatíticos de importancia económica tienen su registro temporal entre el Permo-Triásico y Paleógeno, tanto a lo largo de cinturones móviles (Ciclo Brasileño) como dentro de la Cuenca de Paraná (Riccomini et al. 2005; Gomes & Comin-Chiaramonti 2005), muchos de ellos se encuentran en la región sur de Brasil asociados a zonas de flexuras y fracturas del basamento (Biondi, 2005). Todas las asociaciones alcalinas – alcalinas/carbonatíticas son reconocidas como importantes fuentes de Nb, fosfatos y ETR, además de las posibles asociaciones con complejos kimberlíticos que algunos complejos puedan presentar (Biondi 2005; Ernst 2014). En Uruguay, el magmatismo reconocido con anterioridad a los recientes estudios realizados por parte del equipo de investigación en la Cuenca Norte Uruguay (extensión sur de la Cuenca de Paraná; De Santa Ana & Veroslavsky, 2004), corresponde a los derrames basálticos tholeíticos (subalcalinos) de la Formación Arapey (Bossi, 1966), con una extensión aproximada de 41.500 km² (Bossi & Navarro, 1991) y a la actividad intrusiva básica (también de naturaleza química tholeítica) reunida en la Formación Cuaró (Preciozzi et al., 1985); ésta última con ocurrencia restringida a la porción centro-este del país aunque recientes estudios podrían extender este límite más hacia el sur (Muzio et al., 2011; Muzio et al., 2013). Estudios más recientes en diferentes áreas de esta formación geológica (Soto 2014; Eguía, 2014) han puesto en evidencia la presencia de estructuras subcirculares y de diversas facies volcánicas (internas y externas), abriendo así la posibilidad de aplicar un abordaje estratigráfico basado en la arquitectura de facies, a través de estudios de detalle en áreas clave.

Estudios recientes realizados por el equipo de investigación proponente de este proyecto han registrado la ocurrencia de lavas máficas subsaturadas en algunas de las estructuras subcirculares presentes en la Cuenca Norte, recortando los derrames basálticos cretácicos de la Formación Arapey y que fueron interpretados como posibles necks volcánicos (Soto 2014; Olivera et al. 2018; Muzio et al. 2019). De acuerdo a estos estudios se tratan de rocas ultramáficas volcánicas de textura porfirítica con olivina (hortonolita/fayalita; como megacristales y xenocristales) y augita, inmersos en una matriz hipocristalina compuesta por olivina, augita, microlitos de plagioclasa, nefelina y minerales opacos (principalmente ulvospinela y pirita). Los análisis químicos preliminares realizados indican para estas litologías (basanitas) un alto contenido en ETR, elementos LILE y HFS, como Nb, Ti y Ta, siendo el primer registro de este tipo de rocas para la Cuenca Norte uruguaya (Muzio et al. 2019). El presente proyecto propone un análisis volcanológico físico focalizado en el estudio morfológico y petrogenético del reciente hallazgo de un evento volcánico alcalino subsaturado que posdata a las lavas basálticas de la Formación Arapey, estas últimas de edad Cretácico inferior. Adicionalmente, la presencia importante de brechas volcánicas y procesos de interacción magma - sedimentos (seudo-peperitas, brechas hidráulicas, etc.), refuerza la idea de que no todas las estructuras descritas como brechas por otros autores en la zona de trabajo seleccionada responden a los mismos procesos. La integración de datos recientes, sumados al relevamiento estructural de áreas clave, permitirá establecer un modelo evolutivo que contribuya al entendimiento del origen de estos magmas, del estilo de volcanismo, modelos de emplazamiento y su eventual potencial en recursos minerales, así como al conocimiento de los procesos derivados por acción de estos magmas en la cuenca. Como fuera mencionado anteriormente, a nivel internacional y particularmente en la región (sur de Brasil y Paraguay), existen eventos similares, pero no había registros aún para la porción sur correspondiente a Uruguay, lo cual amerita profundizar los estudios ante este hallazgo reciente en la zona propuesta.

Tradicionalmente la investigación de derrames volcánicos priorizó la adquisición e interpretación de datos geoquímicos e isotópicos, considerando al depósito volcánico como una sucesión monótona de derrames tabulares con espesores variados. En este sentido en el caso de Uruguay, así como hasta dos décadas atrás en otras regiones vecinas de la Provincia Magmática Paraná (PMP; Peate, 1997), el marco estratigráfico de estas sucesiones volcánicas se resume en subdivisiones simples que separan derrames de lavas de otros productos ígneos asociados (p.e. cuerpos intrusivos). En contrapartida, se observa un fuerte aumento o priorización en obtener datos analíticos, mineralógicos o petrogenéticos, muchas veces desvinculados de las asociaciones de facies volcánicas, estructuras y texturas presentes en estos depósitos. Para poder comprender la historia física del volcanismo (tasas de efusión, interacción magma-sedimentos y/o mecanismos de transporte involucrados en la construcción de estos depósitos, por ejemplo), la investigación de los sistemas volcánicos debe priorizar la identificación de los diferentes tipos de facies presentes en el depósito volcánico (a partir de Self 1998; entre otros). A partir de estos datos, la construcción de un modelo basado en la arquitectura de facies permite extraer información relevante acerca del paleo-ambiente y las condiciones físicas del volcanismo, además de los procesos magmáticos relacionados con el potencial mineral de la secuencia volcánica estudiada (Jerram & Widdowson, 2005; Waichel et al., 2007; 2008). Las facies/asociaciones de facies que pueden identificarse a partir de un evento volcánico incluyen: desde los flujos tabulares clásicos hasta flujos compuestos, con diferentes estructuras asociadas; facies hialoclásticas, interacción magma-sedimentos (brechas, peperitas/seudo-peperitas), facies intrusivas y/o de conducto, entre otras. Muchas de estas estructuras ocurren desde una escala local/intermedia hasta una gran escala dentro de una cuenca y solo pueden ser reconocidas a través de un estudio sistemático y detallado en campo (p.e. Jerram & Stollhoffen, 2002; Waichel et al., 2008). Este abordaje metodológico puede proporcionar una valiosa información acerca de cómo se construyeron no sólo las provincias ígneas; sino que también permite cuantificar su relación e interacción con las secuencias sedimentarias subyacentes (Spitzer et al., 2005; Jerram et al., 2009). Asimismo, los recursos minerales asociados a las cuencas sedimentarias son ampliamente conocidos (carbón, gas, petróleo, minerales metálicos y no metálicos) y no solo están asociados a sus unidades sedimentarias, sino que también están relacionados a la influencia térmica del magmatismo presente y a procesos sin- y pos-magmáticos (Fúlfaro et al., 1997; Mincato, 2000; Santos et al. 2009).

