

Comportamiento de la susceptibilidad magnética en el ambiente ofiolítico del nordeste de Cuba oriental

José Alberto Batista Rodríguez¹ jabatista@ismm.edu.cu

Resumen

Se analiza el comportamiento de la susceptibilidad magnética en las rocas de ambiente ofiolítico del nordeste de Cuba oriental con el propósito de esclarecer, en esta zona, la naturaleza geológica de las anomalías del campo magnético; para ello se consideraron, primeramente, resultados de investigaciones petrofísicas anteriores que incluyeran la susceptibilidad magnética; posteriormente, en dos etapas de muestreo separadas por un intervalo de 5 años, se midió esta propiedad en un total de 374 muestras. El estudio permitió conocer que la susceptibilidad magnética constituye un reflejo de la composición e historia geológica de las diferentes rocas de la región, e inferir variaciones en el grado de serpentización de las rocas ultramáficas, así como el enriquecimiento en minerales magnéticos en todas las rocas estudiadas. Las peridotitas serpentizadas y los diques de gabros presentan los valores más altos de susceptibilidad magnética reflejando, para las peridotitas, su grado de serpentización en una relación directa. Ambos grupos de rocas son los principales responsables del comportamiento del campo magnético, el cual parece estar vinculado a las características geométricas y físicas de las peridotitas y algunos diques de gabros.

Palabras clave

Cuba, ofiolitas, serpentización, susceptibilidad magnética.

Behavior of the magnetic susceptibility in the ophiolitic suites of the north eastern portion of Eastern Cuba

Abstract

The behavior of the magnetic susceptibility is analyzed in the rocks that are located in the ophiolitic suite of northeastern Cuba with the aim of know the geological nature of magnetic anomalies. First they are considered the results of petrophysical investigations previous in this region that include the k , next the measurements of k are analyzed carried out in two sampling stages, in those that were collected 374 samples. Starting from the analysis of this property it is known that the same evidences the composition and geologic history of the different type of rocks in the region. Variations are inferred in the grade of serpentinization of the ultramafic rocks, as well as of the enrichment in magnetic minerals in all the studied rocks. The serpentinized peridotites and the gabbros dikes present the highest values in k , indicating in the first case, their serpentinization grade, related of direct way. Both groups of rocks are the main responsible for the magnetic field behavior, the which it should be linked with the geometric and physical characteristics of the ophiolites and some gabbros dikes, associating the high values of the field with the biggest thickness of this rocks.

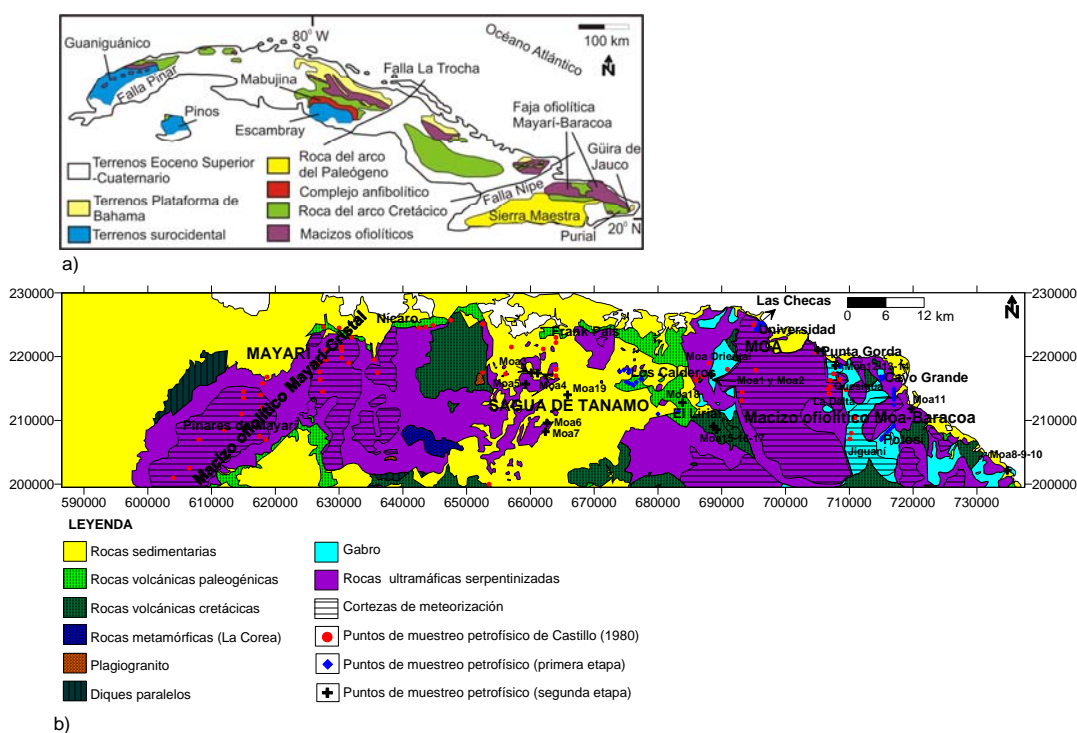
Key words

Cuba, ophiolites, serpentinization, magnetic susceptibility.

INTRODUCCIÓN

Los estudios petrofísicos buscan conocer las propiedades físicas de diferentes tipos de rocas para apoyar las investigaciones geofísicas y el mapeo geológico. La susceptibilidad magnética (κ), una de las propiedades comúnmente medidas durante las investigaciones geofísicas, aporta información sobre variaciones en los contenidos de minerales ferromagnéticos en las rocas; estas variaciones pueden interpretarse como reflejos de cambios litológicos, grado de homogeneidad e intensidad de las alteraciones en las rocas (Carmichael, 1982).

Del conocimiento de las propiedades físicas de las rocas y de los factores que sobre ellas influyen depende, en gran medida, el éxito en la aplicación de los métodos geofísicos (Carmichael, 1982; Clark, 1997). La susceptibilidad magnética responde a la composición mineralógica de las rocas (Carmichael, 1982) y procesos posteriores a la formación de éstas pueden alterarla (Grant, 1985; Toft et al., 1990).



Durante la interpretación del campo magnético, generalmente se considera que las rocas ultramáficas se caracterizan por altos valores de susceptibilidad magnética (Carmichael, 1982); sin embargo en Cuba, sobre todo en la región oriental, existen grandes discrepancias entre las anomalías positivas del campo magnético y los afloramientos de rocas ultramáficas (Batista et al., 2007). Las rocas ultramáficas de esta región poseen un alto grado de metamorfismo, por lo tanto están conformadas por minerales magnéticos primarios y secundarios, estos últimos derivados del metamorfismo del olivino.

Esta investigación tuvo el objetivo de determinar el comportamiento de la susceptibilidad magnética en rocas de ambiente ofiolítico de Cuba nororiental para esclarecer la naturaleza geológica de las anomalías del campo magnético e inferir aspectos relacionados con la historia geológica de estas rocas.

MARCO GEOLÓGICO

La región de estudio se ubica dentro de la faja ofiolítica Mayarí-Baracoa en la cual afloran, principalmente, rocas ultramáficas y gabros. Acompañando estas rocas de afinidad ofiolítica aparecen rocas volcánicas, pertenecientes a los arcos de islas del Cretácico y del Paleógeno. Las ofiolitas descansan tectónicamente sobre las rocas volcánicas cretácicas, mientras que las rocas paleogénicas descansan discordantemente sobre formaciones geológicas generadas durante el emplazamiento de las ofiolitas (formaciones Mícara y La Picota) y sobre las ofiolitas y vulcanitas cretácicas; en la región (Figura 1) también aparecen rocas sedimentarias terciarias (Iturralde-Vinent, 1996).

La faja ofiolítica Mayarí-Baracoa se divide en dos grandes macizos: Mayarí-Cristal y Moa-Baracoa. El primero, se ubica en la parte occidental de la faja ofiolítica, ocupando un área aproximada de 1 200 km². En este macizo se han descrito, principalmente, los niveles de tectonitas (rocas ultramáficas deformadas) y diques de diabasas (Iturralde-Vinent, 1996; Cobiella, 2000). Las rocas ultramáficas están constituidas predominantemente por harzburgitas y dunitas, así como lherzolitas y piroxenitas en menor cantidad (Fonseca et al., 1985). Al sur del macizo se localiza la *melange* La Corea, compuesta por rocas

metamórficas (Millán, 1996). En la Figura 2 se muestra un diagrama para la clasificación de las rocas ultramáficas de acuerdo con la concentración de Olivino-Ortopiroxeno-Clinopiroxeno.

