

## **Rocas volcánicas de las series Inferior y Media del Grupo El Cobre en la Sierra Maestra (Cuba Oriental): volcanismo generado en un arco de islas tholeiítico**

**Volcanic rocks from the lower and intermediate series of the El Cobre Group,  
Sierra Maestra, Eastern Cuba: a case of island arc tholeiites**

X. CAZAÑAS<sup>(1)</sup>, J.A. PROENZA<sup>(2)</sup>, G. MATTIETTI KYSAR<sup>(3)</sup>, J. LEWIS<sup>(3)</sup>, J.C. MELGAREJO<sup>(2)</sup>

*(1) Instituto de Geología y Paleontología, Ciudad de la Habana, Cuba.*

*(2) Departament de Cristal·lografia, Mineralogia i Dipòsits Minerals. Facultat de Geologia, Universitat de Barcelona.  
Martí i Franquès, s/n, 08028 Barcelona. E-mail: joaquin@natura.geo.ub.es*

*(3) Geology Department, George Washington University, Washington, D.C. 20052, USA.*

### RESUMEN

Se han analizado once muestras de rocas volcánicas (basaltos, andesita basáltica, andesitas y dacitas) localizadas en la parte inferior y media de las series del Grupo El Cobre en la Sierra Maestra (este de la Isla de Cuba). Las muestras corresponden (excepto la muestra M8) a cuerpos hipoabisales, y se componen principalmente de fenocristales de plagioclasas, con un predominio de texturas porfíricas. De acuerdo a los contenidos de SiO<sub>2</sub>, FeO total, MgO y K<sub>2</sub>O, las rocas presentan una tendencia tholeiítica con bajos contenidos en K.

Los contenidos de REE son bajos y presentan un patrón normalizado a los valores condríticos prácticamente no fraccionado (plano) desde las LREE a las HREE. Los elementos trazas muestran un ligero enriquecimiento en large-ion lithophile elements (LILE), y una marcada anomalía negativa de Nb, característico de muchas tholeiitas de arcos de islas. La composición química de los clinopiroxenos también es similar a la que presentan los clinopiroxenos de las tholeiitas de arcos de islas. Las características geoquímicas (elementos mayores y trazas) de las rocas analizadas son similares a las del arco volcánico de Kermadec en Pacífico SW.

Por último, los bajos contenidos en REE, el patrón de REE con morfología plana, así como los bajos contenidos en elementos incompatibles (K, Rb, Zr, Th) son similares a los de las series tipo IAT presentes en el arco volcánico del Caribe. Estos nuevos datos sobre el volcanismo del Paleógeno de la Sierra Maestra sugieren que los modelos de placas tectónicas que han sido propuestos para explicar el origen del arco volcánico de Sierra Maestra deben ser revisados.

*Palabras claves:* Geoquímica. Tholeiíta. Arco volcánico. Sierra Maestra. Cuba. Caribe.

## ABSTRACT

A set of 11 samples of igneous rocks from the lower and middle Cobre Group of the Sierra Maestra (SE Cuba) were analyzed. These rocks are volcanic and hypoabyssal bodies with porphyritic texture and predominantly plagioclase phenocrysts. Their composition ranges from basalt to dacite and shows a tholeiitic trend with low K contents.

The REE concentrations are low and, when normalized to chondrite, show a flat pattern with no relative enrichment in either LREE or HREE. In addition, these rocks present a slight enrichment in LILE and a strong Nb negative anomaly, typical of island arc tholeiites. Because of their geochemistry, the rocks of the Sierra Maestra are comparable to those of the Kermadec arc in the SW Pacific.

Finally, the low REE content, the flat REE pattern, as well as the low incompatible element contents, are similar to the IAT Series present in the Caribbean Volcanic Arcs. All these new data on the Paleogene volcanism suggest that the tectonic models proposed for the origin of the Sierra Maestra Arc should be revised.

*Key words:* Geochemistry. Tholeiite. Volcanic arc. Sierra Maestra. Cuba. Caribbean plate.

---

## EXTENDED ABSTRACT

### Introduction

Rocks associated with the volcanic island arc of the Sierra Maestra (or Turquino arc) are present throughout the Sierra Maestra, in southeastern Cuba. This magmatic activity took place from Paleocene (Thanetian) to early Middle Eocene (Cobiella, 1988; Iturralde-Vinent, 1996). In this paper we present the results of the geochemistry of the igneous rocks from the lower and middle part of the El Cobre Group of the Sierra Maestra.

### Geologic outline

Igneous rocks of Danian-Middle Eocene age crop out in the Sierra Maestra eastern Cuba (Fig. 1). This volcanic activity was limited to the eastern part of the island and is represented by a sequence of volcanic material thicker than 4000m. These rocks belong to the Paleogene volcanic arc and were deposited on top of the deformed deposits of the Cretaceous island arc, ophiolites and deposits of piggy-back basin of Campanian-Late Danian (Iturralde-Vinent, 1996). The El Cobre Group described in the Sierra Maestra region consists of agglomerates, lava, hialoclastites and pyroclastic rocks. This group includes a large number of hypoabyssal bodies of diorite to granite composition and plutons of gabbro, quartz-diorite, tonalite and plagiogranite, granodiorite and granite (Méndez, 1997). The Cobre Group has been interpreted as the axial zone of the volcanic arc (Cobiella, 1988; Iturralde-Vinent, 1996).

The volcanoclastic material from the Paleogene arc are found to north of the Sierra Maestra, they represent the back arc deposits and are described as the Sabaneta Formation (Iturralde-Vinent, 1976; Proenza and Carralero, 1994; Quintas et al., 1995; García-Torres et al., 1996).

### Sample description and analytical procedures

A total of 11 samples were collected from the lower and middle part of the Paleogene sequence of the Sierra Maestra (Fig. 2). Five of these samples (M2, M9, M4, M6 and M7) are from outcrops (Fig. 3), the other seven samples come from cores drilled within the "El Cobre" mine area, located in the middle part of the El Cobre Group (Cazañas et al., in this volume).

Chemical analyses of the minerals were carried out with the CAMECA SX50 electron microprobe. Major elements and some trace elements (Zr, Y, Pb, Ga) were obtained by XRF (Philips PW2400, with a Rh anode). Other trace elements (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, U, Th, Nb, Sr, Mo, Ni, Rb, Cu, Zn, V, Ba) were measured by ICP-MS with a Perkin Elmer Elan 6000 equipment. These analyses were carried out at the University of Barcelona.

### **Petrology and chemistry of the mineral phases**

In thin section the samples show porphyritic texture but the glomeroporphyritic texture is also commonly observed (Table 1). The phenocrysts, for the most part plagioclase and in smaller amount clinopyroxene, are idiomorphic. Plagioclase composition ranges between An<sub>87</sub> to An<sub>39</sub>, and the orthoclase content is present only in minor percentage (0.5 %), (Fig. 5A). Most plagioclase crystals show a strong oscillatory zonation, with composition varying between Ab<sub>60</sub> and Ab<sub>13</sub>. All of the analyzed pyroxenes are augite according to the classification of Morimoto et al. (1988) (Fig. 5B).

When distinguishable under the microscope, the groundmass is microcrystalline and it is mostly made up of plagioclase (or feldspar), clinopyroxene or other ferromagnesian minerals.

### **Geochemistry**

The major and some trace element analyses of the volcanic rocks analyzed are shown in Table 2. Following the classification of total alkali versus silica (Le Bas, 1986) the analyzed rocks are compositionally basalts (6 samples), basaltic andesite (1 sample), andesite (1 sample), and dacite (3 samples) (Fig. 6).

All the samples present a strong tholeiitic character (Miyashiro, 1974) (Fig. 7A). In addition they are characterized by low K<sub>2</sub>O content (with the exception of one of the basalt that was strongly altered) (Fig. 7B). In general, the total alkali content is lower than 5% in weight.

The REE content is extremely low, on a chondrite normalized plot the REE show a flat trend with no relative enrichment in either LREE or HREE (Fig. 8). All of the samples are depleted on large ion lithophile elements (LILE). On the other hand, LILE are slightly enriched with respect to REE and HFSE, and show a strong Nb negative anomaly (Fig. 9A and B).

### **Discussion and conclusions**

The volcanic rocks of the lower and middle part of the El Cobre Group in the Sierra Maestra are similar to the tholeiites of island arcs (IAT). These geochemical characteristic show that from the Late Danian until to Middle Eocene there existed at least two island arc in the Northeast Caribbean domain: 1) A CA arc that evolved from the Main Cretaceous arc. The volcanic rocks of this arc are found in the Dominican Republic and Puerto Rico and 2) a typical IAT arc, well represented in the rocks of eastern Cuba (Sierra Maestra arc, Fig. 10). The data presented here suggest that the Paleogene volcanism, at least as it appears in the lower part of the Cobre Group in the Sierra Maestra, 1) was originated in a volcanic island arc setting (Fig. 11), 2) the volcanism was tholeiitic with low values of K, 3) the volcanism was typical of the IAT as defined for the Caribbean volcanic arcs, 4) the volcanism in the Sierra Maestra was independent from the other areas of the Caribbean Domain (e.g. the central part of Hispaniola and Puerto Rico) where the volcanism is clearly cal-alkaline (Lebron and Perfit, 1993), and finally 5) the Sierra Maestra arc presents geochemical character similar to that of the Kermadec arc in the SW Pacific (Fig. 9B), thus represent a similar geodynamic context.

These new data on the Paleogene volcanism suggest that the tectonic models proposed for the origin of the Sierra Maestra should be revised.

## INTRODUCCIÓN

Materiales asociados al denominado arco de islas volcánicas Sierra Maestra (o arco Turquino) están presentes en la totalidad de la Sierra Maestra, en el extremo oriental de la Isla de Cuba. Esta actividad magmática se desarrolló entre el Paleoceno (Thanetiense) y el Eoceno Medio Inferior (Cobiella, 1988; Iturralde-Vinent, 1994, 1996; Méndez et al., 1994). Materiales volcánicos de esta misma edad han sido descritos en otras áreas del Caribe (Jackson y Smith, 1979; Quintas et al., 1994; Iturralde-Vinent, 1994, 1996): La Española, Jamaica, Puerto Rico, Antillas Menores septentrionales, el Elevado de Nicaragua, Dorsal de Caimán y la Cresta de Aves. Sin embargo, los afloramientos más extensos de materiales relacionados con el volcanismo del Paleógeno en la región del Caribe se encuentran en la parte oriental de Cuba.

El conocimiento acerca del origen y evolución del volcanismo del Paleógeno en Cuba es de vital importancia a la hora de establecer modelos de placas tectónicas que intenten explicar la evolución del Caribe NW en el Terciario. En cambio, los datos geológicos disponibles son insuficientes. Los estudios geoquímicos existentes sobre rocas volcánicas de la Sierra Maestra son escasos, y los de elementos trazas son prácticamente nulos.

En este trabajo tenemos como objetivo presentar y discutir los resultados geoquímicos (elementos mayores y sobre todo de elementos trazas: REE, LILE y HFSE) obtenidos en el estudio de rocas volcánicas presentes en las series inferior y media del Grupo El Cobre en la región de la Sierra Maestra.

