

INTERPRETACIÓN AEROMAGNÉTICA, CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y PETROGRÁFICA DE DIQUES MÁFICOS EN EL ESTE DEL DEPARTAMENTO DE CERRO LARGO, URUGUAY.

AEROMAGNETIC INTERPRETATION, GEOLOGIC AND PETROGRAPHIC CHARACTERIZATION OF MAFIC DYKES TO THE EAST OF CERRO LARGO DEPARTMENT, URUGUAY.

INTERPRETAÇÃO AEROMAGNÉTICA, CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA E PETROGRÁFICA DOS DIQUES MÁFICOS À LESTE DO DEPARTAMENTO DE CERRO LARGO, URUGUAI.

Scaglia, F.⁽¹⁾; Aïfa, T.⁽³⁾; Viera, B.⁽¹⁾; Masquelin, H.⁽²⁾; Muzio, M.⁽²⁾; Peel, E.⁽²⁾; Paris, A.⁽²⁾

¹ Programa de Desarrollo de las Ciencias Básicas, MEC-Universidad de la República, Iguá 4225, CP 11400, Montevideo, Uruguay. E-mail: scagliageo@gmail.com

² Instituto de Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias, Universidad de la República, Iguá 4225, CP 11400, Montevideo, Uruguay.

³ Université de Rennes 1, Géosciences Rennes - CNRS UMR6118, Bat.15, Campus de Beaulieu, CP 35042, Rennes, Francia.

Editores: Dr. César Goso

revista@sociedadgeologiauy.org

PEDECIBA Isidoro de María 1614, piso 6 - Uruguay Tel: 2929 0318-int. 1612/1613

www.sociedadgeologiauy.org

RESUMEN

Nuevos diques máficos, localizados al este de la ciudad de Melo, fueron identificados y delimitados, mediante el reprocesamiento e interpretación de datos magnéticos (especialmente reducción a polo total) y se llevaron a cabo los primeros estudios petrográficos. Estos diques (al menos los dos principales y de mayor tamaño) intruyen en el basamento cristalino precámbrico y en la secuencia permo-carbonífera del Grupo Cerro Largo, con segmentos expuestos y otros en parte subaflorantes. Las direcciones de estos diques son N 100° - N 115° (NO-SE), con inflexión hacia el noreste según las direcciones N65°E y N75°E, siendo paralelos a subparalelos entre sí. Presentan ancho de hasta 20 metros, longitudes de hasta 50 kilómetros y localmente presentan bifurcación. El análisis de los datos magnéticos permitió definir tres *trends* estructurales dominantes (NO-SE; E-O; NE-SO), similares a la dirección de los diques, indicando un control de emplazamiento por estructuras previas del basamento cristalino según dos direcciones principales (N100° y N75°E), y localmente N20°E. Los diques son microgabros que presentan textura glomeroporfírica a porfírica, estando compuestos por plagioclasas cálcicas (labradorita/andesina), clinopiroxenos (augita y pigeonita), óxidos de Fe-Ti (minerales portadores del magnetismo), relictos de olivino y vidrio (en zonas

de borde). A su vez, la casi ausencia de titanomagnetitas con formas esqueléticas, en conjunto con los aspectos de las demás fases minerales presentes, indicarían un emplazamiento magmático no muy rápido y/o bajas tasas de enfriamiento. La integración de la interpretación geofísica, datos de campo y petrográficos permitió establecer que estos diques son la continuación del enjambre de diques presentes al oeste de Melo y que probablemente, continúan en territorio brasileño; abarcando una escala regional. En base a esta continuidad, se les asigna una edad tentativa Mesozoica y parte de la Provincia Magmática Paraná-Etendeka.

Palabras clave: diques máficos, Magmatismo mesozoico, Provincia Magmática Paraná-Etendeka, Uruguay.

ABSTRACT

New mafic dykes located to the East of Melo city have been identified and marked off by reprocessing and interpretation of magnetic and the first petrographic data. These dykes intrude the Precambrian crystalline basement and the Permo-Carboniferous sequence of the Cerro Largo Group, showing exposed segments and, sometimes partly inferred outcrops. The structural *trends* of these dykes are N 100 ° - N 115 ° (NW-SE), with an inflection towards the northeast according to the directions N 100 ° - N 115 ° (NW-SE), being parallel to sub-parallel to each other. They present up to 20 meters of thickness, lengths of up to 50 kilometers and, locally they present bifurcation. The analysis of the magnetic data allowed to define three dominant structural *trends* (NW-SE; EW; NE-SW), similar to the dykes direction, indicating an emplacement controlled by previous structures of the crystalline basement, according to two main directions (N100 ° and N75 ° E), and locally N20°E. The dykes are microgabbros that have porphyritic to glomeroporphyritic textures, and are composed of plagioclase (labradorite / andesine), clinopyroxenes (augite and pigeonite), Fe-Ti oxides (magnetism carrier minerals), relicts of olivine and glass. On the other hand, the little abundance of skeletal shapes titanomagnetites, added to other petrographic aspects of the mineral phases present, would indicate a slow emplacement and / or low cooling rates. The integration of field data, geophysical and petrographic interpretation allows to establish that these dykes are the extension of the dyke swarm present to the west of Melo and that they probably continue in Brazilian territory; spanning a regional scale. Based on this continuity, they are assigned a tentative Mesozoic age and as members of the Magmatic Paraná-Etendeka Province..

Keywords: mafic dykes, Mesozoic magmatism, Paraná-Etendeka Magmatic Province, Uruguay.

RESUMO

Novos diques máficos localizados à leste da cidade de Melo foram identificados e delimitados através do reprocessamento e interpretação de dados magnéticos e petrográficos. Estes diques intruem o embasamento cristalino precambriano e a sequência permo-carbonífera do Grupo Cerro Largo, apresentando segmentos contínuos aflorantes às vezes parcialmente inferidos. Os diques são paralelos a sub-paralelos entre si, com orientação estrutural N 100 ° - N 115 ° (NW-SE), e com uma inflexão para NE segundo as direções N 100 ° - N 115 ° (NW-SE). Apresentam até 20 metros de largo e 50 quilômetros de comprimento, e localmente são frequentes as bifurcações. A análise dos dados magnéticos disponíveis para a área do estudo permitiu definir três tendências estruturais dominantes (NW-SE; EW; NE-SW), apontando um emplazamento controlado por estruturas pre-existentes do embasamento cristalino segundo duas direções principais N100 ° and N75 ° E, e subordinadamente N20 ° E. Os microgabros apresentam textura glomeroporfírica a porfírica, e estão mineralógicamente compostos por plagioclásio (labradorita/andesina), clinopiroxênio (augita e pigeonita), óxidos de Fe-Ti (minerais portadores do magnetismo), relictos de olivino e vidro. A baixa presença de titanomagnetitas com geometria esquelética adicionada a outras feições petrográficas presentes na mineralogia dos diques, estaria indicando condições de emplazamento lentas e/ou baixas taxas de resfriamento. A integração de dados de campo, e a interpretação de dados geofísicos e petrográficos permitem estabelecer que estes diques máficos são uma extensão do enxame de diques presentes a oeste da cidade de Melo e, provavelmente, eles têm continuidade no território brasileiro. com base na extensão e continuidade dos diques estudados, eles são atribuídos a uma idade tentativa mesozóica e como integrantes da Província Magmática Paraná-Etendeka.

Palavras-chave: diques máficos, Magmatismo Mesozoico, Província Magmática Paraná-Etendeka, Uruguai.

INTRODUCCIÓN

La Provincia Magmática Paraná - Etendeka (PMP-E; Peate, 1997), es la segunda mayor provincia ígnea continental a escala global. Preserva un volumen basáltico de al menos $1 \times 10^6 \text{ km}^3$, un espesor máximo de 1,7 km (Almeida, 1986) y un área de 917.000 km^2 en la Cuenca Paraná (Frank *et al.*, 2009; [Figura 1](#)). La génesis de la PMP-E está relacionada con la fragmentación continental del Gondwana occidental (Jurásico tardío - Cretácico inferior). Esta fragmentación precedió la apertura del Océano Atlántico sur y, por tanto, la separación de América del Sur y África (Piccirillo y Melfi, 1988). La edad del magmatismo bimodal de la provincia se concentra entre los 127-137 Ma, con una tasa de erupción estimada de $0,1 \text{ km}^3/\text{año}$ (Turner *et al.*, 1994; Florisbal *et al.*, 2017). La fase magmática principal estaría vinculada a la etapa pre-rift, desarrollada entre los 130-134 Ma, la cual estaría además asociada a la mayor tasa de erupción (Renne *et al.*, 1992; Peate, 1997; Thiede y Vasconcellos, 2010; Janasi *et al.*, 2011). La PMP-E comprende términos efusivos e intrusivos, los cuales agrupan a enjambres de diques, que son considerados como los conductos alimentadores de las grandes provincias magmáticas (Ernst, 2014).

Este trabajo está enfocado particularmente al estudio de las rocas intrusivas, situadas en la porción este de Uruguay, y complementa el conocimiento de otros cuerpos intrusivos máficos conocidos de las porciones periféricas de la Cuenca Paraná (Piccirillo y Melfi, 1988). La distribución de los cuerpos intrusivos (filones capas y diques) de la Provincia no es uniforme ([Figura 1](#)), estando los filones capa (*sills*) concentrados principalmente en: (i) la región norte (Estado de Goiás), (ii) la región central (Estados de San Pablo y Paraná), con un espesor total mayor a 1 km, (iii) el Estado de Rio Grande del Sur (Piccirillo y Melfi, 1988) y (iv) Uruguay (Preciozzi *et al.* 1985). Por su parte, los principales enjambres de diques máficos (generalmente asociados a los *sills*) son: Serra do Mar (Valente *et al.* 2007), Ponta Grossa (Renne *et al.* 1996; Almeida *et al.* 2018), Florianópolis (Tomazzoli y Pellerin, 2008; Marques *et al.* 2018), Paraguay (Druecker y Gay, 1987; Comin-Chiaramonti *et al.* 2007), Río Grande del Sur (Sarmiento *et al.* 2017) y centro-noreste de Uruguay (Preciozzi *et al.* 1985; Scaglia, 2010, 2013; Muzio *et al.* 2017; Scaglia *et al.* 2019). En la porción africana (Etendeka) los principales diques se encuentran en el borde oeste de Namibia y Angola (Thompson *et al.*, 2001; Masse y Laurent, 2016; Scaglia *et al.*, 2021). Este trabajo tiene como objetivo general continuar con el estudio sistemático del magmatismo mesozoico en Uruguay, presentando información detallada sobre los cuerpos intrusivos básicos localizados hacia el este de la ciudad de Melo, Departamento de Cerro Largo.

El área de interés del presente trabajo profundiza y complementa el trabajo realizado por Nuñez *et al.* (2020), con énfasis en los diques localizados al este de la ciudad de Melo, a partir de la reinterpretación de datos magnetométricos disponibles en el área seleccionada, el procesamiento de imágenes remotas, actividades de campo y muestreos en áreas clave.

Para lograrlo, se llevó a cabo un estudio integrado desde reprocesamiento e interpretación de datos aeromagnéticos, actividades de campo y laboratorio, con el fin específico de establecer su distribución y extensión superficial con detalle. Además de la primera caracterización de sus principales rasgos petrográficos y estructurales, así como su relación con los demás diques máficos del centro-norte de Uruguay (para los cuales no hay datos geofísicos disponibles) y sur de Brasil.

