

## **Utilidad de los valores de susceptibilidad magnética para el análisis petrográfico de muestras del basamento de la corteza de intemperismo**

### **Utility of magnetic susceptibility values for the petrographic analysis of weathering crust basement samples**

Alfredo Hernández-Ramsay<sup>1</sup>, Emilio R. Escartín-Sauleda<sup>2</sup>, Martha L. Gutiérrez-Herrero<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Empresa Geominera Oriente. Santiago de Cuba, Cuba.

<sup>2</sup>Universidad Tecnológica de La Habana, Cuba.

---

#### **Resumen**

Este artículo expone el poder resolutivo de las mediciones de la susceptibilidad magnética en muestras de minerales del basamento del perfil de meteorización laterítica, como un elemento de análisis complementario en la caracterización petrográfica de las rocas y de utilidad en el mapeado de las heterogeneidades magnéticas del basamento. La comparación de los datos de la susceptibilidad magnética con los datos petrográficos de diferentes muestras reveló que aun en muestras que corresponden a litotipos homogéneos se pueden manifestar grandes heterogeneidades y diferencias desde el punto de vista físico-mineralógico. De modo general, se observó una alta concordancia entre la intensidad de los procesos de intemperismo en las muestras de rocas y los valores de la susceptibilidad magnética de tales muestras. Los resultados sustentan la posibilidad de extrapolar la información de composición a muestras con mediciones de susceptibilidad magnética y sin estudios petrográficos.

**Palabras clave:** susceptibilidad magnética; cortezas de intemperismo; lateritas; Cuba oriental.

## **Abstract**

This article exposes the resolving power of the magnetic susceptibility measurements in basement minerals samples of the lateritic weathering profile as an element of complementary analysis in the petrographic characterization of the rocks, and useful in the mapping of the magnetic heterogeneities of the basement. The comparison of the magnetic susceptibility data with the petrographic data of different samples revealed that even in samples that correspond to homogeneous lithotypes, great heterogeneities and differences can be manifested from the physical-mineralogical point of view. In general, a high concordance was observed between the intensity of the weathering processes in the rock samples, and the values of the magnetic susceptibility of such samples. The results support the possibility of extrapolating the composition information to samples with magnetic susceptibility measurements and without petrographic studies.

**Keywords:** magnetic susceptibility; weathering crust; laterites; Eastern Cuba.

---

## **1. INTRODUCCIÓN**

En los trabajos de prospección y exploración de los yacimientos de cortezas de intemperismo del nordeste cubano no es posible realizar estudios petrográficos a todas las muestras de la red de pozos, pues se encarece demasiado la investigación. Los estudios petrográficos requieren de mucho tiempo y grandes recursos en la preparación de las secciones delgadas y la posterior observación de las muestras bajo el microscopio.

En los yacimientos de corteza de intemperismo se han encontrado dificultades relativas a:

- La caracterización, cartografía y discriminación de las secuencias magnéticas, no magnéticas (secuencias gabroide) y cuerpos de composición no ultramáfica en la corteza de intemperismo y el basamento.

- La alta variabilidad y complejidad geológica en la corteza de intemperismo y su basamento, con muestras químicamente homogéneas, pero heterogéneas física y mineralógicamente.

Considerando estas dificultades reales se hace necesario y conveniente establecer algún método de estudio complementario, sencillo, barato y rápido, cuyos resultados den indicios de la naturaleza mineralógica de las muestras petrográficas.

La susceptibilidad magnética es una propiedad física más de cada mineral relacionada con el origen y formación del mismo. Su magnitud puede ser fácilmente medible e indica muchas veces los procesos geológicos (el grado e intensidad de alteración) sufridos o que posee dicho mineral. Es capaz de revelar el punto o estadio en que se encuentra un mineral dentro de su transformación de un mineral por otro y como los minerales son los que constituyen las rocas, entonces el estudio de este parámetro físico nos lleva al conocimiento de las características físico-geológicas de los mismos y al completamiento de la información geológica.

El poder resolutivo de la susceptibilidad magnética (SM) hace que los valores medidos de esta propiedad, base del método magnético de la geofísica, se puedan convertir en una valiosa herramienta para el petrógrafo moderno, al proporcionarle información a priori que da idea de la composición mineralógica de las muestras, la intensidad del intemperismo y el grado de alteración en cada muestra, y permite realizar una clasificación magnética de las muestras bajo estudio.