## CONTEXTO GEOLÓGICO

### **El arco de islas volcánicas del Paleógeno (arco Sierra Maestra) en Cuba**

En Cuba oriental afloran materiales asociados a un arco de islas volcánicas de edad Daniense-Eoceno medio (Fig. 1) (Cobiella, 1988; Méndez et al., 1994; Quintas et al., 1994; Draper y Barros, 1994; Iturralde-Vinent, 1994, 1996; Méndez, 1997; Kysar et al., 1998a). Esta actividad volcánica estuvo restringida fundamentalmente a la parte oriental de la isla y está representada por más de 4000 metros de espesor de rocas volcánicas (Iturralde-Vinent, 1996). Las rocas pertenecientes al arco de islas volcánicas del Paleógeno yacen sobre los materiales deformados de un arco de islas volcánicas del Cretácico, rocas de afinidad ofiolítica y materiales depositados en cuencas de

*piggy back* del Campaniense Tardío-Daniense (Iturralde-Vinent, 1996).

Al sur de Cuba oriental (región de la Sierra Maestra) se encuentran los materiales correspondientes al denominado Grupo El Cobre, el cual está compuesto por lavas, hialoclastitas y rocas piroclásticas (Fig. 1) (Cobiella, 1988; Quintas et al., 1994; Méndez et al., 1994; Iturralde-Vinent, 1994, 1996). Este grupo presenta, igualmente, un amplio desarrollo de cuerpos hipoabisales y plutónicos, tales como gabros, dioritas cuarcíferas, tonalitas, plagiogranitos, granodioritas y granitos (Méndez et al., 1994; Iturralde-Vinent, 1996). El Grupo el Cobre ha sido interpretado como la zona axial del arco volcánico (Iturralde-Vinent, 1996).

Al norte de Cuba oriental los materiales volcano-sedimentarios asociados al volcanismo paleogénico integran la Formación Sabaneta (Fig. 1) (Iturralde-Vinent, 1976, 1996; Proenza y Carralero, 1994; Quintas et al., 1995; García-Torres et al., 1996), en la cual predominan las rocas epiclásticas e interpretada como un depósito sedimentario acumulado en una cuenca de *back arc* (Iturralde-Vinent, 1996; García-Torres et al., 1996).

Según los estudios geoquímicos existentes, fundamentalmente geoquímica de elementos mayores, la actividad volcánica del Paleógeno presenta en sus inicios una tendencia tholeiítica, la cual continúa manifestándose durante toda la evolución del arco (Díaz de Villalvilla et al., 1994; García-Delgado y Méndez, 1994; Méndez et al., 1994; Méndez, 1997). Según estos autores, el carácter calcoalcalino es más evidente en la parte media y superior de las series volcánicas (a partir del Eoceno). También se ha descrito la presencia de un magmatismo calcoalcalino rico en K, el cual se manifiesta en los materiales no estratificados del Eoceno Medio, en la parte más oriental de la Sierra Maestra (Méndez et al., 1994).

### **Las rocas hipoabisales (cuerpos “subvolcánicos”)**

Estas rocas han sido descritas en la región bajo la denominación de cuerpos “subvolcánicos”. Constituyen cuerpos en forma de *stocks*, lacolitos, *sills*, diques y facies de chimeneas volcánicas (*necks*, diques, cúpulas extrusivas). Presentan composiciones desde basálticas hasta riolíticas, aunque con un predominio de las composiciones basálticas y andesíticas (Eguipko et al., 1976; Pérez et al., 1979; Gyarmati, 1983; Gyarmati y Brito, 1983; Méndez et al., 1994; Iturralde-Vinent, 1996). Según estos autores,

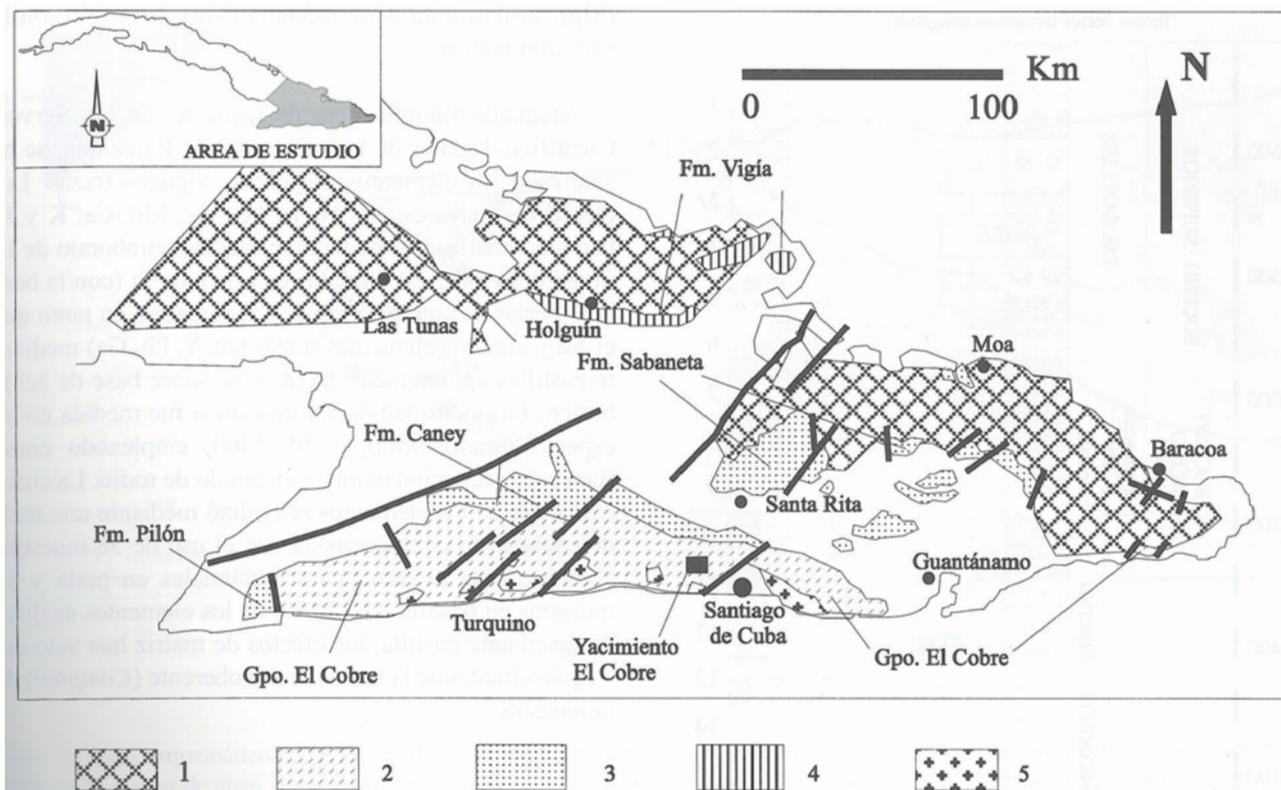


Figura 1. Grandes unidades en el Paleógeno de Cuba Oriental (adaptado de Iturralde-Vinent, 1996). 1) Basamento del arco. Rocas del arco volcánico Daniense-Eoceno Inferior; 2) Flujos de basaltos a dacitas, con rocas piroclásticas, grauwacas y calizas; 3) Rocas piroclásticas con calizas, margas, y grauwacas; 4) Calizas, margas, rocas piroclásticas y algunas intercalaciones de grauwacas; 5) Rocas plutónicas eocenas.

Figure 1. Main geological units in the Western Cuba Paleogene (Iturralde-Vinent, 1996). 1- Arc basement. Rocks of the Danian-Lower Eocene volcanic arc; 2- Basalt to dacite flows, tuffs, greywackes, limestones; 3- Tuffs, limestones, marls, with interbedded greywackes; 4- Limestones, marls, tuffs and some interbedded greywackes; 5- Eocene plutonic rocks.

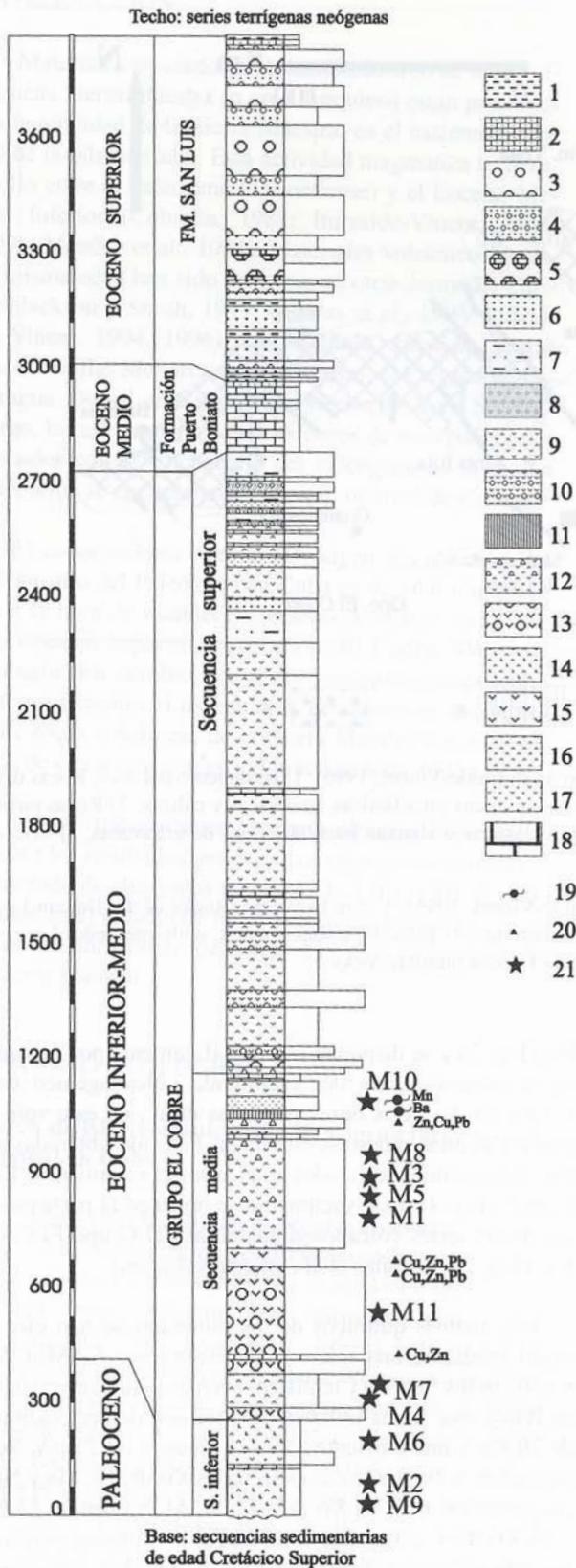
los cuerpos están relacionados espacialmente con cuerpos intrusivos y asociados a ellos se vinculan mineralizaciones de Cu, Pb, Zn, Au y Ag. Estas rocas hipoabisales se presentan mayoritariamente en la parte sur de la Sierra Maestra donde forman asociaciones volcánicas complejas (Iturralde-Vinent, 1996).