CONTEXTO GEOLÓGICO

Los derrames e intrusivos asociados a la PMP-E ([Figura 1](#)), en América del Sur, están espacialmente relacionados con la cuenca intracratónica Paraná y Chaco-Paraná, ubicadas en el sector centro - este del continente con una dirección general NE controlada por una mayor subsidencia del basamento cristalino (Fulfaro *et al.* 1982). La Provincia Magmática Paraná (PMP) abarca la región meridional de Brasil, la mesopotamia argentina, la región oriental de Paraguay y el centro-norte del Uruguay (Northfleet *et al.* 1969; Melfi *et al.* 1988). La cobertura volcánica está representada principalmente por basaltos toleíticos (más del 90%) y cuerpos intrusivos relacionados (Piccirillo *et al.* 1988) comprendidos bajo la Formación Serra Geral en Brasil (White, 1908); Paraguay (Comin-Chiaramonti *et al.* 2007) y Argentina (Aceñolaza, 2007; Lagorio *et al.* 2016). El magmatismo de carácter alcalino también está presente, aunque en baja proporción y, en forma restricta, en la periferia de la Cuenca Paraná (Peate, 1997; Comin-Chiaramonti *et al.* 2007). Este último se ha desarrollado en forma precedente, contemporánea y posterior al evento magmático toleítico principal presente en la Provincia (Gomes *et al.* 2013; Lagorio *et al.* 2016).

En Uruguay, los equivalentes volcánicos corresponden a la Formación Arapey (Bossi, 1966), mientras que los cuerpos intrusivos relacionados fueron agrupados en la Formación Cuaró (Preciozzi *et al.* 1985). En este trabajo será empleada la terminología de Formación Arapey e intrusivos asociados (Scaglia y Muzio; 2018,

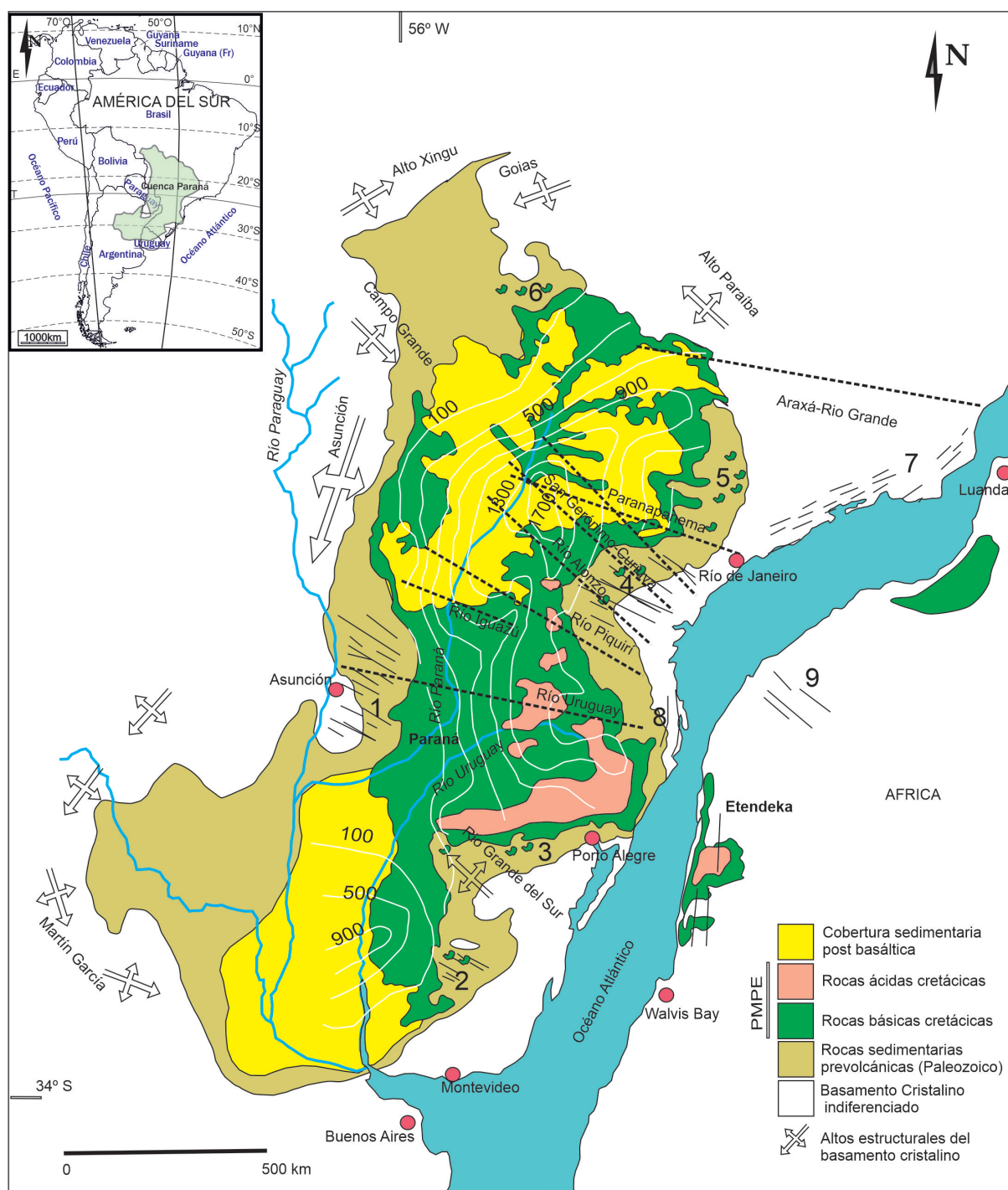


FIGURA 1. Reconstrucción del Gondwana Pre-rift mostrando la extensión de la PMP-E; los principales lineamientos estructurales de la Cuenca Paraná (líneas punteadas); isopacas de las lavas básicas (líneas blancas continuas) y el Rift proto-Atlántico. Los números hacen referencia a los cuerpos intrusivos de la PMP-E, siendo: 1) Diques del Este de Paraguay; 2) Diques y sills de Uruguay; 3) Sills de Rio Grande del Sur; 4) Diques y sills de Ponta Grossa; 5) Sills del Estado de San Pablo; 6) Sills del Estado de Goiás; 7) Diques de Rio de Janeiro; 8) Diques de Florianópolis; 9) Diques de Namibia y Angola. Mapa elaborado a partir de Piccirillo y Melfi (1988), Peate (1997), Renner (2010) y Scaglia (2013).

FIGURE 1. Reconstruction of the Gondwana Pre-rift showing the extent of the PMP-E; the main structural lineaments of the Paraná Basin (dotted lines); Isopachs of the basic lavas (solid white lines) and the proto-Atlantic Rift. The numbers refer to the intrusive bodies of the PMP-E, being: 1) Dykes of the East of Paraguay; 2) Dykes and sills of Uruguay; 3) Sills of Rio Grande do Sul; 4) Ponta Grossa dykes and sills; 5) Sills of the State of San Pablo; 6) Sills of the State of Goiás; 7) Dykes of Rio de Janeiro; 8) Florianópolis Dykes; 9) Dykes from of Namibia and Angola. Map after Piccirillo and Melfi (1988), Peate (1997), Renner (2010) and Scaglia (2013).

2019), considerando la relación existente entre los derrames basálticos, diques y *sills* desde el punto de vista petrológico y cronoestratigráfico (Hart, 1966; Feraud *et al.* 1999; Muzio *et al.* 2017) y siguiendo los criterios establecidos por Barragán *et al.* (2010). La Formación Arapey ocupa un área de aproximadamente 41.500 km² (Preciozzi *et al.* 1985; Muzio, 2004), estando conformada por rocas ígneas de composición basalto-andesítica, de naturaleza química subalcalina, de bajo Ti (menor al 2% TiO₂) e improntas geoquímicas correspondiente al magma tipo “Gramado” (Peate, 1992; Scaglia, 2010; Scaglia, 2013; Muzio *et al.*, 2011; Muzio *et al.*, 2017). Sin embargo, Turner *et al.* (1999) señalan la presencia de derrames basálticos e intrusivos máficos asociados con un alto contenido de TiO₂ (mayor al 2% en peso), a partir de estudios litoquímicos en perforaciones. Estos valores se corresponden con el magma tipo “Paranapanema”, situado entre los 300 y 700 metros de profundidad.

Desde el punto de vista estratigráfico, los derrames basálticos de la Formación Arapey, se apoyan e interdigitan de manera concordante sobre las areniscas fluviales y eólicas de la Formación Tacuarembó (Bossi, 1966; Formación Botucatú según White, 1908) y de forma discordante sobre las secuencias Devónicas a Pérmicas, siendo sus actuales límites de tipo erosivo y/o altos estructurales (de Santa Ana *et al.*, 2006).

En el extremo sur de la Cuenca Paraná (Cuenca Norte en Uruguay; Ucha y De Santa Ana, 1994), los cuerpos intrusivos básicos mesozoicos aflorantes (diques y *sills*) se localizan principalmente en el borde noreste de la misma ([Figura 2](#)), aunque fueron reconocidos afloramientos puntuales de diques en el extremo noroeste (Departamento de Artigas; Oyhantçabal y Piñeiro, 2007). Las principales áreas de exposición de estos cuerpos intrusivos básicos corresponden a las regiones de: San Gregorio de Polanco, representados por un enjambre de diques cuyas dimensiones alcanzan los 80 km de longitud y hasta 20 m de ancho (Masquelin *et al.* 2009; Scaglia *et al.* 2009, 2010; Scaglia y Muzio, 2019); y la región comprendida entre las ciudades de Tacuarembó – Melo, a lo largo de la Ruta Nacional N° 26, que integran los *sills* de Los Novillos, Ansina, Cuaró, Turupí, Cerro Pereira, Ramón Trigo, Fraile Muerto, Caraguatá y sus diques asociados (Preciozzi *et al.*, 1985; Bossi y Schipilov, 2007; Muzio *et al.*, 2017). Los detalles en relación con su distribución, petrología y estructuras se encuentran reseñados en Bossi y Schipilov (1998; 2007); Scaglia (2010), Scaglia (2013), y Muzio *et al.* (2017). En términos generales, estos gabros son de grano fino a medio, de colores grises a negro oscuros, con textura glomeroporfítica a porfirítica y con matriz ofítica a subofítica. Los fenocristales pueden alcanzar tamaños de

5 mm y están compuestos por plagioclasas cálcicas (labradorita An_{50-70} y andesina An_{30-50}), clinopiroxenos cálcicos (augita) y subcálcicos (pigeonita) de manera subordinada, característicos del magmatismo toleítico. Otros minerales presentes en la matriz, además de los mencionados, incluyen óxidos de Fe-Ti (titanomagnetitas pobres en Ti; Muzio *et al.* 2013; o incluso maghemita; Masquelin *et al.*, 2009), relictos de olivino (fayalita), trazas de apatito y presencia ocasional de vidrio en sectores restringidos, especialmente hacia los bordes de los diques en contacto con las rocas caja (Scaglia *et al.* 2010). Desde el punto de vista geoquímico, y considerando las variaciones texturales y mineralógicas, estas rocas se clasifican como basalto-andesitas, de naturaleza química toleítica, con bajo contenido de titanio (menor al 2% TiO_2), correspondientes al magma tipo “Gramado” al igual que la Formación Arapey. Los datos químicos les atribuyen un ambiente tectónico de intraplaca, con evidencias de procesos de fraccionamiento y asimilación cortical (Scaglia, 2010; Muzio *et al.* 2011; Scaglia, 2013; Muzio *et al.* 2017).

Hasta el presente, todos los relevamientos de los cuerpos intrusivos máficos fueron realizados en el área intracuenca, es decir al oeste y alrededores de la ciudad de Melo (departamento de Cerro Largo), sin tener registros de cuerpos intrusivos máficos al este de esta localidad hasta el límite político con Brasil.

Recientemente, Nuñez *et al.* (2020), utilizando datos geofísicos aeroportados, realizan una demarcación general a gran escala de los diques para toda el área aflorante del escudo cristalino uruguayo al sur del Río Negro, incluyendo también el área del presente trabajo. Sin embargo, los objetivos y resultados del trabajo se concentran en aquellos diques ubicados al sur y sureste del país y vinculados a la tectónica de las cuencas tipo rift de Santa Lucía- Aiguá-Laguna Merín (SaLAM; Rossello *et al.* 2007).