Las irregularidades químicas, geológicas y mineralógicas en las rocas de la corteza laterítica ferro-niquelífera-cobaltífera y su basamento provocan variaciones en sus características físicas, las que pueden ser detectadas con la aplicación de métodos magnéticos debido a:

- La disponibilidad de equipos ligeros, portátiles y de bajo costo para medir la susceptibilidad magnética, que pueden ser utilizados en condiciones de campo, en los frentes de cantera, y dentro del proceso fabril, y que tienen una rápida respuesta. Los ensayos no son destructivos, son baratos, no requieren transformar la muestra y solo requieren de un buen acoplamiento inductivo entre la muestra y la sonda del equipo, así como cumplir con los procedimientos normativos de las mediciones.
- La capacidad de la susceptibilidad magnética para separar los minerales en magnéticos, electromagnéticos y no magnéticos.

- El hecho de que los valores de la susceptibilidad magnética están más relacionados con el tipo de mineralización existente en la muestra que con su contenido total de hierro. Por ejemplo, cuando una muestra de laterita tiene un valor de susceptibilidad magnética de  $65 \cdot 10^{-3}$  SI, este valor indica la presencia mayoritaria de magnetita y no de hematita; sin embargo, cuando el contenido químico de Fe es del 50 %, no hay un indicio definitivo del tipo de mineralización, la cual puede ser de hematita, ilmenita, maghemita o magnetita.

El valor de la susceptibilidad magnética proporciona una medida del grado en que una sustancia puede ser magnetizada; es la relación  $k$  o  $k'$  de la magnetización  $M$  o  $I$  con respecto a la fuerza magnetizante  $H$ , que es la responsable de la magnetización, según se expresa como:

$$kH = M \quad \text{en el sistema SI} \quad (1)$$

$$k'H = I \quad \text{en el sistema cgs} \quad (2)$$

La susceptibilidad es adimensional, pero tiene diferente magnitud en los dos sistemas:

$$k = 4\pi k' \quad (3)$$

Desde el punto de vista geológico, la susceptibilidad magnética con frecuencia es proporcional a la fracción de magnetita presente en el material rocoso (Sheriff 2002).

## 2. CARACTERÍSTICAS PETROGRÁFICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

Desde el punto de vista petrográfico en el área de estudio están presente seis variedades de rocas: harzburgitas (H), dunitas (D), peridotitas plagioclásicas (PP), serpentinitas (S), gabros (G) y lherzolitas (L), las cuales han sufrido procesos de intemperización en mayor o menor grado, así como la influencia de la tectónica regional con los procesos de compresión, que han servido de vía a las soluciones ricas en minerales. Todos estos procesos han dado origen a una enorme cantidad de minerales, propios de la corteza ofiolítica intemperizada.

## 3. METODOLOGÍA

Se muestrearon rocas del basamento del yacimiento La Delta. El muestreo en todos los casos fue realizado por geólogos y petrógrafos, según las normas ramales vigentes en la Empresa Geominera Oriente del Grupo Geominsal, perteneciente al Ministerio de Energía y Minas (Hernández 2009). Se midió la susceptibilidad magnética a 228 muestras del basamento o fondo de pozo, con el objetivo de caracterizar, evaluar,

clasificar y correlacionar solamente el material de la muestra con sus atributos y parámetros físicos, geológicos, químicos y petrográficos.

La metodología aplicada y el procesamiento de los valores de la susceptibilidad magnética de las muestras procedentes de pozos de perforación en redes ordinarias está tratada con un cierto nivel de profundidad por Hernández (2009). Se utilizó la clasificación magnética de Bersudskin recogida en Delgado (1979).

#### 4. RESULTADOS

##### 4.1. Susceptibilidad magnética de las muestras del basamento

La Tabla 1 muestra a la izquierda los intervalos magnéticos según Bersudskin y a la derecha la clasificación magnética que utilizan los mineralogistas. El intervalo no magnético establecido por estos últimos coincide con el intervalo prácticamente no magnético que emplean los geofísicos y en este se ubican todas las muestras cuyo valor de susceptibilidad magnética es menor a  $0,3 \cdot 10^{-3}$  SI, donde predominan minerales no magnéticos como: caolín, gibbsita, cuarzo, plagioclasas, albita y otros (Milovski y Kónonov 1988). Muchos de estos minerales intervienen en la composición básica de los gabros y secuencias gabroides.

