



ESTUDIO PALEOMAGNÉTICO DE LA FORMACIÓN ALTO PARAGUAY

Miguel Cervantes Solano*^{1,2}, Avto Gogutchichvili¹, Leda Sánchez Bettucci³, Mabel Mena⁴, Ricardo Trindade⁵ and Bertha Aguilar Reyes¹

¹Laboratorio Interinstitucional de Magnetismo Natural (LIMNA), Instituto de Geofísica, UNAM - Campus Morelia, México.

²Departamento de Ciencias Básicas, Tecnológico de Estudios Superiores de Cuautitlán Izcalli, TESC, México.

³Facultad de Ciencias, Universidad de la República, Departamento de Geología, Área Geofísica-Geotectónica, Iguá 4225, Malvin Norte, CP 11400, Montevideo, Uruguay.

⁴Instituto de Geofísica, Daniel Valencio, Departamento de Ciencias Geológicas, Universidad de Buenos Aires, Argentina.

⁵Departamento de Geofísica, Instituto de Astronomía, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, Rua do Matão, 1226, 05508-090, São Paulo, Brazil.

Resumen

Reportamos un estudio de magnetismo de rocas, paleomagnetismo y paleointensidad realizado a 28 flujos de lava de la Formación Alto Paraguay perteneciente a la Provincia Magmática de Paraná, con finalidad de contribuir al estudio de variabilidad del campo magnético Terrestre durante el Cretácico y para establecer el ritmo de extrusión magmática de Paraná obteniendo una estimación de posición de los Polos Paleomagnéticos de Suramérica durante el Cretácico temprano. Se determinó la dirección promedio del paleocampo en 26 sitios. Nueve sitios tienen polaridad normal y ocho sitios muestran polaridades intermedias. La paleodirección promedio de los sitios de polaridad normal es $I=-41.8^\circ$, $D=4.9^\circ$, $k=112$, $\alpha_{95}=4.9^\circ$; para sitios con magnetización inversa es $I=37.1^\circ$, $D=181.4^\circ$, $k=23$, $\alpha_{95}=11.1^\circ$. La posición promedio del Paleopolo es $Plong=179.2^\circ$ E, $Plat= 86.2^\circ$ S, $R=17.74$, $k=64.56$, $A_{95}=4.3^\circ$. Este polo obtenido concuerda con los polos reportados para la parte central de Paraná, (Los Adobes, Misiones y SAMC). Contrariamente otros polos paleomagnéticos de edades similares muestran alejamiento significativo atribuible a rotaciones tectónicas locales o muestreo insuficiente para descartar la variación paleosecular. Los parámetros de variación secular concuerdan con los reportados para el Súpercron Normal Cretácico, aunque las dispersiones angulares de los VGP's son menores respecto al Jurásico y Plio-Pleistoceno.

Abstract

We report a detailed paleomagnetic investigation from 28 lava flows collected in the Paraguayan part of the Paraná Flood Basalts (Alto Paraguay Formation) in order to document the variability of the Earth's magnetic field during the early Cretaceous, estimate the extrusion rate of Paraná magma and obtain a new Cretaceous paleomagnetic pole for stable South America. The paleofield direction is precisely determined for 26 sites for which, the remanent magnetization is characterized by a small within-site dispersion and a high directional stability. No paleodirections were determined for two sites because of their very complex



and erratic behaviour during the paleomagnetic treatments. Nine sites give normal polarity magnetization and other 9 are reversely magnetized while 8 remaining sites show intermediate paleodirections. The mean paleomagnetic direction of normal polarity sites is $I=-41.8^\circ$, $D=4.9^\circ$, $k=112$, $\alpha_{95}=4.9^\circ$ while reversely magnetized sites give $I=37.1^\circ$, $D=181.4^\circ$, $k=23$, $\alpha_{95}=11.1^\circ$. The mean paleomagnetic pole position obtained from 18 sites is $Plong=179.2^\circ E$, $Plat=86.2^\circ S$, $R=17.74$, $k=64.56$, $A_{95}=4.3^\circ$. The pole obtained in this study agrees reasonably well with coeval pole positions, in particular with those obtained from CPMP (Central Paraná), Los Adobes, Misiones and SAMC. However, some other similar age paleomagnetic poles show significant departure that may be attributed to local tectonic rotations or insufficient sampling to overcome the paleosecular variation. The paleosecular variation parameters are in agreement with the selected data reported for the Cretaceous Normal Superchron.