En Sudamérica, la PMP (Peate 1997), ocupa un área de 1.2×10^6 km², distribuida entre el Sur de Brasil, en el Este de Paraguay y en el Norte de Uruguay y Argentina. En lo que respecta a la petrología de la PMP, se destaca el predominio de basaltos tholeiíticos, no obstante, se encuentran abundantes registros de actividad magmática alcalina coetánea y posterior al evento magmático principal, con una gran diversidad litológica desde el punto de vista composicional (Ulbrich & Gomes, 1981; Comin-Chiaramonti & Gomes, 2005; entre otros autores).

En Uruguay, este magmatismo está presente en la Cuenca Norte Uruguaya (extensión sur de la Cuenca de Paraná; De Santa Ana & Veroslavsky, 2004), y está representado por los derrames basálticos correspondientes a la Formación Arapey (Bossi, 1966) y por la actividad intrusiva básica reunida en la Formación Cuaró (Preciozzi et al., 1985); ésta última con ocurrencia restringida a la porción centro-este del país aunque recientes estudios podrían extender este límite más

hacia el sur (Muzio et al., 2011; Muzio et al., 2013). El primer investigador en reconocer estos derrames basálticos fue Walther (1911; 1927). Caorsi & Goñi (1958), introducen por primera vez el nombre de lavas de Arapey, siendo finalmente Bossi (1966) quien eleva a estas lavas a su rango de formación geológica. Posteriormente, Bossi & Schipilov (1998) cambian la jerarquía estratigráfica de esta unidad proponiendo el Grupo Arapey, en base a criterios estructurales y petrográficos. Este magmatismo cuenta con abundantes antecedentes cartográficos a escala local y regional (Bossi & Heide, 1970; Bossi et al., 1974; Preciozzi et al., 1985, entre otros); antecedentes petrológicos y estructurales (Fernández & Ledesma, 1974; Bossi & Navarro, 1991; Bossi & Schipilov, 1998); datos geoquímicos y datos de perforaciones profundas y geocronológicos (Creer et al, 1965; Turner et al., 1994; Féraud et al., 1999). Estudios más recientes en diferentes áreas de esta formación geológica (Eguía, 2014) han puesto en evidencia la presencia de estructuras y de diversas facies volcánicas (internas y externas), abriendo así la posibilidad de aplicar un abordaje estratigráfico basado en la arquitectura de facies, a través de estudios de detalle en áreas clave. Estudios realizados por Soto (2014) y Eguía (2014), en los alrededores de la localidad de Pepe Núñez (Depto. de Salto), señalaron la presencia de "litotipos y estructuras poco frecuentes" para la Formación Arapey, que fueron interpretados por estos autores como posibles necks volcánicos. Trabajos posteriores realizados 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.

El presente trabajo propone un análisis volcanológico físico focalizado en el estudio morfológico de estos registros ígneos alcalinos con la integración de datos de campo basados en el estudio de la arquitectura de las facies volcánicas, incluyendo datos petrológicos (SEM-EDS, química mineral, geoquímica complementaria a la ya existente y geocronología), para establecer posibles vínculos entre la estructuración de los derrames y el quimismo. La integración de estos datos, sumados al relevamiento estructural de áreas clave, permitirá establecer un modelo evolutivo que contribuya al entendimiento del origen de estos magmas, del estilo de volcanismo, modelos de emplazamiento y su eventual potencial en recursos minerales. entre los principales resultados esperados se cuentan los siguientes:

(1) Identificación de estructuras y facies volcánicas indicadoras de procesos físicos asociados al mecanismo de emplazamiento y procesos de interacción magma - rocas sedimentarias. (2) Se espera conocer la posible incidencia térmica del evento ígneo en las rocas sedimentarias y la verificación de posibles procesos hidrotermales. Se espera también comprobar la afinidad química y fuente asociada al evento volcánico. (3) Actualización de base de datos geocronológicos. Se espera verificar la existencia o no de un evento volcánico posterior al magmatismo Mesozoico presente en la cuenca con edades georreferenciadas en las áreas clave del estudio y (4) Verificar la correspondencia entre datos químicos, química mineral y procesos ígneos involucrados, determinar las relaciones entre procesos volcánicos - productos (facies volcánicas presentes incluyendo a los productos de interacción magma-sedimentos) y posibles efectos térmicos/hidrotermales.

Metodología/diseño del estudio

La complejidad y variabilidad faciológica que presentan los terrenos volcánicos se pone de manifiesto en los registros presentes en la Cuenca Norte uruguaya (diversidad en la arquitectura de facies de los derrames, intrusiones de diques y sills, procesos y relaciones de contacto con rocas sedimentarias, grado relativamente alto de meteorización y fracturación de los materiales, etc.). Frente a esta diversidad y complejidad, la selección de áreas claves que cuentan con una base suficiente de antecedentes cartográficos, petrográficos y químicos se torna indispensable para abordar los objetivos establecidos. En base a este criterio y de acuerdo a los antecedentes es que fueron seleccionadas las áreas entre las localidades de Pepe Núñez - Quintana y el área sureste de Pepe Núñez, aproximadamente en el límite de los departamentos de Salto y Tacuarembó. Estos datos previos permitieron definir con mayor precisión la estrategia de trabajo para el estudio del volcanismo presente en esa región, evaluar los productos y procesos derivados y complementar datos para su estudio a través de una selección adecuada de puntos de muestreo para análisis químicos, química mineral y geocronología. Si bien se contó con antecedentes petrológicos puntuales en las zonas seleccionadas y que fueron utilizados como control para los nuevos datos obtenidos en este proyecto, no existían suficientes datos acerca de los procesos evolutivos o de interacción generados por este evento volcánico ni datos relacionados con las facies volcánicas presentes. El área seleccionada aportó nuevos datos de interés ya que no se habían relevado hasta ahora en forma detallada y a nivel de superficie muchas de las estructuras presentes en los derrames ni los procesos o relaciones con rocas las rocas sedimentarias. Para el desarrollo del proyecto se adoptó la interrelación campo - laboratorio - gabinete, estableciéndose en ese marco las actividades que se detallan a continuación: (i) identificación en campo de contactos y procesos relacionados a interacción magma - sedimentos; (ii) relevamiento de facies volcánicas y estructuras presentes en las áreas clave; (iii) caracterización petrográfica de nuevas muestras volcánicas/subvolcánicas y sedimentarias de superficie; (iv) muestreos para química mineral, litogeoquímica y geocronología en rocas relacionadas con el evento volcánico alcalino y muestreos para estudios químicos en las rocas sedimentarias o materiales alterados