Tabla 1. Frecuencias de la clasificación magnética de los valores de SM de todas las muestras del basamento estudiadas

| <b>Intervalos de clasificación de Bersudskin</b> | <b>N</b> | <b>%</b> | <b>Clasificación magnética según mineralogistas</b> |
|--|----------|----------|---|
| SM < 0,3 prácticamente no magnético              | 2        | 0,9      | Intervalo no magnético 0,9 %                        |
| SM ≥ 0,3 SM < 1,25 muy débilmente magnético      | 3        | 1,35     | Intervalos electromagnéticos 82,51 %                |
| SM ≥ 1,25 SM < 6,25 débilmente magnético         | 115      | 51,57    |   |
| SM ≥ 6,25 SM < 12,5 débilmente magnético         | 66       | 29,6     |   |
| SM ≥ 12,5 SM < 20 magnético                      | 22       | 9,87     | Intervalos magnéticos 16,59 %                       |
| SM ≥ 20 SM < 31,66 magnético                     | 8        | 3,59     |   |
| SM ≥ 31,66 SM < 44,74 magnético                  | 3        | 1,35     |   |
| SM ≥ 44,74 SM < 62,8 magnético                   | 2        | 0,9      |   |
| SM ≥ 62,8 fuertemente magnético                  | 2        | 0,9      |   |

SM: susceptibilidad magnética. N: número de muestras

El intervalo electromagnético (de acuerdo con la clasificación mineralógica) incluye a las categorías petrofísicas de muy débilmente magnética y débilmente magnética; aquí abundan los minerales electromagnéticos con una  $SM \geq 0,3 \cdot 10^{-3}$  SI y  $SM < 12,5 \cdot 10^{-3}$  SI (Milovski y Kónonov 1988). Según estudios mineralógicos y petrográfico-petroológicos aparece goethita FeOOH (sistema rómbico); hematita, mena roja de Fe,  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (el 70 % de Fe) (sistema trigonal); ilmenita FeTiO<sub>3</sub> (sistema trigonal); SiO<sub>2</sub>; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, gibbsita, espinela, minerales de Mn, psilomelano, ilmenita, minerales arcillosos, minerales de serpentina, indicando que en dichas muestras existe un predominio de minerales alterados, intemperizados, hematitizados, característicos de la corteza laterítica; mientras que en las muestras del basamento encontramos minerales máficos o básicos y no magnéticos, plagioclasas, etc. Por tal razón se deben esperar incrementos de los valores de las determinaciones del SiO<sub>2</sub>, MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, entre otros.

Dentro del intervalo magnético se incluyen las muestras con valores de  $12,5 \cdot 10^{-3}$  SI  $\leq SM < 62,8 \cdot 10^{-3}$  SI, en las cuales predominan los minerales magnéticos en los que se dan incrementos de elementos y compuestos químicos asociados a los minerales magnéticos. Esto indica el predominio en las muestras analizadas de los minerales magnéticos magnetita (hierro magnético) FeFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (un 72,4 % de Fe) (sistema cúbico); maghemita  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y otros (Milovski y Kónonov 1988). En el intervalo fuertemente magnético se incluyen las muestras con una  $SM \geq 62,8 \cdot 10^{-3}$  SI, donde predomina la magnetita (hierro magnético) FeFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (un 72,4 % de Fe).

#### **4.2. Relación entre los valores de la SM con las diferentes litologías de la roca del basamento**

Cuando es posible proporcionar los valores de SM de las muestras de las secciones delgadas durante los estudios petrográficos, antes de realizar las observaciones en el microscopio, resulta de gran utilidad, pues permite usar la caracterización y clasificación magnética, que revela las heterogeneidades magnéticas y consecuentemente mineralógicas existentes dentro de los grupos de muestras de una misma clasificación petrográfica. De esta forma, se puede anticipar que no todo el material de las muestras es homogéneo y se advierte de la necesidad de analizar algunas muestras con detalle y análisis especiales. A continuación se discute la clasificación magnética de cada litología. Resulta pertinente aclarar que la clasificación, nomenclatura y codificación de las litologías usadas siguió un criterio petrográfico.

## **Serpentinitas**

Se incluyó dentro de la litología serpentinita a las siguientes muestras: serpentinita oxidada, serpentinita, serpentinita con abundante cromita, serpentinita fracturada y oxidada, serpentinita por harzburgita oxidada, serpentinita cloritizada y carbonatizada oxidada, serpentinita mineralizada, oxidada, serpentinita con intensos procesos de oxidación, serpentinita con procesos de alteración secundarios, serpentinita antigorítica. El histograma de la SM de las serpentinitas, (Figura 1) es polimodal, lo que revela la heterogeneidad de la litología serpentinita, derivada de los procesos y fenómenos geológicos a que están sometidas. Un total de diez muestras presentó valores de SM  $>12,5 \cdot 10^{-3}$  SI, a las cuales corresponden contenidos de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y FeO por encima de la media de la población.