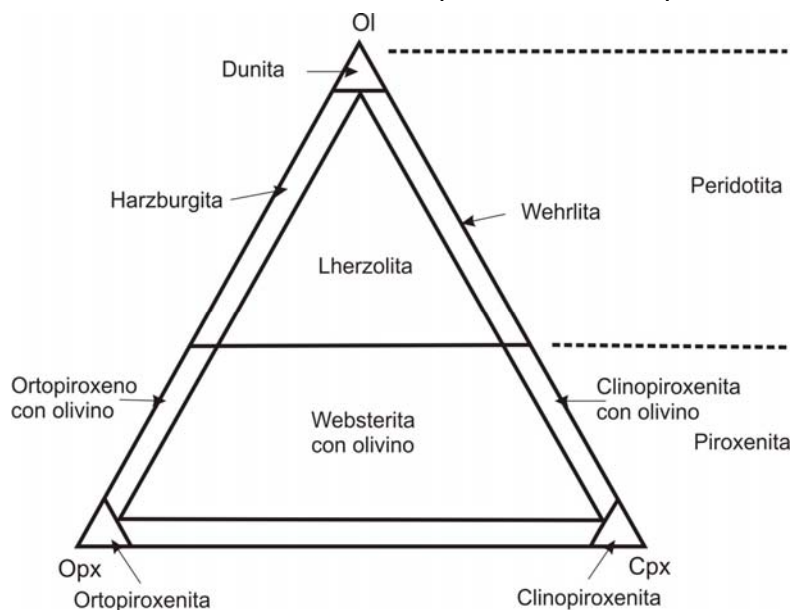


Figura 2. Clasificación modal de las rocas ultramáficas (Streckeisen, 1973).

El macizo Moa-Baracoa se ubica en el extremo oriental de la faja ofiolítica, expuesto en un área aproximada de 1 500 km², con un desarrollo considerable de los niveles de tectonitas, gabros y rocas volcano-sedimentarias. El nivel de tectonitas se caracteriza por un predominio de harzburgita, en menor grado, dunita. También se ha descrito dunita con plagioclasa, wehrlita, lherzolita, y piroxenitas (Proenza et al., 2003).

Las rocas ultramáficas, fundamentalmente harzburgita y dunita, de la faja ofiolítica Mayarí-Baracoa están afectadas por procesos de serpentinización durante el cual se reemplazan los cristales de olivino por serpentina y magnetita (Proenza et al., 2003), es decir, olivino+agua=serpentina+magnetita.

Las rocas volcánicas del Cretácico están compuestas por basalto, andesita basáltica (tobas y derrames brechados), mientras que las rocas volcano-sedimentarias del Paleógeno (Fm. Sabaneta) están compuestas por tobas vitroclásticas, litovitroclásticas, cristalovitroclásticas con intercalaciones de tufitas calcáreas, areniscas tobáceas, calizas, conglomerados tobáceos, lutitas, margas, gravelitas,

conglomerados volcanomícticos y algunos cuerpos de basalto, andesita y andesita-basáltica (Iturralde-Vinent, 1996).

Dentro de las rocas sedimentarias se encuentran las formaciones La Picota y Mícará, típicamente olistostrómicas, compuestas por fragmentos y bloques procedentes de la secuencia ofiolítica y de las rocas volcánicas cretácicas. En la primera predominan los bloques de rocas volcánicas y en la segunda los de ofiolitas (Cobiella, 2000). Dentro de las rocas sedimentarias también aparece la Fm. Gran Tierra, compuesta fundamentalmente por calizas brechosas, conglomerados volcanomícticos, brechas, margas y tobas.

PETROGRAFÍA

El análisis petrográfico de las rocas máficas y ultramáficas de Cuba nororiental se basa en los resultados de los estudios realizados por: García (1976) en el yacimiento La Delta; Marrero (1983) en Jiguaní; Ríos y Cobiella (1983) en Quesigua, Pinell (1987) en el yacimiento Moa-Oriental y García (1990) en Pinares de Mayarí (Figura 1).

En el estudio petrográfico realizado en el yacimiento La Delta, realizado por García (1976) se analizaron 48 muestras en rocas ultramáficas (harzburgitas, dunitas plagioclásicas y serpentinita harzburgítica) y máficas (troctolita con piroxeno, gabro pegmatita, troctolita, gabro normal, gabro olivínico).

En La Delta, de manera general, las rocas ultramáficas presentan colores oscuros con textura hipidiomórfica, compuestas fundamentalmente por olivino y piroxeno, el primero en grandes cantidades y alterado a minerales del grupo de la serpentina (crisotilo y antigorita). Los óxidos están representados por magnetita y cromita abarcando pequeñas cantidades del total de las rocas. Las rocas máficas también poseen colores oscuros con textura hipidiomórfica, compuesta fundamentalmente por olivino y plagioclasa. Las plagioclasas están saussuritizadas. En ocasiones el olivino está alterado a minerales del grupo de la serpentina. En ellos aparecen pequeñas cantidades de magnetita. Algunas variedades (gabro-pegmatita, gabro normal y gabro olivínico) contienen además clinopiroxeno. En Jiguaní, Marrero (1883) realizó un análisis

petrográfico (Tabla 1) en 26 muestras de gabros (normal, norita, olivínico y troctolita) y peridotitas (harzburgita, dunita, wehrlita y variedades plagioclásicas de estas dos últimas rocas).

Tabla 1. Mineralogía de las rocas máficas y ultramáficas de Jiguaní (Marrero, 1983)

Tipos de rocas	N	Pl	Cpx	Opx	OI	Ox	Textura
Gabro normal	4	50-60	25-40	3	1-30	2	Hipidiomórfica
Gabro norita	3	50-60	15-20	5-10	4	5-8	Hipidiomórfica
Gabro olivínico	7	30-60	5-30	4	5-30	5	Hipidiomórfica
Gabro troctolita	1	50	-	-	35	5	Hipidiomórfica
Dunita	2	-	-	3	30-45	3-5	Alotriomórfica
Wehrlita	1	-	20	-	30	1	Alotriomórfica
Harzburgita	6	-	3	7-20	40-50	3-10	Alotriomórfica
Dunita plagioclásica	1	5	-	-	90	5	Alotriomórfica
Wehrlita plagioclásica	1	7	20	-	40	50	Alotriomórfica

N=número de muestras; Pl= % plagioclasa; Ol= % olivino; Opx= % ortopiroxeno; Cpx= % clinopiroxeno; Ox= % óxidos.

En Jiguaní, las rocas ultramáficas poseen textura alotriomórfica, color gris oscuro a negro, a veces con tonalidades verdosas y en ellas se manifiesta un alto grado de serpentización. Sus componentes fundamentales son olivino y piroxeno bastante alterados. Algunas variedades de dunita y wehrlitas presentan plagioclasa. También en ocasiones aparece clorita. En esta zona las rocas máficas presentan color gris oscuro, en ocasiones con tonalidades verdosas, de granulometría fina a media, con textura hipidiomórfica. Están conformados fundamentalmente por plagioclasa (labradorita) y clinopiroxeno (augita y diópsido), además pueden aparecer ortopiroxeno y olivino en menor cantidad. En estos gabros las plagioclasas están saussuritizadas, y la serpentina se forma a partir del olivino, todas ellas en pequeñas cantidades. Tanto en estas rocas como en las ultramáficas los óxidos primarios están representados por magnetita y cromita, mientras que en los óxidos secundarios además de la magnetita también aparece limonita.

En el estudio petrográfico realizado en Quesigua por Ríos y Cobiella (1983) se analizan 62 muestras (Tabla 2) en diferentes tipos de gabros (normal, olivínico, norita y troctolita) y peridotitas (dunitas, wehrlitas y harzburgitas).

Tabla 2. Composición mineralógica de rocas máficas y ultramáficas de Quesigua (Ríos y Cobiella, 1984)

Tipos de rocas	N	Pl	Cpx	Opx	Ol	Textura
Gabro normal	15	50-90	10-50	5	5	Hipidiomórfica
Gabro norita	11	50-80	10-30	5-20	5	Hipidiomórfica
Gabro olivínico	11	40-80	5-30	3	5-30	Hipidiomórfica
Gabro troctolita	1	60-80	-	-	5-30	Hipidiomórfica
Dunita	10	-	-	3	95-98	Hipidiomórfica
Wehrlita	8	-	10-20	-	30-40	Hipidiomórfica
Harzburgita	6	-	-	7-30	40-50	Hipidiomórfica

N=número de muestras; Pl= % plagioclasa; Ol= % olivino; Opx= % ortopiroxeno; Cpx= % clinopiroxeno.