Introducción

Durante la historia geológica, la Tierra ha experimentado periódicamente grandes erupciones magmáticas. La mayoría de estos eventos ocurrieron durante el Mesozoico hasta el Cenozoico sin relación aparente con la subducción o expansión del piso oceánico. Existe ahora un consenso general en que el tiempo de emplazamiento de las grandes Provincias Ígneas (LIP, Large Igneous Provinces) fue muy corto (orden de cientos de años, Thiede y Vasconcelos., 2010), Coffin y Edholm.,(1994) estimaron que las LIP's gigantes representan hasta 50% de la cantidad total de masa y energía expelida del Manto Terrestre hacia la litósfera durante el Cretácico. En el Cretácico, en particular el periodo entre los 140 a 80 Ma, estuvo caracterizado por un proceso geodinámico extremadamente intenso en Suramérica con gran actividad magmática, rompimiento y apertura continental (Anderson et al., 1992; Coffin y Edholm, 1994; Anderson, 1994). De igual forma el geodinamo pudo haberse encontrado en un estado anómalo de alta energía durante el Cretácico Temprano resultando no solo en el súper Cron Normal Cretácico sino también en una variación secular (PSV) anormalmente alta (McFadden et al., 1991).

La Provincia Magmática de Paraná (PMP) comprende el Sur de Brasil, Norte de Argentina, Paraguay y Uruguay ya se le han realizado diversos estudios paleomagnéticos dejando como resultado una base de datos de direcciones paleomagnéticas (Tamrat y Ernesto, 1999). La mayoría de los estudios disponibles provienen de la parte Brasileña de la PBP mientras que los datos disponibles de las Regiones Argentina y Uruguay son limitados (Cervantes et al., 2010). Este trabajo se realiza con el fin de contribuir al estudio de la variabilidad del campo magnético Terrestre durante el Cretácico Temprano y de establecer el ritmo de extrusión magmática de Paraná para obtener una estimación de la posición de los Polos Paleomagnéticos de Suramérica durante el Cretácico temprano.

Principales rasgos Geológicos y detalles de Muestreo.

El área de estudio se encuentra en la frontera oriente de Paraguay (Figura 1). Los mayores afloramientos se encuentran en la cantera Nakunday situada cerca del poblado Santa Rita ($25^\circ 45' 53.88'' S$ y $55^\circ 7' 53.67'' O$), al este de Paraguay. Localmente, incluye bloques oscuros y sedimentos carbonatados y de color blanquecino de la Formación Iratí separados por extrusión basáltica. Una característica notable de estas xenolitas es su apariencia manchada debido a las inclusiones de color negro verdoso en los



sedimentos. Al mismo tiempo, existe material sedimentario dentro de los basaltos. En total, se obtuvieron 221 núcleos paleomagnéticos estándar, provenientes de los 28 sitios (Figura 1) distribuidos a lo largo de afloramientos de la carretera del este de Paraguay durante una campaña de muestreo realizada en 2009.