#### LOCALIZACIÓN DE LAS MUESTRAS Y PROCEDIMIENTO ANALÍTICO

Se han procesado un total de 11 muestras de rocas volcánicas pertenecientes a las series inferior y media del Paleógeno de la Sierra Maestra (Fig. 2). Cinco muestras (M2, M9, M4, M6 y M7) corresponden a diferentes afloramientos de rocas volcánicas en la región de la Sierra Maestra (Fig. 3). Estas muestras se ubican en las series volcanosedimentarias inferior y media del Grupo El Co-

bre (Fig. 2) y se disponen estratigráficamente por debajo de la mineralización del yacimiento volcanogénico de Cu-Zn-Pb-Au "El Cobre" (Cazañas et al., en este volumen). Las otras muestras estudiadas han sido obtenidas a partir de sondeos realizados en el área del yacimiento "El Cobre" (Fig. 4). Este yacimiento se ubica en la parte media de las series volcanosedimentarias del Grupo El Cobre. (Fig. 2) (Cazañas et al., en este volumen).

Los análisis químicos de los minerales se han efectuado mediante una microsonda electrónica CAMECA SX50, en los Serveis Científic-Tècnics de la Universitat de Barcelona. Se ha utilizado una tensión de aceleración de 20 Kv y una corriente sobre la muestra de 20 nA. Se ha medido sobre las líneas espectrales  $K\alpha$  del Fe, Mn y Ni con un cristal LiF; las  $K\alpha$  del Mg, Si, Al, Na con un TAP, y las  $K\alpha$  del Ca, Ti y K con un PET. Los patrones utilizados han sido ortoclasa (Si, Al, K),  $Fe_2O_3$  (Fe), periclusa



(Mg), wollastonita (Ca), rodonita (Mn), NiO (Ni), rutilo (Ti), albita (Na).

Mediante fluorescencia de rayos X, en los Serveis Científico-Tècnics de la Universitat de Barcelona, se ha analizado los elementos mayores y algunos trazas. Los elementos mayores (Si, Al, Ti, Fe, Mg, Mn, Ca, K y P) han sido analizados mediante perlas de tetraborato de litio en dilución 1/20 fundidas en crisol de Pt (con la base de 3 perlas, limpieza, original y duplicado), en tanto que el Na y algunos elementos trazas (Zr, Y, Pb, Ga) mediante pastillas aglomeradas en Elvacite sobre base de ácido bórico. La intensidad de fluorescencia fue medida en un espectrofómetro *Philips PW 2400*, empleando como fuente de excitación el tubo con ánodo de rodio. La cuantificación de los elementos se realizó mediante una recta de calibración confeccionada con el uso de 56 muestras geológicas de referencia internacionales en perla y 58 muestras en pastilla. En el caso de los elementos analizados mediante pastilla, los efectos de matriz han sido corregidos mediante la radiación incoherente (*Compton*) de la muestra.

Figura 2. Localización de las muestras estudiadas en la columna geológica generalizada de las series del Paleógeno desarrolladas en la parte oriental de la Sierra Maestra, a través del Yacimiento "El Cobre": 1-limolitas, 2-areniscas calcáreas, 3-conglomerados, 4-microconglomerados, 5-conglomerados calcáreos, 6-areniscas polimicticas, 7-areniscas tobáceas, 8-rocas piroclásticas calcáreas, 9-rocas piroclásticas intermedias a ácidas, 10- aglomerados, 11-cuerpos estratiformes de anhidrita, 12-brecha volcánica con predominio de fragmentos de tamaño < 15 mm y abundantes intercalaciones de areniscas y rocas piroclásticas, 13-brecha volcánica con fragmentos de tamaño generalmente > 15 mm y pocas intercalaciones de areniscas y rocas piroclásticas, 14-andesita basáltica, 15-andesitas, 16-andesita-dacita, 17-rocas piroclásticas intermedias a básicas, 18-calizas, 19- mineralización estratiforme, 20- mineralización estratoligada, 21- localización de las muestras de rocas volcánicas estudiadas.

Figure 2. Geological profile along the Paleogene series developed in the easternmost part of Sierra Maestra, through the "El Cobre" deposit: 1- clays, 2- calcareous sandstones, 3- conglomerates, 4- micro-conglomerates, 5- calcareous conglomerates, 6- polymictic sandstones, 7- tuffaceous sandstones, 8- tuffaceous limestones, 9- intermediate to acidic tuffs, 10- agglomerates, 11- stratiform anhydrite, 12- volcanic breccia mainly constituted by fragments <15 mm, interbedded with sandstones and tuffs, 13- volcanic breccia, mainly constituted by fragments >15 mm, interbedded with scarce sandstones and tuffs, 14- andesite-basalt, 15- andesite, 16- andesite-dacite, 17- intermediate to basic tuffs, 18- limestones. Mineralizations: 19- stratiform, 20- stratabound. 21- Samples.

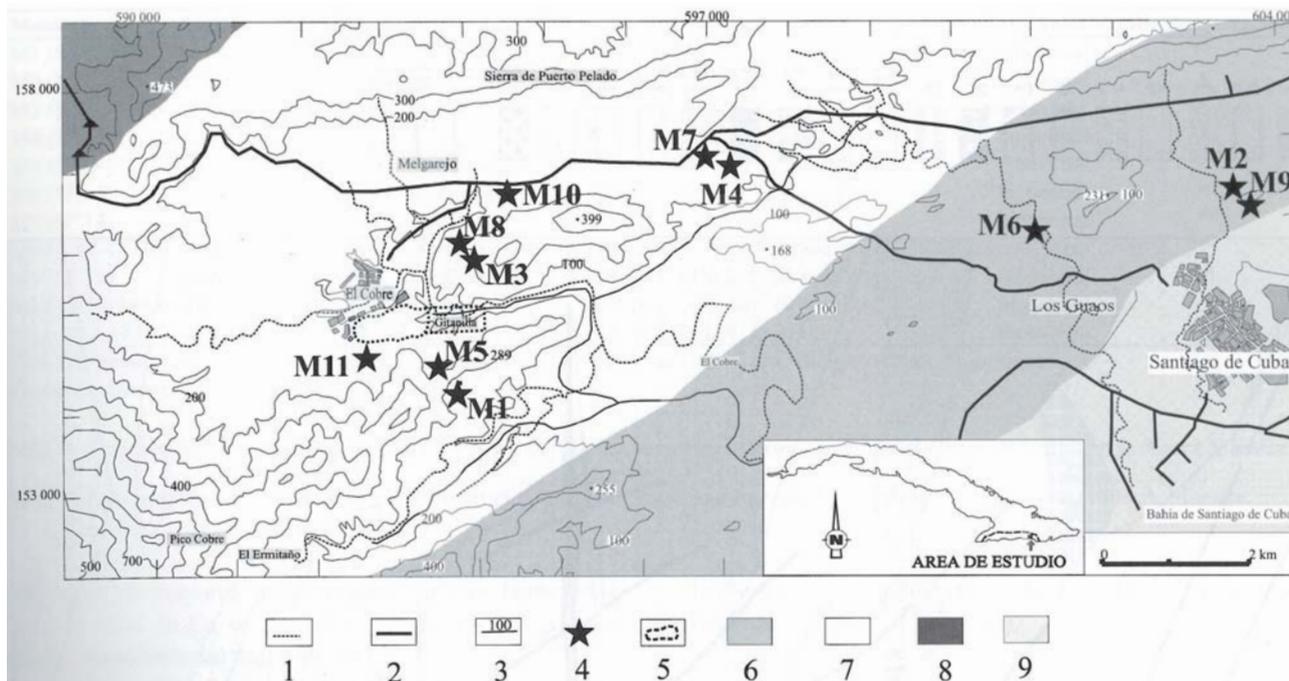


Figura 3. Mapa esquemático de la Sierra Maestra con la ubicación de las muestras de rocas volcánicas estudiadas. 1- Red fluvial, 2- carretera, 3- curvas de nivel, 4- localización de las muestras volcánicas estudiadas, 5- contorno de la corta del Yacimiento “El Cobre”, 6- parte inferior de las series del Grupo El Cobre, 7- parte media de las series del Grupo El Cobre, 8- parte superior de las series del Grupo El Cobre, 9- materiales terrígenos y carbonatados de Cuenca de Santiago.

Figure 3. Schematic map of the central Sierra Maestra, showing the situation of the sampled volcanic rocks. 1- rivers, 2- road, 3- contour lines, 4- samples of volcanic rocks, 5- “El Cobre” open pit perimeter, 6- Lower Sequence of el Cobre Group, 7- Middle Sequence of el Cobre group, 8- Upper Sequence of el Cobre Group, 9- terrigenous and carbonated materials of the Santiago Basin.

La mayor parte de los elementos trazas (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, U, Th, Nb, Sr, Sb, Mo, Ni, Rb, Zn, V, Cu, Ba) han sido medidos con un *ICP-MS Perkin Elmer Elan 6000* de los Serveis Científico-Tècnics de la Universitat de Barcelona, usando rodio como estándar interno. Las muestras de roca total mineral se han triturado en un mortero de carburo de tungsteno. Todas las muestras se han atacado por duplicado junto a 4 blancos y 2 GIS. No se dan las características del GIS utilizado.

#### PETROLOGÍA Y QUIMISMO MINERAL

Al microscopio las rocas volcánicas estudiadas se caracterizan por un predominio de texturas porfíricas con fenocristales bien desarrollados, aunque también se presentan texturas glomeroporfíricas (Tabla 1). Los fenocristales se componen fundamentalmente de plagioclasas y, en menor medida, de clinopiroxenos. Los fenocristales de plagioclasas se presentan fuertemen-

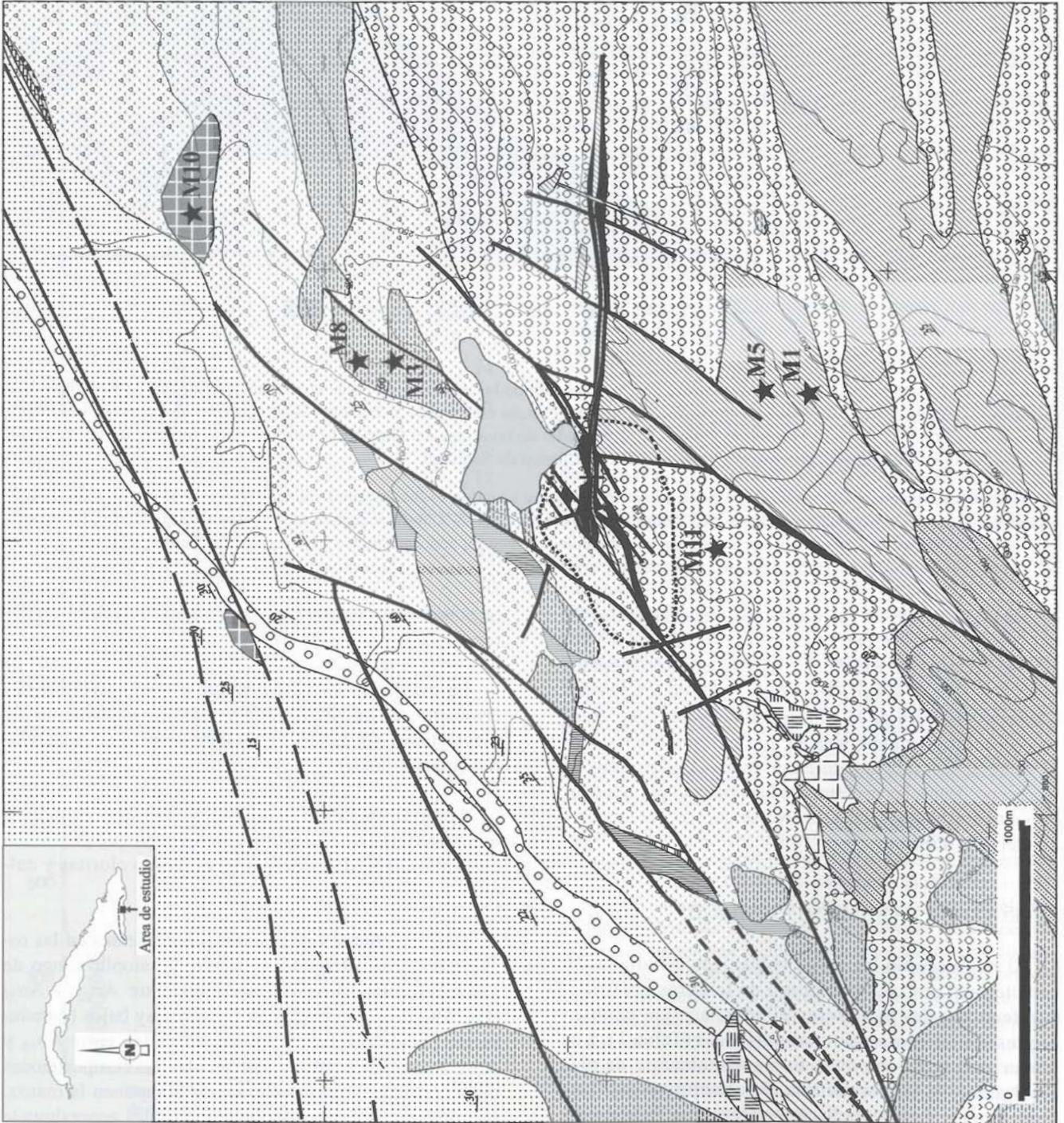
te zonados y comúnmente muestran zonación oscilatoria.