por procesos volcánicos (DRX, SEM - EDS cuantitativo y microsonda electrónica; (vi) interpretación de datos visualizando la potencialidad en recursos minerales asociados. Para cumplir con los objetivos planteados y con las diversas etapas operativas se prevén un total de 20 días de campo a ser ejecutados por los diferentes integrantes del equipo. Se contó en parte de estas etapas con el apoyo del profesor Dr. Carlos Sommer (UFRGS, Brasil), quien además de participar en la discusión de datos y colaborar con el procesamiento de muestras en microsonda electrónica, es co-tutor de doctorado de un investigador del equipo (en ejecución). Durante la primera etapa del proyecto se trabajó fundamentalmente en la verificación de zonas de contacto de las unidades magmáticas involucradas, la caracterización petrográfica de la zona de Pepe Núñez en base a aspectos macroscópicos de campo y análisis cuantitativos y semicualitativos en lámina delgada (microscopio petrográfico y SEM -EDS cuantitativo con patrones). Todos estos estudios se realizaron en laboratorios de la Facultad de Ciencias. Asimismo, se realizaron los muestreos para química mineral y datos químicos y geocronológicos complementarios en las dos áreas. Como resultado de estos trabajos, se realizaron 24 análisis químicos completos de las unidades subvolcánicas alcalinas identificadas, 6 muestreos para química mineral y 8 dataciones geocronológicas por método K-Ar (roca total). La preparación preliminar de las muestras fue realizada en los laboratorios de la Facultad de Ciencias y las muestras procesadas fueron enviadas a laboratorios del exterior (ACME Bureau Veritas y Actlabs, Canadá), para los respectivos análisis geoquímicos y geocronológicos, garantizando la calidad de los análisis de acuerdo a los patrones de calidad internacionales. Los análisis de DRX se ejecutaron en la Facultad de Química (UDELAR), bajo forma de pasantía por parte de uno de los jóvenes investigadores del equipo. Una vez obtenidos los primeros resultados, se generó otra etapa de trabajos involucrando actividades de campo y gabinete, para la interpretación de los datos preliminares obtenidos y complementación de datos estructurales, así como la caracterización de procesos y facies volcánicas presentes. Una vez obtenidos todos los resultados analíticos, se inicia la etapa importante de la interpretación final de los mismos para verificar la correspondencia con los datos petrográficos o químicos previamente obtenidos; discutir y verificar las tendencias evolutivas de las unidades magmáticas y su eventual parentesco entre sí; discutir las relaciones entre los magmas y rocas sedimentarias circundantes, su incidencia térmica y procesos relacionados; así como la verificación de la presencia o no de nuevas estructuras volcánicas y/o conductos hidrotermales. Una vez establecidas las interpretaciones y verificada la coherencia de los resultados, se concluye el estudio petrológico integrando los datos de campo y los químicos con la finalidad de evaluar la influencia de los procesos magmáticos en el contexto de la cuenca. Cabe resaltar, que en el marco de la estrategia de trabajo y metodología seleccionada se desarrollaron 2 trabajos puntuales entre las etapas previstas de trabajo: una tesina de grado en la Licenciatura en Geología (en etapa de conclusión para este semestre), un trabajo de posgrado (Maestría en Geociencias, ya finalizada y en espera de defensa). El abordaje metodológico propuesto en este proyecto cuenta con numerosos antecedentes y abundantes resultados para control de datos a nivel regional (Waichel et al., 2008; Holz et al., 2008; Hartmann et al., 2012; Waichel et al., 2013).

Resultados, análisis y discusión

A partir del análisis de imágenes satelitales y posterior verificación en campo fueron identificados 6 nuevos conductos de rocas subvolcánicas alcalinas, totalizando así un conjunto de 9 cuerpos ígneos alcalinos (incluyendo los 3 hallazgos previos del equipo de investigación). La topografía positiva que conforma los cerros, suele ser una característica para los afloramientos de naturaleza alcalina, sugiriendo una erosión diferencial para estas litologías respecto a los basaltos de la Formación Arapey circundante. Un rasgo estructural importante, presente y reiterado en todos los cerros de rocas alcalinas estudiados, es la existencia de estructuras columnares. Este tipo de estructuras suele generarse por la contracción que sufre un derrame de lava o intrusión somera durante su enfriamiento (Budkewitsch y Robin, 1994). Según estos autores, la superficie de enfriamiento comienza a generar fracturas hacia el interior del derrame, esto sucede una vez que la superficie excede el esfuerzo de tensión de la roca fundida, lo cual comenzaría por debajo de una temperatura de 980°C aproximadamente (Lamur et al., 2018). Las litologías encontradas en los niveles inferiores de los cerros exhiben columnas de menor tamaño y con menor hexagonalidad respecto a las comúnmente encontradas hacia el tope, indicando un aumento de madurez de la estructura hacia el centro del cuerpo (Budkewitsch y Robin, 1994). Esto sugeriría una diferencia en la tasa de enfriamiento desde el centro a la periferia, lo cual es típico de derrames o intrusiones someras emplazadas con geometría esférica a elipsoidal (plugs) (Spry, 1962). Por otro lado, en las áreas estudiadas, los derrames basálticos producto del magmatismo regional Juro-Cretácico correspondientes a la Formación Arapey, recubren y se intercalan con sedimentos de la Formación Tacuarembó, compuesta por areniscas y pelitas de origen fluvio-lacustre con episodios eólicos en su parte inferior, y areniscas netamente eólicas en su parte superior. Esto es indicativo de que el magmatismo sucedió cuando la sedimentación aún estaba activa, generando diversas facies volcano-sedimentarias, particularmente en los alrededores de la localidad de Pepe Núñez. La facies más abundante es una brecha compuesta por una matriz de sedimentos y clastos volcánicos, conocida como peperita, además de facies volcánicas internas propias de los derrames de lava, como brechas de tope o base de derrames. White et al. (2000) define a las peperitas como "un