En Quesigua las rocas máficas presentan textura hipidiomórfica y colores grises claro a oscuro, en ocasiones con tonalidades verdosas. Están compuesta principalmente por clinopiroxeno (augita y diópsido), plagioclasas (labradorita), olivino y ortopiroxeno (enstatita). Como minerales metálicos aparecen magnetita y cromita en pequeñas cantidades. Los minerales de alteración se presentan en pequeñas cantidades, tales como la saussurita a partir de la plagioclasa, la bastita a partir de enstatita, la clorita a partir de los piroxenos, además de los minerales del grupo de la serpentina por la alteración del olivino.

Las rocas ultramáficas en Quesigua poseen color gris oscuro con tonalidades verdosas y granulometría entre media y fina con textura hipidiomórfica. Su composición mineralógica está determinada por minerales tales como olivino, ortopiroxeno y clinopiroxeno, concentraciones de óxidos metálicos (magnetita). Como rasgo general de estas rocas se destaca la serpentinización que la afecta en mayor o menor medida.

En el yacimiento Moa-Oriental, Pinell (1987) solo analiza rocas ultramáficas (harzburgita serpentinizada y dunita) en 16 muestras. Este autor asume el término serpentinizadas para aquellas rocas que poseen contenidos inferiores al 70 % de minerales del grupo de la serpentina. Para contenidos superiores usa el término serpentinitas. Estas rocas presentan diferentes grados de serpentinización, así como colores que varían de gris verdoso a negro. Se componen fundamentalmente de olivino y ortopiroxeno, el primero alterado a minerales del grupo de la serpentina. Los óxidos están

representados por magnetita y cromita. También en las zonas más intemperizadas además de la magnetita, aparecen como óxidos secundarios limonita y hematita.

García (1990) realiza un estudio, en Pinares de Mayarí, en 49 muestras de rocas ultramáficas y máficas asumiendo igual criterio que Pinell respecto a la denominación de las rocas serpentinizadas y serpentinitas.

Las rocas ultramáficas de Pinares de Mayarí poseen colores que van del verde claro a oscuro, y en ocasiones casi negro. Presentan granos finos y textura hipidiomórfica y reticular. Sus principales componentes son el olivino serpentizado y ortopiroxenos como bastitas. Como minerales de alteración aparecen la lizardita, el crisotilo y la antigorita. Como óxidos se encuentran la magnetita y la cromoespinela picotita, la primera surgida a partir del proceso de serpentización. En ocasiones los piroxenos aparecen en grandes cantidades (clinopiroxenita y ortopiroxenita). En algunas de estas rocas se observan zeolita y calcita en grietas, constituyendo la mineralización secundaria. También en ocasiones se observa cloritización de la masa serpentinitica.

Las rocas máficas generalmente son de granos finos, color gris verdoso y textura holocristalina. Se componen fundamentalmente de hornblenda, plagioclasas y pequeñas cantidades de piroxenos. Aparecen minerales secundarios (carbonatos y clorita) generalmente desarrollados en grietas. La mineralización metálica es fina y dispersa.

En la Figura 3 se muestra la clasificación modal de las rocas ultramáficas de Cuba nororiental según los estudios petrográficos antes expuestos (García, 1976; Ríos y Cobiella, Marrero, 1983; 1984; Pinell, 1987; García, 1990), cuyos resultados sirvieron de base al análisis de la susceptibilidad magnética.

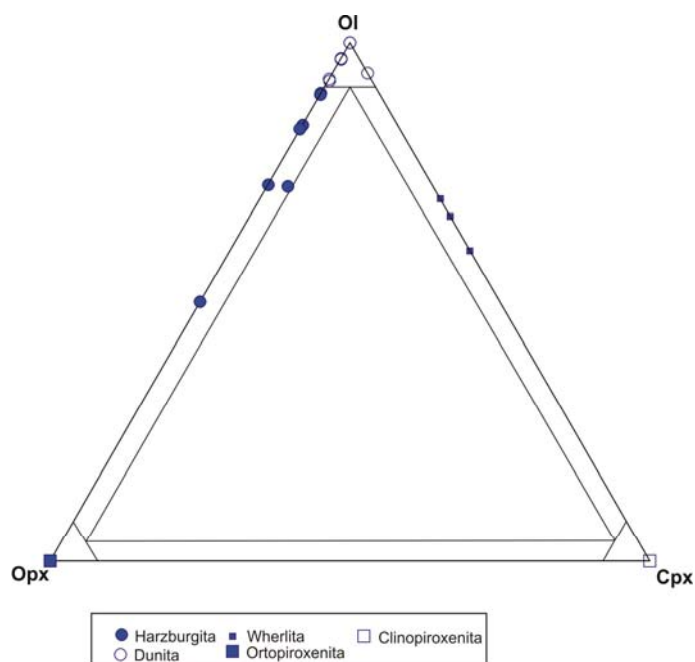


Figura 3. Clasificación modal (Streckeisen, 1973) de las rocas ultramáficas de Cuba nororiental.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio del comportamiento de la susceptibilidad magnética se desarrolló en tres etapas; en la primera, se analizaron estadísticamente los valores de susceptibilidad magnética de varios tipos de rocas, obtenidos en investigaciones anteriores desarrolladas en la región nororiental de Cuba (Zamashikov y Tobachkov, 1971; Castillo, 1980; Rodríguez, 1982; Chang et al., 1990, 1991). En la segunda etapa, se realizó un muestreo en afloramientos de diferentes tipos de rocas, en sitios de Moa y Sagua de Tánamo, y se midió la susceptibilidad magnética en cada una de las muestras, realizando posteriormente el procesamiento estadístico y análisis de los resultados. La tercera etapa, siguió el mismo procedimiento que la segunda y se realizó en otros sitios de Moa y Sagua de Tánamo, con la diferencia de que las muestras se colectaron con una perforadora portátil, considerando más efectivo el uso de la misma debido al alto grado de intemperismo de las rocas en esta región.

El muestreo de la segunda etapa se realizó en enero del año 2000, tomando un total de 137 muestras representativas de las principales unidades litológicas afloradas en 7 sitios (peridotitas serpentizadas,

gabro, rocas volcánicas y rocas sedimentarias), fundamentalmente en cortes de caminos y carreteras, donde las rocas estaban mejor expuestas (Figura 1). A cada muestra se le midió la susceptibilidad magnética con un kapámetro IMV-2.

En noviembre del año 2005 se realizó el muestreo de la tercera etapa donde se tomaron, 235 muestras en 19 sitios en rocas de la secuencia ofiolítica, volcánicas (paleogénicas y cretácicas) y la Fm. Mícara. La medición de la susceptibilidad magnética se realizó con un Kappabridge KLY-2. Los resultados de ambos muestreos fueron comparados durante la interpretación.

Para el análisis de la susceptibilidad magnética de las rocas se consideró, como es de esperar, que generalmente los valores más altos se presentan en rocas ígneas, y dentro de ellas, las básicas y ultrabásicas, debido a sus mayores concentraciones de magnetita (Carmichael, 1982). También se tuvo en cuenta que los minerales formadores de rocas ultramáficas son el olivino y los piroxenos, mientras que el mineral accesorio más común es la magnetita (Carmichael, 1982). La magnetita es el principal mineral magnético en estas rocas y es frecuente que durante la serpentinización se forme como mineral secundario a expensas del Fe del olivino y del ortopiroxeno, por lo que la dunita, la harzburgita, la lherzolita y en menor medida la wehrlita, al serpentinizarse, formarían magnetita secundaria y su susceptibilidad magnética se incrementaría (Eckstrand, 1975; Lienert y Wasilewski, 1979; Toft et al., 1990; Kane et al., 2005).

RESULTADOS

Análisis de la susceptibilidad magnética de trabajos precedentes

Zamashikov y Tobachkov (1971); Castillo (1980); Rodríguez (1982) y Chang et al. (1990, 1991), en estudios realizados en la región nororiental de Cuba reportan, para las rocas serpentinizadas (harzburgitas y dunitas) del macizo ofiolítico Moa-Baracoa, los mayores valores de susceptibilidad magnética, mientras que los menores corresponden a las cromititas y gabros (Tabla 3), aumentando en las rocas serpentinizadas. Otros estudios realizados en el extremo suroeste de este macizo revelan que las rocas volcánicas y sedimentarias también exhiben los menores valores de susceptibilidad (Tabla 4).