La matriz, en los casos en que es distinguible al microscopio, es microcristalina y también se compone de plagioclasa (o feldespato) y clinopiroxeno (o minerales ferromagnesianos).

Como minerales secundarios aparece principalmente sericita, que constituye agregados que provienen de la alteración de feldespatos, así como cloritas y calcita.

Los fenocristales de plagioclasas presentes en las rocas volcánicas estudiadas muestran un amplio rango de variación composicional, oscilando entre  $An_{87}$  y  $An_{39}$  (Fig. 5A). Los contenidos en Or son muy bajos (comúnmente por debajo 0.5) y los de Ab varían entre  $Ab_{60}$  y  $Ab_{13}$ . A nivel de muestras individuales, las composiciones de los cristales de plagioclasas que componen la matriz, así como las de los bordes de fenocristales generalmente

- 1 [Solid grey]
- 2 [Dotted pattern]
- 3 [Wavy pattern]
- 4 [Vertical lines]
- 5 [Horizontal lines]
- 6 [Diagonal lines (top-left to bottom-right)]
- 7 [Diagonal lines (top-right to bottom-left)]
- 8 [Cross-hatch pattern]
- 9 [Horizontal lines]
- 10 [Diagonal lines (top-left to bottom-right)]
- 11 [Vertical lines]
- 12 [Horizontal lines]
- 13 [Solid black]
- 14 [Vertical lines]
- 15 [Horizontal lines]
- 16 [Diagonal lines (top-left to bottom-right)]
- 17 [Diagonal lines (top-right to bottom-left)]
- 18 [Dotted pattern]
- 19 [Dashed line]
- 20 [Solid line]
- 21 [L-shaped symbol]



Muestra	Clasificación Química	Textura	Moda de fenocristales	Tipo de roca volcánica	Grado de alteración.
M1 (S-76-204,5)	basalto	porfirica	80 % feld, 20% ferr	hipoabisal	**
M2 (Nº 10)	basalto	glomeroporfirica	85% plag., 15% ferr	hipoabisal	*
M3 (S-47-158,1)	dacita	porfirica	90% feld, 7% ferr, 3% oxid	hipoabisal ?	*
M4 (Nº 15)	basalto	porfirica	92% plag, 8% ferr	hipoabisal	*
M5 (S-76-172,7)	basalto	porfirica	82% plag, 16% ferr, 2% oxid	hipoabisal	*
M6 (Nº 13)	dacita	glomeroporfirica	78% feld, 15% ferr, 7% oxid	hipoabisal	*
M7 (Nº 14)	andesita basáltica	porfirica	70% plag, 30% cpx	hipoabisal	*
M8 (S-47-127,65)	andesita	porfirica	90% feld, 7% ferr, 3% oxid	lava	*
M9 (Nº 12)	basalto	porfirica	77% feld, 18% ferr, 7% oxid	hipoabisal	**
M10 (S-94-134,0)	dacita	porfirica	76% plag, 14% ferr, 10% oxid	hipoabisal	*
M11 (515-373)	basalto	porfirica	85% feld, 10 ferr, 5% oxid	hipoabisal	***

feld, feldespato; ferr, minerales ferromagnesianos; oxid, óxido; plag, plagioclasa; cpx, clinopiroxenos; px, piroxenos  
Grado de alteración: \* bajo; \*\* medio; \*\*\* alto

Tabla 1. Características petrográficas de las rocas volcánicas de las series inferior y media del Grupo el Cobre en la Sierra Maestra.

Table 1. Petrographic characters of the volcanic rocks from the Lower and Intermediate series, El Cobre Group, Sierra Maestra.

presentan los mayores contenidos en Na. Los fenocristales más ricos en Ca se encuentran en las rocas que presentan menores contenidos en SiO<sub>2</sub>.

La composición de todos los clinopiroxenos analizados es mostrada en la figura 5B, los cuales según la clasificación de Morimoto et al. (1988) corresponde a augita. Se observan ligeras variaciones entre la composición de los clinopiroxenos presentes en los basaltos, andesitas basálticas y andesitas. Los clinopiroxenos de los basaltos presentan composiciones entre En<sub>43-45</sub> Wo<sub>39-43</sub> Fs<sub>13-19</sub>, los de las andesitas basálticas entre En<sub>43-45</sub> Wo<sub>35-38</sub> Fs<sub>17-21</sub> y, los de las andesitas entre En<sub>43-45</sub> Wo<sub>39-43</sub> Fs<sub>13-19</sub>. Los clinopiroxenos de los basaltos y las andesitas basálticas muestran los mayores contenidos de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (entre 2.26 y 4 % en peso). En los clinopiroxenos de las andesitas los contenidos de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oscilan entre 1.7 y 1.9 % en peso. Los contenidos en TiO<sub>2</sub> y Na<sub>2</sub>O son bastante similares en los tres tipos pe-

trológicos analizados (0.24<TiO<sub>2</sub><0.44 % en peso y 0.12<Na<sub>2</sub>O<0.31 % en peso).

## GEOQUÍMICA

### Geoquímica de elementos mayores

Los análisis de elementos mayores y algunos trazas de las rocas volcánicas estudiadas son presentados en la tabla 2. Las muestras son clasificadas, de acuerdo al diagrama de álcali total (K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O) *versus* SiO<sub>2</sub> (TAS, Le Bass et al., 1986), como: basaltos (6 muestras), andesita basáltica (1 muestra), andesita (1 muestra) y, dacitas (3 muestras) (Fig. 6). Existe un predominio de basaltos en los cuerpos situados en los niveles inferiores de la serie, mientras que los cuerpos más jóvenes situados en los niveles medios de la pila volcánica son de composición andesítica y dacítica.

Figura 4. Mapa geológico del yacimiento “El Cobre” con la ubicación de las muestras de rocas volcánicas estudiadas en el área del depósito. Modificado de Luna et al., 1989: 1- Cobertera cuaternaria, 2- Brecha volcánica con predominio de fragmentos de tamaño < 15 mm y abundantes intercalaciones de areniscas, y rocas piroclásticas, 3- Brecha volcánica con fragmentos de tamaño > 15 mm y escasas intercalaciones de areniscas y rocas piroclásticas, 4- Areniscas, 5- Riodacita, 6- Andesita, 7- Conglomerado, 8- Mineralización estratoligada de sulfuros (Cu-Zn-Pb), 9- Mineralización estratoligada de sulfuros (Zn-Cu-Pb), 10- Andesita-dacita, 11- Riolita, 12- Dacita, 13- Mineralización filoniana de Cu, 14- Mineralización estratiforme de anhidrita, 15- Mineralización estratiforme de barita, 16- calizas, 17- Andesita basáltica y basalto, 18- Mineralización estratiforme de óxidos de manganeso, 19- Contorno aproximado de la corta, 20- Fallas principales, 21- Perfiles de sondeos.

Figure 4. Geological map of the “El Cobre” deposit. Modified after Luna et al., 1989: 1- Quaternary covering, 2- Volcanic breccias mainly constituted by fragments < 15 mm, interbedded with tuffs and sandstones, 3- Volcanic breccia with fragments > 15 mm and sandstones and tuffs scarcely interbedded, 4- Sandstones, 5- Rhyodacite, 6- Andesite, 7- Conglomerate, 8- Stratobound sulphide deposits (Cu-Zn-Pb), 9- Stratobound sulphide deposits (Zn-Cu-Pb), 10- Andesite-dacite, 11- Rhyolite, 12- Dacite, 13- Vein mineralization (Cu), 14- Stratiform anhydrite mineralization, 15- Stratiform barite mineralization, 16- limestones, 17- Andesite-basalt and basalt, 18- Stratiform manganese oxides, 19- Open pit perimeter, 20- Main faults, 21- Drilling profiles, 22- samples.