término genético aplicado a rocas formadas esencialmente in situ, por la desintegración de magma durante una intrusión, el cual se mezcla con sedimentos no consolidados o poco consolidados, típicamente húmedos". No obstante, algunos autores (Jerram & Stollhofen, 2002; Petry et al, 2007) sostienen que el agua no es un elemento esencial en la formación de peperitas, existiendo otros mecanismos para dar origen a estas rocas en ambientes sedimentarios secos, nombradas como pseudo-peperitas por Fernandes et al. (2010). Las brechas observadas parecen tratarse de peperitas sensu stricto, del tipo fluidal o globular. Sedimentos con vacuolas, vacuolas rellenas de sedimento y deformación suave en los sedimentos son evidencias de que los sedimentos estaban húmedos y no consolidados.

Desde el punto de vista mineralógico, el conjunto de rocas alcalinas asociadas a los cerros presenta megacristales (3 cm – 1 cm), macrocristales (3 mm - 1 mm), microcristales (< 1 mm) y vidrio, sugiriendo diferentes etapas de enfriamiento dentro de la misma roca. Esta variación en el tamaño cristalino no es extraña en sistemas magmáticos, donde varios eventos de enfriamiento y cristalización suceden en distintos momentos o a través de diferentes pulsos, generando una textura heterogénea de cristales con diferente evolución (Jerram et al., 2018). Esta textura inequigranular porfirítica indicaría que el ascenso del magma hacia la superficie fue interrumpido por períodos de cristalización en cámaras magmáticas más profundas (Gill, 2010). La inexistencia de texturas de desvitrificación, la diversidad en el tamaño cristalino, la textura subidiomórfica y el bajo porcentaje de vidrio y vesículas, descarta la posibilidad de que estas litologías correspondan al enfriamiento de un derrame subaéreo. Tanto las estructuras columnares como texturales sugieren que el magma que originó estas litologías fue emplazado dentro de niveles someros de la corteza (< 3 km). A partir del estudio mineralógico-petrográfico detallado estudio se confirma la presencia modal de nefelina en los cuerpos alcalinos identificados en la Cuenca Norte. Estos cristales se encuentran en forma de megacristales automorfos a subautomorfos de hasta 3 cm, automorfos y xenomorfos de aproximadamente 0,20 mm comúnmente dentro de estructuras globulares (ocelos) y también asociada con carbonatos. Ocelos de nefelina y carbonato han sido interpretados como resultado de la inmiscibilidad de líquido silicatado-carbonatado (Kjarsgaard y Peterson 1991; Roedder, 1997). Asimismo, a partir del análisis con microscopio petrográfico, se observa un mineral comúnmente anisótropo, con similar composición a la nefelina y a partir del análisis semi-cuantitativo con realizado con Microscopio Electrónico de Barrido, caracterizado como analcima. Las analcimas pueden aparecer como resultado de alteración de feldespatoides en rocas ígneas, así como resultantes de procesos hidrotermales (Wikinson y Hensel, 1994). Otros autores postulan que la analcima xenomorfa y anisótropa en rocas ígneas puede ser considerada como primaria o como producto de desvitrificación de vidrio volcánico (Rock, 1977). Mineralógicamente, todas las litologías estudiadas están constituidas esencialmente de augita y olivino, con abundante presencia de plagioclasa en los basaltos alcalinos y traquibasaltos, nefelina y/o analcima, y carbonatos. Esta mineralogía es típica de rocas máficas insaturadas y es similar a la asamblea mineral que presentan las tefritas de los cuerpos alcalinos ultramáficos previamente caracterizados por Olivera (2019).

Los datos químicos de las muestras extraídas de los plugs sugieren que estas se encuentran emparentadas con una fuente magmática poco diferenciada, de afinidad alcalina, preferentemente sódica. Este conjunto se diferencia en rocas ultrabásicas y básicas, siendo las muestras correspondientes a dos de los cuerpos, las menos diferenciadas ($SiO_2=40,86\%p.$ - $44,77\%p.$, $mg\#= 0,51 - 0, 55$), sugiriendo una relación más directa con un magma poco evolucionado. Si bien el contenido de MgO , $mg\#$, Cr y Ni , especialmente en las rocas ultrabásicas, sugiere que estas litologías provienen de magmas poco diferenciados, estos valores son relativamente bajos como para relacionarlos directamente a una fuente primitiva. Las litologías analizadas presentan, en general, similares concentraciones de óxidos mayores, elementos menores y traza, sugiriendo una fuente magmática común para el conjunto de litologías. Algunas leves variaciones, especialmente en los elementos traza, permiten la distinción de tres grupos dentro del conjunto. Por un lado, las tefritas son las menos evolucionadas y generalmente más enriquecidas en la mayoría de elementos incompatibles; luego las tefritas, traquibasaltos y basaltos alcalinos del segundo grupo presentan concentraciones intermedias, y los traquibasaltos y basaltos alcalinos del tercer grupo (en uno de los cerros) poseen el menor enriquecimiento general, a excepción de la mayor concentración en U , Cr y Ni . Esta diferencia composicional podría estar relacionada con diferentes etapas magmáticas, siendo las rocas ultramáficas y más enriquecidas en elementos incompatibles, el último evento hasta ahora reconocido para este evento tectono-magmático alcalino, de acuerdo a las edades que presentan. El ambiente relacionado con este magmatismo es de tipo intraplaca continental, sugiriendo esfuerzos distensivos en la región estudiada desde el Cretácico Tardío al Cenozoico (intervalo geocronológico establecido en base a las edades $K-Ar$ obtenidas en las muestras analizadas). De esta forma, los esfuerzos distensivos que fueron caracterizados por la liberación de gran volumen de magma a los 132 Ma, habrían culminado con reactivaciones locales a partir del Cretácico Tardío y hasta inicios del Paleógeno en la Cuenca Norte. De acuerdo a la representación de las muestras analizadas en los diagramas químicos que permiten aproximarnos al tipo de fuente magmática que dio origen a estos magmas (Pearce, 2008), las rocas alcalinas se encuentran emparentadas con una fuente de tipo OIB, asociada a fusión profunda. Asimismo, el enriquecimiento general de elementos trazas, las relaciones altas de elementos HFSE/HREE, y la inexistencia de