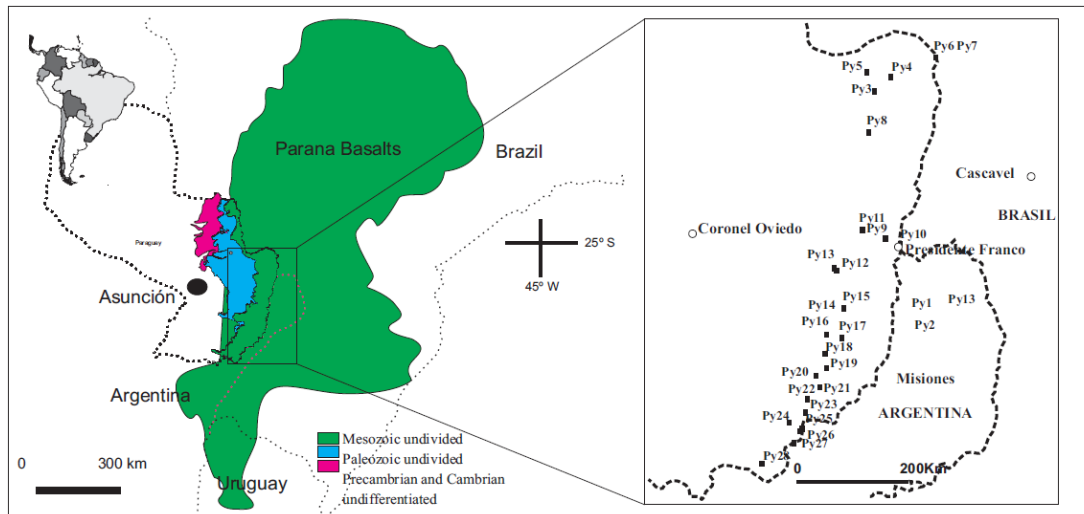


Figura 1. Mapa geológico simplificado del este de Paraguay con la localización de los sitios estudiados.

Metodología: Mediciones Paleomagnéticas y de magnetismo de Rocas.

Mediciones de susceptibilidad continua.

Para identificar a los portadores de la magnetización remanente y obtener información acerca de su estabilidad paleomagnética se llevaron a cabo mediciones de la susceptibilidad de campo (curvas K-T) en aire utilizando un Kappabridge (KLY-3) con horno en el laboratorio de paleomagnetismo de Saint-Maur (Institut de Physique du Globe de Paris). Se logró identificar cuatro tipos de comportamientos. Algunas muestras (11%) mostraron evidencia de una sola fase ferromagnética (magnetita) con una curva de calentamiento y enfriamiento irreversible casi ideal (tipo A, figura 2). La mayor parte de las muestras (72%) indican evidencia de titanomagnetita pobre en titanio (tipo B) pero durante el calentamiento y enfriamiento las curvas son considerablemente irreversibles debido, probablemente, al proceso de oxidación durante el calentamiento en presencia de aire. El comportamiento C (figura 2) se caracteriza por dos fases magnéticas principales durante el calentamiento (la primera entre los 320 a 365°C mientras que la segunda entre los 540 a 580°C). Dicho comportamiento puede atribuirse a la presencia de (titano) maghemita que se transforma en magnetita casi pura en temperaturas relativamente bajas o intermedias. El tipo 4 es similar al tipo C con la diferencia que se observan ahora tres fases (350°C, 520°C y 585°C) durante el calentamiento mientras que durante el enfriamiento subsisten únicamente dos. Este comportamiento inusual en las rocas basálticas se debe probablemente a la co-existencia de (titano) magnetita y magnetita (titano) con un contenido de titanio variable.

Ciclos de histéresis.

Se realizaron mediciones de histéresis a temperatura ambiente a todos los sitios estudiados utilizando en campos de hasta 0.65 Tesla. La magnetización remanente de saturación (J_{rs}), la magnetización de saturación (J_s) y la fuerza coercitiva (H_c) se calcularon después de hacer la corrección de contribución



paramagnética. La coercitividad de la remanencia (H_{cr}) se determinó aplicando progresivamente un campo de fondo después de la saturación mostrando una curva de histéresis típica. Las fracciones de H_{cr}/C_c oscilan entre 1.75 y 2.73, mientras que los valores de J_{rs}/J_S varían desde 0.11 hasta 0.88. A juzgar por estos parámetros de histéresis, los responsables de la remanencia parecen ser granos de dominio pseudo sencillo, o bien este comportamiento puede deberse a la presencia de mezcla de granos multidominio MD y una cantidad significativa de granos SD (Dunlop, 2002).