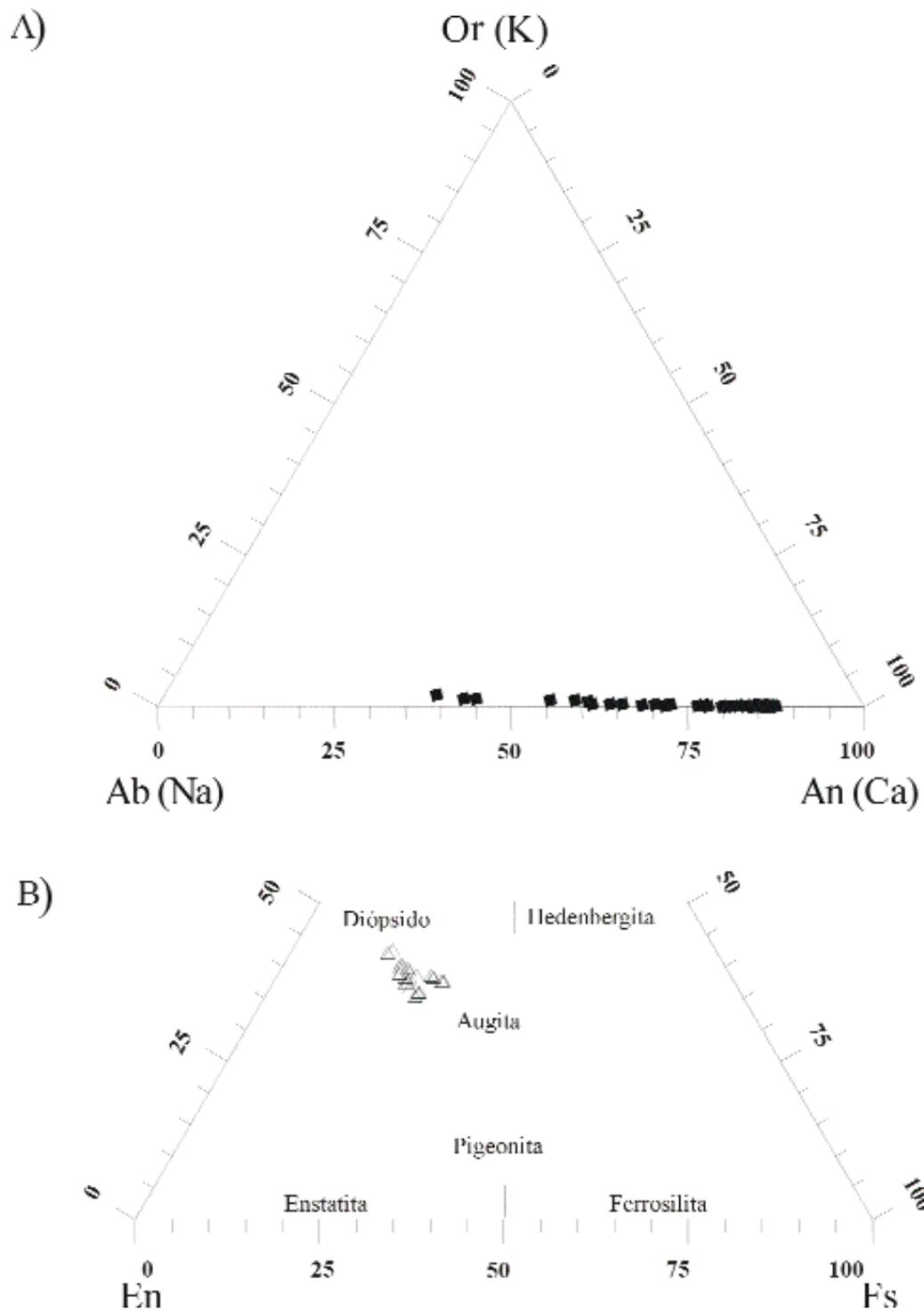


Figura 5. Composición de los fenocristales de plagioclasas (A) y de los de clinopiroxenos (B) presentes en las rocas volcánicas de las series inferior y media del Grupo El Cobre en la Sierra Maestra.

Figure 5. Chemical composition of phenocrystals in the volcanic rocks from the El Cobre Group Middle and Lower Sequences. A) plagioclase composition as molecular proportions of albite, anorthite and K-feldspar; B) pyroxene compositions in the quadrilateral pyroxene diagram (Morimoto et al., 1989).

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11
SiO <sub>2</sub>	48,96	51,53	64,92	50,45	48,47	63,90	52,35	58,39	45,34	67,32	44,32
TiO <sub>2</sub>	0,68	0,71	0,99	0,83	0,66	0,74	0,76	0,77	0,63	0,74	0,89
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,04	16,19	13,88	18,06	18,06	13,78	15,35	16,90	19,83	13,13	20,67
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,07	7,17	7,68	7,63	9,78	7,19	7,28	7,44	11,00	6,74	10,58
MnO (% en peso)	0,20	0,20	0,16	0,15	0,28	0,09	0,35	0,16	0,18	0,14	0,36
MgO	3,42	3,02	1,75	3,70	4,22	1,91	2,13	1,75	3,75	1,07	3,54
CaO	8,57	12,43	2,20	7,28	9,01	2,73	12,77	5,36	10,80	2,62	4,91
Na <sub>2</sub> O	2,18	2,77	4,58	3,61	1,85	4,29	1,88	4,45	2,23	5,31	1,95
K <sub>2</sub> O	0,35	0,34	0,33	0,37	0,41	1,06	0,62	0,97	0,30	0,51	2,72
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,15	0,16	0,27	0,21	0,12	0,27	0,25	0,19	0,12	0,29	0,15
LOI	5,47	4,72	2,59	5,93	5,51	2,76	5,35	2,20	3,97	1,24	8,15
Total	98,09	99,24	99,35	98,22	98,37	98,72	99,09	98,58	98,15	99,11	98,24
Zr (ppm)	46,2	29,5	124,7	50,6	48,7	117,6	46,3	89,4	38,1	79,8	43,6
Y	15,5	10,5	36,9	14,6	15,5	30,6	19,9	29,0	12,6	29,8	15,3
Pb	10,6	9,1	10,3	10,3	9,9	12,4	9,6	7,3	8,0	9,9	8,2
Ga	15,2	12,2	13,9	10,6	14,8	14,8	13,3	15,3	15,6	10,8	17,2
La (ppm)	1,9	1,9	6,1	3,3	1,7	6,3	3,9	4,4	1,6	5,1	2,1
Ce	4,8	4,5	15,8	8,0	4,5	17,1	7,8	11,3	4,2	13,3	5,2
Pr	0,8	0,8	2,5	1,3	0,7	2,8	1,2	1,9	0,7	2,2	0,9
Nd	4,4	4,4	13,1	6,3	3,9	14,6	6,2	9,8	3,9	12,0	4,5
Sm	1,5	1,4	4,2	1,9	1,3	4,5	1,9	3,2	1,3	4,0	1,6
Eu	0,6	0,6	1,2	0,7	0,5	1,4	0,8	1,1	0,5	1,4	0,6
Gd	2,1	1,9	5,4	2,4	1,8	5,5	2,6	4,3	1,8	5,4	2,1
Tb	0,4	0,3	0,9	0,4	0,3	0,9	0,5	0,8	0,3	1,0	0,4
Dy	2,6	2,1	6,2	2,9	2,3	6,1	3,4	5,1	2,2	6,4	2,7
Ho	0,5	0,4	1,2	0,6	0,5	1,2	0,7	1,1	0,5	1,3	0,5
Er	1,6	1,3	3,6	1,8	1,4	3,8	2,3	3,2	1,4	4,1	1,6
Tm	0,2	0,2	0,5	0,3	0,2	0,6	0,4	0,5	0,2	0,6	0,2
Yb	1,5	1,3	3,1	1,7	1,3	3,7	2,3	3,0	1,3	4,0	1,5
Lu	0,2	0,2	0,4	0,3	0,2	0,6	0,4	0,4	0,2	0,6	0,2
Hf	0,8	0,7	2,1	1,4	0,8	5,0	1,4	2,2	1,0	3,1	0,8
U	0,1	0,5	0,7	0,7	0,2	1,0	0,2	0,5	0,2	0,4	0,3
Th	0,3	0,1	0,9	0,6	0,3	1,3	0,4	0,7	0,2	0,6	0,4
Nb	0,6	0,4	1,6	1,0	0,5	1,2	0,6	0,8	0,5	0,9	0,7
Sb	0,3	0,2	0,8	0,2	0,2	0,5	1,2	0,8	0,1	0,5	0,4
Mo	4,3	5,3	12,3	13,5	9,7	10,7	12,8	4,9	2,6	8,9	1,1
Ni	33,7	52,1	59,9	71,5	57,6	55,4	77,8	22,3	21,0	51,1	10,8
Rb	4,7	4,1	5,3	4,9	5,3	14,4	6,4	9,2	6,0	7,9	51,4
Cu	15,0	107,9	88,9	158,3	76,7	15,5	176,4	62,7	146,9	13,2	9,5
Zn	68,5	68,5	101,4	73,2	168,8	97,9	82,8	75,7	65,9	127,2	205,8
V	232,6	387,8	104,5	303,5	199,4	37,4	314,5	116,3	308,1	44,3	463,0
Sr	210,3	323,0	163,0	272,9	181,9	186,3	197,6	260,3	393,2	173,7	119,0
Ba	87,5	80,4	105,2	75,2	129,5	280,7	146,2	374,8	62,5	169,9	608,1

Tabla 2. Composición en elementos mayores y trazas de las rocas volcánicas de las series inferior y media del Grupo El Cobre en la Sierra Maestra. Análisis mediante XRF (mayores, Zr, Y, Pb, Ga) e ICP-MS (el resto).

Table 2. Major- and trace-element analyses of the volcanic rocks from the Lower and Intermediate series, El Cobre Group, Sierra Maestra. Analyses by XRF (major elements, Zr, Y, Pb, Ga) and ICP-MS (the other trace elements).

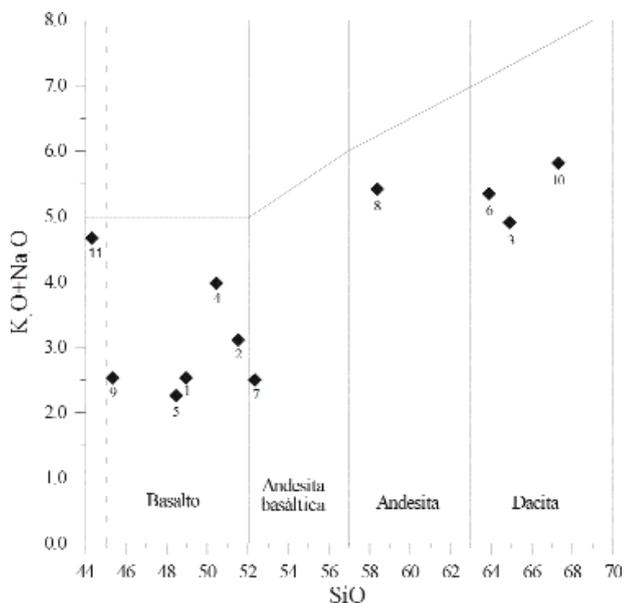


Figura 6. Álcali total ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ) frente a  $\text{SiO}_2$  (TAS) en las rocas volcánicas presentes en las series inferior y media del Grupo El Cobre en la Sierra Maestra. Los campos son de Le Bas et al. (1986).

Figure 6. Chemical composition diagrams for several major elements in the volcanic rocks from the Lower and Intermediate Sequences of El Cobre Group. Total alkali ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ) versus silica diagram (TAS). Fields are from Le Bas et al. (1986).

Todas las muestras estudiadas presentan una marcada tendencia tholeiítica de acuerdo a la clasificación de Miyashiro (1974) (Fig. 7A). Por otra parte, se caracterizan por presentar bajos contenidos en  $\text{K}_2\text{O}$  (excepto una muestra de basalto, la cual muestra un grado alto de alteración) (Fig. 7B). En general los basaltos, las andesitas basálticas y las andesitas tienen menos de 5 % en peso de  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ .

Todas las rocas máficas estudiadas consisten en basaltos ricos en aluminio con contenidos superiores al 16% en peso de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (tabla 2). En estos tipos de rocas la asociación mineral, como sucede en las muestras estudiadas, es dominada por la plagioclasa (Gamble et al., 1997).

Las rocas estudiadas son similares a las series volcánicas tipo IAT (series PIA de Donnelly y Rogers, 1980) establecidas en el arco de islas del Caribe. La naturaleza empobrecida de estas series es caracterizada por sus bajos valores de  $\text{K}_2\text{O}$  y su marcada tendencia tholeiítica (*Low-K, island-arc tholeiites*).

## Geoquímica de elementos trazas (REE, LILE, HFSE)

Los elementos de tierras raras (REE), así como otros elementos trazas de las rocas volcánicas estudiadas se muestran en la tabla 2. Los contenidos en REE son extremadamente bajos y presentan un patrón, normalizado a condritos, con una morfología plana desde las tierras raras ligeras (LREE) hasta las tierras raras pesadas (HREE) (Fig. 8).

