



ESTUDIO DE LA VARIACIÓN SECULAR DEL CAMPO MAGNÉTICO DE LA TIERRA REGISTRADA EN LA PROVINCIA MAGMÁTICA DE PARANÁ, AMÉRICA DEL SUR.

Cervantes Solano Miguel Angel¹, Gogichaisvili Avto², Sánchez Bettucci Leda³, Mena Mabel⁴, Aguilar Reyes Bertha² y Morales Contreras Juan².

¹ Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad Morelia, UNAM.

² Laboratorio Interinstitucional de Magnetismo Natural, UNAM

³ Universidad de la República, Uruguay

⁴ Universidad de Buenos Aires, Argentina

RESUMEN

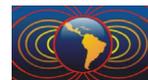
Actualmente se piensa que las inversiones de polaridad geomagnética ocurren espontáneamente como resultado de la acción normal de dinamo más que por un efecto externo. Si este es el caso, es de esperar que en los periodos en los que la frecuencia de las inversiones geomagnéticas sea sustancialmente diferente, dichos periodos se caractericen por diferentes formas de variación secular. Dos de estos periodos fueron el Súper Cron Normal Cretácico (CNS: 84-125 Ma) cuando el campo se encontraba predominantemente en un estado de polaridad y el periodo Jurásico (145-200 Ma) cuando las inversiones se presentaron con una rapidez promedio de 4.6 inversiones cada Ma. Sin embargo, aún no hay información disponible de los regímenes intermedios. A pesar de los incrementos recientes en cantidad y calidad de los datos paleomagnéticos, no todos son confiables y su distribución geográfica es muy escasa, particularmente en el hemisferio sur.

En el siguiente trabajo se reportan los resultados de un estudio paleomagnético y de variación paleosecular realizado a distintas formaciones geológicas pertenecientes a la Provincia Magmática de Paraná (PMP) con la finalidad de establecer posiciones más precisas de los polos paleomagnéticos estables de América del Sur y contribuir al estudio de la variación paleosecular del campo magnético de la Tierra durante el Cretácico temprano. El estudio consiste en el análisis de muestras recolectadas en las siguientes formaciones: la Formación Posadas en Misiones Argentina, la Formación Arapey en Uruguay y la Formación Alto Paraguay. Considerando en conjunto a estas tres formaciones, se puede afirmar que, en promedio, los polos paleomagnéticos encontrados concuerdan con los polos reportados anteriormente para la Provincia Magmática de Paraná mientras que las posiciones de los polos paleomagnéticos son diferentes a los esperados por las reconstrucciones realizadas a partir de la posición del hotspot. Los resultados del análisis de la variación secular nos sugieren un estilo diferente de variación secular durante y justo antes del Supercron Normal Cretácico, lo que apoya la afirmación de que existe una relación entre la variación paleosecular y la frecuencia de las inversiones geomagnéticas. Este trabajo fue financiado mediante el proyecto UNAM-PAPIIT IA102213.

Palabras clave: Paraná, Paleomagnetismo, Variación secular, Paleopolos

ABSTRACT

Currently it is thought that geomagnetic polarity reversals occur spontaneously as a result of normal dynamo action rather than by an external effect. In this case, it is expected those periods in which the geomagnetic reversals frequency is substantially different, such periods are characterized by different forms of secular variation. Two of these periods were the Cretaceous Normal Super Cron (CNS: 84-125 Ma) when the field was predominantly in a state of polarity and the Jurassic period (145-200 Ma) when the reversals occurred with a mean rate of 4.6 reversals per Ma. However, there is no information available from intermediate regimes. Despite recent increases in quantity and quality of paleomagnetic data, not all are reliable and their geographical distribution is very limited, particularly in the southern hemisphere.