anomalías negativas de HFSE en la mayoría de muestras en el diagrama multi-elementos, sustenta la hipótesis de una fuente enriquecida en elementos incompatibles y/o bajo grado de fusión, lo que es común en magmas de tipo OIB. El bajo grado de fusión en un contexto intraplaca continental (como es el contexto geodinámico de la Cuenca Paraná, a la cual se asocia la Cuenca Norte uruguaya) estaría relacionado a fuentes litosféricas empobrecidas que fueron posteriormente enriquecidas a partir de procesos metasomáticos (McKenzie y O'Nions, 1995). De acuerdo con diferentes autores, el ingreso de estos fluidos metasomáticos puede ser provocado por procesos de subducción previos relacionados a la amalgamación de Gondwana durante el Neoproterozoico (Heilbron y Machado, 2003; Ruberti et al., 2012), o debido al bajo grado/tasa de fusión de la astenósfera dentro del ambiente distensivo durante el Mesozoico (Almeida, 1983; Comin-Chiaramonti y Gomes, 2005). Según edades modelo (TDM) disponibles, las rocas alcalinas y carbonatíticas del sudeste de Brasil presentan edades de 1,1 y 0,5 Ga, estando posiblemente relacionadas con la orogenia Brasiliana; mientras que las rocas alcalinas de Paraguay presentan una edad de 1,5 Ga, sugiriendo una relación con la formación del Cratón del Río de la Plata – Luis Alves (Gibson et al., 1996; Comin-Chiaramonti et al., 1996, 1997). Asimismo, el magmatismo alcalino sódico máfico a particularmente ultramáfico ha sido explicado por el bajo grado de fusión del manto, localmente metasomatizado por ingreso de fluidos (Pilet, 2015). Las edades TDM obtenidas previamente para algunas tefritas caracterizadas por Olivera (2019), similares químicamente a las tefritas halladas en este proyecto, son de 0,741 a 0,661 Ma, sugiriendo que pueden estar relacionadas a posibles procesos de ingreso de fluidos asociados al evento de amalgamación de Gondwana en el Neoproterozoico (Muzio et al., 2022). Las tefritas caracterizadas en el presente trabajo poseen un comportamiento de Tierras Raras y elementos incompatibles similares a las litologías alcalinas pertenecientes a las Provincias Misiones (120 - 116 Ma) y Asunción (66 - 39 Ma), del Paraguay (Velázquez et al., 2006; Gomes et al., 2013); así como también con volcánicas alcalinas de Sierra Chica (136 - 115 Ma), en Córdoba, Argentina (Lagorio et al., 2016), lo que puede indicar una posible fuente con características similares. En particular, la signatura isotópica descrita para las tefritas caracterizadas por Olivera (2019) es similar a la obtenida para las litologías de la Provincia Asunción, fortaleciendo la hipótesis de una fuente enriquecida similar o afectada por procesos similares. Teniendo en cuenta la distribución espacial y la edad de los diferentes cuerpos, no es posible establecer la trayectoria de emisión a partir del lineamiento NW-SE aparente en la zona de trabajo. Los cuerpos más jóvenes (correspondientes a edades del Paleógeno-Eoceno) tienden a presentar una composición ultramáfica alcalina hacia el centro del área de estudio, mientras que los cuerpos más antiguos con edades en el Cretácico Tardío se encuentran dispuestos en la periferia, siendo los correspondientes a las demás litologías básicas alcalinas. De acuerdo al enriquecimiento de elementos incompatibles, la fuente magmática asociada a la génesis de los cuerpos centrales del área de estudio, podría haber sido más profunda y/o estar sometida a un grado de fusión menor respecto a la fuente magmática que generó los primeros cuerpos alcalinos menos enriquecidos. El rango de edades obtenidas para este evento alcalino se enmarca entre los 79.2 ± 2.5 Ma y 51.5 ± 1.7 Ma, representando un evento hasta ahora inédito en la geología uruguaya.

Conclusiones y recomendaciones

Del estudio realizado, a partir de una primera caracterización geomorfológica, estructural, petrográfica, litogeoquímica y geocronológica de nuevos cuerpos alcalinos localizados en la Cuenca Norte, se resaltan las principales conclusiones:

- (1) Fueron identificados 6 nuevos cuerpos de naturaleza alcalina dentro de la Cuenca Norte uruguaya, totalizando actualmente un total de 9 cuerpos de naturaleza alcalina, predominantemente sódica, hasta ahora registrados.
- (2) Los análisis litogeoquímicos determinaron la existencia de nuevas variedades alcalinas asociadas a estos tipos de cuerpos subvolcánicos encontrándose, además de tefritas, traquibasaltos y basaltos alcalinos.
- (3) En base al análisis litogeoquímico y geocronológico se determinan al menos dos pulsos o etapas de actividad magmática alcalina para la Cuenca Norte, una que comienza a partir del Cretácico Tardío (79,2 a 65.5 Ma); y otra hacia el Paleógeno (63.7 – 51.5 Ma). Estos datos geocronológicos aumentan el rango temporal de magmatismo alcalino para la Cuenca Norte.
- (4) Diferentes signaturas litogeoquímicas indican posibles procesos de metasomatismo asociados a estos magmas, siendo un evento comúnmente citado para el magmatismo de la PMP. Estos procesos podrían haber generado enriquecimientos locales de H₂O y CO₂ a partir de los diferentes eventos de subducción ocurridos durante la amalgamación de Gondwana.
- (5) Futuros análisis a partir de estudios isotópicos y de química mineral, permitirían determinar con mayor precisión los posibles procesos ocurridos durante el emplazamiento de estos magmas, así como conocer con mayor detalle el tipo de fuente magmática, su origen y profundidad de emplazamiento. La determinación de la acción de fluidos metasomáticos durante la génesis de estos magmas o de efectos hidrotermales, podría explicar algunos de los rasgos químicos particulares que presentan estas rocas.
- (6) El hallazgo de este conjunto de unidades alcalinas es inédito para la geología y estratigrafía uruguaya, representa el

magmatismo más reciente dentro del registro geológico y con rasgos mineralógicos y químicos particulares, lo que motiva a continuar trabajando en el tema.

