

## PROPIEDADES MAGNÉTICAS DE MONOCRISTALES DE FELDESPATO Y SUS IMPLICACIONES PARA EL REGISTRO MAGNÉTICO EN CUERPOS INTRUSIVOS

Christian Merino<sup>1\*</sup>, Vincenzo Costanzo<sup>1</sup> y Ricardo Da Trindade<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidad Simón Bolívar. \*[christian.merino1508@gmail.com](mailto:christian.merino1508@gmail.com)

<sup>2</sup> Universidad de São Paulo.

### RESUMEN

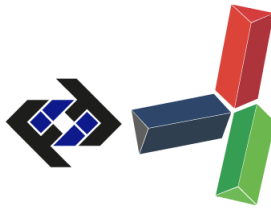
En el presente estudio se llevaron a cabo medidas de la magnetización remanente natural (MRN), magnetización remanente anhística (ARM), magnetización remanente isotermal (IRM), datos de histéresis, curvas de inversión de primer orden (F.O.R.C) y datos de anisotropía de susceptibilidad magnética (ASM) en 21 cristales de feldespato recolectados en un afloramiento de Morungaba al sureste de Brasil en el Estado de São Paulo. Los valores de intensidad MRN, ARM e IRM resultaron ser mayores que el límite de detección práctico de los magnetómetros disponibles comercialmente ( $\approx 4 \cdot 10^{-12} \text{ Am}^2$ ), por lo tanto contienen una cantidad significativa de partículas ferromagnéticas. Se reveló que las partículas magnéticas contenidas se presentan con una mezcla de estructuras de tipo PSD-MD con interacciones magnetostáticas mínimas. El conjunto de los resultados sugiere la realización de un gran muestreo para disminuir el sesgo de la dirección de las inclusiones magnéticas, pues se determinó que el 35% de los cristales presenta diferentes direcciones preferenciales. En general, los resultados de este estudio proponen que los cristales de feldespato poseen el potencial para preservar información paleomagnética fiable durante miles de millones de años (Ma).

*Palabras Clave: Granito de Morungaba, magnetismo de rocas, propiedades magnéticas, cristales de feldespato, inclusiones de óxido.*

### ABSTRACT

In the present study, measurements of natural remanent magnetization (NRM), anhysterical remanent magnetization (ARM), isothermal remanent magnetization (IRM), hysteresis data, first order reversal curves (F.O.R.C) and anisotropy of magnetic susceptibility (ASM) were carried out in 21 feldspar crystals collected in an outcrop of Morungaba in southeastern Brazil. The MRN, ARM and IRM intensity values were found to be higher than the practical detection limit of commercially available magnetometers ( $\approx 4 \cdot 10^{-12} \text{ Am}^2$ ), therefore they contain a significant amount of ferromagnetic particles. It was revealed that the contained magnetic particles are presented with a mixture of PSD-MD type structures with minimal magnetostatic interactions. The set of results suggests the realization of a large sampling to diminish the bias of the direction of the magnetic inclusions, since it was determined that 35% of the crystals present different preferential directions. In general, the results of this study propose that feldspar crystals have the potential to preserve paleomagnetic information for thousands of millions of years (myr).

*Keywords: Granite of Morungaba, magnetism of rocks, magnetic properties, feldspar crystals, oxide inclusions.*



## INTRODUCCIÓN

El paleomagnetismo consiste en el estudio del campo magnético terrestre del pasado mediante el análisis de las magnetizaciones en rocas. Esto se logra dado que los minerales magnéticos graban información sobre el campo geomagnético de la época en que la roca se formó. Así, la magnetización permanente adquirida puede ser investigada y la propia historia del magnetismo terrestre puede ser elucidada. La interpretación de los datos paleomagnéticos no solo da lugar al conocimiento del magnetismo terrestre, sino que también permite obtener resultados concernientes a la historia geológica de las rocas estudiadas [4].

La base fundamental de esta ciencia se centra en el estudio de las propiedades de los materiales ferromagnéticos; por lo tanto el tamaño, la forma y la dispersión de los granos dentro de las rocas afectan sus características magnéticas. Sin embargo, a pesar de los éxitos de esta técnica, estudiar los registros paleomagnéticos más antiguos puede ser complicado. Muchas veces, las rocas suelen estar alteradas por metamorfismo u oxidación, lo cual impide la determinación fiable del paleomagnetismo y disminuye la cantidad de rocas bien preservadas [8].