We report the results of a paleomagnetic and paleosecular variation study carried out on different geological formations belonging to the Paraná Magmatic Province (PMP) in order to establish precise paleomagnetic pole positions for South America and contribute to the study of the paleosecular variation of the Earth's magnetic field during the early Cretaceous. The study involves the analysis of samples collected from the following formations: Posadas Formation in Misiones Argentina, Arapey Formation in Uruguay and Alto Paraguay Formation. Considering all these three formations, on average, the paleomagnetic poles found agree with previously reported poles for the Paraná Magmatic Province, while the paleomagnetic pole positions are different from those expected by the reconstructions made from hotspots positions. The results of the analysis of the secular variation suggest a different style of secular variation during and just before the Cretaceous Normal Superchron, supporting the hypotheses of a strong relation between the paleosecular variation and the frequency of geomagnetic reversals.

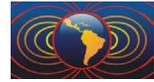
Keywords: Paraná, Paleomagnetism, Secular Variation, Paleopoles

Introducción

El estudio de las fluctuaciones del campo magnético de la Tierra en el pasado geológico es esencial para comprender el funcionamiento del Geodínamo, el cual está íntimamente ligado a las condiciones del núcleo líquido de la Tierra y aquellas en el límite entre el núcleo y el manto, (Hide, 1967; Courtillot y Besse, 1987; Gubbins, 1994; Glatzmaier, Roberts, 1995; Heller *et al.*, 2002). Estos datos proporcionan una fuente importante de información sobre el interior de la Tierra.

El Cretácico inferior puede ser considerado como un período clave para entender la evolución del campo magnético de la Tierra. Es decir, algunos problemas aún no resueltos están relacionados con la forma de variación paleosecular antes y durante el CNS (Supercrón Normal Cretácico). La compleja relación que existe actualmente entre la frecuencia de las inversiones, la variación secular, y paleointensidad podría expresarse con claridad durante el Supercrón Normal Cretácico (CNS; Tarduno *et al.*, 2002) cuando el ritmo en las inversiones fue casi nulo, sugiriendo que el Geodínamo debe tener dos estados fundamentales: uno reversible y uno no reversible (McFadden, Merrill, 1997). Larson y Olson (1991) sugirieron que el campo magnético dejará de cambiar de polaridad si la amplitud de la convección en el núcleo externo se eleva por encima de cierto umbral, y se especula que el CNS (es decir, el estado no reversible del Geodínamo) corresponde a un período de fuerte convección en el núcleo exterior de la Tierra. También se esperaría una paleointensidad del campo geomagnético anormalmente alta durante el CNS. Por lo tanto, nuevos datos paleomagnéticos de alta calidad correspondientes al Cretácico inferior son importantes para restringir la teoría del Geodínamo y para proporcionar un medio para comprender mejor la evolución a largo plazo del Geodínamo y así escalecer con evidencia fenomenológica las condiciones que originan la variabilidad del campo geomagnético, en particular las del núcleo líquido de la Tierra y las condiciones en la frontera entre el manto y el núcleo.

Una aproximación comúnmente aceptada para estimar la variación paleosecular (PSV) consiste en observar la desviación estándar de la desviación angular (ASD) de los polos geomagnéticos virtuales de un sitio en específico. Alguna combinación de componentes dipolares y no dipolares del campo geomagnético predice una ASD característica de la PSV en función de la latitud (McFadden *et al.*, 1988, 1991; Lawrence *et al.*, 2006). Sin embargo Johnson *et al.* (2008) realizaron una síntesis detallada de una nueva generación de datos paleomagnéticos para los pasados 5 Ma y mostraron que la dependencia latitudinal en la dispersión del polo geomagnético virtual VGP de estos datos tiene poca relevancia. Aunque existen datos ampliamente documentados para periodos recientes (p.ej. los últimos 10 Ma), períodos más antiguos están pobremente estudiados en términos de variación secular. Recientemente, Biggin *et al.* (2008) investigó en detalle dos intervalos clave, el Supercrón Normal Cretácico, (CNS: 84-125 Ma) y el Jurásico (145-200 Ma). En estos períodos la frecuencia de las inversiones fue dramáticamente diferente y por consecuencia se espera que muestren estilos diferentes de variación secular. En el Cretácico, en particular el periodo entre los 140 a 80



Ma, estuvo caracterizado por gran actividad magmática, rompimiento y apertura continental (Anderson *et al.*, 1992; Coffin, Edholm, 1994; Anderson, 1994). De igual forma el geodínamo pudo haberse encontrado en un estado inusual de alta energía durante el Cretácico inferior, resultando el Supercrón Normal Cretácico y una variación secular (PSV) anómalamente alta (McFadden *et al.*, 1991).