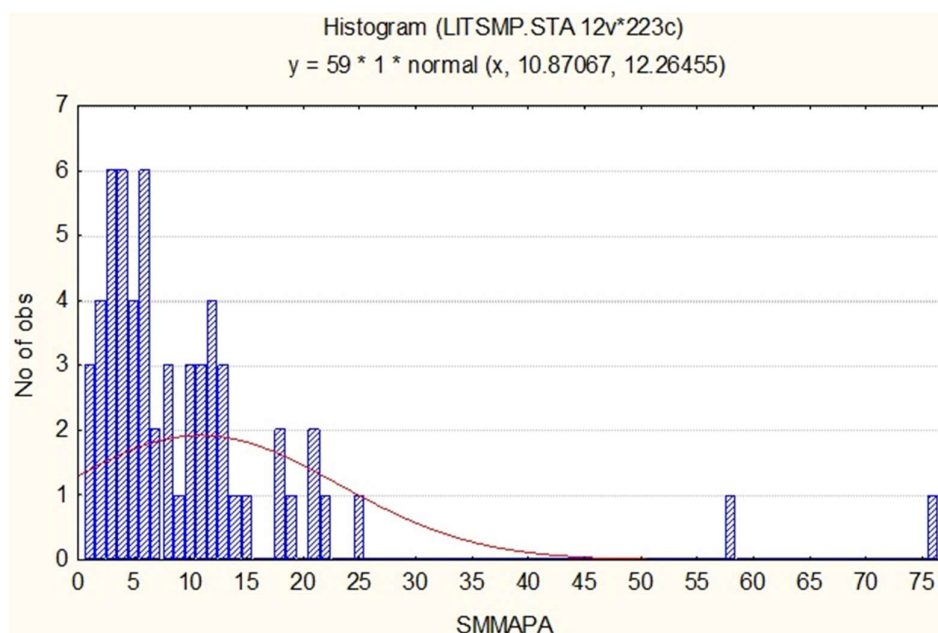


Figura 1. Susceptibilidad magnética de las serpentinitas.

## **Harzburgitas**

Se consideraron como de esta litología las siguientes muestras: harzburgita serpentinizada, serpentinita de composición harzburgítica y serpentinita harzburgítica. Desde el punto de vista magnético y mineralógico la población es heterogénea. El histograma de la SM de las harzburgitas es polimodal y se muestra en la Figura 2. Existen tres muestras que se separan de la población con valores de SM  $>12,5 \cdot 10^{-3}$  SI y contenidos de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y FeO por encima de la media de la población.

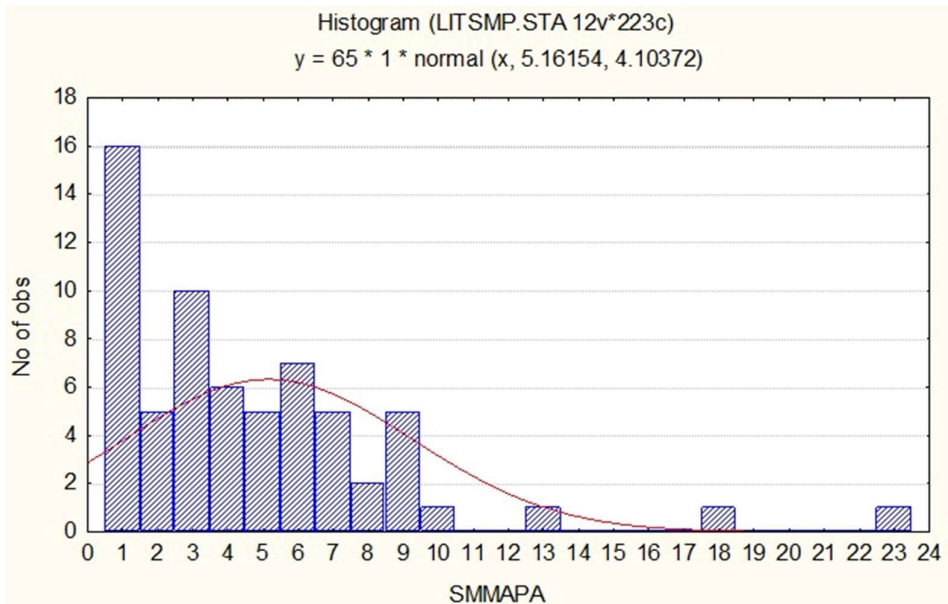


Figura 2. Susceptibilidad magnética de las harzburgitas.

### **Lherzolitas**

Dentro de esta litología se consideran: lherzolita serpentinizada y lherzolita serpentinizada, alterada. Según los datos de la SM son dos muestras muy diferentes. La lherzolita serpentinizada tiene una  $SM = 17,91 \cdot 10^{-3}$  SI y un contenido de  $FeO = 8,95\%$ , mientras que la lherzolita serpentinizada, alterada, tiene valores de  $SM = 5,03 \cdot 10^{-3}$  SI y contenido de  $FeO = 4,48\%$ . El histograma de la SM de las lherzolitas se muestra en la Figura 3.

