Caracterización mineralógica de tipologías del comportamiento geoquímico de las lateritas del oriente cubano

Ramón Eddie Peña-Abreu [(1)], Yuslieni Cala-Cardero [(1)], Neicis Capote-Flores [(1)], Abdel Casanova-Gómez [(2)], Carlos A. Toledo-Sánchez [(3),] Inés Milia-González [(3)] y Evelio Lisabet-Sarracen [(3)]

[(1)] *Centro de Investigaciones del Níquel. Grupo de Matemática Aplicada y Procesamiento Avanzado de Datos. Carretera Yagrumaje km 5 ½ Moa. Holguín. Cuba CP:83330 Fax: 53 24 62202, Teléf: 024-67123, 024-67976, E-mail: rpena@cil.moa.minbas.cu*

[(2)] *Centro de Investigaciones para la Industria Minero Metalúrgica. E-mail: abdel@cipimm.minem.cu.*

[(3)] *Instituto de Geología y Paleontología, Servicio Geológico Cubano. E-mail: carlos.ts@igp.minem.cu*

Recibido: septiembre 2016	Aceptado: enero 2017

Resumen

Se presentan los resultados de la investigación mineralógica realizada al material laterítico, perteneciente a tipologías obtenidas en la clasificación multivariada de los yacimientos de níquel del oriente cubano, con el objetivo de conocer las diferencias mineralógicas entre ellas. Se tomaron muestras representativas de varias tipologías o clases, se les realizó separación magnética y en tres fracciones granulométricas, que generaron en total 54 muestras, se les determinó su composición por difracción de rayos X, análisis calorimétricos y microscopía electrónica de barrido. Se exponen brevemente los resultados del estudio multivariado que generó las clases y la selección de las muestras. Se detalla la metodología de validación cruzada a partir de los resultados en cada método, que permitió diferenciar las clases mineralógicamente y confirmó que se pueden utilizar para los cálculos de recursos y reservas, en la planificación minera y para aumentar la confirmación de las leyes de Ni y Co en la alimentación a la industria.

Palabras clave: Clasificación Multivariada, Reconocimiento de Patrones, Mineralogía, Modelación Matemática

Mineralogical characterization of typologies of the geochemical behavior in laterites of eastern Cuba

Abstract

Show the research results of mineralogical laterites samples analysis, that belong to obtained in multivariate cluster analysis, of easterly north Cuban laterites ore deposit. The objective was to know mineralogical differences between typology. Representative samples of several typologies or classes were magnetic separated and fractionated by three sizes of particles, generating 54 samples to determine composition, X-rays diffraction, calorimetric analysis and electronic scanning microscopy. Are briefly exposed the results of the multi-varied study that has generated the typology and the selection of the samples. In detail explained the cross- validation methodology of the results of each method, allowing mineralogical differentiation typology and confirmed that it can be used for the reserve and resource calculations, in the mining planning and to increase the confirmation the Ni and Co tenors in the mineral supply to the industry.

Key words: cluster analysis, pattern recognition, mineralogy, mathematical modeling

1. Introducción

Se conoce que las menas lateríticas están compuestas de una amplia variedad de minerales (Coello, 1998; Wilson, 2004; Rojas et al, 2005; Freyssinet, Butt & Morris, 2005) y que la eficiencia extractiva en los procesos de lixiviación carbonato amoniacal (Caron) y de lixiviación ácida, dependen más de la composición mineralógica que de la composición química de las menas (Miranda et al, 2002; Chang et al, 2005). La determinación de la composición mineralógica en el control diario de las menas alimentadas, en la actualidad resulta engorrosa y no es posible estimarla con precisión (Chang et al, 2004; Lavaut, 2007). Esta variedad de minerales es producto de la compleja génesis de formación de los yacimientos lateríticos del oriente cubano (Lavaut, 1987, 2003 y 2007) y se ha clasificado con la ayuda de la estadística multivariada para utilizar las clases en el desarrollo de modelos matemáticos (Peña y Vera, 2013), que reproducen nítidamente las propiedades geoquímicas de estos yacimientos (Peña, 2015 b).

La aplicación de dichos modelos se ha visto limitada porque no se conocen las diferencias en el comportamiento mineralógico y metalúrgico de las clases o tipologías de menas obtenidas de los análisis multivariados. La investigación se desarrolló con el objetivo de determinar estas diferencias. Se desenvolvió en los yacimientos lateríticos concesionados a la Empresa del Níquel Comandante Ernesto Che Guevara (ECG), que se localizan en la porción oriental del sistema montañoso del nordeste de Cuba, donde yacen potentes cortezas lateríticas formadas sobre rocas básicas y ultra básicas de la asociación ofiolítica que predominan en la región.

Se tomaron muestras representativas de los subtipos de menas, se separaron en fracciones granulométricas y por magnetismo, se generaron 54 muestras, se le realizaron análisis de ocho elementos químicos y análisis mineralógicos por métodos calorimétricos, difracción de rayos X, microscopía óptica y electrónica; en los casos necesarios se realizó microanálisis Raman.

Los resultados de estos análisis permitieron realizar un contraste de las mineralogías encontradas con cada método empleado y determinar que las diferencias geoquímicas que generaron a las clases sustanciales en el análisis multivariado, corresponden a diferencias mineralógicas que pueden ser notables o ligeras entre clases. Adicionalmente se determinó que existen muestras en las cuales aparecen tierras raras.