Contemporánea a este periodo de gran actividad geodinámica se desarrolla la Provincia Magmática de Paraná (PMP) y representa uno de los mayores volúmenes de piso continental basáltico en el mundo, cubriendo un área de cerca de 1.2×10^6 km², principalmente en Brasil, así como Uruguay, Paraguay y Argentina. Renne *et al.* (1992, 1996) mostraron que toda la PMP se formó en un intervalo de tiempo muy estrecho (133 a 132 Ma). Características geoquímicas relacionadas al hotspot actual de Tristan da Cunha y datos de tomografía sísmica sugieren que la provincia magmática Paraná fue originada por una pluma mantélica.

La PMP ha sido extensamente estudiada con más de 300 sitios en los cuales se registró el campo paleomagnético (Ernesto *et al.*, 1990). Algunos de los VGP's reportados en dichos estudios claramente no se ajustan a una distribución de Fisher, lo que sugiere, probablemente, que no se removieron componentes secundarias del

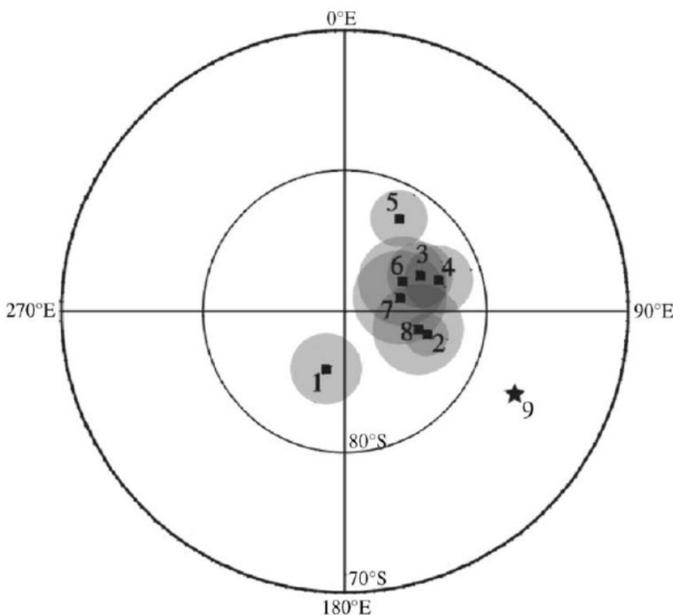


Figura 1. Polos paleomagnéticos de edades similares como se indica en la tabla 1. Se muestran los límites de confianza de Fisher α_{95} , la estrella es el Paleopolo para América del Sur calculado a partir de hotspots.

campo en los tratamientos magnéticos, o que existe una perturbación tectónica de los sitios muestreados y que no fue detectada (Alva-Valdivia *et al.*, 2003). Adicionalmente está el hecho de que el estudio de Ernesto *et al.*, 1990 se realizó utilizando solo tres muestras orientadas manualmente por cada sitio, muy lejos del estándar paleomagnético actual. Esto mismo puede argumentarse del estudio realizado por Mena *et al.*, (2011). La mayoría de los estudios disponibles provienen de la parte brasileña de la PMP, mientras que los datos disponibles de Argentina y Uruguay son limitados (Cervantes *et al.*, 2010). Los polos paleomagnéticos de PMP previamente reportados (Tabla 1) son significativamente diferentes a la posición estimada del Polo mediante reconstrucción de hotspot. No es claro si esta diferencia representa una real deriva polar o un movimiento del hotspot (fig. 1).

Principales Resultados

Formación Posadas, Misiones Argentina

Magnetismo de rocas.