Tabla 3. Susceptibilidad magnética ($\kappa \times 10^{-6}$ SI) de las rocas del macizo ofiolítico Moa-Baracoa (tomadas de Chang et al., 1990, 1991)

Litologías	N	xmin	xmax	xm
Gabros	43	126	38956	6283
Gabros diabasas	28	3770	12566	8796
Dunitas	71	6283	40212	12566
Dunitas serpentinizadas	60	251	90478	31416
Harzburgitas	50	6283	49010	12566
Harzburgitas serpentinizadas	70	2639	114982	26641
Cromititas	8	628	1257	1257

N= número de muestras; xmin= valor mínimo; xmax= valor máximo; xm= valor medio.

Tabla 4. Susceptibilidad magnética ($\kappa \times 10^{-6}$ SI) de las rocas ofiolíticas del extremo suroeste del macizo Moa-Baracoa (tomadas de Zamashikov y Tobachkov, 1971)

Litologías	xmax	xm
Dunitas	40212	12566
Dunitas serpentinizadas	90478	31416
Harzburgitas	49010	12566
Harzburgitas serpentinizadas	37699	12566
Gabros	11310	2513
Calizas	3141	126
Margas	7037	628
Areniscas tobáceas	11184	1257
Tobas argilíticas	3330	126

Xmax= valor máximo; xm= valor medio.

Castillo (1980), al medir la susceptibilidad magnética en diferentes zonas de Cuba oriental (Tabla 5), reporta los mayores valores medios de esta propiedad en las peridotitas serpentinizadas de Sagua-Frank País, aunque la mayor parte de las muestras presenta valores por debajo de los $25\ 133 \times 10^{-6}$ SI (Figura 4).

Tabla 5. Susceptibilidad magnética ($\kappa \times 10^{-6}$ SI) de peridotitas serpentinizadas en varias zonas de Cuba nororiental (tomadas de Castillo, 1980).

	N	Rango	Media
Moa-Punta Gorda	20	2802-53558	19617
Sagua-Frank País	13	8269-34558	21176
Nícaro	16	2677-65270	19640
Pinares de Mayarí	13	2639-40300	17301

N= número de muestras

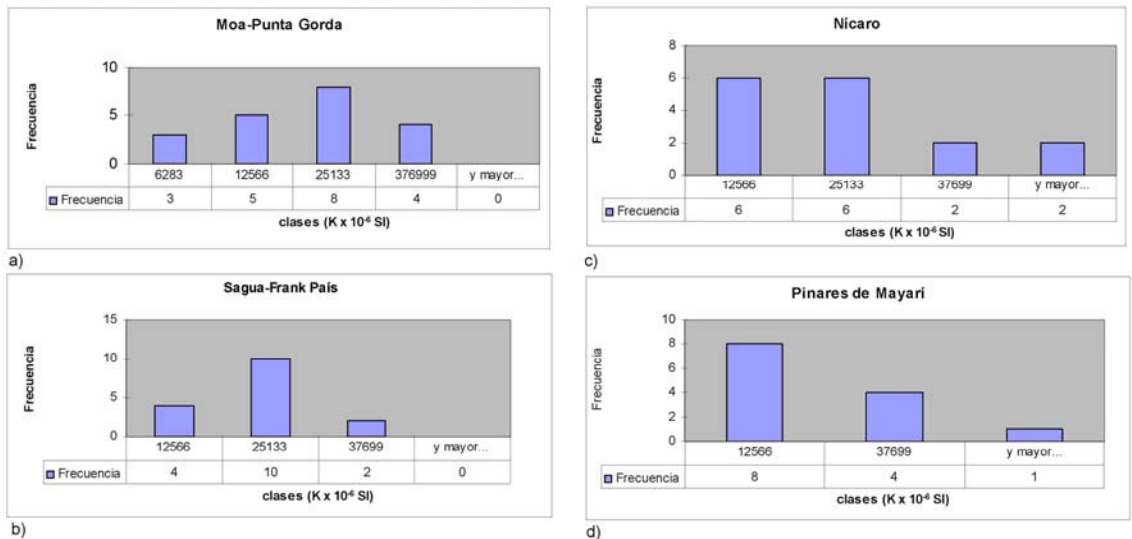
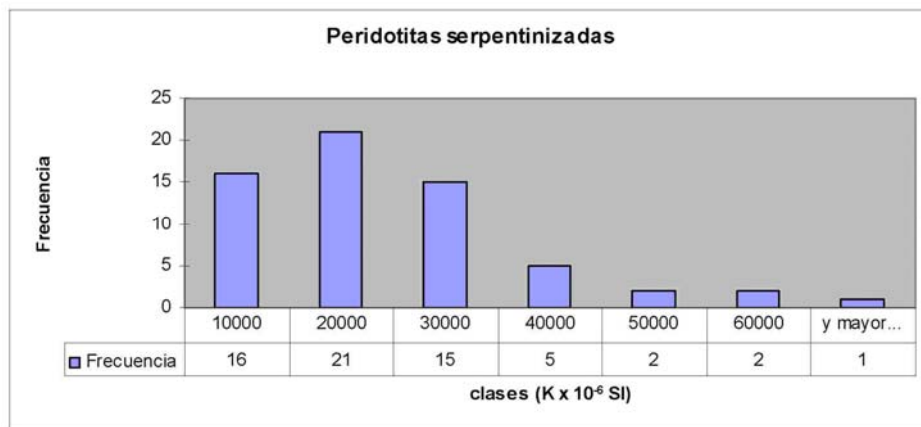


Figura 4. Histogramas de la $\kappa \times 10^{-6}$ SI de diferentes zonas de Cuba nororiental (calculados a partir de los datos de Castillo, 1980). Zonas: a) Moa-Punta Gorda; b) Sagua-Frank País; c) Nícaro; d) Pinares de Mayarí.

La susceptibilidad magnética de las peridotitas serpentinizadas en todas las muestras analizadas por Castillo (1980) varía de 2 639 a 65 270 $\times 10^{-6}$ SI, con media de 19 464 $\times 10^{-6}$ SI. La mayoría de estas muestras poseen valores de κ inferiores a 30 000 $\times 10^{-6}$ SI (Figura 5).



Parámetros estadísticos (susceptibilidad magnética)

Variación: 2639-65270

Media: 19464

Desviación estándar: 13120

Figura 5. Histogramas de la $\kappa \times 10^{-6}$ SI de las peridotitas serpentinizadas de Cuba nororiental (calculados a partir de los datos de Castillo, 1980).

Análisis de la susceptibilidad magnética medida en las etapas dos y tres de la investigación

En las Tablas 6, 7, 8 y 9 se presentan los resultados del tratamiento estadístico de las mediciones de κ realizadas en dos etapas de muestreo, en diferentes zonas del nordeste de Cuba oriental (Figura 1). En el sitio Las Checas la mayoría de las muestras poseen valores entre 2513 y 13396 x 10⁻⁶ SI, y en el segundo entre 5027 y 15080 x 10⁻⁶ SI (Tabla 6; Figura 6a y b).

Tabla 6. Susceptibilidad magnética (κ x10⁻⁶ SI) de los diferentes tipos de rocas de los sitios de Sagua-Moa (primera etapa de muestreo). La Fm. Mícará, La Picota, Gran Tierra están conformadas por rocas sedimentarias, mientras que la Fm. Sabaneta está compuesta por tobas. Todas estas formaciones se describen en el marco geológico.

Las Checa				
Litologías	N	Rango	Media	SD
Peridotitas serpentinizadas	33	2174-13396	7073	3245
Universidad				
Peridotitas serpentinizadas	34	1885-15163	9165	3674
Los Calderos				
Fm. Mícará	5	126-2275	937	867
Peridotitas serpentinizadas	3	397-27750	9650	15677
Sur de Los Calderos				
Fm. Gran Tierra	8	126-597	230	172
Fm. Sabaneta	5	126-824	331	310
Fm. La Picota	1	-	18096	-
El Lirial				
Fm. Sabaneta	3	126-471	241	199
Fm. La Picota	2	13729-22828	18278	6434
Cayo Grande				
Gabros	3	251-4241	1584	2301
Peridotitas serpentinizadas	10	633-36757	14539	9793
Potosí				
Gabros	13	251-13195	3032	4469
Peridotitas serpentinizadas	17	769-23091	9265	6155

N= número de muestras; *SD*= desviación estándar.