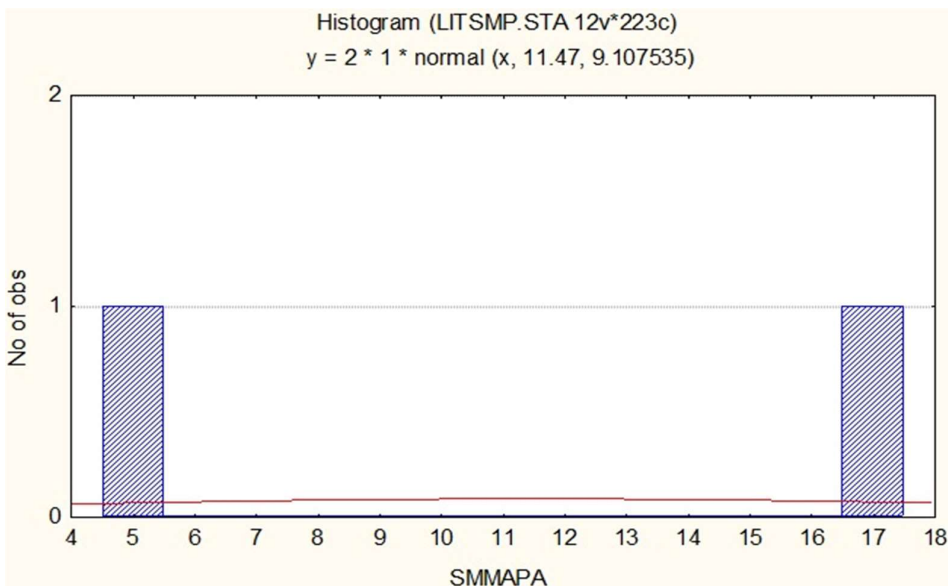


Figura 3. Susceptibilidad magnética de las lherzolitas.



## **Dunitas**

Bajo el nombre de dunitas se incluyeron: dunita serpentinizada, serpentinita por dunita, dunita enstatítica serpentinizada, serpentinita con intensos procesos de oxidación de composición dunítica y serpentinita de composición dunítica. El histograma (Figura 4) de la SM de las dunitas es también polimodal, lo que revela la heterogeneidad de esta litología. 18 muestras forman poblaciones e individuos aislados. En general, las muestras con  $SM > 12,5 \cdot 10^{-3}$  SI presentan contenidos de  $Cr_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$  y FeO por encima de la media de la población.

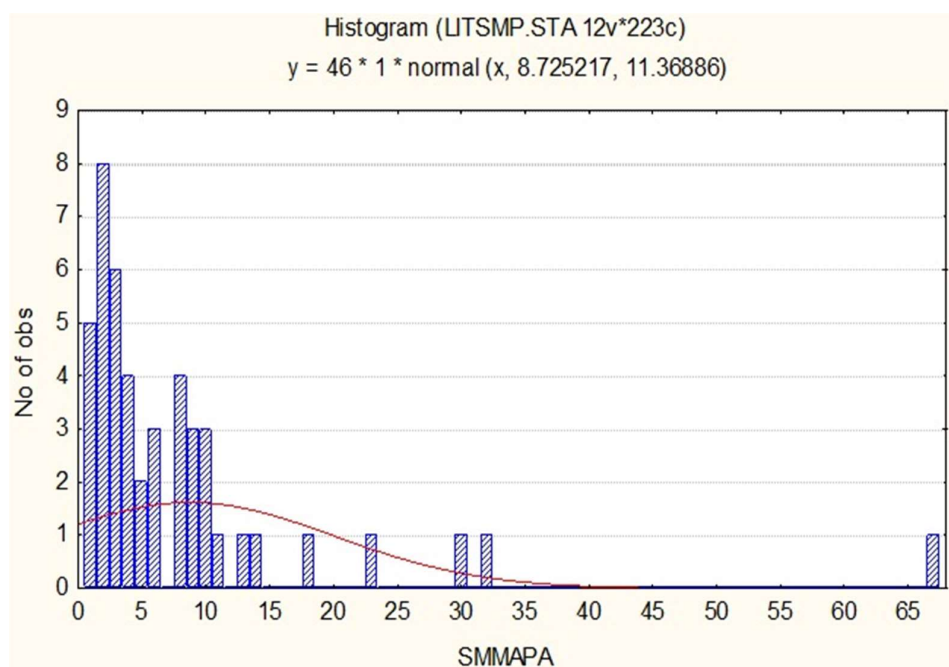


Figura 4. Susceptibilidad magnética de las dunitas.