Se obtuvieron 331 núcleos paleomagnéticos provenientes de 28 flujos de lava de la parte Argentina de la PMP. Las mediciones de susceptibilidad en campos bajos y en aire (curvas k-T), las curvas de adquisición de IRM y AF y la desmagnetización térmica detallada revelan que la magnetita o titanomagnetita pobre en titanio es el portador principal de remanencia. Algunos sitios exhiben componentes secundarios de polaridad opuesta a la ChRM portada por hematita y/o maghemita.



Ubicación		Edad (Ma)	N	Lat. (°N)	Long. (°E)	α_{95}	ASD (°)	Referencia.
Central PMP	1	~132	35	-85.7	197.9	2.6	8.5 + 1.7/-1.2	Alva-Valdivia (2003)
Sur PMP	2	~133	197	-84.0	106.2	1.5	12.1 + 0.9/-0.8	Raposo, Ernesto (1995)
Central PMP	3	~132	103	-84.1	64.4	2.3	13.1 + 1.4/-1.2	Raposo, Ernesto (1995)
Norte PMP	4	~132	92	-83.0	71.4	2.4	13.0 + 1.5/-1.2	Ernesto <i>et al.</i> (1999)
Ponta Grossa	5	~130	115	-82.4	30.3	2.0	12.2 + 1.2/-1.0	Raposo, Ernesto (1995)
Provincia Alcalina Paraguay	6	127-130	75	-85.4	62.3	3.1	15.0 + 1.9/-1.5	Ernesto <i>et al.</i> (1996)
Provincia de Córdoba Argentina	7	~125	55	-86.0	75.9	3.3	—	Geuna, Vizan (1998)
Kaoko basaltos	8	~132	—	-84.7	103.9	3.2	—	Gidskehaug <i>et al.</i> (1975)
<i>Hotspot</i>	9	~130	—	-76.7	116.4	—	—	Muller <i>et al.</i> (1993)

Tabla 1. Polos Paleomagnéticos de la Provincia Magmática de Paraná entre los 120-140 Ma previamente reportados

Paleodirecciones y polaridades magnéticas.

Los sitios mostraron poca dispersión dentro del sitio y alta estabilidad, se observan al menos tres intervalos de polaridad que se ajustan estadísticamente con una distribución de Fisher. Se obtuvo un nuevo Paleo Polo para el Cretácico inferior (339.1°E, 89.7°S, N = 26, K = 45.6, $\alpha_{95} = 4.2$) que concuerda con otras estimaciones confiables del Cretácico Inferior para América del Sur pero no corresponde con los polos del sur y del norte de la Cuenca de Paraná.

Dispersión angular de la variación secular.

Respecto del análisis del VGP, la trayectoria promedio del VGP muestra un ciclo casi completo alrededor del polo geográfico y pasa cerca de la ubicación de todos los polos publicados para la F. Serra Geral. Ambos polos paleomagnéticos, así como la media de la ruta son significativamente diferentes a las reconstrucciones del Paleo Polo propuestas mediante el uso del hotspot, esto puede deberse al desplazamiento o a una verdadera deriva polar del hotspot. La dispersión VGP, SB=11.68°, es menor que el valor esperado para esta latitud en el intervalo de 0-5Ma (McElhinny, McFadden, 1997), pero concuerda bien con el cálculo de Biggin *et al.*, (2008) para el Supercrón Normal Cretácico.

Formación Arapey, Uruguay

Magnetismo de rocas.

Se recolectaron 302 núcleos paleomagnéticos provenientes de 34 sitios distribuidos a lo largo de afloramientos cercanos a las carreteras en el Norte de Uruguay. Los valores de los campos destructivos sugieren granos de dominio pseudo sencillo como los portadores de la magnetización remanente o una mezcla de granos multidominio y una cantidad significativa de granos de dominio sencillo. Los experimentos y las observaciones microscópicas de susceptibilidad contra temperatura indican la presencia de titanomagnetitas pobres en Titanio.



Paleodirecciones y polaridades magnéticas.