El área de estudio se encuentra ubicada en el sector noreste de Uruguay (Figura 2), en el departamento de Cerro Largo (Hoja-38 Melo del Servicio Geográfico Militar), específicamente al este de la ciudad de Melo hasta el límite político con Brasil ($32^{\circ}17'01''S$ - $32^{\circ}26'43''S$ y $54^{\circ}10'34''$ - $53^{\circ}38'58''O$), cubriendo un área aproximada de 730 km². Los rasgos geomorfológicos del área están comprendidos principalmente en la Cuenca Sedimentaria del Noreste y Sierras del Este (Panario, 1988), con cotas entre 100 a 300 m, y mayormente cubierto por vegetación, lo que fundamenta la importancia del empleo de métodos indirectos para la identificación de las diferentes unidades geológicas y de los rasgos estructurales del área.

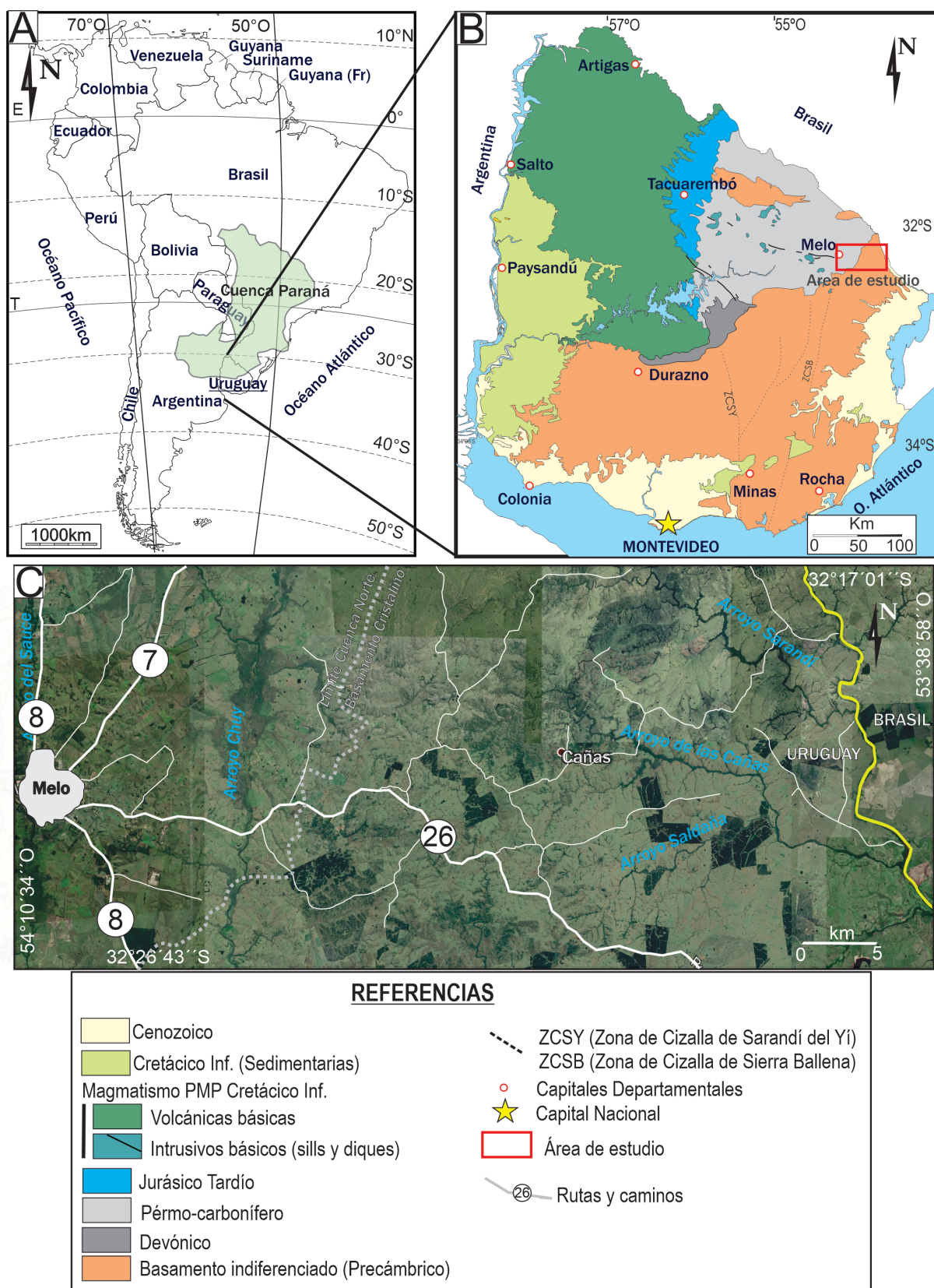


FIGURA 2. A) Ubicación de la Provincia Magmática Paraná (Modificado de Peate, 1997); B) Mapa geológico de Uruguay simplificado (modificado de Masquelin et al., 2009); C) Área de estudio.

FIGURE 2. (A) Location of the Magmatic Province of Paraná (Modified from Peate, 1997); B) Simplified geological map of Uruguay (modified from Masquelin et al., 2009); C) Study area.

En el sector occidental, dentro del área de estudio, aflora la secuencia Carbonífera-Pérmica del Grupo Cerro Largo (Goso, 1995); mientras que en la parte oriental está expuesto el basamento cristalino, compuesto principalmente por granitos calcoalcalinos sintectónicos, granitos indiferenciados y migmatitas (Preciozzi *et al.* 1985), cuyas edades varían entre los 630 -570 Ma (Masquelin *et al.*, 2017; Peel *et al.*, 2018); además de riolitas correspondientes a la Formación Sierra de Ríos (Elizalde *et al.* 1970).

METODOLOGÍA

1. Datos Geofísicos e imágenes:

Los datos geofísicos, y en especial los datos magnetométricos, son muy útiles para el reconocimiento, delimitación y continuidad de rocas ígneas máficas, en áreas extensas y con pocos afloramientos a causa de la cobertura vegetal y/o sedimentaria. Esto es debido a que la mayoría de las rocas de la corteza poseen baja susceptibilidad mientras que los basaltos, doleritas y gabros, son usualmente muy magnéticas, alcanzando valores entre 0,01 - 0,15 SI (Moon *et al.* 2006). El intemperismo puede disminuir los valores de susceptibilidad magnética de las rocas, debido a la oxidación de la magnetita (principal mineral magnético) a hematita (Milsom, 2003).

En el presente estudio fueron reprocesados los datos aeromagnetométricos de alta resolución de la Hoja 38 Melo (escala 1:100.000), de libre acceso, de la Dirección Nacional de Minería y Geología (DINAMIGE). La información geofísica de base utilizada fue obtenida por la empresa *Sander Geophysics Limited* (SGL, Ottawa) por requerimiento de DINAMIGE, cubriendo solamente las áreas del escudo cristalino aflorante de Uruguay (Sánchez Bettucci *et al.* 2016). La campaña consistió de 196 vuelos llevados a cabo entre setiembre del 2014 y marzo del 2015 (Bates *et al.*, 2016) obteniéndose, por un lado, datos de anomalías magnéticas y por otro lado datos radiométricos, que proveen información en la variabilidad geológica local. Los parámetros obtenidos de los datos aéreos fueron los siguientes: 1) vuelos de baja altura, 100 m por encima de la altitud digital superficial, con dirección N130° para el hoja Melo H-38 ([Figura 3](#)); 2) velocidad de vuelo de 130 nudos (67 m/s); 3) líneas paralelas de vuelo espaciadas cada 400 m; y 4) parámetros de campo geomagnético usados para la reducción al polo (RPT): inclinación varía entre -36.4° y -41.8° y declinación varía entre -7.6° y -15.8° (*International Geomagnetic Reference Field, IGRF*).

Los datos radiométricos existentes para el área no poseen suficiente resolución espacial y/o definición para el objeto de estudio (diques), por lo que no fueron empleados en el presente trabajo.

La magnetometría, por su parte, registra perturbaciones en el campo magnético terrestre causado por rocas susceptibles magnéticamente. El hecho de que todas las rocas sean magnéticamente susceptibles (en diferentes grados) produce un mapa de variación magnética en superficie (Mapa de Intensidad Magnética Total, IMT) que permite interpretar la distribución litológica, en tres dimensiones, y sin ser afectada por la cubierta superficial.

La imagen de Intensidad Magnética Total ([Figura 3](#)) refleja anomalías en un grado que son asimétricas a los cuerpos que las causan, lo cual marca la importancia de la reducción al polo total mediante procesos de corrección matemática (Marjoribanks, 2010).

Los datos magnetométricos fueron reducidos a polo total (RPT), utilizando el software Oasis-Montaj 8.3.0® (Geosoft Inc.;2018). Esta conversión supone hipotéticamente que el campo magnético terrestre (relevado en latitudes medias a bajas) es perpendicular a la superficie (hecho que solo ocurre en los polos), por ende, las anomalías magnéticas deberían reflejar la simetría y estar sobre los cuerpos que la causan (Moon *et al.* 2006). La imagen obtenida es de alta resolución y definición ([Figura 4](#)), siendo una imagen de mayor confianza para la identificación de los cuerpos ígneos tabulares máficos (en complemento con imágenes satelitales y aéreas).

En el caso del estudio de los diques, no es raro que tengan magnetismo remanente asociado a la polaridad reversa. En consecuencia, es de suma importancia la verificación mediante el relevamiento en terreno, revisión de antecedentes y mapas geológicos, para ayudar a definir el origen de las improntas magnéticas en los diferentes sectores del área de estudio.

La textura magnética es el resultado de las diferencias en la abundancia de magnetita, por lo que los diques máficos, tienden a tener altas señales magnéticas y de rápido reconocimiento, en complemento con el patrón lineal característico (Moon *et al.* 2006).

Los vuelos aeromagnéticos realizados en el área de estudio en dirección N130°, recorrieron de manera casi perpendicular las principales direcciones estructurales presentes en la Carta Geológica del Uruguay de Preciozzi *et al.* (1985), logrando así una muy buena definición tanto de las estructuras correspondientes a los diques como de los grandes dominios litoestructurales y principales fallas regionales.

En este trabajo para la identificación de los diques, fue reprocesada la imagen IMT-RPT y sobrepuesta a imágenes satelitales de *Google Earth Pro* (2020), complementadas con ortofotos a color obtenidas por la campaña de vuelos realizados durante 2018-2019 en todo el territorio nacional, por la Sección de Infraestructura de Datos Espaciales (IDE), de libre acceso.