En el sitio Cayo Grande, los gabros reportaron los valores más bajos y las peridotitas serpentinizadas los más altos; en estas últimas, con excepción de una muestra, los valores de κ están por encima de 7540 x 10⁻⁶ SI. De manera general la mayor parte de las muestras del sitio poseen κ superiores a 2513 x 10⁻⁶ SI (Figura 6c). Se observa un notable aumento de la

susceptibilidad magnética de este sitio con respecto a los dos anteriormente analizados.

Tabla 7. Susceptibilidad magnética ($\kappa \times 10^{-6}$ SI) de varios sitios de Sagua-Moa (segunda etapa de muestreo). La Fm. Mícara está conformada por rocas sedimentarias y la Fm. Sabaneta por tobos. Ambas formaciones se describen en el marco geológico.

Sitios	Litologías	N	Rango	Media	SD
Moa1	Gabros	7	517-183600	78240	77750
Moa2	Gabros	11	3200- 183500	77612	49370
Moa3	Peridotitas serpentinizadas	11	18000- 34700	26809	5671
Moa4	Peridotitas serpentinizadas	9	17000- 45300	27144	8300
Moa5	Peridotitas serpentinizadas	15	17100- 53500	32380	11322
Moa6	Peridotitas serpentinizadas	13	3080- 18920	8966	4188
Moa7	Peridotitas serpentinizadas	20	8240- 20440	13521	3387
Moa8	Peridotitas serpentinizadas	15	9100- 23500	18646	4184
Moa9	Gabros pegmatitas	16	304- 24200	7882	9696
Moa10	Gabros pegmatitas	13	231- 2800	814	724
Moa11	Peridotitas serpentinizadas	18	817- 1972	1478	303
Moa12	Gabros	11	731- 10140	1928	2735
Moa13	Gabros	10	2480- 49200	24493	17671
Moa14	Gabros	13	1240- 8100	4490	2222
Moa15	Diabasas	16	405- 615	532	59
Moa16	Diabasas	13	449- 596	512	39
Moa17	Diabasas	8	1020- 31800	10416	11163
Moa18	Fm. Sabaneta	6	664- 950	798	136
Moa19	Fm. Mícara	10	688- 44800	15921	13991

N= número de muestras; SD= desviación estándar.

Tabla 8. Susceptibilidad magnética ($\kappa \times 10^{-6}$ SI) de las litologías de la región nororiental de Cuba. La Fm. Mícara y La Picota, están conformadas por rocas sedimentarias y la Fm. Sabaneta por tobos. Todas estas formaciones se describen en el marco geológico.

Litología	N	Rango	Media	SD
Peridotitas serpentinizadas	256	633-65270	14494	10966
Gabros	95	251-183500	18137	35256
Fm. Sabaneta	14	126-950	512	332
Fm. La Picota	3	13729-22828	18217	4551
Fm. Mícara	15	126-44800	10927	13399

N= número de muestras; SD= desviación estándar.

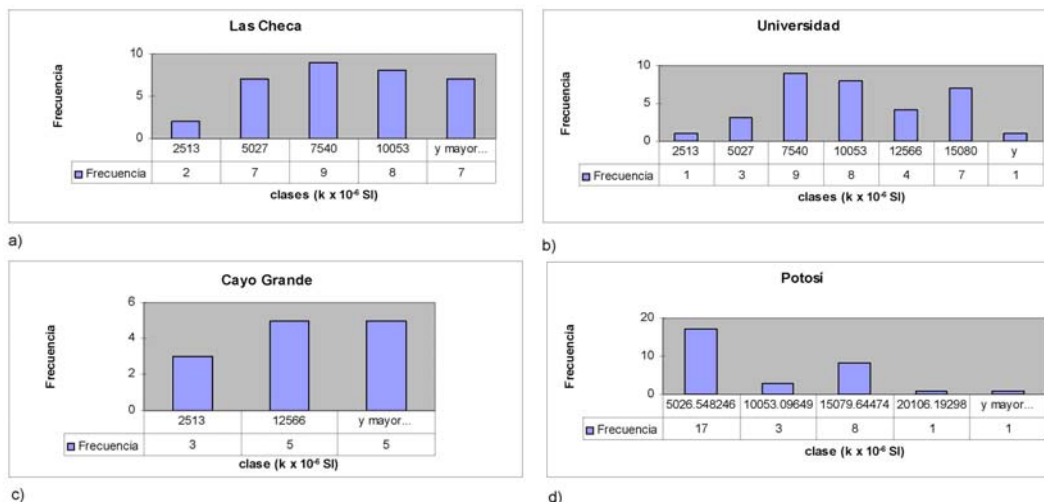


Figura 6. Histograma de la $\kappa \times 10^{-6}$ SI de los sitios muestreados en Moa. Sitios: a) Las Checa; b) Universidad; c) Cayo Grande; d) Potosí.

En el sitio Potosí, las peridotitas y gabros mostraron un comportamiento de la susceptibilidad magnética similar al de Cayo Grande, pero con valores más bajos (Tabla 6). En Potosí, más del 50 % de las muestras analizadas, en su mayoría gabros, poseen κ inferiores a 5027×10^{-6} SI (Figura 6d), aunque superiores a los de Cayo Grande, contrario a lo que sucede con las peridotitas.

En Los Calderos la mayoría de las muestras poseen κ entre 126 y $2\,513 \times 10^{-6}$ SI, correspondiente a la Fm. Mícara (Figura 7a). El valor extremo superior 27750×10^{-6} SI, pertenece a las peridotitas serpentinizadas (Tabla 6).

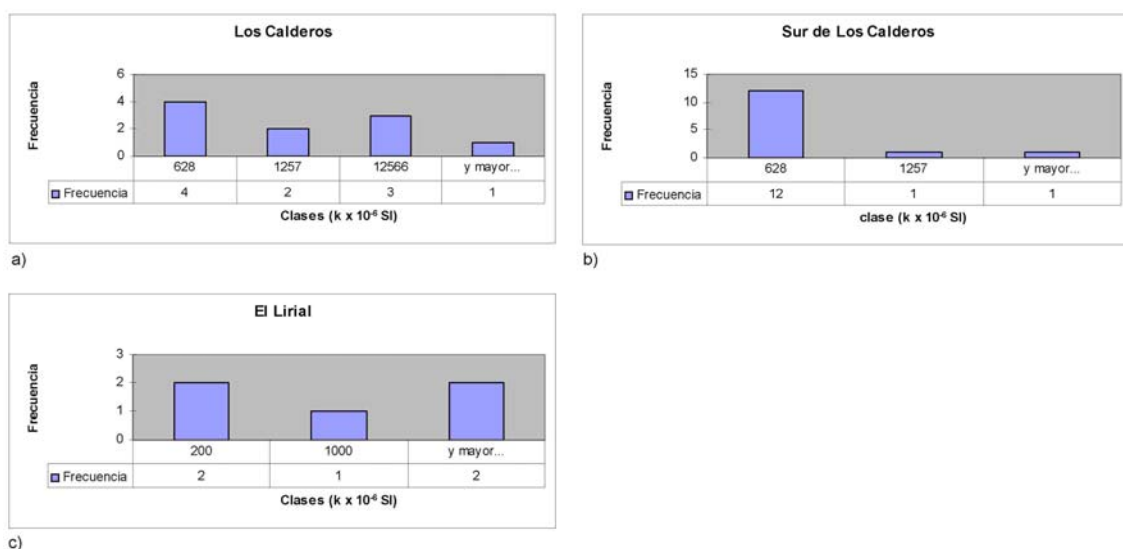


Figura 7. Histograma de la $\kappa \times 10^{-6}$ SI de los sitios muestreados entre Sagua y Moa. Sitios: a) Los Calderos; b) Sur de Los Calderos; c) El Lirial.

Al sur de Los Calderos y en El Lirial se registran, en la Fm. La Picota, los valores más altos de susceptibilidad magnética, los cuales se asemejan a los obtenidos en peridotitas serpentinizadas. Este aspecto se vincula con su composición litológica, caracterizada fundamentalmente por contener un alto porcentaje de clastos de peridotitas serpentinizadas (Cobiella, 2000). En ambos sitios las rocas volcano-sedimentarias exhiben los menores valores de susceptibilidad magnética.