Usualmente se prefieren rocas volcánicas máficas en estudios paleomagnéticos debido a su remanencia estable. Desafortunadamente, el principal óxido mineral en la mayoría de las rocas graníticas es la magnetita de grano grueso que, en general, posee baja estabilidad magnética y tiende a ser susceptible a sobreimpresión por remanencia más joven [8].

La mineralogía magnética de las rocas graníticas, y en especial los cuerpos plutónicos, presentan un registro magnético complejo con diferentes componentes de magnetización remanente natural. Parte de esta magnetización se registra en granos magnéticos grandes, de cristalización tardía con estructuras multidominio (MD) y típicamente inestables. Otra parte reside en granos submilimétricos en estado de dominio simple que ocurren como inclusiones en los cristales [8].

A raíz de este problema, en las últimas décadas muchas investigaciones se han centrado en experimentos sobre inclusiones magnéticas contenidas en cristales de silicato, como piroxeno [5], plagioclasas [8], circón [6] y olivino [7] utilizándolas como marcadores de intensidad del campo geomagnético en diferentes edades, basándose en que las muestras de roca total suelen estar alteradas y contienen minerales magnéticos secundarios.

Sin duda comprender las propiedades magnéticas de un cristal durante su interpretación es complicado; los estudios de las diferentes componentes de magnetización en un registro magnético por cuerpos intrusivos son limitados y poco conocidos. Por ello, el objetivo de este trabajo se concentra en el estudio de las inclusiones de hierro en silicatos diamagnéticos (feldespatos) en intrusiones con señal remanente multivectorial compleja del Granito de Morungaba.

## METODOLOGÍA

Se escogió un bloque de granito porfírico orientado de un afloramiento en Morungaba al sureste

### SECRETARÍA DE LAS JORNADAS.

Coordinación de Investigación .Edif. Física Aplicada. Piso 2. Facultad de Ingeniería.

Universidad Central de Venezuela. Ciudad Universitaria de Caracas. 1053

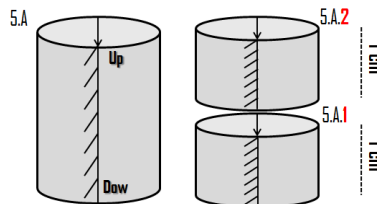
Telf.: +58 212-605 1644 | <http://www.ing.ucv.ve>

de Brasil (ver figura 1). En el laboratorio se perforó para la retirada de núcleos cilíndricos. Se buscó discriminar cristales de matriz; para ello se perforaron dos tipos de diámetro: 0,5 cm para encontrar los cristales con la mayor pureza posible y 3 cm para la matriz.



**Figura 1.** Muestra estudiada del Granito de Morungaba.

Se perforaron 20 núcleos de menor diámetro que se identificaron con números arábigos (1, 2, 3,...) y 6 de mayor diámetro que se clasificaron con números romanos (I, II, III,...). Posteriormente, se cortaron en especímenes de 1 cm de altura con la intención de discriminar los cristales de la matriz, de esta forma, se ordenaron con letras (A, B, C,...) y números arábigos (1, 2, 3,...) de base a tope como se muestra en el ejemplo de la figura 2.



**Figura 2.** Clasificación sistemática de las muestras realizadas en la Litoteca del IAG-USP.

Finalmente el número total de las muestras fue de 143, de las cuales 113 son de menor diámetro y 30 son de mayor diámetro. De esta manera se distinguieron 21 cristales y 122 muestras de matriz que incluye 92 de menor diámetro y 30 de 3 cm de diámetro.

Para la medición de la anisotropía de susceptibilidad magnética (ASM) se utilizó el susceptómetro MFK1-FA Multi-Function Kappabridge de AGICO en el que a partir de cuatro medidas (susceptibilidad magnética a lo largo de tres planos perpendiculares y la susceptibilidad volumétrica) se proporcionaron los datos necesarios para generar un tensor de ASM. La adquisición se realizó para todas las muestras de mayor diámetro y, de menor diámetro, únicamente 20 cristales y 75 de matriz a través del software SAFYR, se analizaron en el software ANISOFT 4.2 y los errores estadísticos se calcularon a partir de un ajuste por mínimos cuadrados que ofrece el programa.