En 29 de los 34 sitios las direcciones promedio de cada unidad se determinaron suponiendo una distribución de Fisher, con baja dispersión dentro de cada sitio y una alta estabilidad direccional. Diecinueve sitios tienen magnetización de polaridad normal mientras que diez se encuentran inversamente magnetizados. La posición del polo paleomagnético obtenido es: $\text{Plat} = -84.8^\circ$, $95.8^\circ = \text{Plong}$, $K = 42$, $\alpha_{95} = 4.2^\circ$ el cual concuerda con el polo esperado para el Cretácico temprano de América del Sur.

Dispersión angular de la variación secular.

Los parámetros de dispersión angular, $SB = 11.8^\circ$, coinciden en gran medida con los datos esperados para el Supercrón Normal Cretácico. Debido al escaso intervalo paleolatitudinal y la relativa baja calidad de los datos disponibles para ese periodo resulta muy delicado realizar una comparación similar con los datos del Jurásico.

Formación Alto Paraguay

Magnetismo de rocas.

221 núcleos paleomagnéticos estándar provenientes de 28 flujos de lava fueron recolectados en la parte Paraguaya de la PMP conocida como la Formación Alto Paraguay. Para todos los sitios estudiados, se puede pensar en la presencia de granos de dominio sencillo como portadores de la remanencia, o bien este comportamiento puede deberse a la presencia de una mezcla de granos multidominio y una cantidad significativa de granos de dominio sencillo así como la presencia de titanomagnetitas pobres en Titanio como responsables de la magnetización.

Paleodirecciones y polaridades magnéticas.

En 26 de los 28 sitios se determinaron con precisión las direcciones promedio mostrando baja dispersión angular y una alta estabilidad direccional. Nueve sitios presentan magnetización de polaridad normal, mientras que nueve sitios se encontraron magnetizados inversamente y ocho sitios con polaridades intermedias. La posición paleomagnética promedio obtenida de los 18 sitios es: $\text{Plong} = 179.2^\circ \text{ E}$, $\text{Plat} = 86.2^\circ \text{ S}$, $R = 17.74$, $k = 64.56$, $\alpha_{95} = 4.3^\circ$ el cual se ajusta razonablemente bien a una distribución de Fisher y concuerda razonablemente bien con las otras posiciones del polo de la parte Central de Paraná. Sin embargo, en conjunto, los polos son significativamente diferentes a los polos sugeridos por la reconstrucción del hotspot.

Dispersión angular de la variación secular.

Con base en los parámetros de dispersión angular, $SB = 9.9^\circ$, se observa que coincide bastante bien con datos reportados para el Supercrón Normal Cretácico. Hacer una comparación similar con el Jurásico es complicado debido a la limitación en la escasa distribución paleolatitudinal y la baja calidad de los datos disponibles.

Conclusiones

Considerando globalmente a los resultados obtenidos podemos hacer las siguientes afirmaciones:

- Los experimentos de magnetismo en rocas indican que la magnetita o titanomagnetita pobre en titanio es el portador principal de remanencia. Algunos sitios muestran la presencia de hematita o titanomaghemita.
- A grandes rasgos, los polos obtenidos en este estudio para PMP, concuerdan bien con otros Polos previamente publicados. Sin embargo son significativamente diferentes a las posiciones sugeridas por reconstrucciones del Hotspot, esto puede deberse a la existencia de una verdadera deriva polar, al movimiento de la posición del hotspot o bien a rotaciones tectónicas locales así como a un muestreo insuficiente para descartar los efectos de la variación paleosecular, ver Tabla 2, Figura 2.