Las muestras estudiadas presentan contenidos bajos en *large-ion-lithophile elements* (LILE). Los contenidos en Rb son inferiores a 15 ppm, excepto en la muestra M11 donde alcanza 51 ppm. Las concentraciones en otros elementos incompatibles como el Ba y el Th también son bajas. En cambio, los LILE presentan un ligero enriquecimiento con respecto a las REE y a los HFSE, así como una fuerte anomalía negativa de Nb (Fig. 9A). El enriquecimiento moderado en LILE y el empobrecimiento en Nb son característicos de muchas tholeiitas de arcos de islas (Gust et al., 1996). En la figura 9A también se observa una ligera anomalía positiva en Sr. La anomalía positiva en Sr puede ser el resultado de un pobre fraccionamiento de feldespatos durante la evolución magmática. La ausencia de una significativa anomalía en Eu en los patrones de REE normalizados a condritos soporta esta hipótesis.

En la figura 9B se compara el patrón de distribución de los elementos trazas de las rocas volcánicas presentes en las series inferior y media del Grupo El Cobre en la Sierra Maestra con el arco de Kermadec en Pacífico SW. En esta figura se observa una gran similitud en la morfología de ambos patrones.

## DISCUSIÓN

### El arco de islas volcánicas Sierra Maestra como un arco de islas tholeiítico pobre en K (*Low-K, island-arc tholeiites*).

La composición de los clinopiroxenos varía de acuerdo a la composición química del magma parental (Letterrier et al., 1982; Rollinson, 1993). Esta dependencia es totalmente válida para los fenocristales de clinopiroxenos, cuya composición refleja las diferencias existentes entre los diferentes tipos de magmas basálticos. En la figura 10 se muestra la relación entre los contenidos de Ti y de Al en los clinopiroxenos de las muestras de basaltos y andesitas basálticas estudiados. En esta figura se observa como los clinopiroxenos caen dentro del campo de las tholeiitas de arcos de isla definido por Letterrier et al. (1982).

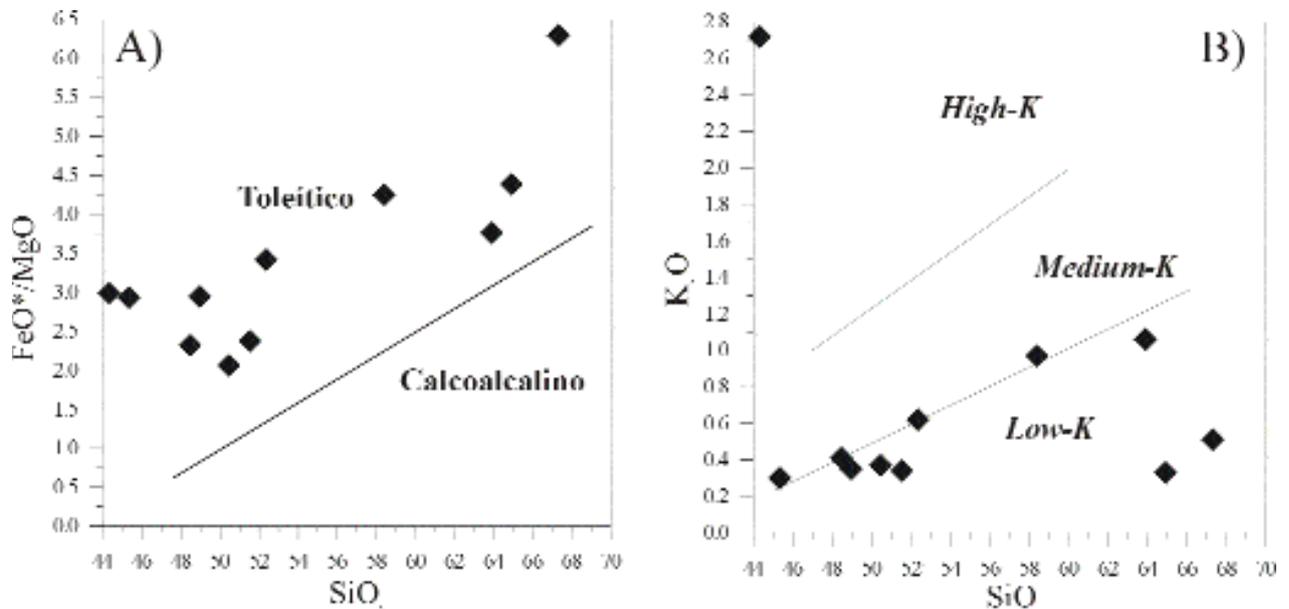


Figura 7. A) Variación del hierro total (expresado como FeO\*/MgO) frente a SiO<sub>2</sub> en las rocas volcánicas presentes en las series inferior y media del Grupo El Cobre en la Sierra Maestra. La línea de discriminación de los campos tholeiíticos y calcoalcálico es trazada a partir de Miyashiro (1974). B) Variación del K<sub>2</sub>O frente a SiO<sub>2</sub> en las mismas rocas. Los campos son tomados de Gil (1981).

Figure 7. Chemical composition diagrams for several major elements in the volcanic rocks from the Lower and Intermediate Sequences of El Cobre Group. A) Total iron (indicated as FeO\*/MgO) versus silica. The line for discrimination between the tholeiitic and calcoalkaline fields is according data from Miyashiro (1974). B) K<sub>2</sub>O versus silica. Fields after Gil (1981).

Según los contenidos de SiO<sub>2</sub>, FeO total, MgO y K<sub>2</sub>O, las rocas volcánicas de las series inferior y media del Grupo El Cobre, en la Sierra Maestra, presentan una tendencia tholeiítica con bajos contenidos en K. Estas características son típicas de arcos volcánicos tholeiíticos pobres en K (*Low-K, island-arc tholeiites*). Similares resultados han sido descritos en rocas volcánicas de Sierra Maestra por Kysar et al. (1998b).

El diagrama Zr/Y vs. Zr ha sido utilizado para separar los basaltos de arcos de islas oceánicas, en los cuales para la edificación del arco volcánico sólo interviene corteza oceánica, de los arcos desarrollados en márgenes continentales activos (Pearce, 1983). Las muestras de basaltos analizadas en este estudio se ubican tanto en el campo que comprende a los basaltos de arco oceánico, como en el de arco continental (Fig. 11). Sin embargo, la relación Zr/Y varía entre 2.3 y 3.4 (valor medio de 2.9) muy cerca del valor crítico (3) definido por Pearce (1983) para separar a los basaltos de arcos oceánicos de los continentales. Estos resultados sugieren un carácter “transicional” para el tipo de placa litosférica que sufrió los procesos de suprasubducción. Este hecho, en principio, es coherente con el marco geológico regional, en el cual se

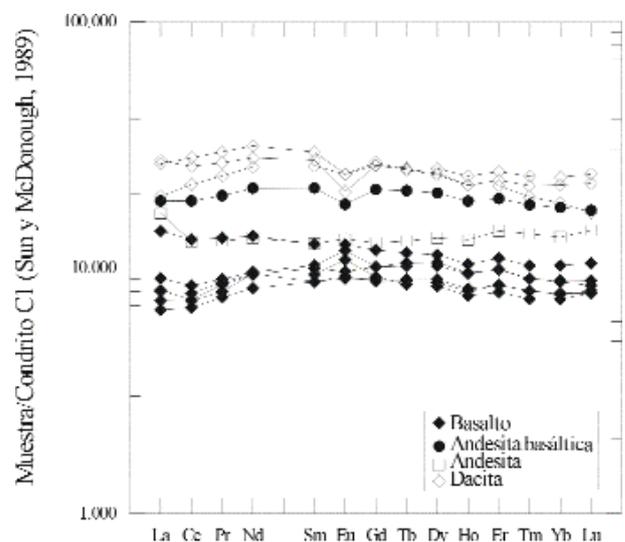


Figura 8. Diagrama de REE, normalizados a los valores condriticos, de las rocas volcánicas de las series inferior y media del Grupo El Cobre en la Sierra Maestra.

Figure 8. A) REE diagram, normalized to chondritic values, for the volcanic rocks from the Lower and Intermediate Sequences of El Cobre Group.

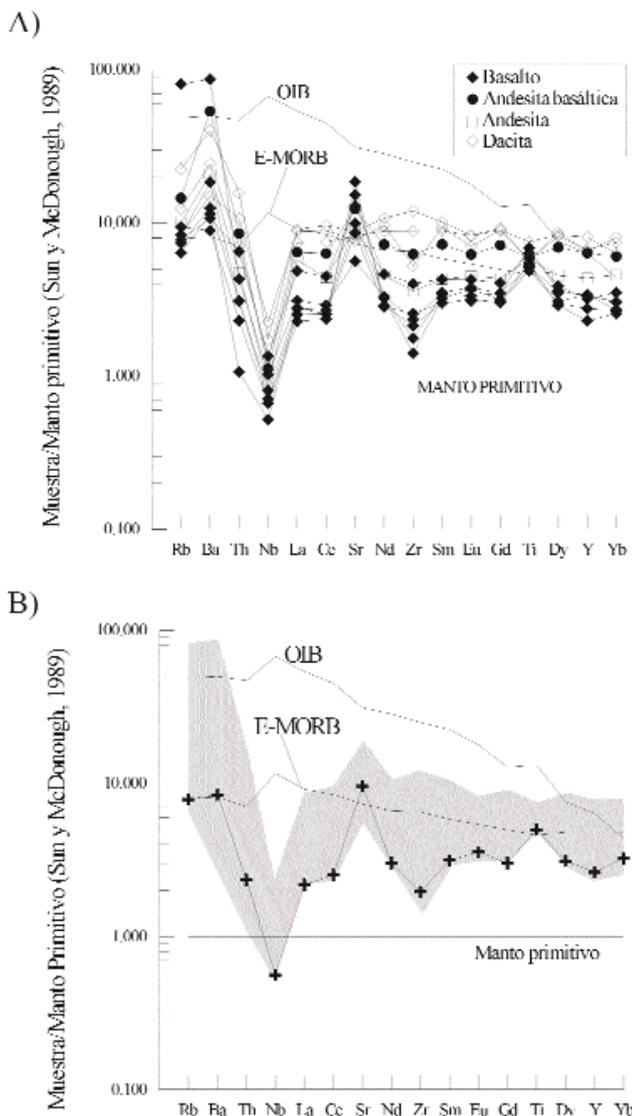


Figura 9. A) Diagrama de elementos trazas, normalizados al manto primitivo, de las rocas volcánicas de las series inferior y media del Grupo El Cobre en la Sierra Maestra. B) Comparación del patrón de distribución de los elementos trazas de las mismas rocas (zona sombreada) con el arco de Kermadec (cruces) en Pacífico SW. Los valores del manto primitivo, OIB y E-MORB pertenecen a Sun y McDonough (1989). Los datos del arco de Kermadec son tomados de Smith et al. (1997).