(7) Se ha propuesto denominar al conjunto alcalino descrito, de acuerdo a los criterios estratigráficos internacionales, como Provincia Alcalina de Salto, para incluirlo como una nueva unidad geológica en la geología uruguaya.

Referencias bibliográficas

- ALMEIDA, F.F. (1983). Relacoes tectónicas das rochas alcalinas mesozóicas da região meridional da Plataforma Sul-americana. *R.B.Geociencias* 13:139-158.
- BELLIENI, G.; PICCIRILLO, E.; COMIN-CHIARAMONTI, P.; MELFI, A. & DA ROIT, P. (1988). Mineral Chemistry of continental stratoid volcanics and related intrusives from the Paraná Basin (Brazil). In: PICCIRILLO, E. & MELFI, A. (EDS.), EDUSP, 73-93.
- BIONDI, J.C. (2005). Brazilian mineral deposits associated with alkaline and alkaline-carbonatite complexes. In: GOMES, C. & COMIN-CHIARAMONTI, P (Eds.), EDUSP, 707-750.
- BOSSI, J. (1966). Geología del Uruguay. D. Publicaciones, UDELAR, 460p.
- BOSSI, J. & HEIDE, E. (1970). Carta geológica del Uruguay a escala 1.100.000, segmento Arapey. D. de Publicaciones, UDELAR.
- BOSSI, J. & NAVARRO, R. (1991). Geología del Uruguay. D. de Publicaciones, UDELAR, 700-742.
- BOSSI, J. & SCHIPILOV, A. (1998). Rocas ígneas básicas del Uruguay. FAGRO, UDELAR, 245p.
- BOSSI, J.; LEDESMA, J.; CARBALLO, E. & NAVARRO, R. (1974). Resumen de los conocimientos actuales sobre los derrames basálticos del noroeste del Uruguay. Anais XXVIII C.B. de Geología.
- BROOKS, C.K. Y PRINTZLAU, I. (1978) Magma mixing in mafic alkaline volcanic rocks: the evidence from relict phenocryst phases and other inclusions, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 4, Issues 3–4, 1978, 315–331 pp.
- BUDKEWITSCH, P. Y ROBIN, P.-Y. (1994) Modeling the evolution of columnar joints. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 59. 219-239. [10.1016/0377-0273\(94\)90092-2](https://doi.org/10.1016/0377-0273(94)90092-2).
- CAORSI, J. & GOÑI, J. (1958). Geología uruguaya. Boletín 37, IGU, 73p.
- CERNUSCHI, F.; DILLES, J.H.; KENT., J.R; 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. *G.Research* 28:837–857.
- COMIN-CHIARAMONTI, P. Y GOMES, C.B. (1996). Alkaline magmatism in central-eastern Paraguay. Relationships with coeval magmatism in Brazil. São Paulo, Edusp-Fapesp, 464p.
- COMIN-CHIARAMONTI, P. Y GOMES, C.B. (2005). Mesozoic to Cenozoic Alkaline Magmatism in the Brazilian Platform. EDUSP/FAPESP. São Paulo, Brazil, p. 737.
- Gomes, C.B.; Comin-Chiaramonti, P.; Velázquez, V.F. (2013) A synthesis on the alkaline magmatism of Eastern Paraguay. *Braz. J. Geol.* 43, 745–761. <https://doi.org/10.5327/Z2317-488920130004000012> v.4.
- COMIN-CHIARAMONTI, P.; CUNDARI, A.; PICCIRILLO, E.M.; GOMES, C.B.; CASTORINA, F.; CENSI, P.; DE MIN, A.; MARZOLI, A.; SPEZIALE, S.; VELÁZQUEZ, V.F. (1997) Potassic and sodic igneous rocks from Eastern Paraguay: their origin from the lithospheric mantle and genetic relationships with the associated Parana flood tholeiites. *J. Petrol.* 38, 495–528. <https://doi.org/10.1093/petroj/38.4.495>
- COMIN-CHIARAMONTI, P.; GOMES, C.B.; CUNDARI, A.; CASTORINA, F.; CENSI, P. (2007a). A review of carbonatitic magmatism in the Paraná-Angola-Namibia (PAN) system. 2007. *L PERIODICO Di MINERALOGIA. An International Journal of MINERALOGY, CRYSTALLOGRAPHY, GEOCHEMISTRY, ORE DEPOSITS, PETROLOGY, VOLCANOLOGY and applied topics on Environment, Archaeometry and Cultural Heritage* (76), pp. 2-3, pp. 25-78
- COMIN-CHIARAMONTI, P.; CUNDARI, A.; DEGRAFF, J.M.; GOMES, C.B. & PICCIRILLO, E.M. (1999). Early Cretaceous-Tertiary magmatism in Eastern Paraguay: geological, geophysical and geochemical relationships. *J.Geodynamics* 28:375-391.
- CREER, K.M.; MILLER, J.A. & GILBERT-SMITH, A. (1965). Radiometric age of the Serra Geral Formation. *Nature* 207:282–283.
- DE SANTA ANA, H. & VEROSLAVSKY, G. (2004). La tectosecuencia volcanosedimentaria de la Cuenca Norte de Uruguay. Edad Jurásico-Cretácico Temprano. In: VEROSLAVSKY, G.; UBILLA, M. & MARTÍNEZ, S. (EDS.). *DIRAC, FCIEN*, 53-77.
- EGUÍA, M. (2014). Aportes al conocimiento de la génesis de algunas estructuras circulares en los basaltos de la Formación Arapey. Trabajo de graduación, FCIEN, 113 pp.
- ERLANK, A.; MARSH, J.; DUNCAN A.; MILLER, R.; HAWKESWORTH, C.; BETTON, P.; REX, D. 1984. Geochemistry and petrogenesis of the Etendeka volcanic rocks from South West Africa Namibia. *G.Soc.S. Africa Spec.Publ.*, 13:195-246.
- ERNST, R.E. (2014). Large igneous provinces. Cambridge University Press, <https://doi.org/10.1017/CBO9781139025300>.
- FÉRAUD, G.; BERTRAND, H.; URES, C.; SCHIPILOV, A. & BOSSI, J. (1999). $^{40}\text{Ar} - ^{39}\text{Ar}$ age geochemistry of the southern extension of the Paraná traps in Uruguay.