## **Peridotita plagioclasa**

Se consideró peridotita plagioclasa a las peridotitas plagioclásicas, serpentinita peridotítica, serpentinita por peridotita plagioclásica oxidada. En la Figura 5 se muestra el histograma de la SM de la peridotita plagioclasa, revelando igualmente la heterogeneidad de la litología. Por sus valores de SM, 13 muestras forman poblaciones e individuos aislados. Las muestras con  $SM > 12,5 \cdot 10^{-3}$  SI presentan contenidos de  $Cr_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$  y FeO por encima de la media de la población.

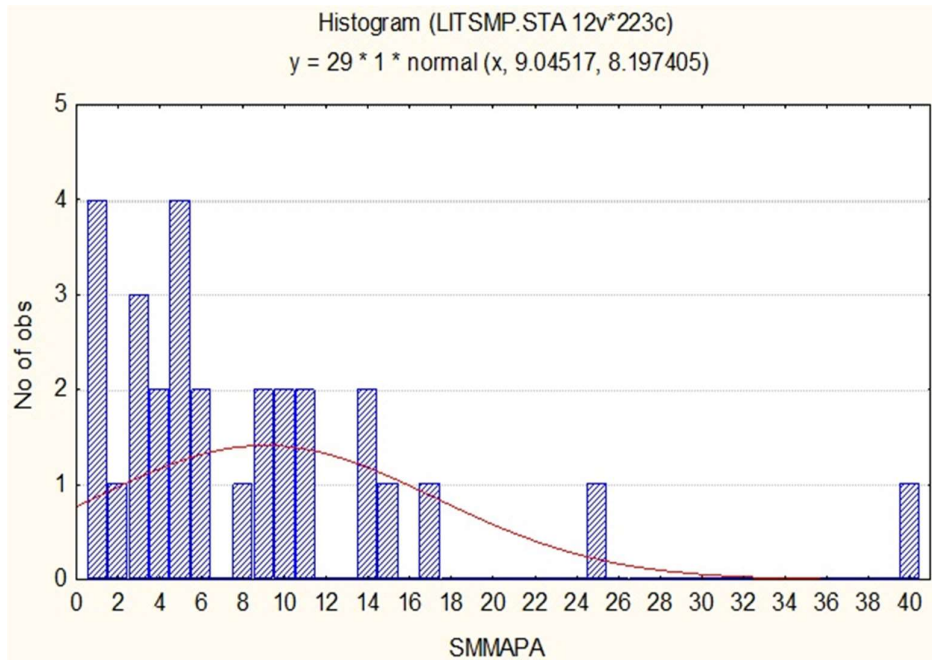


Figura 5. Susceptibilidad magnética de las peridotitas plagioclasas.

### **Gabro**

Dentro de la litología se incluyeron el gabro olivínico alterado y el gabro olivínico. El histograma (Figura 6) es polimodal, lo que evidencia una litología heterogénea. Tres muestras forman poblaciones e individuos aislados. La diferencia mayor se encuentra en una muestra de gabro olivínico alterado, que posee una  $SM=13,19 \cdot 10^{-3}$  SI, con un contenido de  $FeO=4,01$  %, debido a la presencia de la magnetita en forma de polvo fino. Realmente no es común encontrar un gabro de composición básica con valor de SM típico de los minerales magnéticos. Los resultados de los informes de los levantamientos realizados por el CAME (Consejo de Ayuda Mutua Económica) y de los trabajos de prospección y exploración de la región nororiental de Cuba describen a los gabros como una litología típicamente no magnética.

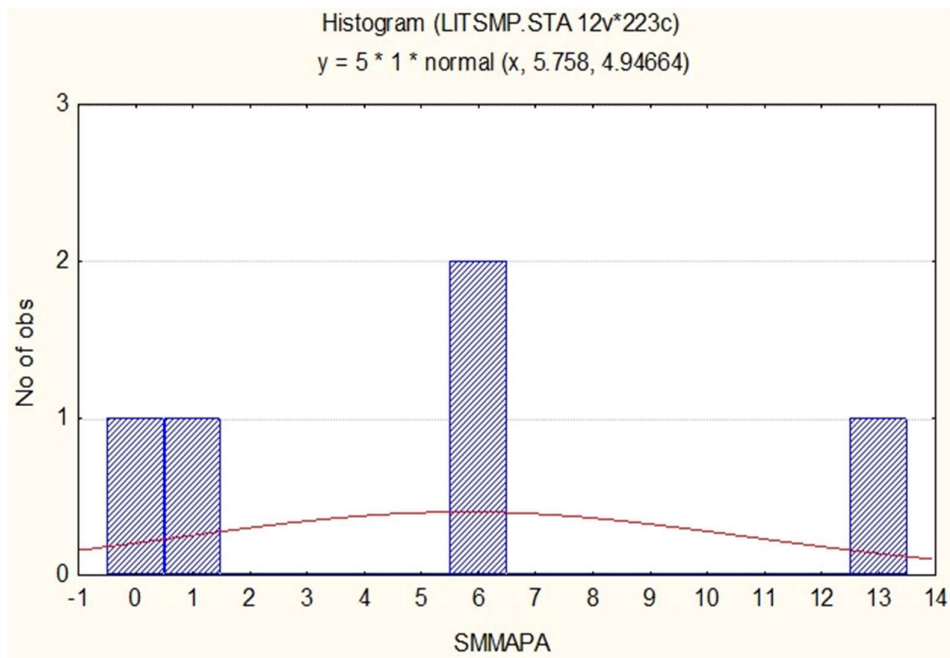


Figura 6. Susceptibilidad magnética del gabro.