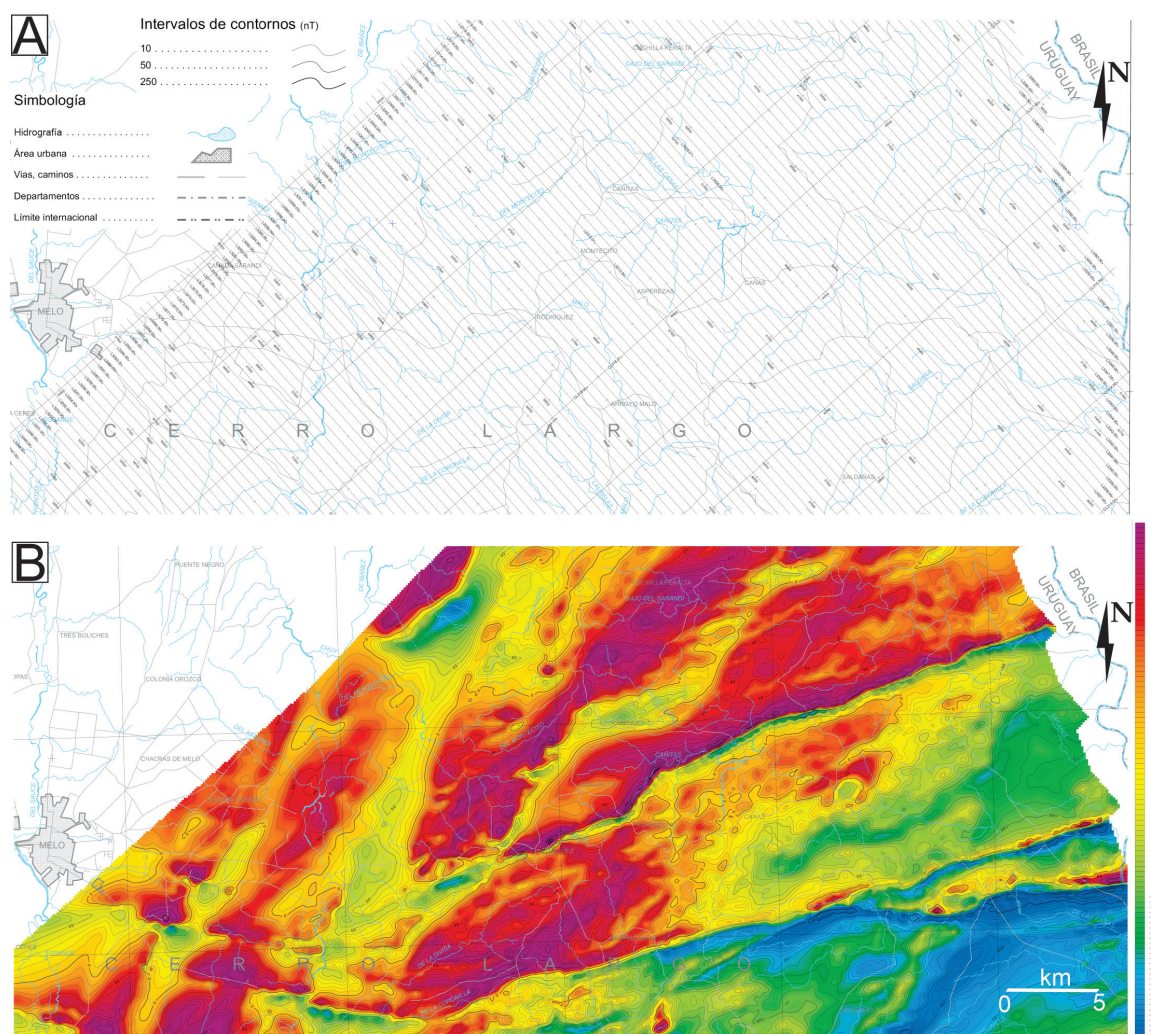


FIGURA 3. A) Líneas de vuelo y área relevada por magnetismo; B) Mapa de Intensidad Magnética Total (IMT). Fuente: DINAMIGE <http://visualizadorgeominero.dinamige.gub.uy/>. Referencias en imagen.

FIGURE 3. (A) Flight lines and magnetic survey area; B) Total Magnetic Intensity map (TMI). Source: DINAMIGE. References in image.

El procesamiento de mapas fue resuelto con uso de software CorelDraw (2020) y QGIS (GNU), con sistema de georreferencia WGS84.

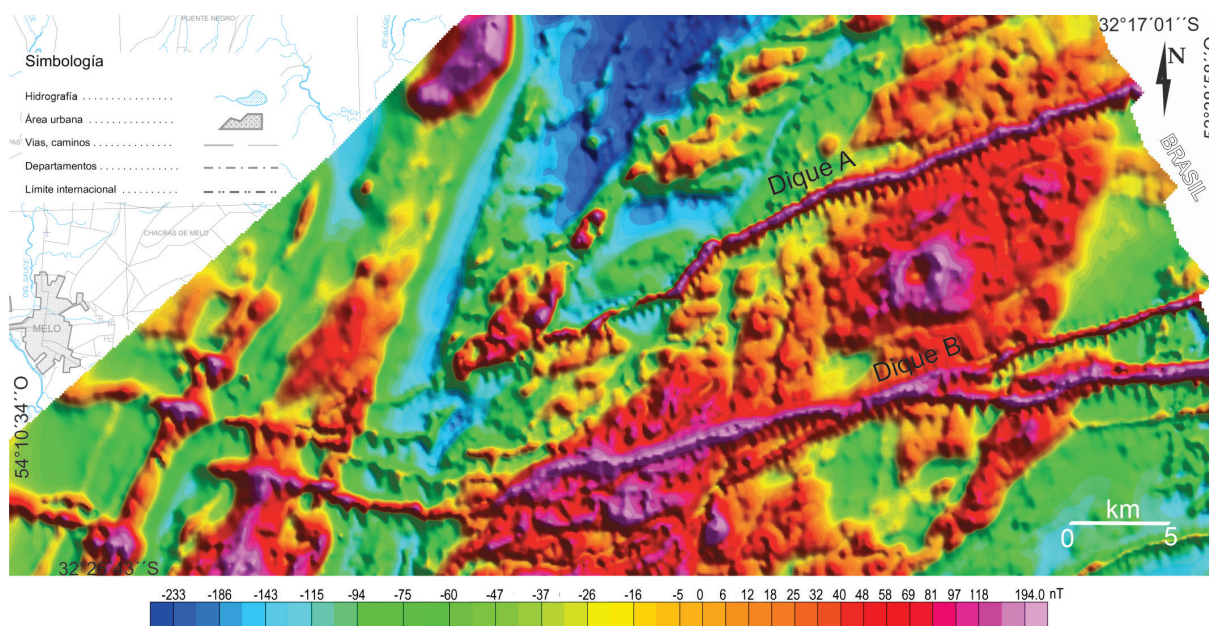


FIGURA 4. Imagen de intensidad magnética total reducida al polo (IMT-RPT), obtenida con software Oasis Montaj. Diques máficos generan una anomalía magnética positiva. Referencias en imagen.

FIGURE 4. Total magnetic intensity map reduced to the pole (TMI-RTP), processed by Oasis Montaj software. Mafic dykes generating positive magnetic anomaly. References in image.

2. Actividades de campo y petrografía

El procesamiento de las muestras y la confección de las secciones petrográficas delgadas se realizaron en el Laboratorio de Corte y Molienda del Instituto de Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias (UdelaR). Las descripciones petrográficas se realizaron utilizando un microscopio petrográfico Nikon-Eclipse 50iPoL con cámara fotográfica acoplada Nikon DS-Fi-1 (Facultad de Ciencias, UdelaR).

RESULTADOS

1. Interpretación de datos y mapas

El análisis e interpretación de las imágenes geofísicas reprocesadas, permiten identificar las estructuras predominantemente lineales, con altos valores de densidad de flujo magnético que varían desde 98 a 248 nT (Figura 4), y que se asocian de acuerdo a la literatura, a cuerpos tabulares máficos (Marjoribanks, 2010). Estas fuertes anomalías magnéticas se pueden atribuir a la ocurrencia superficial y subsuperficial de intrusivos ígneos ricos en minerales magnéticos. Cabe destacar que los análisis mineralógicos en otros cuerpos

intrusivos intracuenca, caracterizaron a los minerales magnéticos como magnetita y titanomagnetita pobre en Ti (Masquelin *et al.*, 2009; Muzio *et al.*, 2013), minerales de alta susceptibilidad magnética.

Los principales diques inferidos alcanzan dimensiones de 45 – 50 km de largo, subparalelos, con segmentos expuestos (relevados en terreno) y otros no aflorantes. Las principales anomalías magnéticas lineales permiten diferenciar dos “diques” (clasificación según Rickwood, 1990, en base al ancho y largo de cada segmento aflorante), denominados Dique A (DA) y Dique B (DB), representados en la [Figura 5](#).

Estos diques presentan direcciones N 100°- N 115° (NO-SE), hasta aproximadamente el paralelo 54°O, donde se produce una inflexión hacia el noreste: N65°E en el DA y N75°E en el DB ([Figura 5](#)), coincidiendo con los datos relevados en terreno ([Figura 6](#)).

Es de destacar que las zonas anómalas identificadas no necesariamente corresponden únicamente a un solo dique, sino que pueden abarcar varios diques muy próximos entre sí. Esto fue relevado en las actividades de campo en el punto (32°24'10.55"S; 53°48'34.93"O, [Figura 6](#)), donde la zona magnéticamente anómala del DB posee una dimensión aproximada de 250 m. Sin embargo, en el campo se identificaron, dentro de esa zona anómala, dos diques aflorantes de 10 m de ancho cada uno, no descartándose la presencia de más cuerpos subaflorantes ([Figura 5](#)). Los diques relevados poseen similares características estructurales, siendo paralelos entre sí. Por ende, la anomalía relevada sería la resultante de la sumatoria de las señales magnéticas individuales de los diques próximos. El DB, por su parte, también presenta bifurcación hacia el sector oriental por lo que la anomalía es mayor en el comienzo de la bifurcación como una sola, y luego ya comienza a definirse como dos separadas ([Figura 5](#)).

En ciertos segmentos de diques no aflorantes, se puede lograr una continuidad y verificación en base a antiguas canteras próximas y que se encuentran por fuera del área cubierta por la campaña geofísica. Tal es el caso, de las canteras próximas a Melo, relevadas por Ferrando y Andreis (1989), donde mapearon un dique de 2 km y con rumbo E-O ([Figura 6](#)). Esta contribución permite corroborar la continuidad geográfica del dique subaflorante interpretado en la imagen RTP localizado a tan solo 1 km de distancia de la cantera y de igual rumbo estructural ([Figura 5 y 6 E](#)).

Por su parte, los diques presentan patrones tipo *zig-zag*, principalmente en los segmentos del sector oriental (basamento cristalino), que responderían a dos conjuntos de elementos planares, $N65^{\circ} - N75^{\circ}$ (predominante) y $N20^{\circ} - N40^{\circ}$ como subordinado, relevados en las rocas caja en afloramientos dispersos (Figuras 5 y 6). Este patrón estructural no está expuesto en superficie cuando los diques intruyen en áreas sedimentarias debido a la ausencia de afloramientos, a excepción de canteras como es el caso de la mencionada (Ferrando & Andreis, 1989) donde se relevan direcciones $N100^{\circ}-110^{\circ}$ y $N50-65^{\circ}$.

Además de la identificación de los diques y sus principales características, las imágenes RTP permitieron interpretar estructuras, probablemente fallas, de dirección $N20^{\circ}E$ en toda el área de estudio, que dislocan las diferentes unidades del basamento cristalino (sin evidencias de afectar los diques). Entre estas se incluye la Zona de Cizalla de Sierra Ballena (Figura 1). Por otra parte, se observan anomalías circulares restrictas en el área de basamento cristalino (Figura 5) que, si bien requieren mayor estudio y análisis, no están en los objetivos de este trabajo

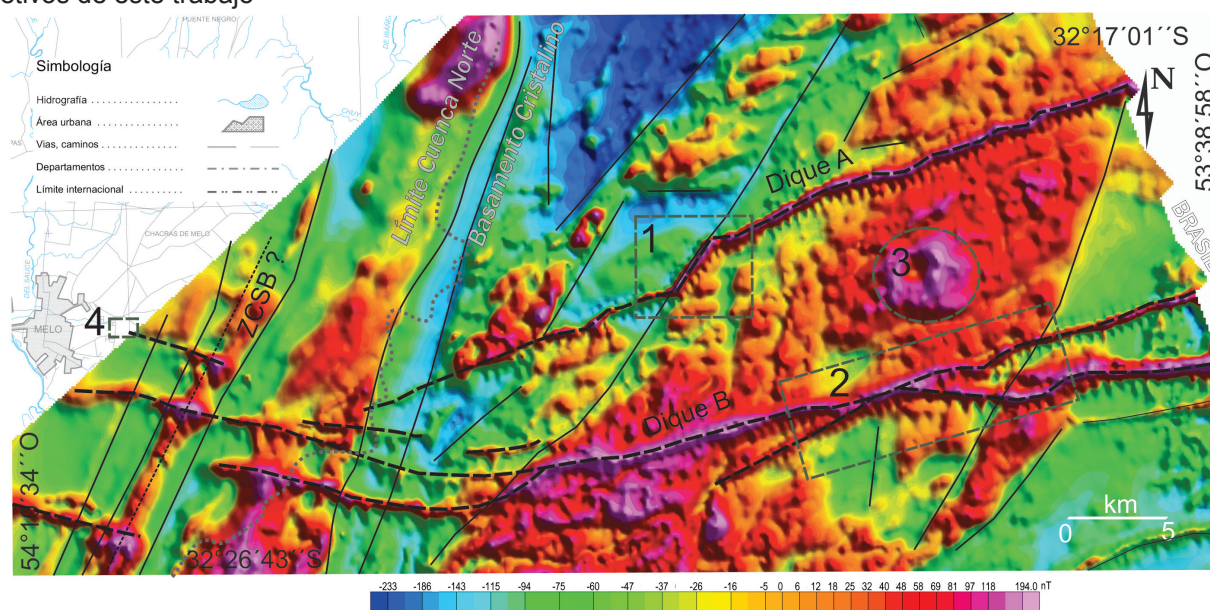


FIGURA 5. Interpretación estructural y diques máficos (anomalías magnéticas positivas) en el área al este de Melo, sobre imagen de campo magnético RPT. Referencias: diques (líneas discontinuas), estructuras (líneas continuas), y límite erosivo Cuenca Norte – Basamento Cristalino (líneas punteadas grises). 1- Patrón *zig-zag* y coincidencia con el plano de una megaestructura 2- Bifurcación de Dique B; 3- Zona circular de anomalía magnética interpretada como posible zona de intensa oxidación dentro de los granitos calcoalcalinos; 4) Área de diques relevada por Ferrando y Andreis (1989); Zona de Cizalla de Sierra Ballena (ZCSB) cubierta por rocas y sedimentos Fanerozoicos, inferida.