2. Materiales y métodos

Las muestras empleadas para los análisis químicos y mineralógicos, se tomaron en el muestreo de campo de diversas muestras tecnológicas (MT) de los yacimientos Punta Gorda (PTG), Yagrumaje Norte (YN), Yagrumaje Sur (YS) y Camarioca Este (CE) de la concesión minera de la Empresa del Níquel Che Guevara. Se extrajeron en locaciones elegidas para garantizar la participación equitativa de las menas que se envían al proceso metalúrgico. Se logró con el empleo sistémico de modelos matemáticos para la toma de decisiones y el modelado markoviano de estos yacimientos (Peña et al 2007 a y b; Peña, 2013 y 2015 a; CEDINIQ, agosto 2015).

Para lograr una mayor precisión en la selección de las muestras y en todo el análisis, teniendo en cuenta que se incorporó un nuevo yacimiento al estudio, fue necesario actualizar el sistema de clases que se utiliza en los modelos matemáticos. El procesamiento se realizó conforme a la metodología ACP-Clasificación (Crivisqui, 2003), comúnmente empleada y con la cual se obtuvo el sistema de clases utilizado hasta el momento (Peña y Vera, 2013).

La preparación de las muestras para el análisis mineralógico se realizó siguiendo recomendaciones tomadas de la bibliografía y de los especialistas en mineralogía (Agyei et al, 2010; Rojas et al, 2005). Cada muestra fue separada por vía húmeda en tres fracciones granulométricas $< 44\ \mu k$, $[44;\ 74)\ \mu k$ y $\geq 44\ \mu k$ y en fracción magnética y no magnética. Para esta última se toman 10 g del material molido hasta el 85 % en la fracción $< 74\ \mu k$ se emulsiona en agua en un crisol de cerámica. Para aislar la fracción magnética en la parte inferior se le adhiere un Imán Schoniev, luego se voltea sobre otro crisol para verter el material que no se adhiere al fondo del crisol por magnetismo, el material de ambos crisoles se seca a temperatura de 85 ºC a 90 ºC, luego se envasan en sobres diferentes y se codifican adecuadamente.

Los ocho elementos químicos se realizaron con el método de espectrometría de absorción atómica (EAA) en un espectrómetro con lámpara de cátodo hueco de la marca ATI-Unicam. Las muestras se procesaron con análisis térmico, en la variante de Termogravimetría (TG) y Calorimetría Diferencial de Barrido (CDB) en el laboratorio del Centro de Investigaciones para la Industria Minero Metalúrgica (CIPIMM), que reporta haber realizado termogramas simultáneos de CDB y TG en un equipo de la firma alemana *NETZSCH*, modelo *STA 449 F3*, con los parámetros de operación siguientes: régimen de calentamiento Dinámico; la masa de muestra se especifica en cada termograma; la masa del material de referencia es de 60.20 mg (Al_2O_3); los crisoles son de Al_2O_3 con tamaño estándar; el material del horno es SiC (T.amb. – 1500 ^{0}C), se utilizó aire en la cámara de calentamiento; el flujo del gas protector de la termobalanza es de 20.0 ml/min (Ar); la velocidad de calentamiento es de 10.0 K/min; la sensibilidad de la termobalanza oscila entre

0,001 mg y 35,0 g; la sensibilidad de las curvas DSC y TG oscila entre (-0.001 y – 5000) µV/mg; el tiempo de medición es de 1 h:37 min el rango de temperatura de trabajo es de (27 a 1000) ^{0}C

Las curvas calorimétricas de barrido (CDB) se convirtieron en termogramas continuos con el empleo del programa "*Proteus"* suministrado por el fabricante del equipo, compatible con Microsoft Office para Windows, con el que se obtienen además los termogramas D1TG de la primera velocidad de cambio de masa $\left(\frac{dm}{dt}\right)$. El error que se reporta del análisis cuantitativo TG es del ± 2.00 %.

En la difracción de rayos X (DRX), los difractogramas se realizaron por el método de polvo y se registraron en un equipo Phillips PW 1710 con los siguientes parámetros de operación: goniómetro vertical; sistema de focalización Bragg – Brentano; Radiación K_α Fe con filtros Mn; diferencia de potencial aplicada 30 kV; corriente anódica 20 µA; calibración del equipo patrón externo silicio; registro angular de 6 º a 800 º (2θ)

Todos los difractogramas se registraron según variante de medición punto a punto, con paso angular de 0,050 y tiempo de medición en cada posición de 3 segundos.

Los datos de los difractogramas se entregaron al laboratorio del CEDINIQ para su interpretación, que se realizó con el software ANALIZE (Versión 2.26) y Hiscore.

En el análisis de microscopía electrónica de barrido (MEB), desarrollado por el Instituto de Geología y Paleontología (IGP), se reporta que las muestras fueron inicialmente observadas por microscopía óptica desde un punto de vista mineralógico y luego sometidas a análisis de microscopía electrónica de barrido, con microanálisis de rayos X (MEB-MARX). Se utilizó un microscopio electrónico TESCAN modelo 5130 SB, los microanálisis de rayos X se realizaron con un espectrómetro marca OXFORD INSTRUMENTS, modelo INCA 350. Como complemento analítico fue empleado un micro espectrómetro RAMAN de la marca Horiba, Jobin Yvon, modelo XploRA.

Los resultados del estudio calorimétrico se entregaron en tablas y gráficos, las tablas exponen los valores cuantitativos de las fases mineralógicas, los resultados de la DRX se toman de los difractogramas y un resumen de las principales fases detectadas que devuelve el software, con ello se crean tablas, en las columnas se encuentran los nombres de las fases mineralógicas y en las filas las muestras.