Al comparar las diferentes zonas investigadas durante la primera etapa de muestreo se encuentra que los mayores valores medios de susceptibilidad magnética en las peridotitas se ubican en la zona de Cayo Grande, siguiéndole en orden Potosí, Universidad y La Checa. En el caso de los gabros, los mayores valores medios se alcanzan en Potosí.

Las peridotitas serpentinizadas muestreadas en la segunda etapa presentaron una susceptibilidad magnética media entre 1 478 y 32 380 $\times 10^{-6}$ SI (Tabla 7), en los sitios Moa11 y Moa5, respectivamente. Los sitios con mayores susceptibilidad magnética se localizan en la región de Sagua de Tánamo, mientras que los más bajos se reportan en Moa-Baracoa (Figura 8).

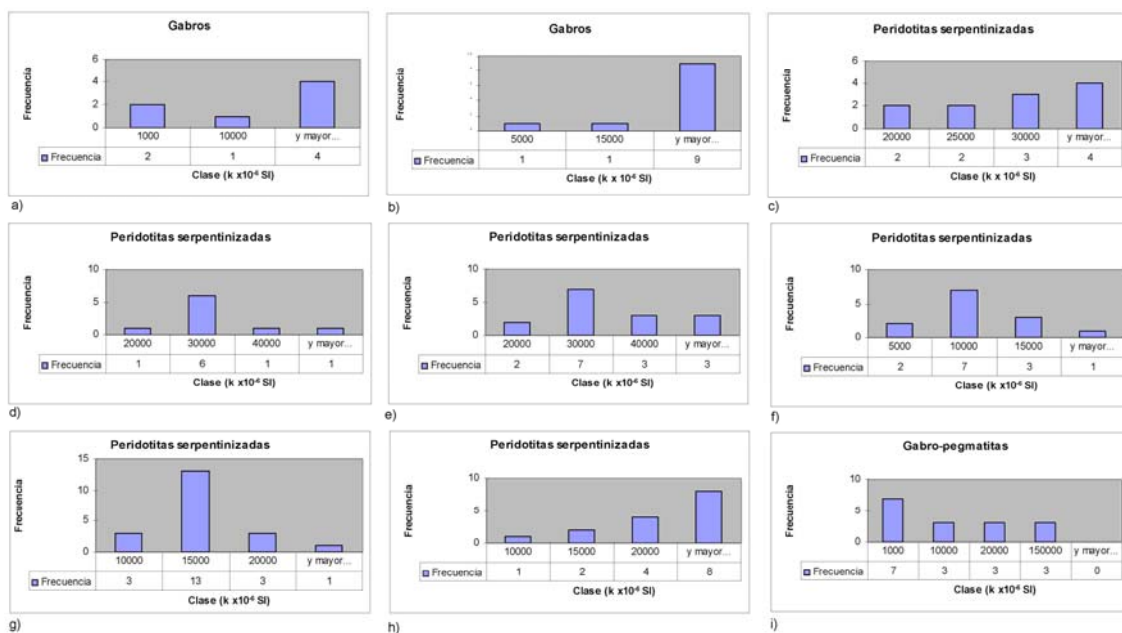


Figura 8. Histograma de la $k \times 10^{-6}$ SI de la región Sagua-Moa. Sitios: a) Moa1; b) Moa2; c) Moa3; d) Moa4; e) Moa5; f) Moa6; g) Moa7; h) Moa8; i) Moa9.

Las muestras de gabros poseen susceptibilidad magnética media entre $1\ 928$ y $78\ 240 \times 10^{-6}$ SI, localizadas en los sitios Moa12 y Moa1, respectivamente. En este último sitio se registraron los valores más altos de susceptibilidad magnética de toda la región investigada. Los sitios Moa1 y Moa2, localizados en la entrada de Farallones, poseen valores de esta propiedad por lo menos tres veces superiores a las obtenidas en los restantes sitios de gabros ubicados en El Quemado del Negro. En Moa1 y Moa2 la mayoría de las muestras poseen valores superiores a $15\ 000 \times 10^{-6}$ SI (Figura 8), sin embargo en los sitios del Quemado del Negro la mayor parte de las muestras presentan valores por debajo de los $6\ 000 \times 10^{-6}$ SI (Figura 9).

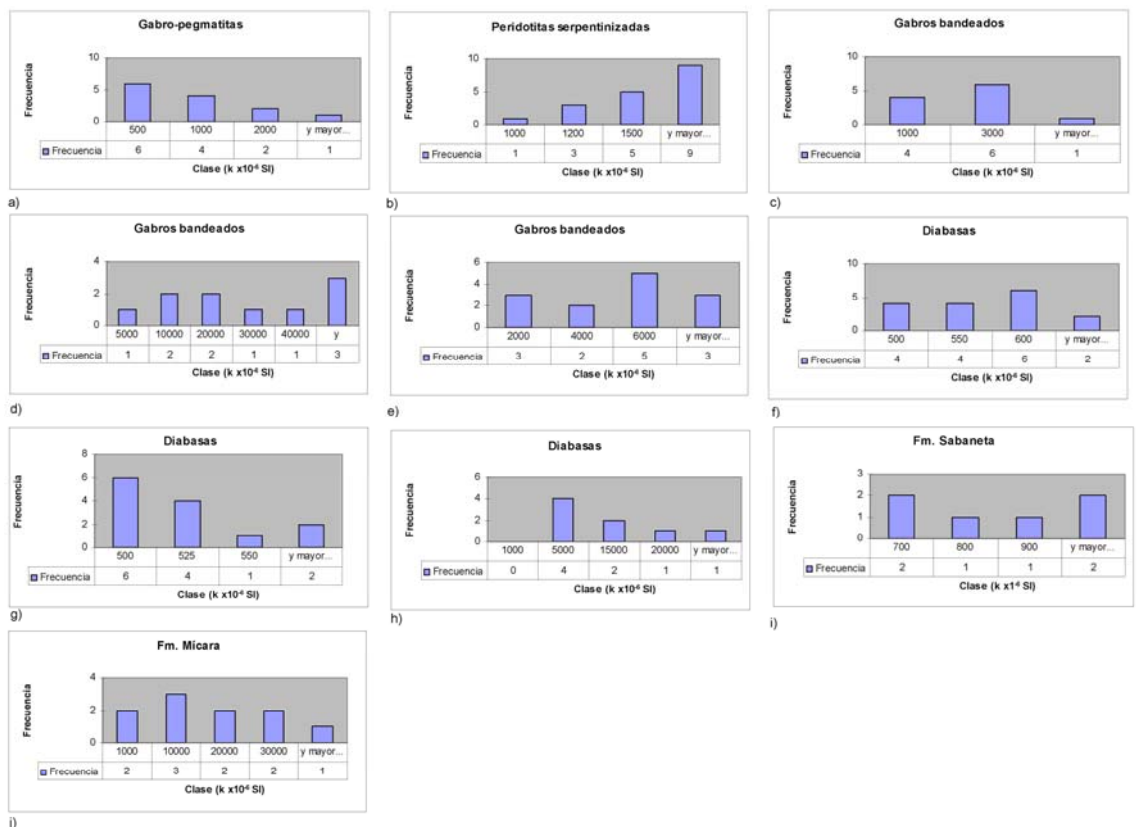


Figura 9. Histograma de la $k \times 10^{-6}$ SI de la región Moa. Sitios: a) Moa10; b) Moa11; c) Moa12; d) Moa13; e) Moa14; f) Moa15; g) Moa16; h) Moa17; i) Moa18; j) Moa19.

En el sitio Moa9 se registraron altos valores de susceptibilidad magnética para este tipo de roca, alcanzando una media de $7\ 882 \times 10^{-6}$ SI (Tabla 7). En la mayoría de las muestras están por debajo de los $10\ 000 \times 10^{-6}$ SI, aunque algunas tienen valores superiores, responsables de los altos valores medios registrados (Figura 8). Todas las muestras poseen valores de susceptibilidad magnética por debajo de $3\ 000 \times 10^{-6}$ SI (Figura 9).

Las diabasas (sitios Moa15, Moa16 y Moa17), presentan valores de susceptibilidad magnética media inferiores a 600×10^{-6} SI, con la excepción del sitio Moa17 que reporta valores por encima de $1\ 000 \times 10^{-6}$ SI hasta $31\ 800 \times 10^{-6}$ SI, con media superior a $10\ 000 \times 10^{-6}$ SI (Tabla 7; Figura 9), semejantes a los valores registrados en peridotitas serpentinizadas.