La desmagnetización por campos alternos (AF) se realizó en un desmagnetizador rotativo LDA-3A de AGICO y las medidas de magnetización se realizaron en el magnetómetro SQUID de sensibilidad  $10^{-12}$  Am<sup>2</sup> alojado en una sala magnética blindada (< 1000 nT) del Laboratorio de Paleomagnetismo de la Universidad de São Paulo para que, durante los procedimientos

realizados, no existiese remagnetización residual de los especímenes. De modo general, las etapas de desmagnetización siguieron los pasos 0 mT; 2,5; 3; 5; 7; 9; 10; 12,5; 15; 18; 21; 25; 30; 35; 40; 45; 50; 60; 70; 80 y 90 mT.

Se desmagnetizaron 15 especímenes de cristal y 15 de matriz de menor diámetro, posterior a la desmagnetización progresiva de las muestras, se buscó la estabilidad de la magnetización remanente a partir de dos tipos de proyecciones vectoriales que se generaron en el software Remasoft (estereográfica de Lambert y triortogonal de Zijdzerveld), además, se calculó la dirección paleomagnética media basada en las estadísticas de Fisher (1953), el parámetro estadístico de precisión ( $k$ ) y el límite de confiabilidad ( $\alpha_{95}$ ) tanto para los cristales como la matriz.

Para la magnetización remanente anhistérica (ARM) se sometieron 5 cristales y 5 muestras de matriz a la acción de un campo directo de  $100\mu\text{T}$  bajo la presencia de un campo magnético alterno, que paulatinamente se redujo a cero a través de un desmagnetizador rotativo LDA-3A de AGICO y cuya magnetización remanente posterior a cada etapa de inducción se midió en el magnetómetro SQUID. Seguidamente, se generaron espectros de coercividad en el software MAX UnMix para las muestras analizadas, así, se determinó la distribución de las coercividades y su respectivo parámetro de dispersión.

La magnetización remanente isoterma (IRM) fue la única etapa que se realizó en el laboratorio de paleomagnetismo de la Universidad Simón Bolívar (USB), en el cual, se magnetizaron 5 cristales y 5 muestras de matriz utilizando el magnetizador por pulsos ASC Scientific Model IM 10-30 Impulse Magnetizer. Acto seguido, se midieron los valores correspondientes del IRM para cada espécimen en el magnetómetro de giro Molspin Limited, colocando las muestras en 6 posiciones distintas dentro de la bobina del equipo.

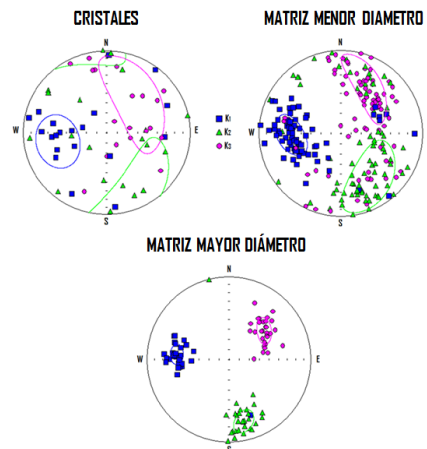
Las curvas de histéresis y las curvas de inversión de primer orden se midieron para 3 cristales y 3 muestras de matriz en un magnetómetro de muestra vibrante (VSM) fabricado por la MOLSPIN y que posee una sensibilidad de  $0,5 \mu\text{emu}$  a 1 segundo por punto. Así, con el software MicroMag VSM se generaron las curvas de histéresis y con el programa FORCinel en su versión 3.0 [3] se generaron los diagramas FORC.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presenta una compilación de los resultados obtenidos de las diversas metodologías empleadas. Se exponen estudios que contemplan análisis de la mineralogía magnética, de las componentes de magnetización, del magnetismo remanente natural, datos de anisotropía de susceptibilidad magnética y curvas de inversión de primer orden tanto para los cristales como la matriz del Granito de de Morungaba.