Los resultados de la microscopía electrónica se entregaron en varios formatos, gráficos, fotos y una tabla de datos con los valores químicos del estudio de varios puntos analizados en las muestras. Esta tabla de datos se adecuó a la codificación de los tipos de muestras analizadas para el contraste con los resultados de otros métodos.

2.1. Validación de las diferencias mineralógicas entre las clases

La validación se realiza contrastando los resultados químicos, con los mineralógicos de acuerdo a los tipos de muestras utilizadas. Se obtienen las relaciones que se exponen en la **Fig. 1**, de ellas se definen las fases presentes en cada clase, así como, la procedencia de las fases en las muestras, sea de una fracción granulométrica o magnética. El análisis cruzado de métodos permitió identificar la composición mineralógica y los elementos químicos correspondientes a las clases en las micropartículas analizadas en cada muestra.

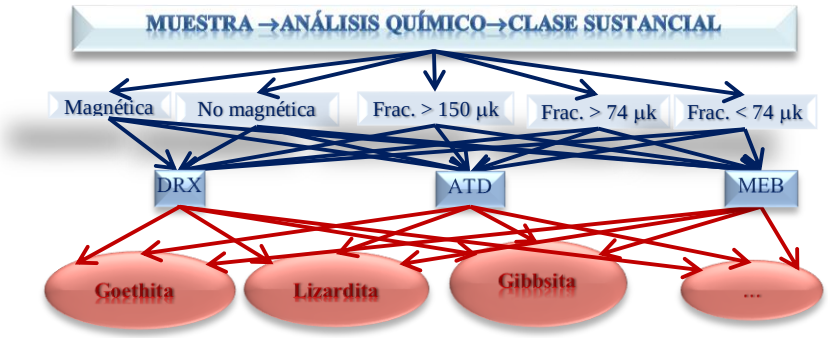


Fig. 1. Esquema de análisis de la composición mineralógica de las clases sustanciales

Los contrastes cruzados de las 54 muestras de los tres métodos empleados pueden ser muy complejos sin herramientas automáticas, por ello se crearon macros que contabilizaron la correspondencia de los métodos calorimétricos y de DRX en contraste con los puntos analizados en el MEB.

Los análisis químicos en cada punto de una muestra analizada con el MEB, se compara con la composición de las fases mineralógicas de patrones obtenidos del webmineral (2016) (http://webmineral.com). Se creó una tabla con los patrones de la composición de cada fase y con una subrutina automática se validó cada punto dentro de un rango del 10 % para cada variable. La rutina genera una tabla con las muestras en las filas y en las columnas las fases a que pertenecen. Otras rutinas comparan por muestras la aparición de las fases en los tres métodos y crea una tabla con la composición mineralógica mayoritaria en cada muestra. Se resume por clases en una tabla dinámica. Todo este procesamiento se realizó en Excel incluyendo la programación de las subrutinas en el sistema de macros de M. S Office.

3. Análisis de los Resultados

3.1. Análisis multivariado de las muestras

El ACP definió el sistema de variables Fe, Ni, SiO_2, Al_2O_3 (fig. 2, a) para la clasificación, con el que se obtuvo la partición más estable en once clases con un cociente de inercia del 85 %. En la fig. 2, b)**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra el gráfico de clasificación en 11 clases que se logró con 88 671 muestras. Cada clase obtenida se divide en dos subclases de acuerdo con los valores del cut off y se denotan con su número, un guión bajo y cero si incumple el cut off, en caso contrario se repite el número con el guión bajo intermedio (ej. 1_0 y 1_1). La composición química de las clases se expone en la fig. 3 a y b.

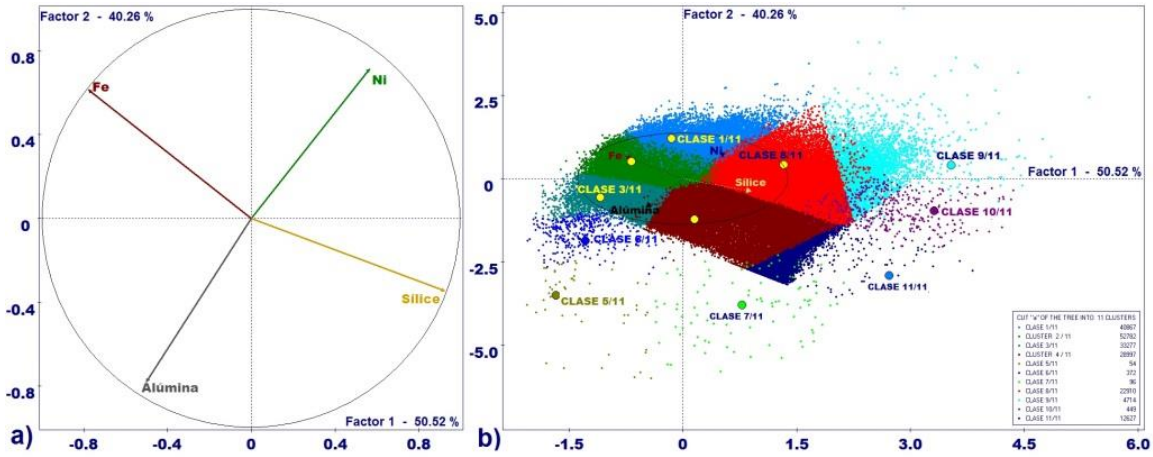


Fig. 2. a) ACP del sistema de variables para la clasificación. b) Gráfico de la clasificación en 11 clases

Las primeras cuatro clases y la novena con las correspondiente subclases están compuestas fundamentalmente de material que no es limonítico, las restantes son mayoritariamente limoníticas. Se puede observar que el Fe y el Al aumentan de las clases iniciales a las finales con un cambio brusco en la novena clase, de la misma forma disminuyen el MgO y la SiO_2.