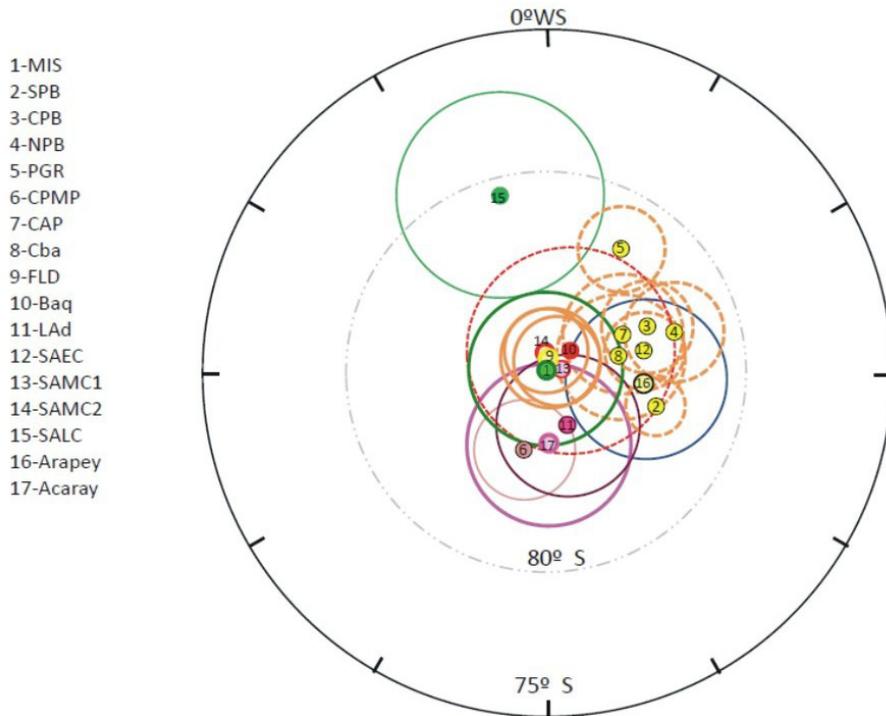
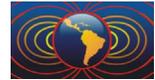


Figura 2. Polos paleomagnéticos con su correspondientes círculos del 95% de confianza de las Formaciones estudiadas y polos paleomagnéticos del Cretácico previamente publicados, ver Tabla 2.

- Un análisis conjunto de datos paleomagnéticos publicados disponibles indica que la variación secular, no aporta evidencias que refuerzan la hipótesis de una alta variación secular anómala en bajas latitudes en gran parte del Cretácico.
- Nuestro registro del campo geomagnético previo al CNS es suficiente para concluir que probablemente la variación secular fue bastante diferente de la observada en el periodo de 0-5 Ma. Esto apoya la hipótesis de que hay una relación entre la PSV y la frecuencia de las inversiones y, en consecuencia, que la PSV es una herramienta de primer orden para determinar la estabilidad del campo geomagnético en el pasado (fig. 3).

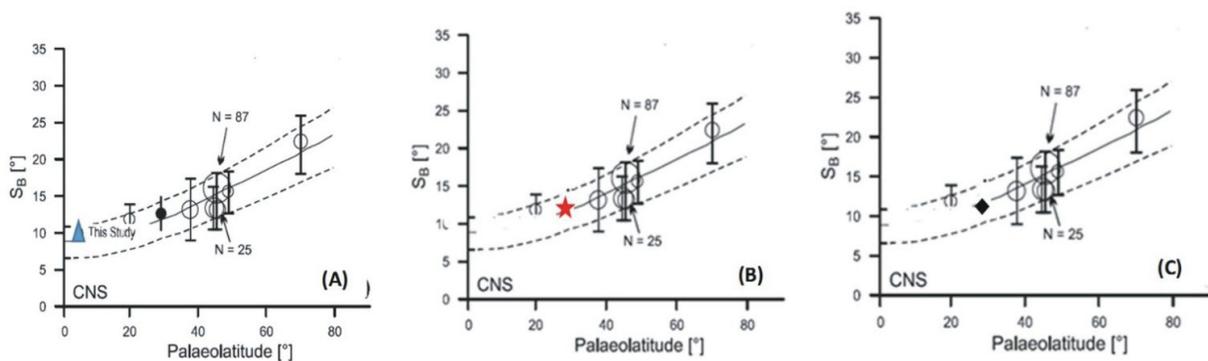
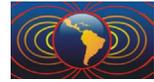


Figura 3. Dispersión angular (SB) del VGP debida al PSV calculada según Biggin (2008) para el Supercrón Normal Cretácico (CNS) y las encontradas en este estudio: (A) Formación Posadas SB= 11.68°; (B) Formación Arapey SB = 11.8° y (C) Formación Alto Paraguay SB = 9.9°.