Proceedings II SASIG. FERNÁNDEZ, A. & LEDESMA, J.J. (1974). Criterios petrográficos de correlación en secuencias de coladas basálticas. XXVIII C.B. de Geología, 2.

FÚLFARO, V.J.; SAAD, A.R.; PERINOTTO, J.A.; ETCHEBEHERE, M.J. & VEROSLAVSKY, G., (1997). Paraná Basin: mineral resource potentials in Brazil, Uruguay and Paraguay. *Int.Geol. Review* 39 (8):703-722.

GIBSON, S.A.; THOMPSON, R.N.; DICKIN, A.P.; LEONARDOS, O.H. (1996) Erratum to "High-Ti and low-Ti mafic potassic magmas: Key to plume-lithosphere interactions and continental flood-basalt genesis". *Earth and Planetary Science Letters*, 141: 325-341.

GILL, R. (2010a). 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, pp. 1-19

GOMES, C. & COMIN-CHIARAMONTI, P. 2005. An introduction to the alkaline and alkaline-carbonatitic magmatism in and around the Paraná Basin. In: GOMES, C. & COMIN-CHIARAMONTI, P (Eds.), EDUSP, 21-30.

HARTMANN, L.A.; ARENA, K.R. & DUARTE, S.K. (2012). Geological relationships of basalts, andesites and sand injectites at the base of the Paraná volcanic province, Torres, Brazil. *J.V.G.Research* 237:97-111.

HEILBRON, M. Y MACHADO, N. (2003) Timing of terrane accretion in the Neoproterozoic–Eopaleozoic Ribeira orogen (SE Brazil). *Precambrian Res.* 125 (1–2), 87–112.

HOLZ, M.; SOARES, A.P. & SOARES, P.C. (2008). Preservation of aeolian dunes by pahoehoe lavas: an example from the Botucatu formation (Early Cretaceous) in Mato Grosso do Sul (Brazil), western margin of the Paraná Basin in South America. *JSAES* 25:398–404.

JERRAM, D.A. & STOLLHOFEN, H. (2002). Lava–sediment interaction in desert settings; ¿are all peperite like textures the result of magma–water interaction? *J.V.G.Research* 114: 231–249.

JERRAM, D. & WIDDOWSON, M. (2005). The anatomy of continental flood basalt provinces: geological constraints on the processes and products of flood volcanism. *Lithos* 79: 385 – 405.

JERRAM, D.A.; SINGLE, R.T.; HOBBS, R.W. & NELSON, C.E. (2009). Understanding the offshore flood basalt sequence using onshore volcanic facies analogues: an example from the Faroe–Shetland basin. *Geol.Mag.* 146 (3): 353–367.

MINCATO, R.L., 2000. Metalogenia dos elementos do grupo da platina com base na estratigrafia e geoquímica da Província Ígnea Continental do Paraná, PhD Tesis, UNICAMP, 172 p.

JERRAM, D. Y BRYAN, S. (2018) Plumbing systems of shallow level intrusive complexes. En Rocchi, S y Breikreuz, C (Eds.) *Physical geology of shallow magmatic systems: Dykes, sills and laccoliths (Advances in Volcanology)*. Springer, Switzerland, pp. 39-60.

KJARSGAARD, B. Y PETERSON, T.D. (1991) Nephelinite-carbonatite liquid immiscibility at Shombole volcano, East Africa: Petrographic and experimental evidence. *Mineralogy and Petrology.* 43. 293-314.

LAGORIO, S.L.; VIZÁN, H.; GEUNA, S.E. (2016a). Cap. 1: Introduction, En: *Early Cretaceous Volcanism in Central and Eastern Argentina During Gondwana Break-Up*. Springer Briefs in Earth System Sciences. Springer., pp. 1-5.

LAMUR, A.; LAVALLÉE, Y.; IDDON, F.E.; HORNBY, A. J.; KENDRICK, J.E.; VON AULOCK F. W.; WADSWORTH, F.B. (2018) Disclosing the temperature of columnar jointing in lavas. *Nature Communications.* 7 pp.

MCKENZIE, D. Y O'NIONS, R. K. (1995) The Source Regions of Ocean Island Basalts, *Journal of Petrology*, Volume 36, Issue 1, February 1995, Pages 133–159.

Pearce, J.A. (2008) Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust. *Lithos* 100, pp. 14–48.

MORBIDELLI, L.; GOMES, C.B.; BECCALUVA, L.; BROTZU, P.; CONTE, A.M.; RUBERTI, E. & TRAVERSA, G. (1995). Mineralogical, petrological and geochemical aspects of alkaline and alkaline-carbonatite associations from Brazil. *E.S.Reviews* 39:135-168.

MUZIO, R.; SCAGLIA, F. & MASQUELIN, H. (2011). Petrochemistry of Mesozoic mafic intrusions related to the Paraná Magmatic Province, Uruguay. *Int.Geol.Review*, 1-17.

MUZIO, R.; SCAGLIA, F. & MASQUELIN, H. (2013). Titaniferous magnetite and barite from the San Gregorio de Polanco dike swarm, Paraná Magmatic Province, Uruguay. *E.Sc.Res.Journal* Vol. 17(2):151–158.