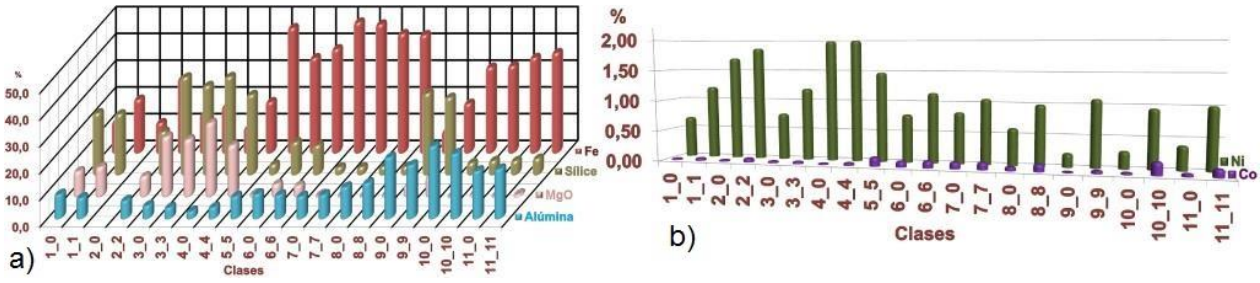


Fig. 3. Comportamiento por clases, a) elementos mayoritarios, b) elementos de interés actual para la industria

Existe correspondencia entre las clases y las menas industriales (Peña y Vera, 2013), todas las menas se subdividen en las clases, la limonita de balance (LB) y la serpentina de balance (SB) empleadas en el proceso Caron se subdividen

en tres y dos clases respectivamente, la primera en las clases 5_5, 6_6 y 7_7 y la segunda en 1_1 y 2_2, ambas menas están presentes en otras clases con una presencia poco significativa.

Se tomaron 14 muestras para los análisis mineralógicos enumeradas de la 8137 a la 8149 y la 8154. Las muestras en bruto correspondientes a una clase se descomponen en dos y tres submuestras respectivamente después de la separación magnética y granulométrica. No todas las muestras al descomponerse mantienen la misma clase, la 8144 en la separación magnética se subdivide en 1_0 y 6_6, pero en la separación granulométrica se afecta sólo una de las fracciones respecto a la clase de origen.

El análisis de las submuestras permitió definir que en la clase 1_0 existe cerca del 4 % de materiales limoníticos, se encuentran en la fracción no magnética de la muestra y en las partículas menores de 45 μk, mientras que las fracciones mayores pertenecen a materiales de la clase 3_0. Todas las muestras separadas en fracciones granulométricas se descomponen al menos en dos clases. La muestra 8137 y la 8139 mantienen dos submuestras de la clase primaria, la 8140 y la 8145 solo una. El resto de las muestras se separan en tres clases diferentes, en total se analizaron mineralógicamente 54 submuestras. Estos resultados revelan la complejidad y la diversidad geoquímica de estas menas, de igual forma se encuentran diferencias mineralógicas que se exponen en el próximo punto.

3.2. Composición mineralógica de las clases

Los resultados de los análisis de ATD se han resumido en las

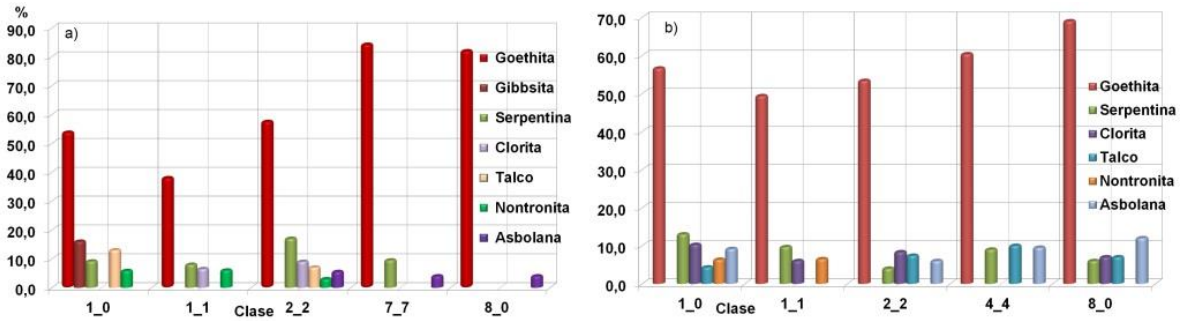


Fig. 4 a y b, las DRX se exponen en las Fig. 5 a y b, la microscopía electrónica se resume en las figs. 11 y 12.

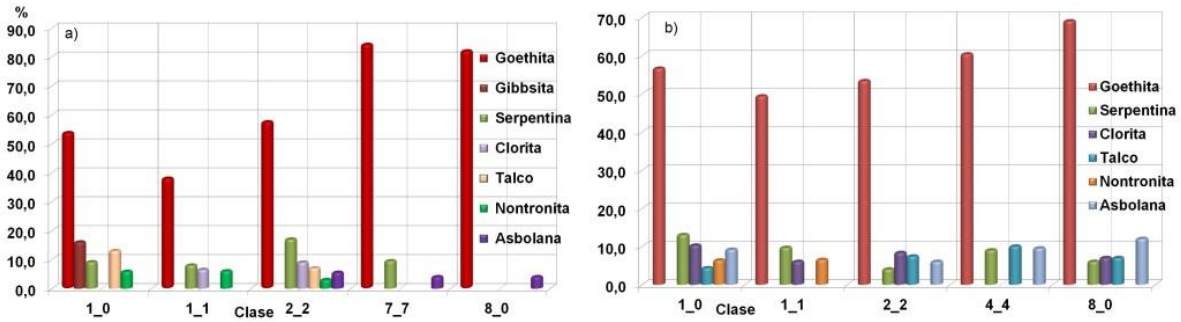


Fig. 4. ATD, a) Muestras de la separación magnética y b) Muestras de la separación granulométrica