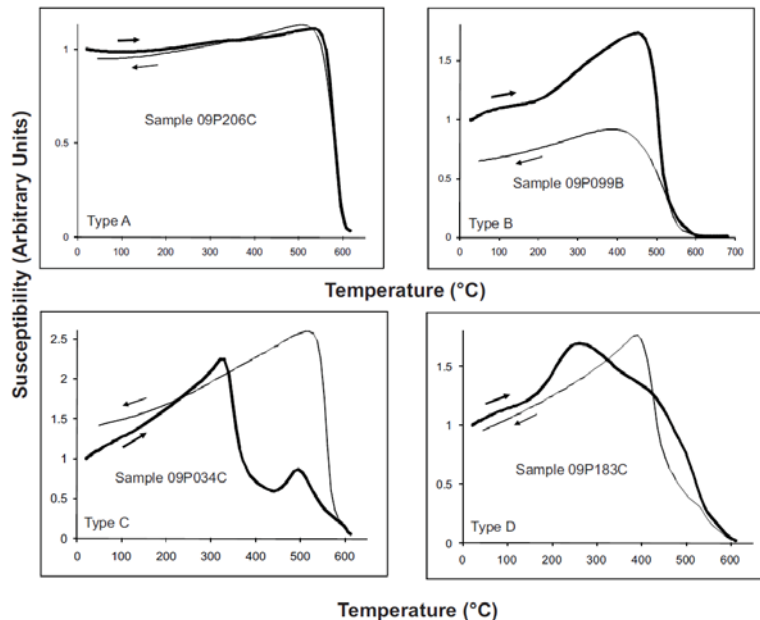


Figura 2. Curvas representativas de susceptibilidad contra temperatura, las flechas indican el calentamiento y enfriamiento.

Mediciones de remanencia

Previo a los tratamientos magnéticos, se determinó el índice de viscosidad siguiendo los procedimientos descritos por Prévot et al. (1983), la mayoría de los valores fueron inferiores al 5%. Por lo tanto, las muestras estudiadas no tienen gran capacidad de absolver magnetización remanente viscosa. La remanencia magnética fue analizada en todas las muestras empleando desmagnetización por campos alternos y desmagnetización térmica. La mayoría de las muestras estudiadas tienen una sola componente estable de magnetización, observada tanto en campos alternos como en el tratamiento térmico. Comúnmente está presente una componente secundaria menor, pero fue removida mediante la aplicación de campos de 10mT o 150°C. Los campos destructivos medios en su mayoría se encuentran en el intervalo de 30 a 40 mT, lo que sugiere la existencia de granos de dominio pseudo sencillo o granos de dominio sencillo como portadores de la remanencia (Dunlop y Ozdemir, 1997). La mayor parte de la magnetización remanente se eliminó entre temperaturas de 530 y 570 °C, lo que sugiere a las titanomagnetitas pobres en titanio como responsables de la magnetización.

Principales Resultados

Se determinaron con precisión las direcciones promedio para 26 de los 28 sitios (figura 3A). Todas las α_{95} son menores a 7.7° lo que indica baja dispersión de cada sitio y una alta estabilidad. Nueve sitios tienen magnetización de polaridad normal (Figura 3B) y otros nueve están inversamente magnetizados (Figura 3C). La dirección paleomagnética promedio de los sitios de polaridad normal es $I = -41.8^\circ$, $D = 4.9^\circ$,



$k=112$, $\alpha_{95}=4.9^\circ$, mientras que para los sitios inversamente magnetizados es $I=37.1^\circ$, $D=181.4^\circ$, $k=23$, $\alpha_{95}=11.1^\circ$. Se presentaron ocho sitios con magnetización de polaridad intermedia según el criterio de Johnson et al (2008) utilizando un ángulo de corte 45° en la latitud del VGP (Figura 3D).