Las rocas volcano-sedimentarias paleogénicas (Fm. Sabaneta) presentan un valor de susceptibilidad magnética media de 798×10^{-6} SI (Tabla 7) y una distribución similar en los diferentes intervalos de susceptibilidad magnética entre 664 y 950×10^{-6} SI (Figura 9).

En la Fm. Mícara las muestras se distribuyen uniformemente en los diferentes intervalos de susceptibilidad magnética, desde 688×10^{-6} SI, valores típicos de rocas volcánicas, hasta $44\ 800 \times 10^{-6}$ SI (valores típicos de peridotitas serpentinizadas) según se refleja en la Figura 9.

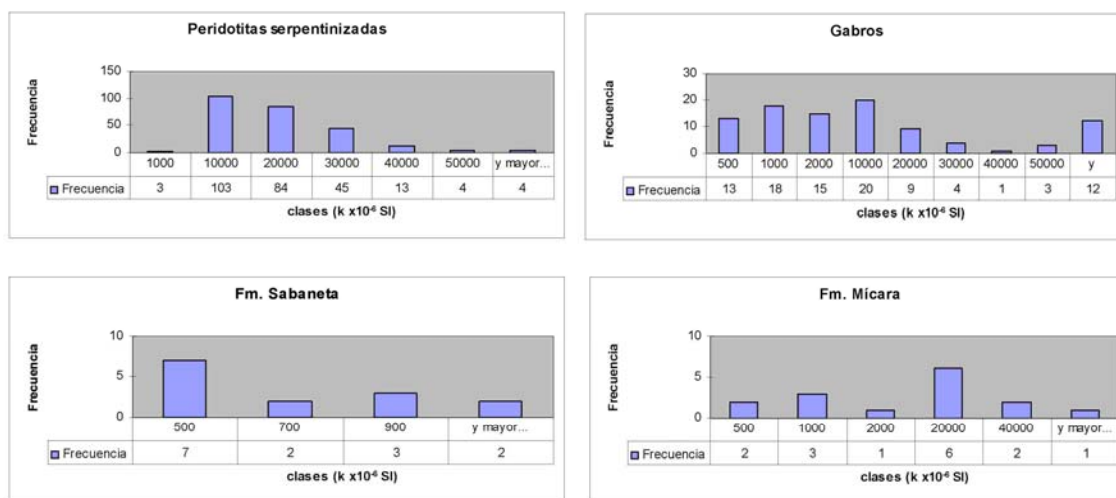


Figura 10. Histogramas de $k \times 10^{-6}$ SI de las rocas de Cuba nororiental.

Un análisis por litologías de la región de estudio, a partir de los muestreos realizados en la segunda y tercera etapa de la investigación, indica que las peridotitas alcanzan valores de susceptibilidad magnética de $65\ 270 \times 10^{-6}$ SI, con media de $14\ 494 \times 10^{-6}$ SI (Tabla 8). La mayor parte de las muestras de estas rocas están por debajo de $30\ 000 \times 10^{-6}$ SI (Figura 10). En los gabros, estos valores llegan hasta $183\ 500 \times 10^{-6}$ SI, con media de $18\ 137 \times 10^{-6}$ SI (Tabla 8). La mayoría de muestras se ubican por debajo de los $10\ 000 \times 10^{-6}$ SI (Figura 10). En la Fm. La Picota se observan valores medios similares a los obtenidos en los gabros ($18\ 217 \times 10^{-6}$ SI), oscilando entre $13\ 729$ y $22\ 828 \times 10^{-6}$ SI.

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Los altos valores de susceptibilidad magnética reportados por Castillo (1980) para las rocas ultramáficas de Nicaro (Tabla 5) indican un mayor grado de serpentización de estas rocas, ya que durante el propio proceso de serpentización el contenido de magnetita se incrementa (Grant, 1985; Toft et al., 1990; Kane et al., 2005). Los resultados petrográficos de García (1990) refuerzan esta idea al encontrar un alto grado de serpentización en Pinares de Mayarí, zona muy próxima a Nicaro.

Durante la segunda etapa de muestreo se observó un aumento de los valores de susceptibilidad magnética en las peridotitas serpentizadas del sitio Cayo Grande, con respecto a La Checas y Universidad, indicando un incremento en el grado de serpentización de las rocas de Cayo Grande. En este mismo sitio los mayores valores de susceptibilidad magnética de las peridotitas serpentizadas respecto a los gabros se deben al carácter ultrabásico y al grado de serpentización de las primeras.

Los menores valores de susceptibilidad magnética registrados en las peridotitas de Potosí con respecto a las de Cayo Grande sugieren menor grado de serpentización de estas rocas en el primer sitio mencionado. Por otra parte, los mayores valores en los gabros de Potosí indican un mayor contenido de minerales magnéticos, vinculados probablemente con una posición en el corte más cercano al contacto con las peridotitas. Los resultados del análisis petrográfico realizado por Marrero (1983) en Jiguaní, cercano a la zona de muestreo, presentan altos contenidos de óxidos, en los que se incluye la magnetita. Los bajos valores de susceptibilidad magnética en la mayoría de las muestras de Los Calderos, al sur de este sitio, y en El Lirial, se deben a que los tipos litológicos presentes son rocas sedimentarias y volcanosedimentarias.

Con excepción del sitio Cayo Grande, los valores medios de susceptibilidad magnética en las peridotitas no sobrepasan los $11\ 000 \times 10^{-6}$ SI, diferenciándose notablemente de las mediciones realizadas por otros autores (Chang et al., 1990, 1991; Zamashikov y Tobachkov, 1971; Castillo, 1980), sugiriendo que las muestras medidas y analizadas en esta investigación poseen menor

grado de serpentización que las analizadas por los investigadores referidos o que el muestreo realizado resultó insuficiente para llevar a cabo tal comparación. En el caso de los gabros los resultados son muy similares a los reportados en la literatura.

Durante la segunda etapa de muestreo se encontró que los mayores valores de susceptibilidad magnética en la región de Sagua de Tánamo indican mayor grado de serpentización en las peridotitas. Los menores valores presentes en la carretera Moa-Baracoa pueden ser un indicador de un menor grado de serpentización de las peridotitas y de un mayor grado de meteorización. Este último aspecto se observó en muestras de mano.

La gran diferencia entre los valores de susceptibilidad magnética de los sitios con gabros evidencia desigualdad en los tipos y concentraciones de minerales magnéticos. Estos contenidos parecen ser mayores en los sitios Moa1 y Moa2, donde se registran mayores valores de susceptibilidad magnética. A partir de este resultado se infiere que es probable que las muestras de estos dos sitios pertenezcan a diques o sills de gabros ubicados por debajo de los gabros bandeados que se localizan en Quemado del Negro, teniendo en cuenta el modelo propuesto por Proenza (1997). Esta ubicación explicaría las causas de los altos contenidos de minerales magnéticos debido a mayores concentraciones de minerales máficos.

Las muestras de peridotitas serpentizadas y de gabros medidas durante la segunda etapa de muestreo, poseen valores de susceptibilidad magnética más altos que los obtenidos en la primera etapa, lo que se explica por el mayor estado de conservación que presentan estas muestras, es decir, menor grado de alteración y meteorización, teniendo en cuenta que las mismas se tomaron de núcleos obtenidos a partir de la perforación de las rocas. No se descarta la influencia de un mayor grado de serpentización en las muestras de la segunda etapa.

Los mayores valores de susceptibilidad magnética de las diabasas del sitio Moa17 (superiores a $1\ 000 \times 10^{-6}$ SI) con respecto a los sitios Moa15 y Moa16 de la misma litología, indican menor enriquecimiento en minerales magnéticos en estos dos últimos sitios. Los altos valores

registrados en Moa17, similares a los obtenidos en peridotitas serpentizadas, sugieren realizar un análisis mineralógico detallado para estimar el contenido y tipo de óxidos, que defina la mineralogía responsable de los valores de susceptibilidad magnética.

En la Fm. Sabaneta la distribución similar de los valores de susceptibilidad magnética en los diferentes intervalos manifiesta el carácter relativamente homogéneo de dicha formación. El carácter heterogéneo de la Fm. Mícara se refleja en la distribución de los valores de susceptibilidad magnética en intervalos típicos de rocas volcánicas y peridotíticas. En estas dos formaciones se registran valores superiores a los obtenidos en los sitios muestreados durante la primera etapa, lo cual puede ser un reflejo de los contenidos de minerales magnéticos o del tipo de muestreo, considerando que durante la segunda etapa las muestras se obtuvieron perforando las rocas, y por lo tanto poseen menor grado de alteración. La disminución, de un sitio a otro, de los valores de susceptibilidad magnética en las peridotitas, puede constituir un indicador de la disminución de su grado de serpentización.