En los termogramas el par (goethita, gibbsita) son las fases predominantes en todas las muestras, con valores que oscilan entre 35 % (8134) hasta 94 % (8119), el contraste con DRX permitió establecer que algunas muestras (8123, 8133 y 8134), no contienen gibbsita. La serpentina y la clorita también son minerales mayoritarios, la serpentina es más abundante y puede alcanzar el 15 % (8120) de la clorita, esta última es menor, pero en la muestra 8116 alcanza un 14 %. Dentro de las fases minoritarias, la nontronita es la de mayor presencia con valores entre 3 % y 9 %, la asbolana aparece en las muestras 8119, 8131 y 8136 con un valor de 4%, mientras que en la muestra 8119 alcanza el 7 %. El talco está presente en varias muestras donde tiene un máximo de 14 %.

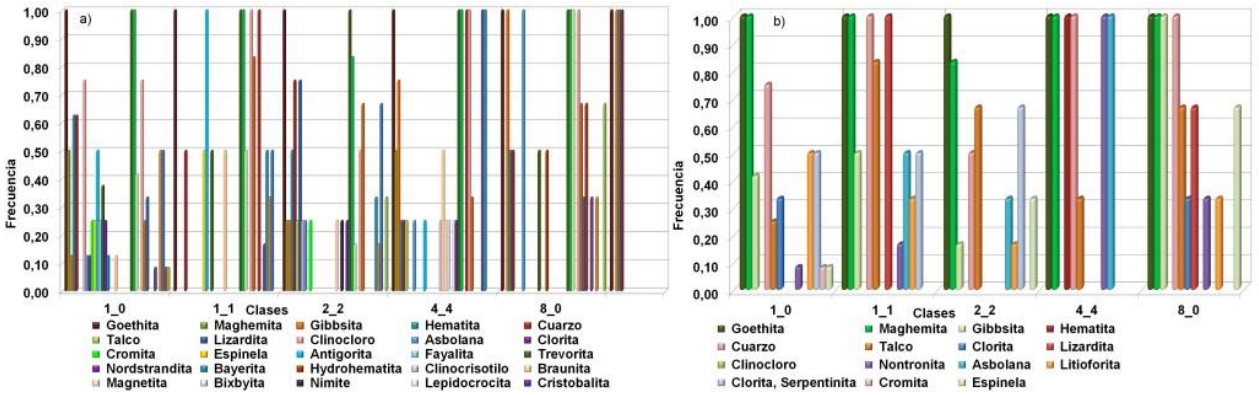


Fig. 5. DRX: a) frecuencia de las fases mineralógicas en las muestras de separación magnéticas; b) frecuencia de las fases mineralógicas en las muestras de separación granulométrica

La difracción de rayos X revela un mayor número de fases mineralógicas en cada clase, en las figs. 5 a y b se exponen las frecuencias de observación de las fases por muestras de una clase. Los resultados de este método serán contrastados con los resultados del ATD y la microscopía electrónica.

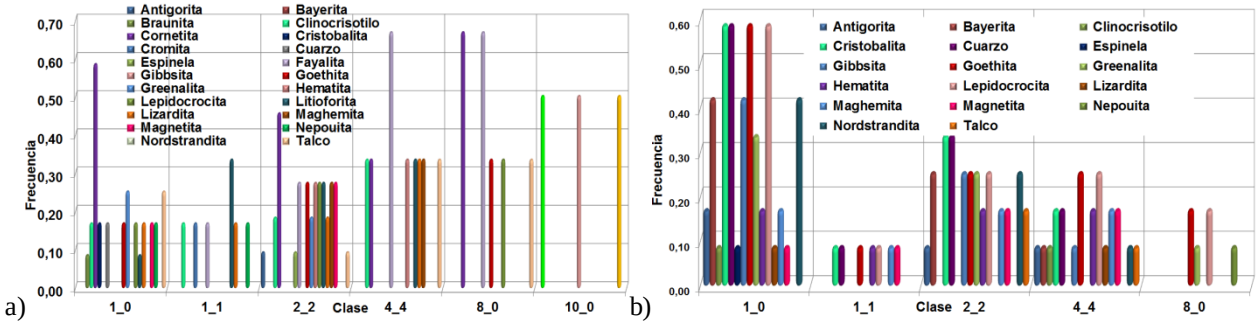


Fig. 6. MEB: a) frecuencia de las fases mineralógicas en las muestras de separación magnética; b) frecuencia de las fases mineralógicas en las muestras de separación granulométrica

La microscopía electrónica estudia puntos específicos de la muestra con una alta resolución, en las figs. 6a y b se valoran las frecuencias de aparición de las fases en muestras de una clase, se tiene en cuenta el sondeo profundo en puntos específicos y el barrido de la muestra. No todas las muestras se pudieron analizar paralelamente con las tres técnicas de análisis mineralógico.

La calorimetría aporta las fases amorfas que no se obtienen con precisión en la DRX, la asbolana se observa en los dos tipos de muestras de acuerdo a las separaciones realizadas, esta fase es la principal portadora de Co y es mayoritaria en Ni (Rojas, 2012; Webmineral, 2016).