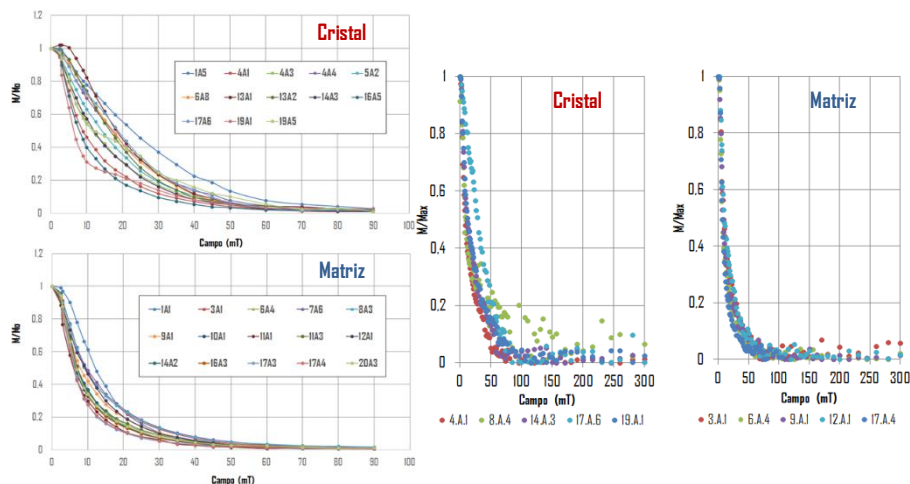
Los valores de la susceptibilidad magnética media alcanzan mayores valores en las muestras de matriz. Pese a esto, los cristales poseen una contribución ferromagnética significativa  $K_m = (1.249 \pm 368)$  SI. Con respecto a los valores vectoriales de la ASM, se encontró el mejor

agrupamiento de los ejes de susceptibilidad magnética máxima ( $K_1$ ), intermedia ( $K_2$ ) y mínima ( $K_3$ ) en las muestras de matriz de mayor diámetro (ver figura 3). Así, se explica que todos los especímenes se encuentran influenciados por el mismo evento metamórfico pues, en términos generales, se indica la misma fábrica magnética posiblemente asociada a la misma fase del magmatismo brasiliano durante el Neoproterozoico.



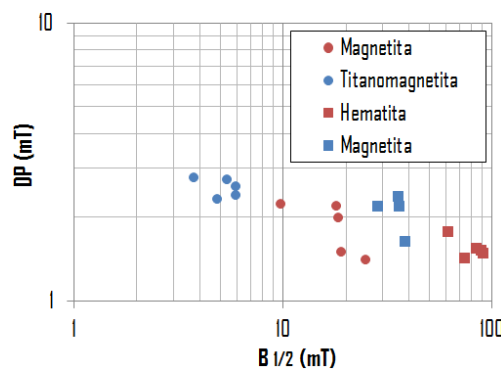
**Figura 3.** Comparación entre los datos vectoriales de los ejes  $K_1$ ,  $K_2$  y  $K_3$  de los cristales y de las muestras de matriz del Granito de Morungaba.

En términos generales todas las muestras se desmagnetizaron por completo en campos de hasta 90 mT y, como consecuencia, la desmagnetización por campos alternos se mostró eficiente al momento de separar las componentes (ver figura 4). Al analizar los resultados de esta metodología se evidencia que los cristales poseen un campo medio destructivo (MDF) relativamente mayor a los de las muestras de matriz y, se propone que, la leve diferencia en el decaimiento de la intensidad de los cristales se asocia a diferencias en el tamaño que presentan dichos minerales magnéticos, pues como indica Dunlop (1983) esta conducta bimodal se debe a una mezcla de granos con comportamientos PSD-MD. También se revela que los cristales exhiben menores tamaños de granos magnéticos en comparación a la matriz.