Localidad	P	long E	lat S	α_{95}	Edad (Ma)	Referencias
MIS: Misiones	1	339.1	89.7	4.2	?	<i>Mena et al, 2010</i>
SPB: Southern Paraná Basin	2	106.2	84	1.5	~133	<i>Raposo & Ernesto, 1995</i>
CPB: Central Paraná Basin	3	64.4	84.1	2.3	~132	<i>Raposo & Ernesto, 1995</i>
NPB: Northern Paraná Basin	4	71.4	83	2.4	132	<i>Ernesto et al., 1999.</i>
PGR: Ponta Grossadikes (Brazil)	5	30.3	82.4	2	129-131	<i>Raposo & Ernesto, 1995</i>
CPMP: Central Paraná Magmatic Province, Brazil	6	197.9	85.7	2.6	132-133	<i>Alva-Valdivia et al., 2003</i>
CAP: Central AlkalineProvince, Paraguay	7	62.3	85.4	3.1	127-130	<i>Ernesto et al., 1996.</i>
Cba: Sierras Pampeanas, Córdoba	8	75.9	86	3.3	~130	<i>Geuna&Vizán 1998</i>
FLD: Florianopolis dikes, Southern Brazil	9	3.3	89.1	2.7	119-128	<i>Raposo et al., 1998</i>
Baq: BaqueróGroup	10	42.7	88.2	5.5	119	<i>Somoza et al., 2005</i>
LAd: Fm. Los adobes	11	159	87	3.8	112-130	<i>Geuna et al., 2000</i>
SAEC: Mean South America Early Cretaceous	12	76.4	84.7	2	135-130	<i>Somoza &Zaffarana, 2008</i>
SAMC1: Mean S.A. Mid-Cretaceous	13	33.8	89.1	2.4	125-100	<i>Somoza &Zaffarana, 2008</i>
SAMC2: Mean S:A: Mid-Cretaceous	14	354.1	88.7	2.3	125-100	<i>Somoza &Zaffarana, 2008</i>
SALC: Mean S.A. Late Cretaceous	15	345.1	80.6	4.3	85-65	<i>Somoza &Zaffarana, 2008</i>
UY: Fm. Arapey	16	95.8	84.8	4.2	~130	<i>Cervantes et al., 2010</i>
PY: Fm. Alto Paraguay	17	179.2	86.2	4.2	~134	<i>Este estudio</i>

Tabla 2. Polos Paleomagnéticos encontrados en este estudio y previamente publicados. P = número asignado a cada polo paleomagnético (PP) en la Figura 2, long E, lat S. α_{95} = longitud, latitud y semiángulo de confianza del 95% de los Paleopolos.

BIBLIOGRAFÍA.