El MEB detectó la goethita en todas las muestras, al igual que las otras técnicas, la mayor densidad de fases por clases se logra en las muestras separadas en fracciones granulométricas. Las partículas de las muestras fueron sometidas a un análisis de composición elemental, lo que se complementó en casos específicos con espectrometría Raman para determinar las fases minerales presentes, los minerales encontrados pueden ser clasificados en cuatro categorías, *minerales fundamentales en las muestras, minerales en concentraciones elevadas, minerales en concentraciones menores*, así como, *elementos y minerales escasos y dispersos.*

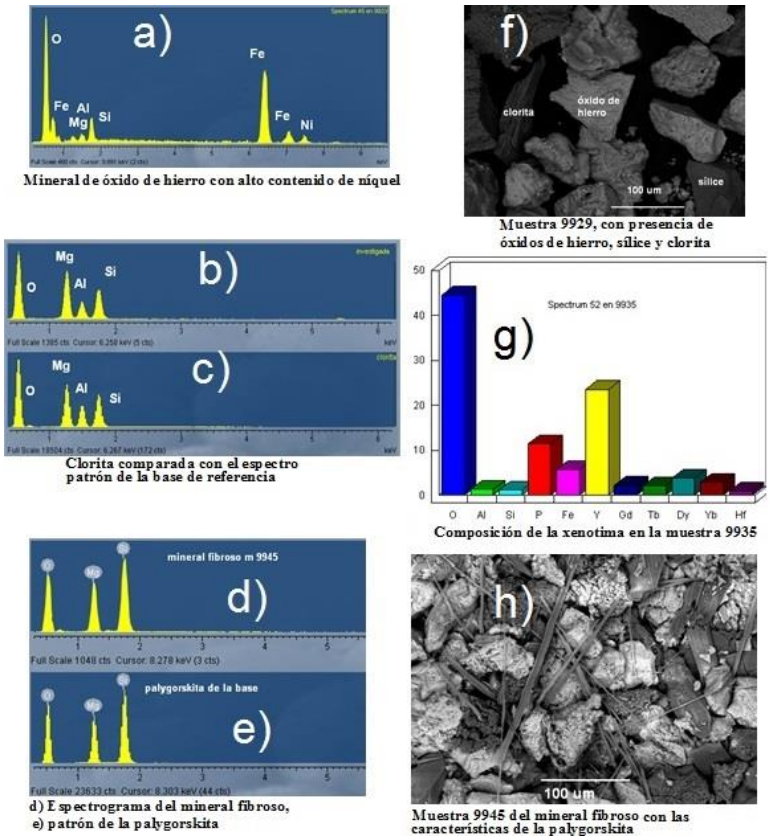


Fig. 7. Minerales fundamentales, en concentraciones elevadas, menores y dispersos

Los minerales fundamentales en las muestras lo forman los óxidos de hierro, son predominantes y se mueven entre un 51 % de FeO en la muestra 9926 y un 80 % en la 9940. Las fases goethita y hematita predominan, se observa además magnetita. En estos óxidos de hierro se encontraron contenidos relativamente elevados de níquel, una partícula con estas características se expone en la fig. 7 a, corresponde a la muestra 9933.

Los minerales en concentraciones elevadas son los silicatos (sílice, cloritas y serpentinas) que oscilan entre el 5,3 % de SiO_2 en la muestra 9934 y un 35,19 % en la 9937. La fig. 7 f) es la imagen de la muestra 9929, en la fig. 7 b se muestra el espectro de la clorita detectada y en la fig. 7 c) el patrón de la base de datos del equipo utilizado.

Se detectaron en menores concentraciones, la cromopicotita y de un mineral fibroso con las características de palygorskita. La fig. 7 h) expone la imagen de la muestra 9945 y la composición química de este mineral se muestra en el espectro de fig. 7 d), comparado con el patrón que se expone la fig. 7 e).

Las muestras separadas granulométricamente no solo han permitido diferenciar las clases, han revelado elementos químicos y minerales escasos, dispersos y fases que no formaron parte de los objetivos de la investigación, pero por su importancia se deben tener en cuenta para próximos trabajos, se Elementos.

En la muestra 9935 correspondiente a la fracción >74 μk de la muestra 8140 de Punta Gorda, perteneciente a la clase 8_0, se detectó xenotima con presencia de gadolinio, terbio, disprosio, iterbio y hafnio (fig. 7 h). El contenido de hierro, aluminio y silicio es aportado por el mineral acompañante, una parte del Fe es aportada por la matriz de la muestra.

En las muestras 9926 y 9934 correspondientes a las fracciones >74 μk y <45 μk de las muestras 8137 (PTG) y 8139 (YS) respectivamente, ambas de la clase 1_0, se detectó galena. Es importante señalar que estas muestras no sufrieron procesos de concentración ya que solo se buscaba diferenciarlas en las fases mayoritarias y las que fuesen importantes para los procesos metalúrgicos de extracción de níquel. Se debe tener en cuenta que estos elementos aparecen en clases de escombros, la muestra 8140 es de tipo limonítica, las muestras 8137 y 8139 son serpentiníticas, por lo que *se recomienda profundizar en el estudio de las tierras raras en los escombros superiores y la galena en los materiales serpentiníticos.*