FIGURE 5. Structural interpretation and mafic dykes (positive magnetic anomaly) located in the East Melo area, superimposed on the TRP magnetic field image. References: dykes (dashed lines), structures (continuous lines), North Basin- Crystalline Basement erosive contact (grey dashed lines). 1- Zig-zag pattern and megastructure correlation; 2-Bifurcated dyke; 3- Circular magnetic anomaly zone interpreted as possible hydrothermal alteration in calc-alkaline granites; 4) Dykes area surveyed by Ferrando and Andreis (1989); Inferred Sierra Ballena Shear Zone (SBSZ) covered by Phanerozoic rocks and sediments.

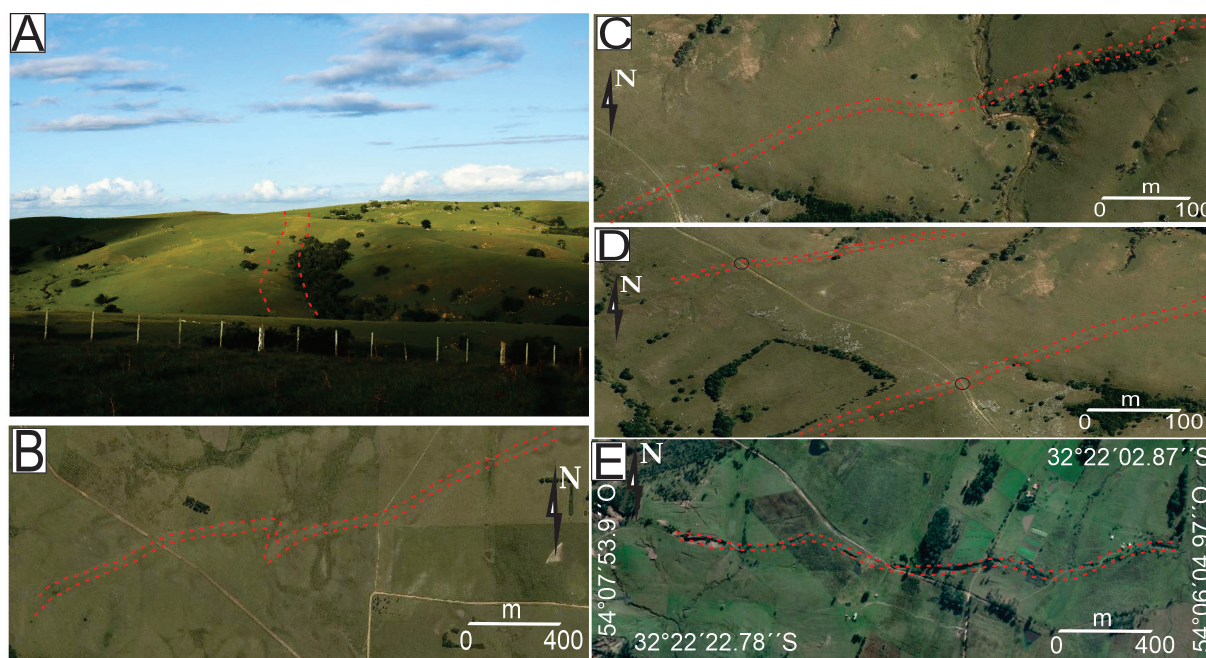


FIGURA 6. A) Afloramiento de un segmento del Dique B, vista hacia el oeste. Coordenadas geográficas punto (32°24'15.20"S; 53°48'29.30"O). B) Dique con cambio de dirección N-S. Punto 32°23'8.47"S, 53°45'26.34"O; C) Patrón zig-zag del dique B, 32°25'5.07"S, 53°50'22.91"O. D) Diques paralelos NE de una zona de elevada señal magnética, Punto Idem A; E) Canteras de microgabros relevadas por Ferrando y Andreis (1989) de rumbo este-oeste con característico patrón zig-zag, Coordenadas 32°22'17.62"S, 54°07'17.20"O.

FIGURE 6. A) Outcrops of dyke B segment, west side view. UTM coordinates (32°24'15.20"S; 53°48'29.30"W). B) Dyke B, with change of direction to N-S. 32°23'8.47"S, 53°45'26.34"W; C) Dyke B with zig-zag pattern 32°25'5.07"S, 53°50'22.91"W. D) N-E Parallel dykes comprised in a positive magnetic anomaly. Same coordinates as B.; E) Microgabbro quarries studied by Ferrando y Andreis (1989), with East-West direction and showing a characteristic zig-zag pattern. Coordinates 32°22'17.62"S, 54°07'17.20"W.

PETROGRAFÍA

Se describieron 10 láminas delgadas representativas de los diques máficos presentes en cinco áreas clave de la zona de trabajo, en muestras libres de alteración. Los diques son hipocristalinos y presentan una textura inequigranular glomeroporfírica a porfírica, con matriz afanítica. Los glomérulos (entre 5 %-8 % del volumen modal) están compuestos por fenocristales de plagioclasa (predominante) y clinopiroxeno. Estos cristales de plagioclasa son de composición variable entre An_{70-50} y An_{50-A30} ; son automorfos a subautomorfos, con maclas tipo Carlsbad simple, Carlsbad-Albita combinada (polisintética) y ocasionalmente de periclina (Figura 7). Los tamaños oscilan entre los 0.5 mm a 1 mm y se observa también zoneamiento composicional (Figura 7). Los cristales de plagioclasa más alargados y delgados (hasta 1 mm), presentan fracturas perpendiculares a su eje mayor, y alteración a sericita (Figura 7). En algunos fenocristales se observan inclusiones de clinopiroxenos, aunque en baja proporción. Los fenocristales de clinopiroxeno cálcico (augita), presentan formas automorfas a subautomorfas, con tamaños variables entre 0.2 a 0.5 mm y con macla simple que conforman glomérulos con las plagioclasas o simplemente se presentan como fenocristales aislados (Figura 7 y 8).

La matriz, por su parte, presenta textura ofítica a subofítica, con tamaño de cristales entre 50 y 100 μ y de similar composición que los fenocristales presentes. Los minerales opacos (titanomagnetitas) ocupan entre un 2 al 5 % del volumen total de la muestra. Están representados desde el punto de vista geométrico por una sola población de cristales automorfos, con secciones geométricas cuadradas a rectangulares y tamaños del entorno de las 100 μ . En forma subordinada, los minerales opacos presentan formas esqueléticas, pero en bajo porcentaje. En forma menos frecuente se observan relictos de olivina y presencia de vidrio.

Es de destacar, que en algunas muestras se observan estructuras de flujo, evidenciadas por la disposición y arreglo preferente de los cristales de plagioclasa (tanto fenocristales como plagioclasas de la matriz), marcando ocasionalmente algunos de los fenocristales una inflexión según la dirección del flujo ([Figura 7 y 8](#)).

DISCUSIÓN

El análisis e interpretación de los datos magnetométricos permitió identificar al menos dos diques principales (denominados Dique A y Dique B), cuyos datos estructurales y caracterización petrográfica podrían asignarse como la continuidad de los diques presentes al oeste de la ciudad de Melo, considerándose como enjambre de macrodiques (Rickwood, 1990).

Se constató una muy buena correlación entre la interpretación de diques en las imágenes RTP, con los diques relevados en terreno. Sin embargo, se evidencian variaciones en el grosor de las anomalías magnéticas, y dependen de que, si están asociadas a la presencia de un único dique, a la de varios diques paralelos y similares en espesor, o incluso a otros factores, tales como el efecto del intemperismo sobre los segmentos aflorantes. El intemperismo tiene como resultado la dispersión de los minerales magnéticos oxidados (probablemente maghemita) y por ende el halo de la anomalía magnética es mayor al espesor real del dique. La maghemita se forma por intemperismo u oxidación a baja temperatura de magnetita o magnetita pobre en Ti, es decir de los principales minerales magnéticos (Marjoribanks, 2010). Cabe destacar que se ha identificado maghemita en sus correlativos diques al este de Melo (Masquelin *et al.*, 2009). En este sentido, se están desarrollando ensayos de curvas termomagnéticas, en muestras representativas de diques al este de Melo, para precisar los minerales portadores del magnetismo y/o presencia de maghemita. A su vez, los regolitos con concentración

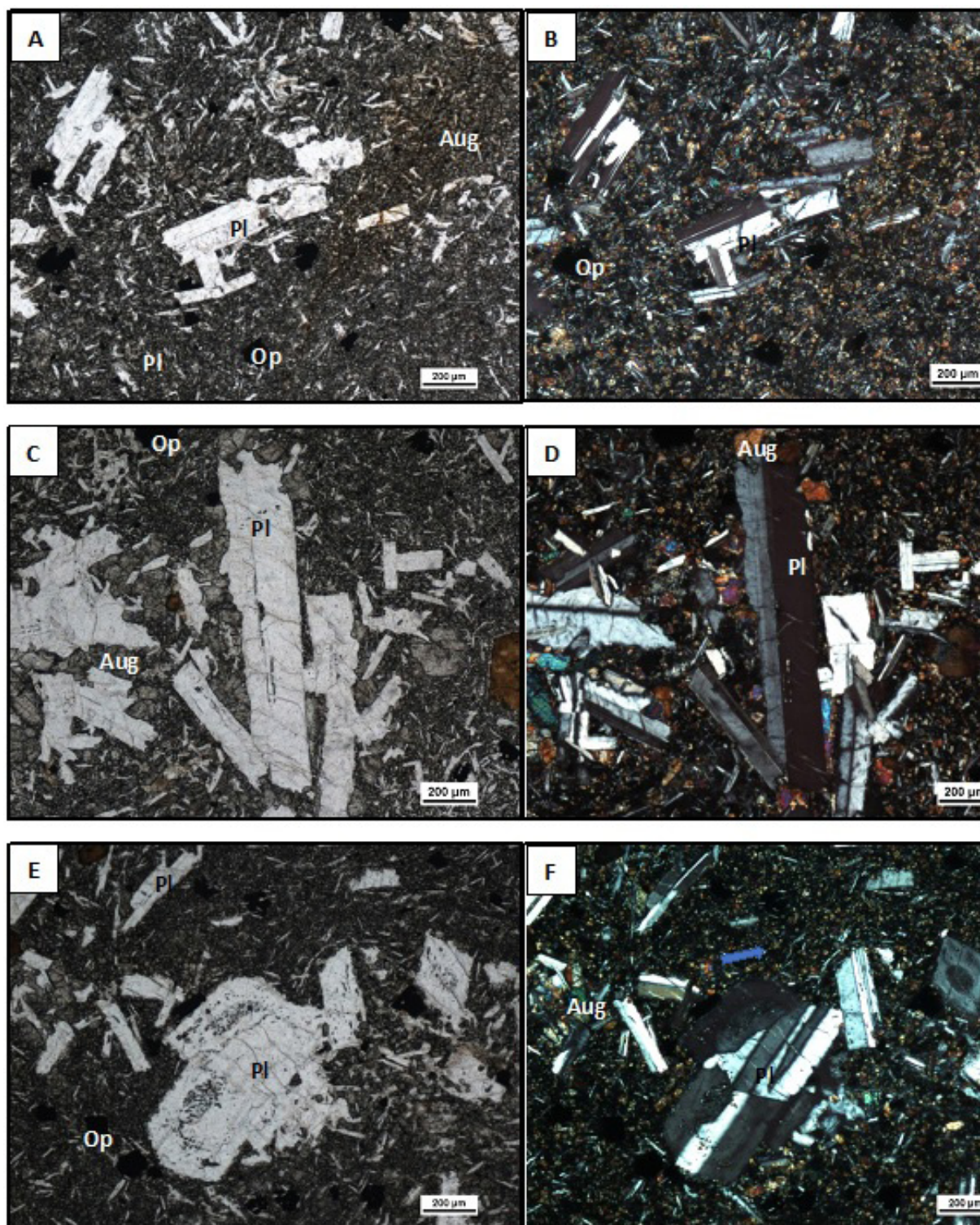


FIGURA 7. Mineralogía y textura representativa de los microgabros (diques) al este de la ciudad de Melo. A-B) Fenocristal de plagioclasa, inmerso en matriz oítica (LPP y LPC respectivamente). C-D) Glomérulos de fenocristales plagioclasa y clinopiroxeno (LPP y LPC respectivamente). E-F) Fenocristal de plagioclasa zoneado y parcialmente orientado por flujo magmático (LPP y LPC respectivamente). Referencias: PI (plagioclase), Aug (Augita), Op (minerales opacos), LPP (luz polarizada plana), LPC (Luz polarizada cruzada).