Figure 9. A) Trace elements diagram of the volcanic rocks from the Lower and Intermediate Sequences of El Cobre Group, normalized to the primitive mantle. B) Comparison of the distribution path for these rocks (shaded zone) with those from the Kermadec primitive island arc (crosses). Values for the primitive mantle, OIB and E-MORB after Sun and McDonough (1989); the Kermadec arc data are from Smith et al. (1997).

aprecia que los materiales volcánicos de la Sierra Maestra se edifican sobre un conjunto formado por los siguientes materiales: rocas asociadas a un arco volcánico Cretácico, rocas de afinidad ofiolítica y materiales sedimentarios asociados a cuencas de *Piggy back* del Campaniense Tardío-Daniense (Iturralde-Vinent, 1996). A la luz de los datos geoquímicos y del contexto geológico regional, el arco volcánico de Sierra Maestra se estructuró a partir de dos placas de naturaleza oceánica. Sin embargo, la placa que sufrió los procesos de suprasubducción presentaba, además de corteza oceánica, un conjunto superpuesto constituido por series volcánicas y sedimentarias. Así pues, una posible explicación para este carácter transicional del volcanismo del Paleógeno sería que estos materiales superpuestos no eran lo suficientemente potentes como para cambiar de manera sustancial la composición del magma, pero sí para contaminarlo suficientemente como para imprimirle rasgos geoquímicos intermedios entre un arco oceánico y uno continental.

En la figura 9B se observa la similitud desde el punto de vista geoquímico entre el arco de Kermadec y el de la Sierra Maestra. El sistema de subducción Tonga-Kermadec ha sido descrito como un ejemplo típico de un arco de islas oceánico primitivo (Ewart et al., 1977; Ewart y Hawkesworth, 1987). El arco de Kermadec se ha edificado sobre una corteza de zona de suprasubducción máfica (*mafic supra-subduction-zone crust*), la cual es típica de arcos oceánicos (Smith et al., 1996). Esta corteza de zona de suprasubducción máfica se compone de serpentinitas, gabros y peridotitas sobre la que yacen una asociación de basaltos y andesitas de un arco Eoceno (Bloomer y Fisher, 1987; Bloomer et al., 1994). Este cuadro estructural es similar al que presentan las rocas volcánicas del arco de la Sierra Maestra, el cual como hemos visto se edificó sobre ofiolitas y rocas volcánicas de un arco de islas Cretácico (Iturralde-Vinent, 1994, 1996). Por consiguiente, el tipo de corteza que intervino en los procesos de fraccionamiento, erupción, asimilación y recarga (FEAR, Defant y Nielsen, 1990) que modifican la composición del magma en su ascenso hacia la superficie era similar en los arcos de Kermadec y de la Sierra Maestra. En el caso de la Sierra Maestra el tipo de corteza que sufrió los procesos típicos de zonas de suprasubducción debió ser relativamente delgada y poco diferenciada (Iturralde-Vinent, com. escrita).

#### Posición del volcanismo del Paleógeno de la Sierra Maestra dentro del arco volcánico del Caribe

Las rocas volcánicas asociadas con el denominado arco volcánico del Caribe (o arco volcánico de las Gran-

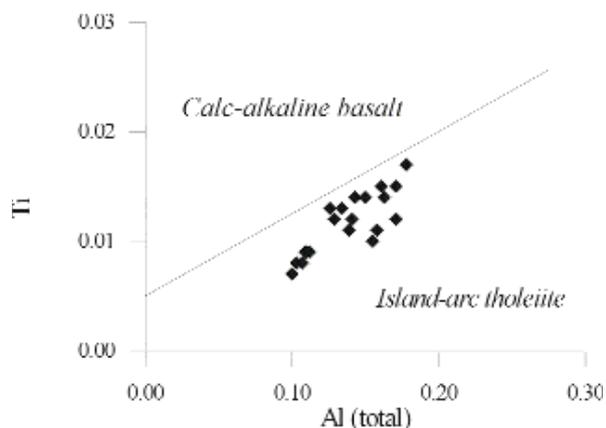


Figura 10. Variación de Ti con respecto a Al total en fenocristales de clinopiroxenos en las rocas volcánicas (basaltos y andesitas basálticas) de las series inferior y media del Grupo El Cobre en la Sierra Maestra. Nótese como todas las muestras caen dentro del campo de las tholeiitas de arcos de isla definido por Leterrier et al. (1982).

Figure 10. A) Variation of Ti versus Al total in clinopyroxene phenocrysts from basalts and andesite basalts sampled in the Lower and Intermediate Sequences of El Cobre Group. Notice as all the samples plot into the island arc tholeiites of Leterrier et al. (1982).

des Antillas) han sido divididas en dos grandes series volcánicas (Donnelly y Rogers, 1980; Donnelly, 1990; Donnelly et al., 1990; Lebron y Perfit, 1993, 1994; Lewis et al., 1995; Simon et al., 1999): 1) series asociadas a un arco de islas "primitivo" (*primitive island arc suite*, PIA) y 2) series calcoalinas (CA). Las series PIA han sido datadas como Jurásico Superior (?)-Cretácico Inferior (pre-Albiense), mientras que las series CA presentan una edad Cretácico Superior-Oligoceno (Donnelly et al., 1990). Las series PIA presentan características similares a las series IAT presentes en los arcos volcánicos del Pacífico.

Las series PIA constituyen una secuencia bimodal formada principalmente por basaltos y andesitas basálticas alteradas; en menor medida, se presentan dacitas y/o riolitas alteradas, así como intrusiones de composición granodiorítica (Donnelly y Rogers, 1980; Lebron y Perfit, 1993, 1994; Simon et al., 1999). Geoquímicamente las series PIA se caracterizan por (Donnelly y Rogers, 1980; Lebron y Perfit, 1993, 1994: 1) bajas concentraciones en elementos incompatibles (K, Rb, Zr, Th, U, Ba); 2) bajas concentraciones en REE; 3) patrones de REE normalizados a los valores condriticos con morfología plana. Estas series se han formado a partir de la fusión de un manto

oceánico durante los estadios iniciales de evolución del arco de isla (Donnelly et al., 1990).

Las series CA están formadas por andesitas basálticas, andesitas y dacitas depositadas principalmente en condiciones subaéreas (Lebron y Perfit, 1993). Desde el punto de vista geoquímico, las series CA se caracterizan por (Doonelly y Rogers, 1980; Lebron y Perfit, 1993, 1994): 1) fuerte enriquecimiento en LILE; 2) relativamente empobrecidas en HFSE; 3) patrones de REE, normalizados a condritos fuertemente fraccionados (LREE>HREE). Se ha interpretado que las rocas de las series CA han sido originadas a partir de la fusión de un manto más enriquecido dentro de un arco volcánico más evolucionado, el cual estuvo expuesto por largos periodos de tiempo en condiciones subaéreas (Lebron y Perfit, 1993, 1994).

Las características geoquímicas (elementos mayores y trazas) de las muestras estudiadas sugieren un origen de las rocas volcánicas asociado a un arco de isla tholeiítico. Por otro lado, los bajos contenidos en REE, el patrón de REE con morfología plana, los bajos valores en K, Rb y Th, así como un ligero enriquecimiento en LILE,

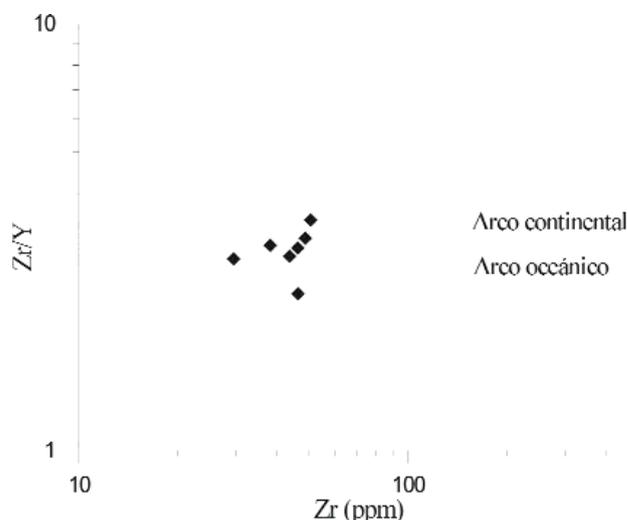


Figura 11. Variación de la relación Zr/Y con respecto a Zr en las rocas volcánicas (basaltos y andesitas basálticas) de las series inferior y media del Grupo El Cobre en la Sierra Maestra. Los campos de los basaltos de arco oceánico y de arco continental son de Pearce (1983).

Figure 11. Variation of the ratio Zr/Y versus Zr in the volcanic rocks from the Lower and Intermediate Sequences of El Cobre Group. Fields of oceanic arc basalts and continental arc basalts are from Pearce (1983).

son característicos de las series tipo PIA (*primitive island arc*) presentes en el arco volcánico del Caribe. Sin embargo, las rocas máficas de las series tipo PIA incluyen tholeiítas de arcos muy empobrecidas (boninitas) las cuales no han sido descritas en la región de la Sierra Maestra. Además, las series PIA presentan una signatura isotópica (Pb primitivo) muy distintiva, la cual no ha sido estudiada todavía para las rocas volcánicas de la Sierra Maestra.

Las rocas volcánicas de las series volcanosedimentarias inferior y media del Grupo El Cobre en la Sierra Maestra presentan un marcado carácter tholeiítico con contenidos bajos en K. Estas rocas son similares a las tholeiítas de arcos insulares (IAT). Estos resultados contradicen la figura 11 de Lebron y Perfit (1994), así como la modificación de esta figura realizada por Simon et al. (1999). En estas figuras se incluye a las rocas volcánicas de la Sierra Maestra dentro de rocas típicas de un arco calcoalcalino (series CA de Donnelly y Rogers, 1980). Desde el Daniense Tardío al Eoceno Medio existieron, al menos, dos arcos volcánicos en el Caribe noroccidental: 1) un arco CA, el cual es una continuación del arco volcánico Cretácico, representado actualmente en La Española y Puerto Rico, y 2) un arco tipo IAT muy bien representado en la parte oriental de Cuba (arco volcánico de la Sierra Maestra).

## CONCLUSIONES

Los datos presentados sugieren que el volcanismo paleogénico de la Sierra Maestra, al menos, el que está registrado en las series inferior y media del Grupo El Cobre: 1) se originó en un arco de islas volcánicas; 2) que el arco de islas volcánicas era tholeiítico bajo en K; 3) que el magmatismo del arco Sierra Maestra es similar al de las series tipo IAT definidas en el arco volcánico del Caribe; 4) que el volcanismo paleogénico de la Sierra Maestra (tholeiítico bajo en K) es independiente del volcanismo paleogénico presente en otras áreas del Caribe (ej: parte central y este de La Española, parte central de Puerto Rico) donde presenta una marcada tendencia calcoalcalina (Lebron y Perfit, 1993); y 5) el arco Sierra Maestra presenta características geoquímicas similares a las del arco de Kermadec en Pacífico SW, lo cual podría indicar una génesis en un contexto geodinámico semejante. Estos nuevos datos sobre el volcanismo del Paleógeno de la Sierra Maestra sugieren que los modelos de placas tectónicas que han sido propuestos para explicar el origen del arco Sierra Maestra deben ser revisados.

## AGRADECIMIENTOS

A los Drs. M. Iturralde-Vinent (Museo Nacional de Historia Natural, Cuba), J. Blanco-Moreno y A. Rodríguez-Vega (Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba), y G. Draper (*Florida International University*, Miami) por las discusiones mantenidas acerca del "polémico" arco volcánico de la Sierra Maestra. Además, este trabajo se enriqueció gracias a los comentarios y sugerencias de los revisores, Dr. D. Gimeno, Dr. R. Vaquer (*Universitat de Barcelona*) e I. Méndez (Empresa Geominera Oriental, Cuba). Al personal de los *Serveis Científico-Tècnics de la Universitat de Barcelona*: E. Pelfort y Dr. A. Padró (*Unitat de ICP-MS*), J.M. Socas y E. Seguí (*Unitat de FRX*), Dr. X. Llovet y Dr. García Veigas (*Unitat de EMP*).