3.3. Diferenciación mineralógica de las clases sustanciales

Los resultados antes expuestos se han sistematizado en una validación cruzada de los tres métodos de análisis que se resume en la tabla I. A continuación se tratarán las diferencias entre las clases estudiadas ya que las semejanzas se infieren de los resultados expuestos en el punto precedente. Ambas partes de la **primera clase** (1_0 y 1_1) se diferencian por la ausencia en la 1_1 de cuatro fases, gibbsita, clinocloro, antigorita, litioforita y por la presencia de lizardita, pero ambas contienen fases de todos los grupos mineralógicos que se han detectado, lo que las hace muy similares. La **segunda clase** representada sólo por las menas 2_2, se diferencia de la primera porque posee fases de óxidos e hidróxidos de aluminio. **La cuarta clase** se diferencia por la ausencia de la magnetita y porque contiene otros óxidos de hierro ausentes en la primera y la segunda clase. Se ausentan además algunas fases de óxido e hidróxidos de aluminio, de filosilicatos presentes en las dos clases anteriores, no contiene cuarzo. La **séptima clase** se diferencia porque no contienen magnetita, hematita ni maghemita, por la ausencia de filosilicatos, óxidos, hidróxidos, silicatos de Mn y cuarzos. En esta clase no se analizaron muestras separadas granulométricamente ni se enviaron a microscopía electrónica, pero los resultados del ATD se confirman plenamente en la DRX.

En las muestras de la **octava clase** no hay menas presentes, se diferencia de la 7_7 en una fase de óxido (maghemita), la presencia de asbolana y cuarzo, en la tabla II de los resultados del MEB muestra además la presencia de clorita, clinocrisotilo, antigorita, talco. De la **décima clase** sólo se han estudiado muestras que no son menas, se diferencia en las fases de óxidos de hierro y en ella no está presente la asbolana.

Las cuatro primeras clases en su mayoría son menas de tipo serpentiníticas, pero contienen en menor cuantía otros tipos de menas. En las figs. 4 a y b se observa a la goethita como mayoritaria en todas las clases analizadas, independientemente que sea del tipo serpentinítico o limonítico, la gibbsita es otra fase con alta presencia en las muestras analizadas, así como la asbolana y la nontronita.

Las tablas I y II y las figs. 3 a la 7 muestran que con aumento del número de la clase hay tendencia al cambio en las fases de óxidos de Fe, en la misma dirección disminuyen los filosilicatos y los óxidos de aluminio. El cuarzo está presente en la mayoría de las clases.

Tabla I. Resumen por clases de las fases detectadas en las muestras con los análisis de ATD y DRX

Clase	Muestra	Submuestras Magnética	Submuestras Granulométrica	Óxidos e Hidróxidos de Fe	Óxido e Hidróxidos de Al	Filosilicatos	Óxidos, hidróxidos y silicatos de Mn	Cuarzos
1_0	8137; 8139; 8144; 8146	8117; 8128; 8118; 8129; 8123; 8133; 8125; 8135	9926; 9927; 9928; 9932; 9933; 9934; 9944; 9945; 9946; 9950; 9951; 9952	**Goethita** $Fe^{3+}O(OH)$; **Magnetita** $Fe^{3+}{}_2Fe^{2+}O_4$	**Gibbsita** $Al(OH)_3$ **Nontronita** **Clinocloro** $Mg_{3,75}Fe^{2+}{}_{1,25}Si_3Al_2O_{10}(OH)_8$	**Talco**; $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$ **Antigorita** $(Mg,Fe^{2+})_3Si_2O_5(OH)_4$	**Asbolana**; $Ni_{0.3}Co_{0.1}Ca_{0.1}Mn^{2+}{}_{1.5}O_{1.5}(OH)_2 \cdot 0.6(H_2O)$ **Litioforita**	**Cuarzo** SiO_2
1_1	8145; 8149	8124; 8134; 81492; 81491	9947; 9948; 9949; 9953; 9954; 9955	**Goethita; Magnetita**	**Nontronita** $Na_{0,3}Fe^{3+}{}_2Si_3AlO_{10}(OH)_2 \cdot 4(H_2O)$	**Lizardita**; $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$ **Talco**	**Asbolana** $Al_{0.7}Li_{0.3}Mn^{4+}{}_{0.7}Mn^{3+}{}_{0.3}O_2(OH)_2$	**Cuarzo**
2_2	8138; 8154	8116; 8127; 8126; 8136	9929; 9930; 9931; 9941; 9942; 9943	**Goethita; Magnetita**		**Talco**; **Lizardita**	**Asbolana**	**Cuarzo**
4_4	8148	81481; 81482	9938; 9939; 9940	**Goethita; Hematita** (Fe_2O_3) **Maghemita** $Fe^{3+}{}_2O_3$	**Nontronita**	**Talco**	**Asbolana**	
7_7	8141; 8142	8120; 8131; 8121; 8132		**Goethita**	**Gibbsita**			
8_0	8140	8119; 8130	9935; 9936; 9937	**Goethita**; **Maghemita**	**Gibbsita**		**Asbolana**	**Cuarzo**
10_0	8143	8122		**Goethita**; **Hematita**	**Gibbsita**			**Cuarzo**

Tabla II. Resumen por clases de las fases detectadas con MEB

Clase	Óxidos e Hidróxidos de Fe	Óxido e Hidróxidos de Al		Filosilicatos		Óxidos, hidróxidos y silicatos de Mn	Cuarzos	
1_0	**Goethita; Magnetita; Hematita; Hydrohematita** ; **Trevorita**	**Nordstrandita; Espinela; Clinocloro**	**Nontronita; Nimite**	**Clorita; Lizardita; Clinocrisotilo; Neupoita; Fayalita;**	**Talco; Greenalita**	**Litioforita; Braunita; Bixbyita**	**Cuarzo**	**Cristobalita**
1_1					**Antigorita**			
2_2	**Goethita; Magnetita; Hematita; Maghemita; Hydrohematita**		**Nimite**		**Talco; Antigorita**	**Bixbyita**	**Cuarzo**	
4_4	**Goethita; Hematita; Maghemita; Trevorita**				**Antigorita; Greenalita**			
8_0	**Goethita; Hydrohematita**			**Clorita; Clinocrisotilo; Antigorita; Talco**		**Asbolana**		
10_0	**Lepidocrocita; Trevorita**	**Gibbsita**						

Nota: Los colores se utilizaron en ambas tablas para mostrar las diferencias en las fases que corresponden a cada clase.