FIGURE 7. Mineralogy and representative textures of the microgabbros eastwards Melo city: A-B) Plagioclase phenocryst in ophitic groundmass (PPL and XPL, respectively), C-D) Glomerules composed of plagioclase and clinopyroxene (PPL and XPL, respectively), E-F) Plagioclase phenocryst partially zoned and arranged according to magmatic flow (PPL and XPL, respectively). References: PI (plagioclase), Aug (augite), Op (opaque minerals), PPL (Plane Polarized Light), XPL (Cross Polarized Light).

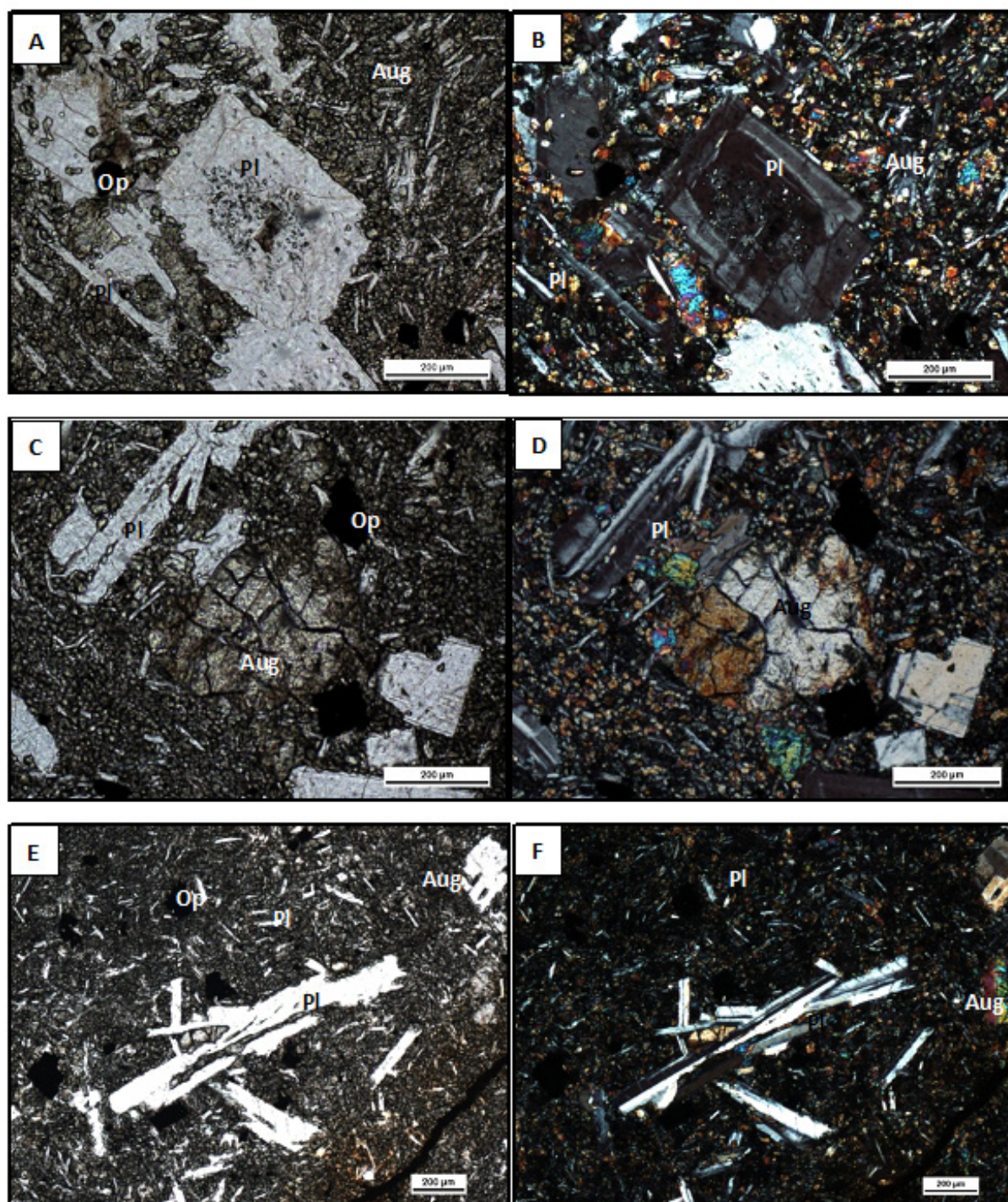


FIGURA 8. Mineralogía y texturas representativa de los microgabros (diques) al este de la ciudad de Melo (continuación).

A-B Fenocristal de plagioclasa con zoneamiento e inclusiones de piroxenos (LPP y PC respectivamente).

C-D Fenocristal de clinopiroxeno con macla simple inmerso en matriz predominantemente ofítica (LPP y PC respectivamente). E-F Glomérulos de fenocristales de plagioclasa y minerales opacos euedrales/automorfos. (LPP y PC respectivamente). Referencias: Pl (plagioclasas), Aug (augita), Op (minerales opacos), LPP (luz polarizada plana), LPC (luz polarizadora cruzada).

FIGURE 8. Mineralogía and representative textures of the microgabbros eastwards Melo city: A-B Plagioclase phenocryst with compositional zoning and pyroxene inclusions (PPL and XPL, respectively). C-D Twinned clinopyroxene phenocryst in ophitic groundmass (PPL and XPL, respectively). E-F Glomeroporphyritic texture developed by plagioclase. Opaque minerals (PPL and XPL respectively). References: Pl (plagioclase), Aug (augite), Op (opaque minerals), PPL (Plane Polarized Light), XPL (Cross Polarized Light).

de maghemita en sedimentos de ríos o arroyos, podrían también mostrar una respuesta magnética diferente y no estar vinculada directamente de un dique máfico, aunque si cercano. Otra posibilidad podría deberse a la interferencia o presencia de otros procesos que pueden influir en la señal magnética como ser procesos de diferenciación magmática (especialmente distribución y tamaños de los minerales magnéticos a lo largo del dique) durante el emplazamiento, y/o removilización por fluidos hidrotermales o metasomatismo. En este caso los procesos de diferenciación no jugarían un rol muy importante, dada la homogeneidad composicional y textural de los diques estudiados y considerando muestreos de superficie, no descartándose a nivel más profundos. Sin embargo, no se descartarían procesos hidrotermales/metasomáticos tardíos o posteriores a su intrusión, como ya fue evidenciado para otros diques en la Cuenca Norte (Scaglia 2010; Muzio *et al.* 2013). Otro posible factor de las anomalías magnéticas puede ser el efecto de las aureolas de contacto de los intrusivos, particularmente alrededor de granitos o gneis oxidados (Moon *et al.*, 2006).

Con relación a las características estructurales relevadas de los diques, estas son representativas de emplazamiento magmático siguiendo estructuras preexistentes del basamento cristalino, en dos direcciones principales conjugadas, NO-SE y SO-NE. Además, la inflexión de los diques A y B desde NO-SE hacia NE-SO, o incluso en la dirección N20°E en determinados segmentos, indicarían dominios estructurales diferentes. Esta hipótesis de emplazamiento magmático siguiendo antiguas estructuras del basamento cristalino, por sobre el fenómeno de fracturación hidráulica (Motoki y Sichel, 2008), está argumentado en coincidencia entre la dirección N100° de los diques al este de Melo (Masquelin *et al.*, 2009; Scaglia y Muzio, 2019) con la dirección de las estructuras del manto superior relevadas en los sitios 07 y 08 de Bologna *et al.* (2018). Lo mismo ocurre para el enjambre de diques de San Gregorio de Polanco de rumbo predominante N70°O (Scaglia, 2010) que son coincidentes con las medidas relevadas para los sitios 03 y 04 de Bologna *et al.* (2018). Por lo tanto, el enjambre de diques de San Gregorio de Polanco estaría emplazado en un basamento con una orientación predominante diferente al enjambre de diques de Melo (incluyendo este trabajo). El enjambre de diques de San Gregorio de Polanco podría estar siguiendo estructuras previas afectadas por la Cizalla de Sarandí del Yí inferida en esa zona (Preciozzi *et al.*, 1985), emplazándose en el basamento del Terreno Piedra Alta (Bossi *et al.* 1993). Este mismo fenómeno puede evidenciarse en los cambios repentinos de rumbo a N20°E en algunos segmentos de los diques al este de Melo, por lo que podrían estar siguiendo megaestructuras previas, en este caso, la Zona de Cizalla de Sierra Ballena (Preciozzi *et al.*, 1985).

En lo que respecta al basamento expuesto dentro del área de estudio, los magmas se habrían emplazado a través de planos de debilidad (fallas, foliaciones, fracturas) que coinciden con las direcciones estructurales principales NE mencionadas por Peel *et al.* (2018) para el Complejo La Tuna y con aquellas identificadas en las cartas geológicas-estructurales (Preciozzi *et al.*, 1979; 1985; Bossi y Ferrando, 2001).

Es de destacar que, a nivel de la Cuenca Norte, las estructuras predominantes son NO-SE (N110-135°), y que coinciden con la de los diques de Los Novillos-Cerro Pereira-Ramón Trigo (Masquelin *et al.*, 2009), y en otros diques más lejanos como son relevados en Artigas (Oyhantcabal y Piñero, 2007).

En base a la información obtenida en este trabajo se sugiere una posible continuación de los diques al este de Melo hacia el territorio brasileño siguiendo las megaestructuras interpretadas en el mapa geológico de Rio Grande del Sur (Servicio Geológico de Brasil - CPRM, 2006). Estas megaestructuras poseen dos direcciones principales: noreste como continuidad del dique A y este - sureste como continuidad del dique B (Figura 9).

Por último, los granitos calcoalcalinos brasileños, comprendidos dentro del área de estudio, presentan anomalías magnéticas circulares (Figura 4) que podrían deberse a procesos hidrotermales. Estos procesos hidrotermales asociados a granitos oxidados tienen una fuerte intensidad magnética, mientras las variantes más reducidas (no afectados por procesos hidrotermales) son magnéticamente silenciosas (Marjoribanks, 2010).