En general, la presencia de procesos de alteración como la cloritización, talquitización y carbonatización, la existencia de serpentinita de composición dunítica, con intensos procesos de oxidación, gabro olivínico alterado, dunita serpentinizada, serpentinita por harzburgita oxidada, entre otros, dificultó la caracterización y separación petrográfica de las rocas que, por sus valores de SM, se encuentran en los intervalos magnéticos.

La diferencia principal y contrastante para una misma población litológica es la existencia de muestras de rocas con valores de SM bajos, correspondientes a los intervalos no magnéticos y electromagnéticos, coexistiendo con muestras de rocas con valores de SM altos, típicos de los minerales magnéticos y fuertemente magnéticos. Esto alerta sobre la necesidad de seleccionar algunas muestras para análisis específicos y especiales, con el objetivo de revelar la génesis de sus diferencias.

Las muestras con valores de SM, correspondientes a los intervalos magnéticos y fuertemente magnéticos, se asocian con altos grados de serpentinitización del olivino y la presencia de magnetita y cromita. Esta información favorece la confección de patrones petrofísicos-petrográficos acertados y contribuye a perfeccionar el modelo físico-geológico del área de estudio. La Figura 7 conjuga en un mapa las litologías establecidas con los valores de SM.

Como la medición de la susceptibilidad magnética constituye un análisis de respuesta rápida, es posible realizarlo a todas las muestras tomadas en las diferentes redes y estadios de estudio de los laboreos mineros, siempre que se cumplan las normas de medición, pues no se destruye la muestra; ello ofrece la posibilidad de extrapolar los resultados a muestras de los pozos a los que se les midió la SM pero no se les practicaron estudios petrográficos.

Es más rápido y barato realizar mediciones de la SM a todas las muestras en una o varias campañas de prospección y exploración, que realizar estudios petrográficos a todas las muestras. Los estudios petrográficos quedarían reservados solamente a las muestras de pozos seleccionados, mientras que la medición de la SM se aplicaría a todas las muestras de todos los pozos, sin encarecer demasiado los trabajos. Es aquí donde radica la importancia de incluir la medición de la susceptibilidad magnética, antecediendo a los estudios petrográficos y del conocimiento a priori del valor de este parámetro en todas las secciones delgadas, antes de que el petrógrafo las analice en el microscopio.