## BIBLIOGRAFÍA

- Bloomer, S.H., Ewart, A., Hergt, J.M., Bryan, W.B., 1994. Geochemistry and origin of igneous rocks from the outer Tonga forearc (site 841). In J.W. Hawkins, L.M. Parson, J.F. Allan, et al. (eds.). Proc. of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, 135. Ocean Drilling Program, College Station, Texas, 625-646.
- Bloomer, S.H., Fisher, R.L., 1987. Petrology and geochemistry of igneous rocks from the Tonga Trench - a non-accreting plate boundary. *Jour. Geol.*, 95, 469-495.
- Cobiella, J., 1988. El vulcanismo paleógeno cubano. Apuntes para un nuevo enfoque. *Revista Tecnológica*, 18(4), 25-32.
- Defant, M.J., Neilsen, R.L., 1990. Interpretation of open system petrogenetic processes: phase equilibria constraints on magma evolution. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 54, 87-102.
- Díaz de Villalvilla, L., Pérez, M., Sukar, K., Mari, T., Méndez, I., Rodríguez, R., Piñero, E., Quintana, M.E., Aguirre, G., Echevarría, B., Milia, I., 1994. Consideraciones geoquímicas acerca de los arcos volcánicos de Cuba. Segundo Congreso Cubano de Geología y Minería, Programa y Resúmenes. Santiago de Cuba, p. 173-174.
- Donnelly, T.W., 1990. Primitive island arcs of the Caribbean: The earliest appearance of arc volcanism and sedimentation. *Geological Society of America, Abstracts with Programs*, Dallas, Texas, A336.
- Donnelly, T.W., Rogers, J., 1980. Igneous series in island arcs: the northeastern Caribbean compared with worldwide island-arc assemblages. *Bull. Volcanol.*, 43, 347-382.
- Donnelly, T.W., Beets, D., Carr, M., Jackson, T., Klaver, G., Lewis, J., Maury, R., Schellekens, H., Smith, A., Wadge, G., Westercamp, D., 1990. History and tectonic setting of Caribbean magmatism. In G. Dengo, J. Case (eds.). *The Caribbean region, The Geology of North America*. Vol. H: Boulder, Col., Geol. Soc. America, 339-374.

- Draper, G., Barros, J.A. 1994. Cuba. In S.K. Donovan, T.A. Jackson (eds.), *Caribbean Geology an Introduction*, UWI-PA, Jamaica, 65-83.
- Eguipko, O., Perez, M., 1976. Breves características petrográficas y petroquímicas de los principales tipos de rocas magmáticas en la parte central de la Sierra Maestra. Serie no. 1. Centro de Investigaciones Geológicas, 14 pp.
- Ewart, A., Brothers, R.N., Mateen, A., 1977. An outline of the geology and geochemistry, and the possible petrogenetic evolution of the volcanic rocks of the Tonga-Kermadec - New Zealand Island Arc. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 2, 205-250.
- Ewart, A., Hawkesworth, C.J., 1987. The Pleistocene recent Tonga - Kermadec arc lava: interpretation of new isotopic and rare earth data in terms of a depleted source model. *Jour. Petrol.*, 28, 495-530.
- Gamble, J.A., Christie, R.H.K., Wright, I.C., Wysoczanski, R.J., 1997. Primitive K-rich magmas from Clark volcano, southern Kermadec arc: a paradox in the K - depth relationship. In G.T. Nixon, A.D. Johnston, R.F. Martin (eds.). *Nature and origin of primitive magmas at subduction zones*. *Can. Mineral.*, 35, 275-290.
- García-Delgado, D.E., Méndez, I. 1994. Generalización estratigráfica del arco volcánico paleogénico en la Sierra Maestra. Segundo Congreso Cubano de Geología y Minería, Programa y Resúmenes. Santiago de Cuba, 68.
- García-Torres, M.C., Carralero, N., Proenza, J., Blanco, J. 1996. Condiciones Paleotectónicas y de sedimentación de las formaciones Sabaneta y Vigía según el modelo de una cuenca de retroarco. *Minería y Geología*, 13(1), 13-17.
- Gill, J.B., 1981. *Orogenic andesites and plate tectonics*. Springer-Verlag, New York.
- Gust, D.A., Arculus, R.J., Kersting, A.B., 1997. Aspects of magma sources and processes in the Honshu arc. In G.T. Nixon, A.D. Johnston, R.F. Martin (eds.). *Nature and origin of primitive magmas at subduction zones*. *Can. Mineral.*, 35, 347-365.
- Gyarmati, P., 1983. Las rocas intrusivas intermedias de Cuba oriental. In E. Nagy et al. (eds.). *Contribución a la geología de Cuba Oriental*, Edit. Cient.-Técnica, 99-111.
- Gyarmati, P., Brito, A., 1983. Relaciones genéticas entre las rocas abisales, subvulcánicas y volcánicas de la Sierra Maestra. In E. Nagy et al. (eds.). *Contribución a la geología de Cuba Oriental*, Edit. Cient.-Técnica, 112-114.
- Iturralde-Vinent, M. 1976. Estratigrafía de la zona Calabazas-Achotal, Mayarí Arriba, Oriente. *La Minería en Cuba*, 5, 9-23.
- Iturralde-Vinent, M., 1994. Cuban geology: A new plate tectonic synthesis. *Journal Petroleum Geology*, 17, 39-70.
- Iturralde-Vinent, M., 1996. Cuba: El archipiélago volcánico Paleoceno-Eoceno Medio. In M. Iturralde-Vinent (ed.). *Ofiolitas y arcos volcánicos de Cuba*, Special Contribution No. 1, 231-246.
- Jackson, T.A., Smith, T.E., 1979. The tectonic significance of basalts and dacites in the Wagwater Belt, Jamaica. *Geol. Mag.*, 116, 365-374.
- Kysar, G., Mortensen, J.K., Lewis, J.F., 1998a. U-Pb zircon age constraints for Paleogene igneous rocks of the Sierra Maestra, southeastern Cuba; implications for short-lived arc magmatism along the northern Caribbean margin. *Geological Society of America, annual meeting, Toronto, Abstracts with Programs*, 185.
- Kysar, G., Green, D., Pérez, M., Méndez, I., Rodríguez, R., 1998b. Igneous rocks of the Sierra Maestra, southeastern Cuba; new major and trace element analyses. 15th Caribbean Geological Conference, Kingston, Jamaica, June 29-July 2, *Contributions to Geology, UWI, Mona*, 3, 84.
- Le Bas, M.J., Le Maitre, R.W., Streckeisen, A., Zanettin, B., 1986. A chemical classification of igneous rocks based on the total alkali - silica diagram. *Jour. Petrol.*, 27, 745-750.
- Lebron, M.C., Perfit, M.C., 1993. Stratigraphic and petrochemical data support subduction polarity reversal of the Cretaceous Caribbean arc. *Jour. Geol.*, 101, 389-396.
- Lebron, M.C., Perfit, M.R., 1994. Petrochemistry and tectonic significance of Cretaceous island-arc rocks, Cordillera Oriental, Dominican Republic. *Tectonophysics*, 229, 69-100.
- Leterrier, J., Maury, R.C., Thonon, P., Girard, D., Marchal, M., 1982. Clinopyroxene composition as a method of identification of the magmatic affinities of palaeo-volcanic series. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 59, 139-154.
- Lewis, J.F., Draper, G., 1990. Geology and tectonic evolution of the northern Caribbean margin. In G. Dengo, J.E. Case (eds.). *The Geology of the northern America*. Vol. H. The Caribbean Region, Geological Society of America, Boulder, 77-140.
- Lewis, J.F., Perfit, M., Horan, S., Diaz de Villalvilla, L., 1995. Geochemistry and petrotectonic significance of early island arc bimodal volcanism in the greater antilles arc. *Geological Society of America, Abstracts with Programs, New Orleans, Louisiana A-227*.
- Luna, J.A., Padró, T., Gelis, B.I., Sosa, I., Batista, F., Rodríguez, E., Ananías, L., Fernández, A., Gutiérrez, M., Estrugo, M., 1989. Informe geológico de prospección preliminar de los flancos y horizontes profundos del campo metalífero El Cobre a escala 1:10.000. La Habana, archivos de la ONRM, inédito, 218 pp.
- Méndez, I., Rodríguez, R., Rodríguez, E., Fernández, A., Rodríguez, M., Ruiz, R., Hernández, R., 1994. Atlas de rocas de la Sierra Maestra. Editorial Oriente, Santiago de Cuba, 125 pp.
- Méndez, I., 1997. Apuntes sobre el vulcanismo del Paleógeno en la región Sierra Maestra y características de su composición química. In G. Furrázola, K. Nuñez (eds.). *Estudios sobre geología de Cuba*, 424-444.

- Miyashiro, A., 1974. Volcanic rock series in island arcs and active continental margins. *Am. J. Sci.*, 274, 321-355.
- Morimoto, N., Fabriès, J., Ferguson, A.K., Ginsburg, I.V., Ross, M., Siefert, F.A., Zussman, J., Aoki, K., Gottardi, G., 1988. Nomenclature of pyroxenes. *Am. Mineral.*, 73, 1123-1133.
- Pearce, J.A., 1983. Roles of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. In C.J. Hawkesworth, M.J. Norry (eds.). *Continental basalts and mantle xenoliths*. Shivas, Nantwich, 230-249.
- Pérez, M., Gorova, M., Kuzakov, G., 1979. Características generales del magmatismo de la Sierra Maestra. *La Minería en Cuba*, 5(1), 32-38.
- Proenza, J., Carralero, N., 1994. Un nuevo enfoque sobre la geología de la parte sur de la cuenca de Sagua de Tánamo. *Minería y Geología*, 11(2), 3-10.
- Quintas, F., Hernández, M., Blanco, J. 1994. Origen y evolución del arco de islas volcánicas Sierra Maestra. *Minería y Geología*, 11(1), 3-12.
- Quintas, F., Proenza, J., Castillo, J.L., 1995. Análisis tectono-sedimentario de la paleocuenca Sabaneta. *Minería y Geología*, 12, 3-8.
- Rollinson, H., 1993. *Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation*. John Wiley and Sons, New York, 352 pp.
- Simon, G., Kesler, S.E., Russell, N., Hall, C.M., Bell, D., Piñero, E., 1999. Epithermal gold mineralization in an old volcanic arc: the Jacinto deposit, Camagüey district, Cuba. *Economic Geology*, 94, 487-506.
- Smith, I.E.M., Worthington, T.J., Price, R.C., Gamble, J.A., 1997. Primitive magmas in arc-type volcanic associations: examples from the southwest Pacific. In G.T. Nixon, A.D. Johnston, R.F. Martin (eds.). *Nature and origin of primitive magmas at subduction zones*. *Can. Mineral.*, 35, 257-273.
- Sun, S., McDonough, W.F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In A.D. Saunders, M.J. Norry (eds.). *Magmatism in the oceanic basins*. *Geol. Soc., Spec. Publ.*, 42, 331-345.