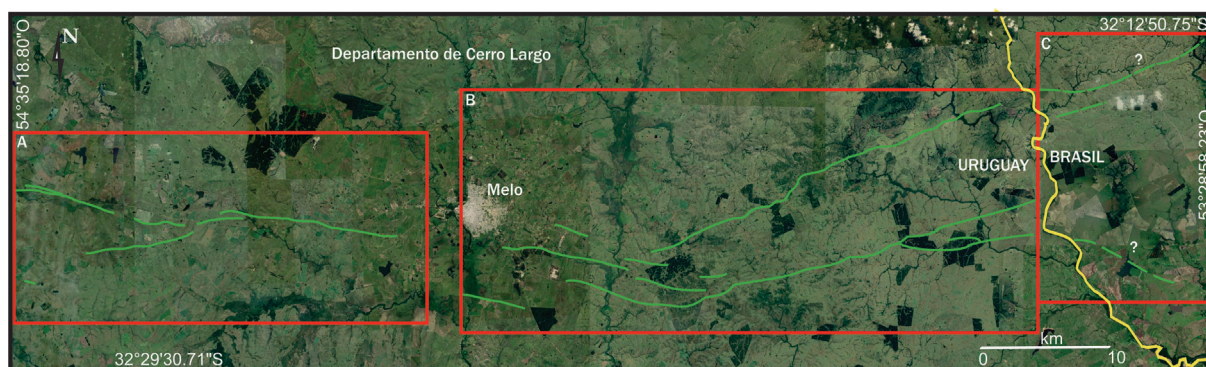


FIGURA 9. Mapa esquemático de los diques máficos en el departamento de Cerro Largo (Uruguay) y su posible continuidad en territorio brasileño. A) Diques al este de Melo (Masquelin *et al.*, 2009); B) Diques interpretados y relevados en este trabajo; C) Posible continuación de diques en estructuras indicadas en Mapa Geológico del Estado de Rio Grande del Sur (Servicio Geológico de Brasil, 2006). Nota: El espesor de los diques ha sido aumentada para una mejor visualización a escala regional.

FIGURE 9. Sketch map of the mafic dykes in Cerro Largo department (Uruguay) and their possible continuity in Brazilian territory. A) East Melo dykes (Masquelin *et al.*, 2009); B) Dykes surveyed and interpreted in this work; C) Possible continuity of the dykes along structures indicated in the Geological Map of the State of Rio Grande do Sul (Geological Survey of Brazil, 2006). Note: The dyke thickness has been increased for a better visualization on a regional scale.

El mapa magnético de RTP está caracterizado por anomalías de longitud de onda cortas y largas, distribuidas a través del área de estudio, con fuertes y quebradas improntas magnéticas que reflejan la heterogeneidad y deformación de las rocas del basamento cristalino. A partir de la imagen de intensidad magnética terrestre TMI, se observó también que hay zonas de anomalías magnéticas locales sobreimpuestos al campo magnético regional. Estas anomalías están probablemente relacionadas con estructuras de fallas del basamento cristalino.

CONCLUSIONES

Los resultados de la interpretación de los datos magnéticos de alta resolución y el relevamiento de campo, junto el estudio petrográfico realizado, permiten llegar a las siguientes conclusiones principales:

-La imagen RPT, permitió identificar en detalle, al menos dos diques máficos principales, de edad tentativa Mesozoica, que corresponden a la continuación del enjambre de diques al oeste de Melo (Cuenca Norte) y que luego se flexionan hacia el NE (área de basamento cristalino) con continuidad, probablemente, en territorio brasileño. La longitud que alcanzan en todo su conjunto, permite considerarlos como macrodiques, quedando de manifiesto su extensión a escala regional.

-La continuidad de los diques en toda el área de estudio (con algunos segmentos aflorantes y otros inferidos), sugiere que los mismos no han sido afectados (o afectados mínimamente) por movimientos tectónicos posteriores.

-El análisis de los datos magnéticos muestra *trends* tectónicos dominantes (NO-SE; E-O; NE-SO), similares a la dirección de los diques, proponiéndose un emplazamiento magmático favorecido por planos de debilidad correspondientes a fracturas heredadas del basamento cristalino, según dos direcciones principales (N100° y N75°E), y localmente N20°E; ambas coincidentes con los datos estructurales existentes para el área de estudio.

-Se evidencia que no hay una correlación perfecta entre el ancho de la anomalía magnética lineal con el espesor real de los diques, ya que el ancho de la anomalía puede deberse a la presencia de más de un dique paralelo de similares características y/o a dispersión por procesos de intemperismo.

-La caracterización mineralógica y textural de los diques máficos al este de la ciudad de Melo no presenta diferencias significativas a las que presentan los diques de la Cuenca Norte. En ambos casos los

microgabros presentan textura glomeroporfírica a porfírica, estando compuestos por plagioclasas cálcicas (labradorita/andesina), clinopiroxenos (augita y pigeonita), óxidos de hierro y titanio (minerales portadores del magnetismo), relictos de olivino y vidrio (en zonas de borde). A su vez, la casi ausencia de titanomagnetitas con formas esqueléticas en conjunto con los aspectos de las demás fases minerales presentes, indicarían un emplazamiento magmático no muy rápido y/o tasas moderadas de enfriamiento.

-Se interpretan dos dominios geológicos-estructurales con diferentes señales magnéticas; coincidentes con la cartografía geológica nacional. Por un lado, el zócalo del área de la Cuenca Norte (área occidental) y, por otro lado (área oriental), el basamento cristalino aflorante que controlaron el emplazamiento magmático (indicado por la orientación de los diques).

-Se delimitaron zonas de anomalías magnéticas, en las áreas con granitos calcoalcalinos, que requieren mayor estudio y que pueden ser de interés en la exploración mineral.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo logístico y financiero del Proyecto ECOS-SUD CONICYT N°U17U01, a la Agencia Nacional de Innovación e Investigación (ANII) por el apoyo en la formación de posgrado de BV y FS, y al proyecto ANII FCE 136496. Esta publicación es también un aporte al proyecto Unesco-igcp638 y al grupo de investigación CSIC-1702. Agradecemos a los revisores P.O (Uruguay) y P.G (Argentina) por sus aportes y sugerencias que contribuyeron a la mejora del presente manuscrito.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aceñolaza, F., 2007. Geología y recursos geológicos de la Mesopotamia Argentina. Instituto Superior de Correlación Geológica, Serie de Correlación Geológica, 22. Magna Ed., Tucumán, Argentina.
- Almeida, V., Janasi, V., Heaman, L., Shaulis, B., Hollanda, M., Renne, P., 2018. Contemporaneous alkaline and tholeiitic magmatism in the Ponta Grossa Arch, Paraná-Etendeka Magmatic Province: Constraints from U-Pb zircon/baddeleyite and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ phlogopite dating of the José Fernandes Gabbro and mafic dykes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 355, 55-65.
- Bates, M., Mc Leish, M., Mushayandebvu, M., 2016. Interpretation report: Partial airborne geophysical survey of the national territory and the procedure and interpretation of existing geophysical data. Sander Geophysics Ltd., Contract No. 01/2013, Report for DINAMIGE, Ottawa, Canada, 1-654.
- Bologna, M.S., Dragone, G.N., Muzio, R., Peel, E., Nuñez-Demarco, P., Ussami, N., 2018. Electrical structure of the lithosphere from Rio de la Plata craton to Paraná basin: Amalgamation of cratonic and refertilized lithospheres in SW Gondwanaland. *Tectonics*, 37, 1-18.
- Bossi, J., 1966. Geología del Uruguay. Departamento de Publicaciones de la Universidad de la República, Montevideo.

- Bossi, J., Campal, N., Preciozzi, F., 1993: Precámbrico del Uruguay, Parte I: Terreno Piedra Alta, DINAMIGE–UDELAR, 1-58.
- Bossi, J., Ferrando, L., 2001. Carta Geológica del Uruguay. Facultad de Agronomía, escala 1:500,000.
- Bossi, J., Schipilov, A., 1998. Rocas ígneas básicas del Uruguay. Facultad de Agronomía, Universidad de la República, Montevideo.
- Bossi, J., Schipilov, A., 2007. Formación Cuaró. En: Rocas ígneas básicas del Uruguay. Facultad de Agronomía, Universidad de la República, Montevideo, 2da edición, 109-129.
- Comin-Chiaramonti, P., De Barros Gomes, C., De Min, A., Ernesto, M., Marzoli, A., Riccomini, C., 2007. Eastern Paraguay: an overview of the post-Paleozoic magmatism and geodynamic implications. Rend. Fis. Acc. Lincei 9, 18, 139-192.
- de Santa Ana, H., Veroslavsky, G., Fúlfaro, V., Rosello, E., 2006. Cuenca Norte: Evolución tectónica y sedimentaria del Carbonífero-Pérmico. En: Veroslavsky, G., Ubilla, M., Martínez, S. (Eds.). Cuencas sedimentarias de Uruguay: geología, paleontología y recursos naturales, Paleozoico. DIRAC, 209-257.
- Druecker, M., Gay, S., 1987. Mafic dyke swarms associated with Mesozoic rifting in eastern Paraguay, South America. En: Mafic dyke swarms. Halls, H., Fahrig, W. (Eds.). Geological Association of Canada Special Paper, 34, 187-193.
- Elizalde G., Eugui W., Verdesio J., Stapff M., Tellechea J., 1970. Carta Geológica del Uruguay, Segmento Aceguá, Boletín N° 3, Departamento de Publicaciones Universidad de la República, Uruguay, escala 1:100,000.
- Ernst, R., 2014. Large Igneous Provinces. Cambridge University Press.
- Féraud, G., Bertrand, H., Martínez, M., Ures, C., Schipilov, A., Bossi, J., 1999. Ar/Ar age and geochemistry of the southern extension of Paraná traps in Uruguay. En: Actas II Simposio Sudamericano de Geología Isotópica, Córdoba, Argentina, p. 57-59.
- Ferrando, L., Andreis, R., 1989. Carta Geológica del Uruguay, Hoja D-15 Melo. Dirección Nacional de Minería y Geología- Facultad de Humanidades y Ciencias-Facultad de Agronomía, Uruguay, escala 1:100,000.
- Florisbal, L., Janasi, V., Bitencourt, M., Nardi, L., Marteleto, N., 2018. Geological, geochemical and isotope diversity of 134 Ma dykes from the Florianópolis Dyke Swarm, Paraná Magmatic Province: Geodynamic controls on petrogenesis. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 355, 181-202.
- Frank, H.T., Gomes, M.E.B., Formoso, M.L.L., 2009. Review of the areal extent and the volume of the Serra Geral Formation, Paraná basin, south America. Pesquisas em Geociências 36, 49-57.
- Fúlfaro, V., Saad, A., Santos, M., Vianna, R., 1982. Compartimentação e Evolução Tectônica da Bacia do Paraná. Revista Brasileira de Geologia, 12, 590-611.

- Gomes, C., Comin-Chiaramonti, P., Velazquez, V., 2013. Synthesis on the alkaline magmatism of Eastern Paraguay, Brazilian Journal Geol., 43, 745–761
- Goso, C., 1995. Análise estratigráfica da Formação São Gregorio na borda leste da Bacia Norte uruguaia. Dissertação de Mestrado, IGCE–Unesp, Rio Claro, Brasil.
- Hart, S., 1966. Radiometric ages in Uruguay and Argentina, and their implications concerning continental drift. En: Geol. Soc. Am. annual meeting, San Francisco, USA, p.xx
- Infraestructura de Datos Espaciales (IDE). Presidencia de la República, Uruguay. <https://www.gub.uy/infraestructura-datos-espaciales/geoservicios-ide>
- Janasi, V. A., Freitas, V. A., Heaman, L.H., 2011. The onset of flood basalt volcanism, Northern Paraná Basin, Brazil: a precise U-Pb baddeleyite/zircon age for Chapecó-type dacite. Earth Planet Sciences Letters, 302 (1-2), 147-153.
- Lagorio, S., Vizán, H., Guena, S., 2016. Early Cretaceous Volcanism in Central and Eastern Argentina During Gondwana Break-Up. Springer Briefs in Earth System Sciences.
- Marjoribanks, R., 2010. Geophysical and Geochemical methods (2da. Ed.), Springer, London, UK.
- Marques, L. S., De Min, A., Rocha-Júnior E. R. V., Babinski, M., Bellieni, G., Figueiredo, A. M. G., 2018. Elemental and Sr-Nd-Pb isotope geochemistry of the Florianópolis Dyke Swarm (Paraná Magmatic Province): crustal contamination and mantle source constraints. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 355, 149-164.
- Masquelín, H., Aífa, T., Muzio, R., Hallot, E., Veroslavsky, G., Bonnevalle, L., 2009. The Cuaró Mesozoic doleritic dyke swarm, southern Paraná basin, Uruguay: Examples of superimposed magnetic fabrics?. Comptes Rendus Geoscience, 341, 1003-1015.
- Masquelin, H., Silva, H., Sánchez Bettucci, L., Núñez Demarco, P., Pascual, S., Muzio, R., Peel, E., Scaglia, F., 2017. Lithologies, structure and basement-cover relationships in the schist belt of the Dom Feliciano Belt in Uruguay, Brazilian Journal of Geology, 47(1), 21-42.
- Masse, P., Laurent, O., 2016. Geological exploration of Angola from Sumbe to Namibe: A review at the frontier between geology, natural resources and the history of geology. Comptes Rendus Geoscience, 348, 80-88.
- Melfi, A., Piccirillo, E., Nardy, A., 1988. Geological and magmatic aspects of the Paraná Basin-An Introduction. En: The Mesozoic Flood Volcanism of the Paraná Basin: petrogenetic and geophysical aspects. Piccirillo, E., Melfi, A. (Eds.). Universidade de Sao Paulo. Instituto Astronômico e Geofísico Publishers, 1-15.
- Millsom, J., 2003. Field Geophysics. 3ra Edición. Wiley.
- Moon, C., Whateley, M., Evans, A., 2006. Introduction to mineral exploration. 2nd Edition, Blackwell.