- Alva-Valdivia L.M., Goguitchaichvili A., Urrutia-Fucugauchi J., Riisager J., Riisager P., 2003. Paleomagnetic poles and paleosecular variation of basalts from Paraná Province, Brazil: geomagnetic and geodynamic implications. *Phys. Earth Planet. Inter.* 138, 183-196.
- Anderson, D. L., 1994. Superplumes or supercontinents?, *Geology*, 22 (1), 39-42.
- Anderson, D. L., T. Tanimoto, y Y. Zhiang., 1992. Plate tectonics and hotspots: the third dimension, *Science*, 22 (1), 39-42.
- Biggin, A. J., D. J., van Hinsbergen, C.G. Langerais, G.B. Straathof, y M.H.L., Deenen., 2008. Geomagnetic secular variation in the Cretaceous Normal Superchron and in the Jurassic. *Physics Earth Planet. Int.*, 169, 3-19.
- Cervantes S. M., A. Goguitchaichvili, L. Sánchez Bettucci, R. Ruiz, M. Calvo-Rathert, V. Ruiz-Martinez, R. Soto, y L. Alva-Valdivia., 2010. Paleomagnetism of early cretaceous Arapey formation (Northern Uruguay). *Studia Geophysica et Geodaetica*, 55, No. 2, 533-546.
- Coffin, M., and O. Eldholm., 1994. Large igneous provinces: crustal structure, dimensions, and external consequences. *Rev. Geophys.*, 32 (1), 1-36.
- Courtillot, V., Besse, J., 1987. Magnetic field reversals, polar wander, and core-mantle coupling. *Science*, 237, 1140-1147.
- Ernesto, M., L.S. Marques, Piccirillo, E.M., Molina, N. Ussami, , P. Comin-Chiaramonti, & G. Bellieni., 2002. Paraná magmatic province Tristan da Cunha plume system: fixed versus mobile plume, petrogenetic



- considerations and alternative heat sources. *J. Volc. Geotherm. Res.* 118, 15-36.
- 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.
- Ernesto, M., I. G. Pacca, F. Y. Hyodo, and A. J. R. Nardy., 1990. Paleomagnetism of the Mesozoic Serra Geral Formation, southern Brazil, Phys. *Earth Planet. Inter.*, 64, 153-175.
- Ernesto, M., Pacca, I.G., 1988. Paleomagnetism of the Paraná Basin flood volcanics, Southern Brasil. En: Piccirillo, E.M., Melfi, A.J. (Eds.), *The Mesozoic Flood Volcanism of the Paraná Basin: Petrogenetic and Geophys. Aspects.* IAG-USP Press, Sao Paulo, Brazil, 229-255.
- Glatzmaier, G. A., y P. H. Roberts., 1995. A three-dimensional convective dynamo solution with rotating and finitely conducting inner core and mantle. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 91, 63-75.
- Gubbins, D., 1994. Geomagnetic polarity reversals: A connection with secular variation and core-mantle interaction?, *Reviews of Geophysics*, 32, 1-18.
- Heller, R., Merrill, R.T., McFadden, P.L., 2002. The variation of intensity of Earth's magnetic field with time, *Phys. Earth Planet. Int.*, 131, 237-249.
- 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, y D. B. Stone., 2008. Recent investigations of the 0-5 Ma geomagnetic field recorded by lava flows. *Geoch. Geophys. Geosyst.*, 9(4), 1-31.
- Larson, R.L., y P. Olson, 1991. Mantle plumes control magnetic reversal frequency. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 107, 437-447.
- McElhinny M. W., y P. L. McFadden, 1997. Palaeosecular variation over the past 5 Myr based on a new generalized database. *Geophys. J. Int.*, 131, 240–252.
- McFadden, P.L., Merrill, R.T., 1997. Asymmetry in the reversal rate before and after the Cretaceous normal polarity superchron. *Earth. Planet. Sci. Lett.*, 149, 43-47.
- McFadden, P. L., Merrill, R. T. McElhinny, M. W., y S. Lee., 1991. Reversals of the Earth's magnetic field and temporal variations of the dynamo families. *J. Geophys. Res.*, 96, 3923- 3933.
- Renne, P.R., Decart, K.; Ernesto, M.; Féarud, G. y Piccirillo, E.M., 1996. Age of the Ponta Grossa dike swarm (Brazil), and implications to Paraná flood volcanism. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 144, 199-212.
- Renne, P.R., Ernesto, M., Pacca I.G., Coe, R.S., Glen, J.M., Prévot M. y Perrin M., 1992. The Age of Paraná Flood Volcanism, Rifting of Gondwanaland, and the Jurassic-Cretaceous Boundary. *Science* 258, 975-979.
- Tarduno, J. A., Cottrell, R. D. y Smirnov, A. V., 2002. The Cretaceous superchron geodynamo: observations near the tangent cylinder. *PNAS*, 99, 14020-14025.