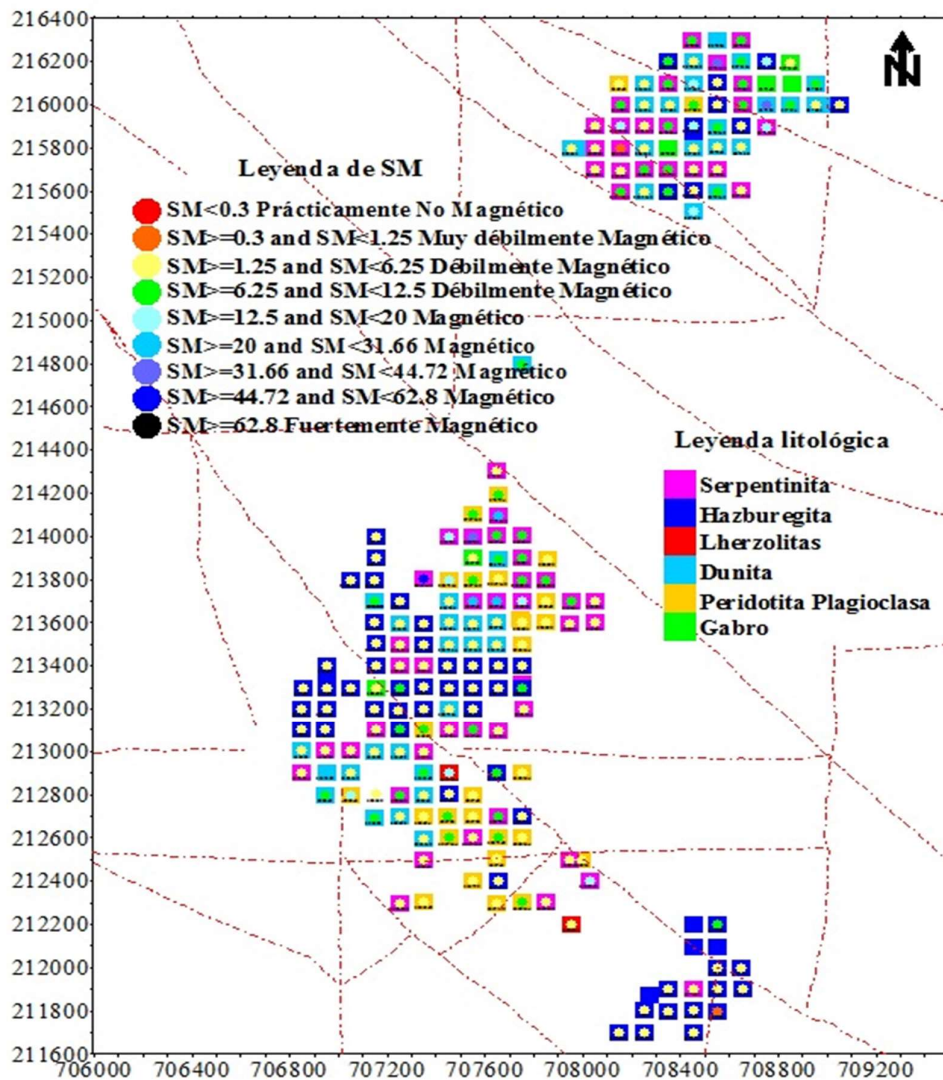


Figura 7. Relación espacial de los valores de la SM con la litología de la roca del basamento.

## 5. CONCLUSIONES

- Los valores de la SM constituyen una magnífica y barata fuente de información a priori que complementa la información petrográfica de las muestras de los sectores objeto de estudio, a la vez que advierte y orienta al petrógrafo sobre las muestras que se alejan mucho de las características generales de cada población litológica.
- Los incrementos de los contenidos de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y  $\text{FeO}$  son los responsables de que aumenten los valores de la susceptibilidad magnética en todos los tipos de rocas, tanto de composición ultramáfica como máfica.

- Los procesos de alteración de tipo cloritización, talquitización, carbonatización y los intensos procesos de oxidación, disminuyen los valores de la susceptibilidad magnética.
- Los resultados sustentan la posibilidad de extrapolar la información de composición a muestras con mediciones de SM, pero sin estudios petrográficos. También permite la creación de patrones sobre regularidades petrofísicas-petrográficas y del modelo físico-geológico del área de estudio.

## 6. REFERENCIAS

- COLEMAN, R. G. *Ophiolites: Ancient Oceanic Litosphere?* Springer-Verlag, 1977. 282 p.
- DELGADO, R. *Magnetometría*. La Habana: Pueblo y Educación, 1979.
- HERNÁNDEZ, A. J. *Metodología para la investigación de la susceptibilidad magnética en muestras de cortezas de intemperismo del norte de oriente de Cuba*. Tesis de maestría. La Habana: ISPJAE, 2009.
- HERNÁNDEZ, A. J.; RODRÍGUEZ, A.; CHÁVEZ, S.; RODRÍGUEZ, A. Y CHAVÉZ, S. Características magnéticas de la corteza de intemperismo y su basamento en la región nororiental de Cuba. En: Congreso de Geología, Minería y Geofísica. Memorias Geomin, La Habana, 19-23 marzo 2001. ISBN 959-7117-10-X. Disponible en: [http://www.redciencia.cu/geobiblio/paper/2001\\_Geomin\\_Prospeccion\\_Geofisica.pdf](http://www.redciencia.cu/geobiblio/paper/2001_Geomin_Prospeccion_Geofisica.pdf)
- MILOVSKI, A.V. Y KÓNONOV, O.V. *Mineralogía*. Moscú: Mir, 1988.
- RUÍZ, R.; PÉREZ, M.; HERNÁNDEZ, A. Y GUTIÉRREZ, M. Trabajos especiales de la exploración del yacimiento La Delta. Informe Geominera Oriente para Moa Nickel S. A. 2013.
- SHERIFF, R. E. *Encyclopedic Dictionary of Applied Geophysics*. USA: Society of Exploration Geophysicists, 2002.
- STRECKEINSEN, A. To each plutonic rock, its proper name. *Earth Science Reviews*, 12(1): 1-33, 1976.

Recibido: 20/04/16

Aceptado: 31/10/17

*Alfredo Hernández Ramsay*, Máster en Geofísica Aplicada. Empresa Geominera Oriente. Santiago de Cuba, Cuba [ahr\\_amsay@yahoo.es](mailto:ahr_amsay@yahoo.es)