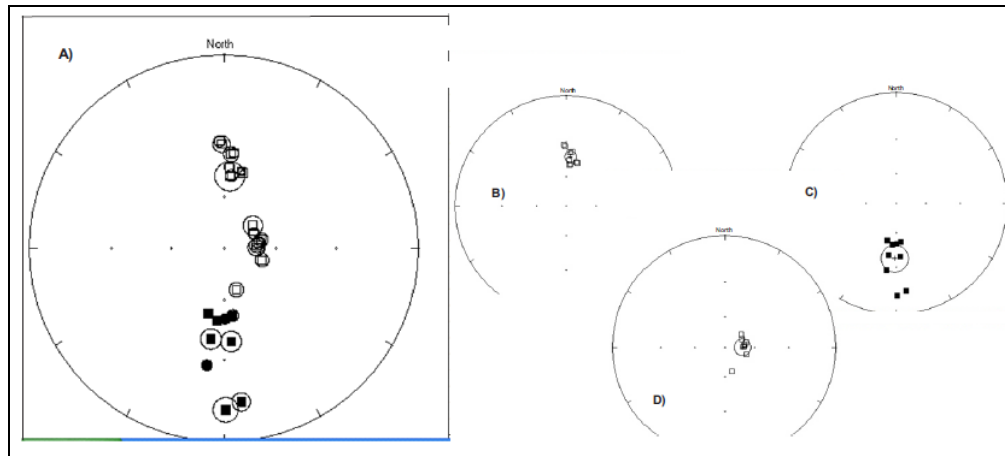


Figura 3. Curvas ortogonales de las desmagnetizaciones mediante campos alternos de muestras representativas (coordenadas estratigráficas).

La posición promedio del polo paleomagnético obtenida (Figura 4) es $Plong=179.2^\circ E$, $Plat=86.2^\circ S$, $R=17.74$, $k=64.56$, $A_{95}=4.3^\circ$. La distribución del polo geomagnético virtual (VGP) tiene un buen ajuste a una distribución de Fisher. La figura 4 muestra este polo junto a otros ya publicados para América de Sur. En general este polo coincide con las posiciones de otros polos, en particular con los reportados para Los Adobes, Misiones y SAMC. Sin embargo, existe un alejamiento respecto de otros polos paleomagnéticos de edad similar que pueden atribuirse a rotaciones tectónicas locales o muestreo insuficiente para descartar a la variación paleosecular. Ernesto et al. (1999) argumenta que los polos PMP son diferentes, lo que indica movimientos tectónicos no reconocidos. En conjunto, los polos PMP son significativamente diferentes a la posición del polo sugerida por la reconstrucción del *Hotspot* lo cual puede atribuirse a una deriva polar real o al movimiento del *Hotspot*, (Cervantes et al., 2010).

1. MIS: Misiones
2. SPB: Southern Parana Basin
3. CPB: Central Parana Basin
4. NPB: Northern Parana Basin
5. PGR: Ponta Grossa dikes (Brazil)
6. CPMP: Central Parana Magmatic (Brazil)
7. CAP: Central Alkaline Province, Paraguay
8. Cba: Sierras Pampeanas, Cordoba
9. FLD: Florianopolis dikes, Southern Brazil
10. Baq: Baqueró Group
11. LAd: Fm. Los adobes
12. SAEC: Mean South America Early Cretaceous
13. SAMC1: Mean S.A. Mid-Cretaceous
14. SAMC2: Mean S:A: Mid-Cretaceous
15. SALC: Mean S.A. Late Cretaceous
16. UY: Fm. Arapey
17. PY: Fm. Acaray

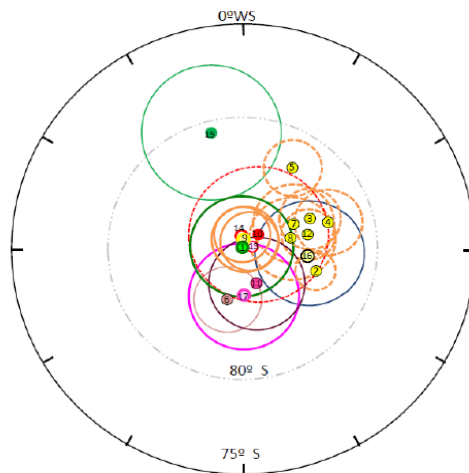


Figura 4. Polos Paleomagnéticos y círculos del 95% de confianza de la Formación Alto Paraguay y Polos Paleomagnéticos Cretácicos previamente reportados.