- Motoki, A., Sichel, S., 2008. Hydraulic fracturing as a possible mechanism of dyke-sill transitions in trachytic tabular bodies of Arraial do Cabo, State of Rio de Janeiro, Brazil. *Geofísica Internacional*, 47 (1), p. 13-25.
- Muzio, R., Peel, E., Porta, N., Scaglia, F., 2017. Mesozoic dykes and sills from Uruguay: Sr - Nd isotope and trace element geochemistry. *Journal of South American Earth Sciences*, 77, 92-107.
- Muzio, R., Scaglia, F., Masquelin, H., 2011. Petrochemistry of Mesozoic mafic intrusions related to the Paraná Magmatic Province, Uruguay. *International Geology Review*, iFirst article, 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. *Earth Sci. Res. Journal*, 17 (2), 151-158.
- Northfleet, A., Medeiros, R., Mulhmann, A., 1969. Reavaliação dos Dados Geológicos da Bacia do Paraná. *Bol. Técnico Petrobrás*, 12(3), 291-346.
- Núñez, P., Masquelin, H., Prezzi, C., Aífa, T., Muzio, R., Loureiro, J., Peel, E., Campal, N., Sánchez Bettucci, L., 2020. Aeromagnetic patterns in Southern Uruguay: Precambrian-Mesozoic dyke swarms and Mesozoic rifting structural and tectonic evolution. *Tectonophysics* 789, 1-17.
- Oasis Montaj, 2018. Geosoft Mapping and Application System Inc. 207 Queens Quay West, Suite 810, Toronto, Canadá.
- Oyhantçabal, P., Piñeiro, G., 2007. Geología y petrografía de las rocas basálticas (Formación Arapey) aflorantes en el corredor de la Ruta 4 entre el Río Arapey (92 Km) y Artigas (200 Km). En: *Actas del V Congreso Uruguayo de Geología*. Sociedad Uruguaya de Geología (Ed.), Montevideo, Uruguay, p x.
- Panario, D., 1988. Geomorfología del Uruguay. Facultad de Ciencias, Universidad de la República.
- Peate, D., 1997. The Paraná – Etendeka Province. En: Mahoney, J.J. & Coffin, M.F. (Eds.) *Large Igneous Provinces, Continental, oceanic and planetary flood volcanism*. Geophysical Monograph 100, 217-245.
- Peate, D., Hawkesworth, C., Mantovani, M., 1992. Chemical stratigraphy of the Paraná lavas (South America): classification of magma types and their spatial distribution. *Bull. Volcanol.*, 55, 119-139.
- Peel, E., Sánchez Bettucci, L., Basei, M.A.S., 2018. Geology and geochronology of Paso del Dragón Complex (northeastern Uruguay): Implications on the evolution of the Dom Feliciano Belt (Western Gondwana). *Journal of South American Earth Sciences* 85, 250-262.
- Piccirillo, E., Comin-Chiaramonti, P., Melfi, A., Stolfa, D., Bellieni, G., Marques, L., Giaretta, A., Nardy, A., Pinese, J., Raposo, M., Roisenberg, A., 1988. En: *The Mesozoic Flood Volcanism of the Paraná Basin: petrogenetic and geophysical aspects*. Piccirillo, E., Melfi, A. (Eds.). Universidade de Sao Paulo. Instituto Astronômico e Geofísico Publishers, 107-157.

- Piccirillo, E., Melfi, A., 1988. The Mesozoic Flood Volcanism of the Paraná Basin: petrogenetic and geophysical aspects. Universidade de Sao Paulo. Insituto Astronômico e Geofísico Publishers.
- Preciozzi, F., Spoturno, J., Heinzen, W., 1979. Carta Geo-estructural del Uruguay. Instituto Geológico, Uruguay, escala 1:2,000,000.
- Preciozzi, F.; Spoturno, J., Heinzen, W., Rossi, P., 1985. Memoria explicativa de la Carta Geológica del Uruguay a escala 1:500.000. DINAMIGE-MIEM, Uruguay, escala 1:500,000.
- Rénne, P.R., Deckart, K., Ernesto, M., Féraud, G., Piccirillo, E.M., 1996. Age of the Ponta Grossa dike swarm (Brazil), and implications to Parana flood volcanism. Earth Planet. Sci. Lett. 144 (1-2), 199-211.
- Renne, P., Ernesto, M., Pacca, I., Nardy, A., Coe, R., Glen, J., Prevôt, M., Perrin, M., 1992. The age of Paraná flood volcanism, rifting of Gondwanaland, and the Jurassic-Cretaceous boundary. Sciences 258, 975-979.
- Renner, L., 2010. Geoquímica de sills basálticos da Formação Serra Geral, Sul do Brasil, com base em rocha total e micro-análise de minerais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil. Tese de Doutorado, En línea. <http://hdl.handle.net/10183/25954>
- Rickwood, P., 1990. The anatomy of a dyke and the determination of propagation and magma flow directions. En: Mafic Dykes and Emplacement Mechanisms. Parker, A; Rickwood, P; Tucker, D. (Eds.). Balkema, Rotterdam, 81-101.
- Rosello, E., Veroslavsky, G., Masquelin, H., De Santa Ana, H., 2007. El corredor tectónico juro-cretácico Santa Lucía-Aiguá-Merín (Uruguay): evidencias cinemáticas transcurrentes dextrales y controles estructurales preexistentes. Revista de la Asociación Geológica Argentina 62 (1), 92-104.
- Sánchez Bettucci, L., Loureiro, J., Pascale, A., Faraone, M., Guerrero, S., 2016. Relevamiento geofísico aeroportado de la porción sur de Uruguay. En: VII Congreso Uruguayo de Geología, Sociedad Uruguaya de Geología (Ed.), Montevideo, Uruguay, p. 8.
- Sarmiento, C., Sommer, C., Fernandes Lima, E., 2017. Mafic subvolcanic intrusions and their petrologic relation with the volcanism in the south hinge Torres Syncline, Paraná-Etendeka Igneous Province, southern Brazil. Journal of South American Earth Sciences 77, 70-91.
- Servicio Geológico de Brasil -CPRM, 2006. Mapa geológico del Estado de Rio Grande del Sur, Brasil, escala 1:750,000.
- Scaglia, F., 2010. Estudio petrológico de los diques básicos Mesozoicos en la región de San Gregorio de Polanco, Uruguay. Universidad de la República, Uruguay. Tesis de grado. En línea. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/1642>
- Scaglia, F., 2013. Estudio petrogenético del Sill de Cuaró, Departamento de Tacuarembó, Uruguay. PEDECIBA-Universidad de la República, Uruguay. Tesis de Maestría. En línea: <https://hdl.handle.net/20.500.12008/4046>

- Scaglia, F., Masquelin, H., Muzio, R., 2009. Distribución de los cuerpos intrusivos básicos mesozoicos (Cuenca de Paraná); NE Uruguay: datos preliminares. En: Universidad de Chile (Ed.), XII Congreso Geológico Chileno, Santiago, Chile, p. 1-4.
- Scaglia, F., Muzio, R., 2018. Descrição petrográfica do Sill do Cuaró (Perfuração Cuaró, N°32.2.014), Uruguai, En: Sociedade Brasileira de Geologia (Ed.), 49° Congresso Brasileiro de Geologia, Rio de Janeiro, Brasil, p. 1973.
- Scaglia, F., Muzio, R., 2019. Mesozoic Subvolcanic mafic system of Uruguay: a new perspective for mineral exploration. En: Galland, Palma, Mescua (Eds.). LASI 6 conference, Malargüe, Argentina, p. 139-140.
- Scaglia, F., Muzio, R., Masquelin, H., 2010. Distribución y petrografía de los diques básicos mesozoicos de la región San Gregorio de Polanco, Provincia Magmática Paraná, Uruguay. Revista de la Sociedad Uruguaya de Geología 16, 11-23.
- Scaglia, F., Muzio, R., Masquelin, H., 2019. Distribución y petrografía del sill de Fraile Muerto, Departamento de Cerro Largo, Uruguay: datos preliminares. En: Sociedad Uruguaya de Geología (Ed.), IX Congreso Uruguayo de Geología, Flores, Uruguay, p. 190.
- Scaglia, F., Paris, A., Muzio, R., 2021. Geological mapping and petrographic characterization of Mamué Dyke Swarm, Southwest Angola. 50° Congresso Brasileiro de Geologia, Brasília, Brasil.
- Thiede, D., Vasconcelos, P., 2010. Parana flood basalts: Rapid extrusion hypothesis confirmed by new $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ results. Geology 38(8), 747-750.
- Thompson, R., Gibson, S., Dickin, A., Smith, P., 2001. Early cretaceous basalt and picrite dykes of the Southern Etendeka Region, NW Namibia: windows into the role of the Tristan Mantle Plume in Paraná-Etendeka magmatism. Journal of Petrology 42 (11), 2049-2081.
- Tomazzoli, E., Pellerin, J., 2008. O exame de diques Florianópolis na Ilha Santa Catarina (SC): Mapa Geológico. En: Sociedade Brasileira de Geologia (Ed.), IV Simposio de Vulcanismo e Ambiente Associados, Foz do Iguaçu, Brasil, p.xx
- Turner, S., Regelous, M., Kelley, S., Hawkesworth, C., Mantovani, M. 1994. Magmatism and continental break-up in the South Atlantic: high precision $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology. Earth and Planetary Science Letters 121, 333-348.
- Turner, S.P., Peate, D.W., Hawkesworth, C.J., Mantovani, M.S.M., 1999. Chemical stratigraphy of the Paraná basalt succession in western Uruguay: further evidence for the diachronous nature of the Paraná magma types. J. Geodyn. 28, 459-469.
- Ucha N., de Santa Ana H., Veroslavsky G., 2004. La Cuenca Punta del Este: geología y potencial hidrocarburífero. En:

Veroslavsky G, Ubilla M., Martínez S. (Eds). Cuencas sedimentarias de Uruguay. Geología paleontología y recursos naturales – Mesozoico. DIRAC, Facultad de Ciencias, Montevideo, Uruguay, 173-192.

Valente, S., Corval, A., Duarte, B.P., Ellam, R.M., Fallick, A.E., Meighan, I.G., Dutra, T., 2007. Tectonic boundaries, crustal weakness zones and plumesubcontinental lithospheric mantle interactions in the Serra do Mar dyke swarm, SE Brazil. Rev. Bras. Geociencias 37 (1), 194-201.

White, I.C., 1908. Relatório Final da Comissao das Minas de Carvao de Pedra do Brasil. Imprensa Nacional, Rio de Janeiro, Brasil..