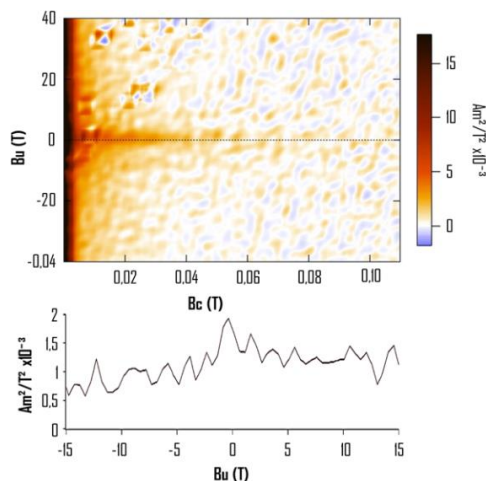
**Figura 4.** Curvas de intensidad de la magnetización normalizada versus el campo aplicado producto de la desmagnetización por campos alternos (izquierda) y de la ARM (derecha).

El análisis de la ARM de las muestras analizadas muestra la presencia de dos componentes. De este modo, se reveló la existencia de una componente magnética intermedia para los cristales que varía de 9,83 a 25,00 mT con un parámetro de dispersión (DP) entre 1,40 y 2,22 el cual se asocia a magnetita, y una componente mayor no observada en la matriz entre 61,55 y 90,69 mT con un parámetro de dispersión (DP) que abarca de 1,42 a 1,77 mT la cual se atribuye a la presencia de hematita. Es decir, a diferencia de los cristales las muestras de matriz presentan componentes menores no asociadas a la presencia de hematita; estos resultados se exponen en la figura 5.



**Figura 5.** Parámetro de dispersión (DP) versus la coercividad media ( $B_{1/2}$ ) de las componentes magnéticas encontradas para los cristales (rojo) y la matriz (azul) del Granito de Morungaba.

Al observar los diagramas FORC de los cristales (ver figura 6), se observa un pico central característico de estructuras de dominio múltiple (MD) con presencia de partículas magnéticas de bajas coercividades. Además, se hacen evidentes perfiles verticales simétricos en todos los especímenes producto de interacciones magnetostáticas no relevantes.

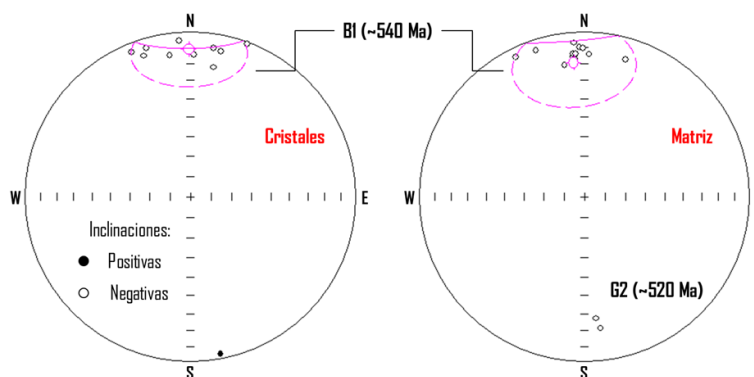


**Figura 6.** Diagrama FORC y perfil vertical ( $B_c=20\text{mT}$ ) típico de los cristales.

Con respecto a las componentes de magnetización, se evidencia en la figura 7 que en la mayoría

de los especímenes se presentan direcciones norte e inclinaciones negativas, esto se cree corresponde a la componente B1 ( $\approx 540$  Ma) observada en el Granito de Ramada del Grupo Bom Jardim al sureste de Brasil [2]. Además, en las muestras de matriz se distingue una componente revertida, que se asocia a la dirección característica G2 ( $\approx 520$  Ma) encontrada por [1] en diferentes rocas ígneas Neoproterozoicas del Complejo Itaqui del Estado de São Paulo.

Estos resultados sugieren que las componentes observadas representan un componente antiguo, pues se demostró la existencia de una magnetización primaria no viscosa debido al cambio de polaridad. Se observa también que los cristales se cerraron magnéticamente antes que la matriz ya que la edad datada para la dirección de la componente revertida resulta menor.



**Figura 7.** Direcciones magnéticas encontradas de las muestras del Granito de Morungaba. Además, se asocian las direcciones características de edades Neoproterozoicas encontradas por [1] y [2].

## CONCLUSIONES

A partir de las medidas de la magnetización remanente natural (MRN), magnetización remanente anhística (ARM), magnetización remanente isothermal (IRM), datos de histéresis, curvas de inversión de primer orden (FORC) y datos de anisotropía de susceptibilidad magnética (ASM) se logró describir y comparar las propiedades magnéticas de 21 cristales de feldespato (microclina) de un afloramiento de Morungaba al sureste de Brasil en el Estado de São Paulo.