MUZIO, R.; OLIVERA, L.; PEEL, E. & FORT, S. Geochemical features of alkaline volcanism in the southern extreme of Paraná Basin, NW Uruguay. *Goldschmidt Conference*, 2019.

OLIVERA ICHAZO, L.; MUZIO, R.; FORT, S.; PEEL, E.; MORALES, E. *Petrografia do vulcanismo alcalino do NW de Uruguai*, 49º Congresso Brasileiro de Geologia, 2018.

OLIVERA, L.; MUZIO, R.; FORT, S. & PEEL, E., 2019. Rasgos petrológicos del magmatismo alcalino del depto. de Salto.

Resumen Extenso, IX Congreso Uruguayo de Geología.

PEATE, D.W. (1997). The Paraná – Etendeka Province. En: Mahoney, J.J. & Coffin, M.F. (Eds.), Large Igneous Provinces, Continental, oceanic and planetary flood volcanism.

Geoph.Monograph 100:217–245.

PILET, S. (2015) Generation of low-silica alkaline lavas: Petrological constraints, models, and thermal implications. 514. 281-304. 10.1130/2015.251417.

PIRSSON, L.V. (1986) On the monchiquites or analcite group of igneous rocks. *J Geol* 4:679-690 pp.

PRECIOZZI, F.; SPOTURNO, J.; HEINZEN, W. & ROSSI, P. (1985). Memoria explicativa de la Carta Geológica del Uruguay escala 1:500.000. DINAMIGE, 72p.

RICCOMINI, C.; VELÁZQUEZ, V & GOMES, C.B: (2005). Tectonic controls of Mesozoic and Cenozoic alkaline magmatism in central south-eastern Brazilian platform. In:

GOMES, C. & COMIN-CHIARAMONTI, P (Eds.), EDUSP, 31-56.

ROEDDER, E. (1979) Silicate liquid immiscibility in magmas. *The Evolution of the Igneous Rocks, Fiftieth Anniversary Perspectives* (Yoder, H. S., ed.), 1557, Princeton Univ. Press.

ROSSELLO, E.A.; DE SANTA ANA, H. & VEROSLAVSKY, G. 2000. El lineamiento Santa Lucía – Aiguá – Merín (Uruguay): un corredor extensivo y transcurrente dextral

precursor de la apertura atlántica. *R.B. de Geociencias*, 30(4):749–756.

RUBERTI, E.; ENRICH, G.E.R.; AZZONE, R.G.; COMIN-CHIARAMONTI, P.; DE MIN, A.; GOMES, C. B. (2012) The Banhadão alkaline complex, southeastern Brazil: source and evolution of potassic SiO₂-undersaturated high-Ca and low-Ca magmatic series. *Mineral. Petrol.* 104 (1-2), 63–80. <https://doi.org/10.1007/s00710-011-0171-9>

SANTOS, R.V.; DANTAS, E.; OLIVEIRA, C.G.; ALVARENGA, C.J.; WENSE DOS ANJOS, C.; GUIMARAES, E.M. & BEDRAN OLIVEIRA, F. (2009). Geochemical and thermal

effects of a basic sill on black shales and limestones of the Permian Irati Formation. *J.S.A.E.Sciences* 28(1):14 - 24.

SELF, S.; THORDARSON, T. & KESZTHELYI, L. (1998). Emplacement of continental flood basalts flows. In: MAHONEY JJ, COFFIN M (EDS), *Am.Geophys.Union Monographs*, 100:381–410.

SOTO, M. (2014). Geología, geofísica y geoquímica de la región de Pepe Núñez, Cuenca Norte (Uruguay), Trabajo Final de Grado, Facultad de Ciencias.

SPRY, A. (1962) The origin of columnar jointing, particularly in basalt flows. *Aust J Earth Science* 8: pp. 191–216.

TURNER, S., REGELUS, M., KELLEY, S., HAWKESWORTH, C.J. & MANTOVANI, M.S.M. (1994). Magmatism and continental break-up in the South Atlantic: high precision

⁴⁰Ar-³⁹Ar geochronology. *E.P.Sc.Letters* 121:333-348.

ULBRICH, H.G.J., Y C.B. GOMES, (1981). Alkaline rocks from continental Brazil, *E.Sci.Rev.* 17:131-154.

VELÁZQUEZ, V.F.; COMIN-CHIARAMONTI, P.; CUNDARI, A.; GOMES, C.B.; RICCOMINI, C. (2006) Cretaceous Na⁺Alkaline Magmatism from the Misiones Province (Paraguay): Its Relationships with the Paleocene Na⁺Alkaline Analog from Asunción and Geodynamic Significance. *The Journal of Geology*, Vol. 114, No. 5 (September 2006), pp. 593-614.

WADSWORTH, F.B. (2018) Disclosing the temperature of columnar jointing in lavas. *Nature Communications*. 7 pp.

WAICHEL, B.L., LIMA, E.F., SOMMER, C.A., LUBACHESKY, R., 2007. Peperite formed by lava flows over sediments: An example from the central Parana´ Continental Flood

Basalts, Brazil. *J. V.G.Research* 159:343–354.

WAICHEL, B.L.; SCHERER, C.M. & FRANK, H.T. (2008). Basaltic lava flows covering active aeolian dunes in the Paraná Basin in southern Brazil: Features and emplacement

aspects. *J.V.G. Research* 171:59–72.

WAICHEL, B.L.; TRATZ, E.B.; PIETROBELLI, G.; JERRAM, D.A.; CALIXTO, G.R.; BACHA, R.R.; TOMAZZOLLI, E.R. & DA SILVA, W. (2013). Lava tubes from the

Paraná-Etendeka Continental Flood Basalt Province: Morphology and importance to emplacement models. *J.S.A.E.Sciences* 48:255–261.

WALTHER, K. (1911). Über Permotriassische sandsteine und eruptivdecken aus der norden der Republik Uruguay. *Neues Jahrb.Mineral.Geol.Paläont.* 31: 575 – 609.

WALTHER, K. (1927). Contribución al conocimiento de las rocas “basálticas” de la formación Gondwana en la América del Sud. *Bol.* 9, IGU, 16-28.

Licenciamiento

Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional. (CC BY-NC-SA)