Se utilizó la metodología definida por Cox (1969) para calcular la variación paleosecular, además, para descartar cualquier afectación de algún artefacto metodológico (Biggin et al., 2008), se utilizó un ángulo de corte de 45° para separar la variación secular de los regímenes geomagnéticos intermedios (Johnson et



al., 2008). De esta forma, se obtuvo $S_B=9.9$ con $S_U=13.1$ y $S_L=8.0$ (límites inferior y superior) que coinciden con los datos reportados para el Súper Crón Normal Cretácico. Con estos resultados obtenidos se refuerza la hipótesis planteada por Biggin et al., (2008) acerca de un estilo diferente de variación secular durante (y antes) de CNS y se confirma la relación que existe entre la PSV y la frecuencia de las inversiones.

Bibliografía.

Anderson, D. L. (1994), Superplumes or supercontinents?, *Geology*, 22(1), 39-42, doi: 10.1130/0091-7613(1994)022<0039:SOS>2.3.CO;2.

Biggin, A. J., D. J., van Hinsbergen, C.G. Langerais, G.B. Straathof, and M.H.L. Deenen (2008), Geomagnetic secular variation in the Cretaceous Normal Superchron and in the Jurassic, *Physics Earth Planet. Int.*, 169(1-4), 3-19, doi:10.1016/j.pepi.2008.07.004.

Cervantes S. M., A. Goguitchaichvili, L. Sánchez Bettucci, R. Ruiz, M. Calvo-Rathert, V. Ruiz-Martinez, R. Soto, and L. Alva-Valdivia (2010), Paleomagnetism of early cretaceous Arapey formation (Northern Uruguay), *Studia Geophysica et Geodaetica*, 54(4), 533-546, doi:10.1007/s11200-010-0032-8.

Coffin, M., and O. Eldholm (1994), Large igneous provinces: crustal structure, dimensions, and external consequences, *Rev. Geophys.*, 32(1), 1-36, doi:10.1029/93RG02508.

Dunlop D. J. (2002), Theory and application of the Day plot (Mrs/Ms versus Hcr/Hc), Theoretical curves and tests using titanomagnetite data, *J. Geophys. Res.*, 107(B3) EPM4.1-EPM4.22, doi: 10.1029/2001JB000486.

Dunlop, D. J., and O.Özdemir, (1997), *Rock Magnetism Fundamentals and Frontiers*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Ernesto, M., I. B. Raposo, L. Marques, P. Renne, L. Diogo, and M. Min, (1999). Paleomagnetism, geochemistry and $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ dating of the Northeastern Paraná Magmatic Province, *J. Geodyn.*, 28, 321–340, doi:10.1016/S0264-3707(99)00013-7.

Johnson, C. L., C. G. Constable, L. Tauxe, R. Barendregt, L. L. Brown, R. S. Coe, P. Layer, V. Mejia, N. D. Opdyke, B. S. Singer, H. Staudigel, and D. B. Stone, (2008). Recent investigations of the 0-5 Ma geomagnetic field recorded by lava flows, *Geoch. Geophys. Geosyst.*, 9(4), ID Q04032, doi:10.1029/2007GC001696.

McFadden, P. L. and McElhinny, M. W., 1990. Classification of the reversal test in paleomagnetism. *Geophys. J. Int.* 103, 725-729.

Prévot, M., R. S. Maininen, S. Grommé, and A. Lecaille, (1983), High Paleointensities of the Geomagnetic Field From Thermomagnetic Studies on Rift Valley Pillow Basalts From the Mid-Atlantic Ridge, *J. Geophys. Res.*, 88(B3), 2316-2326, doi:10.1029/JB088iB03p02316.

Tamrat, E., and M. Ernesto, (1999), Magnetic fabric and rock-magnetic character of the Mesozoic flood basalts of the Paraná basin, Brazil, *J. Geodynam.*, 28(4-5), 419-437, doi:10.1016/S0264-3707(99)00019-8.

Thiede, D. S. and P. M. Vasconcelos, (2010), Paraná flood basalts: Rapid extrusion hypothesis confirmed by new $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ results, *Geology*, 38(8), 747–750, doi: 10.1130/G30919.1.