Los valores de intensidad para los cristales lograron ser mayores que el límite de detección práctico de los magnetómetros disponibles comercialmente ( $\approx 4.10^{-12}$  Am<sup>2</sup>), pues, contienen una cantidad significativa de minerales ferromagnéticos. La MRN varió de  $3,42.10^{-07}$  Am<sup>2</sup> a  $4,23.10^{-06}$  Am<sup>2</sup> y la ARM de  $1,20.10^{-09}$  Am<sup>2</sup> a  $5,39.10^{-07}$  Am<sup>2</sup>.

Se determinó que la media de las direcciones posee una menor dispersión para las muestras de matriz, puesto que el valor del semiángulo de confianza  $\alpha_{95}$  fue  $4,98^\circ$  y el parámetro de precisión k de 88,82 en comparación al valor determinado por los cristales ( $\alpha_{95}=5,88^\circ$ ,  $k=70,27$ ). Por esto para futuros estudios paleomagnéticos en cristales se recomienda analizar la anisotropía de la remanencia magnética para disminuir el posible sesgo de la misma.

Se delimitó que las componentes observadas representan el campo magnético antiguo debido a la reversión de la dirección encontrada en las muestras de matriz. Además, a partir de las edades datadas de las direcciones características, se definió que los cristales se cerraron magnéticamente antes que la matriz del Granito de Morungaba.

Al analizar los espectros de coercividad de la ARM, se encontró una fracción de mayor coercividad de los cristales en comparación a las muestras de matriz. Esta fracción se presenta con una media de  $B_{1/2}$  de 79,72 mT y un parámetro de dispersión (DP) de 1,55 la cual se atribuye a hematita.

Las mediciones de los cristales de feldespato revelan que las partículas se encuentran con una mezcla de partículas PSD-MD con interacciones magnetostáticas mínimas, por lo tanto poseen el potencial para preservar información paleomagnética fiable durante miles de millones de años.

Finalmente, se aconseja para futuros estudios con enfoque monocristalino promediar una mayor cantidad de datos, pues se demostró que 35% de los cristales presentan diferentes direcciones preferenciales de las inclusiones magnéticas, pues, las partículas magnéticas se encuentran usualmente en forma de barras y su alineación está controlada por las orientaciones cristalográficas de su silicato huésped.

## REFERENCIAS

- [1] Correia, P. D. B. y Ernesto, M. (1998). Paleomagnetismo e idades k-ar do complexo intrusivo itaquí, Estado de São Paulo. *Revista Brasileira de geociência*, 28:495-502.
- [2] D' Agrella, M. y Pacca, I. (1988). Paleomagnetism of the Itajai, Castro and Bom Jardim Groups from southern Brazil. *Geophysical Journal International*, 93:365-376.
- [3] Harrison, R. J. y Feinberg, J. M. (2008). FORCinel: an improved algorithm for calculating first-order reversal curve distribution using locally weighted regression smoothing. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*.
- [4] Irving, E. (1964). *Paleomagnetism and its application to geological and geophysical problems*. Wiley.
- [5] Muxworthy, A. y Evans, M. (2013). Micromagnetics and magnetomineralogy of ultrafine magnetite inclusions in the modipe gabbro. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, pp.921-928.
- [6] Sato, M., Yamamoto, S., Yamamoto, Y., Ohno, M., Tsunakawa, H., y Maruyama, S. (2015). Rock-magnetic properties of single zircon crystals sampled from the tanzawa tonalitic pluton, central Japan. *Earth, Planets and Space*, p. 150.
- [7] Tarduno, J., Cottrell, R., y Smirnov, A. (2012). The paleomagnetism of single silicate crystals: recording geomagnetic field strength during mixed polarity intervals, superchrons, and inner core growth. *Reviews of Geophysics*.
- [8] Usui, Y., Shibuya, T., Sawaki, Y., y Komiya, T. (2015). Rock magnetism of tiny exsolved magnetite in plagioclase from a paleoarchean granitoid in the pilbara cratón. *Geochemistry, Geophysics Geosystems*, pp. 112-125.