CONCLUSIONES

Los resultados confirman que el comportamiento de los valores de la susceptibilidad magnética refleja la composición y parte de la historia geológica de la región nororiental de Cuba.

Los mayores valores de susceptibilidad magnética se obtuvieron en las peridotitas serpentizadas y en dos sitios de gabros. Estos gabros parecen haberse formado en la parte superior del manto, por debajo de los gabros bandeados. En las peridotitas los valores de susceptibilidad magnética reflejan su grado de serpentización en una relación directa.

Las mediciones de susceptibilidad magnética indicaron gran variabilidad en las propiedades magnéticas en un mismo tipo de roca y entre diferentes tipos de ellas. Esta variabilidad puede estar condicionada por diferentes fases minerales magnéticas, principalmente magnetita, con variaciones en su concentración, lo que indica variabilidad en el contenido de magnetita, posiblemente durante el proceso de cristalización.

Los resultados obtenidos en esta investigación sugieren que en la faja ofiolítica Mayarí-Baracoa el comportamiento del campo magnético obedece a las características geométricas y físicas de las ofiolitas y algunos diques de gabros, asociándose los altos valores del campo a los mayores espesores de estas rocas.

AGRADECIMIENTOS

A Jesús Blanco por su colaboración en los trabajos de campo. A Luis Alva del Instituto Geofísica de la UNAM, por su participación y aporte del equipamiento utilizado durante una campaña de paleomagnetismo realizada en Cuba oriental, de la cual se extrajeron parte de los datos utilizados en el artículo. Las gracias al revisor Luis Delgado Argote del CICESE, Baja California, México.

REFERENCIAS

- ALBEAR, J.; I. BOYANOV; K. BREZSNYANSZKY; R. CABRERA; V. CHEJOVICH; B. ECHEVARRÍA; R. FLORES; F. FORMELL; G. FRANCO; I. HAYDUTOV; M. ITURRALDE-VINENT; I. KANTCHEV; I. KARTASHOV; V. KOSTADINOV; G. MILLÁN; R. MYCZYNSKI; E. NAGY; J. ORO; L. PEÑALVER; K. PIOTROWSKA; A. PSZCZOLKOWSKI; J. RADOZJ; RUDNICKI & M.L. SOMIN. 1988. Mapa geológico de Cuba. Escala 1:250 000.
- BATISTA, J.; M.A. PÉREZ-FLORES; G. QUIROGA-GOODE & L.A. GALLARDO. 2007. Geometry of ophiolites in Eastern Cuba from 3D inversion of aeromagnetic data, constrained by surface geology. *Geophysics* 72 (3): B81-B91.
- CARMICHAEL, R. S. 1982. *Magnetic Properties of Minerals and Rocks: CRC Handbook of Physical Properties of Rocks*. 2 ed. vol 2.
- CASTILLO, L.R. 1980. Algunas particularidades petrofísicas de Cuba oriental. [Instituto Superior Minero Metalúrgico]. Moa (Trabajo de diploma) 81 p.
- CHANG, J.L.; G. GRIBNIOV & A. BRODOBOI. 1990. Informe sobre resultados del levantamiento aerogeofísico complejo en el territorio de las provincias de Santiago de Cuba, Holguín, Granma y Guantánamo (Sector Pinares de Mayarí). ONRM. 314 p
- CHANG, J.L.; L. CORBEA ; F. PRIETO ; J. HERNÁNDEZ & G. BRITO. 1991. Informe sobre los resultados del levantamiento aerogeofísico complejo en el territorio de las provincias Guantánamo y Holguín (Sector Guantánamo sur). ONRM. 260 p.

- CLARK, D.A. 1997. Magnetic petrophysics and magnetic petrology: aids to geological interpretation of magnetic surveys. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics* 17 (2): 83-103.
- COBIELLA, J.L. 2000. Jurassic and Cretaceous geological history of Cuba. *International Geology Review* 42: 594-616.
- ECKSTRAND, O.R. 1975. The Dumont Serpentinite: A Model for Control of Nickelferous Opaque Mineral Assemblages by Alternation Reactions in Ultramafic Rocks, *Econ. Geol.* 70: 183-201.
- FONSECA, E.; V.N. ZELEPUGIN & M. HEREDIA. 1985. Structure of the ophiolite association of Cuba. *Geotectonic* 19: 321-329.
- GARCÍA, M. 1976. Estudio petrográfico de los yacimientos de la Delta. Trabajo de diploma. 126 p.
- GARCÍA, T. 1990. Caracterización petrológica del pozo estructural E No. 1 de Pinares de Mayarí. [Instituto Superior Minero Metalúrgico]. Moa (Trabajo de diploma). 61 p.
- GRANT, F.S. 1985. Aeromagnetism, geology and ore environments, 1, Magnetite in igneous, sedimentary and metamorphic rocks: An overview, *Geoexploration* 23: 303-333.
- ITURRALDE-VINENT, M. 1994. Cuba Geology: a new plate-tectonic synthesis. *Journal of Petroleum Geology*, 17: 39-70.
- ITURRALDE-VINENT, M. 1996. Geología de las ofiolitas de Cuba. En: Iturralde-Vinent, M. (ed.). *Ofiolitas y arcos volcánicos de Cuba*. IGCP project 364. Special contribution n.1: 83-120.
- KANE, I.; A. STAMPOLIDIS; N. GRIGORIS-TSOKAS; S. BUSHATI; D. KONDOPOULOU & P. TSOURLOS. 2005. The structure of the ophiolitic belt in Albania inferred from geomagnetic anomalies. *Annals of geophysics* 48 (2): 231-246.
- LIENERT, B. R., & P. J. WASILEWSKI. 1979. A magnetic study of the Serpentinization Process at Buzzo Mountain, California. *Earth Planet Sci. Lett.* 43: 406-416.
- MARRERO, J. C. 1983. Estudio petrográfico del macizo de gabro Jiguaní. [Instituto Superior Minero Metalúrgico]. Moa (Trabajo de diploma) 71 p.
- MILLÁN, G. 1996. Metamorfitas de la Asociación Ofiolítica de Cuba. En: Iturralde-Vinent, M.A. ed., *Ofiolitas y arcos volcánicos de Cuba*. IGCP Project 364. Special Contribution n.1: 131-153.
- PINELL, A. 1987. Estudio petrológico en el basamento del yacimiento ferroniquelífero Moa-Oriental, provincia Holguín. Trabajo de diploma. ISMM. Moa 95 p.

- PROENZA F.J. 1997. Mineralización de cromita en la faja ofiolítica Mayarí-Baracoa (Cuba): Ejemplo del yacimiento Mercedita. [Instituto Superior Minero Metalúrgico] Moa (Tesis Doctoral) 227 p.
- PROENZA, J.; P. ALFONSO; J.C. MELGAREJO; F. GERVILLA; J. TRITLLA & A.E. FALLICK. 2003. D, O and C isotopes in podiform chromitites as fluid tracers for hydrothermal alteration processes of the Mayarí-Baracoa Ophiolitic Belt, eastern Cuba. *Journal of Geochemical Exploration* 78-79: 117-122.
- RÍOS, Y. Y COBIELLA, J. 1984. Estudio preliminar del macizo de gabroides Quesigua de las ofiolitas del este de la provincia de Holguín. *Minería y Geología*, 2:109-132.
- RODRÍGUEZ, J. 1982. Estructura geológica profunda de Cuba oriental en base a datos geofísicos. [Instituto de Minas de Leningrado.] (Tesis doctoral) 246p.
- STRECKEISEN, A.I. 1973. Plutonic rocks classification and nomenclature. *Geotimes*. 18: 26-30.
- TOFT, P. B., J. ARKANI-HAMED, & S. E. HAGGERTY. 1990. The effects of serpentinization on density and magnetic susceptibility: A petrophysical model. *Phys. Earth Planet. Inter.* 65: 137-157.
- ZAMASHIKOV, M.E. & V. TOBACHKOV. 1971. Informe sobre los resultados de los trabajos de búsqueda a escala 1:50 000 en la parte suroeste del macizo hiperbasítico Moa - Baracoa. ONRM. 314 p.