Conclusiones

1. En la actualización de las clases sustanciales se definió, en el análisis de componentes principales, que el sistema de variables a tener en cuenta para clasificar debe ser Fe, Ni, SiO_2, Al_2O_3.
2. La clasificación generó un sistema de once clases, las primeras cuatro y la novena, con sus correspondientes subclases, están compuestas fundamentalmente de material que no es limonítico, las restantes son mayoritariamente limoníticas.
3. Las diferencias geoquímicas que generaron las clases sustanciales en el análisis multivariado, corresponden a diferencias mineralógicas, que pueden ser notables o ligeras entre las clases.
4. En una muestra de Punta Gorda de la clase 8_0, en la fracción mayor de 74 μk se observó los elementos denominados "Tierras Raras", gadolinio, terbio, disprosio, iterbio, hafnio y xenotima. De este mismo yacimiento una muestra de la clase 1_0, de la fracción >74 μk se le detectó galena, igualmente detectada en Yagrumaje Sur, en una muestra de esa misma clase de en la fracción <45 μk.

Agradecimientos

Los resultados del artículo no se hubiesen logrado sin la realización de la tarea técnico productivo, financiado por el Servicio Geológico Cubano, desarrollada en el Centro de Investigaciones del Níquel (del 2015 al 2016). Mucho agradecimiento a los geólogos con los que intercambio de su apasionante ciencia, en especial a Lázaro Fernández, al Dr. C. Gerardo Orozco Melgar, Dr. C. Nicolás Muñoz Gómez. A mi esposa que me apoya y a mis compañeros de trabajo.

Recomendaciones

1. Continuar el análisis mineralógico de las clases sustanciales que no se analizaron.
2. Establecer una nomenclatura para las clases teniendo en cuenta los resultados obtenidos.

Referencias

Agyei G, Rojas Purón A, Hernández Flores A. 2010. Distribución fraccional de metales y minerales en la laterita de balance del yacimiento Punta Gorda, Moa, Cuba. *Minería y Geología*, V.26 Nº 4, octubre-diciembre. p. 36-52. ISSN 1993 8012.

CEDINIQ. Agosto 2015. Grupo de Matemática Aplicada y Procesamiento Avanzado de Datos. Informe Técnico. Proyecto 600185. Peña Abreu R. E, Cala C. Y, Zamora Matamoros R, Caballero Hechavarría D. "Evaluación integral del mineral en la Empresa del Níquel Comandante Ernesto Che Guevara en el 2016". "Proyección de la Muestra". Biblioteca CEDINIQ. 55 pp.

Chang Cardona, A. R, Rojas Purón A, Arce Molina J. 2004. Metodología para pronosticar el extractable de Níquel por la mineralogía computacional. Trabajo presentado en la IV Conferencia Internacional de Aprovechamiento de los Recursos Minerales y el desarrollo sostenible, CINAREM`2004. Moa. [Memorias en CD-Rom]. ISBN: 959-16-0258-4.

Chang Cardona, A. R., J. Arce Molina, M. Toirac Suárez. 2005. Modelos multivariables para predecir el extractable de níquel por la composición mineralógica de la mena tecnológica en el proceso Caron. *Minería y Geología*. Vol. 21. No. 1. ISSN: 0258 5979.

Lavaut Copa W. 1987. Control litológico - mineralógico de la mineralización en la corteza de intemperismo de ultramafitas del campo mineral yacimientos Punta Gorda, Camariocas y Piloto. Tesis Doctoral. Archivo E.G.S. Moscú.

Lavaut Copa W. 2003. La Meteorización de la Ofiolita de Cuba Oriental. Modelos Geológicos y Terminología Cubana. V Congreso de Geología y Minería de la Sociedad Cubana de Geología, GEOMIN'2003. La Habana. TGMNI.03. [CD-ROM] ISBN: 959-7117-11-8.

Lavaut Copa W. 2004. Patrones de Meteorización de Rocas Ofiolíticas de Cuba Oriental: su Importancia para la Minería. *Minería y Geología*. Nos. 3-4, ISSN: 0258 5979.

Lavaut Copa W. 2005. Clasificador para Modelación Litológica de Lateritas. [En Línea]. Disponible http://www.ismm.edu.cu/R_Geociencias%20y%20Quimica/volumen1.htm.

Lavaut Copa W., 1998. Tendencias geológicas del intemperismo de las rocas ultramáficas en Cuba Oriental. *Minería y Geología* No. 15, pág. 9-16.

Miranda López J, Miranda G. J. R. 2002. Influencia de los parámetros tecnológicos y la composición químico-mineralógica de los minerales, en el proceso de extracción de cobalto en la tecnología carbonato amoniacal. *Revista Cubana de Química*. Vol. XIV. No. 2, pp 3-7.

Palacios Rodríguez A, García Peña E. 2013. Extracción de cobalto mediante lixiviación ácida de los escombros lateríticos. V Congreso Cubano de Minería (MINERIA´2013). VI Simposio Geología, Exploración y Explotación de las Lateritas Niquelíferas. V Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, (GEOCIENCIAS ´2013). La Habana, 1 al 5 de abril. [CD-ROM], MIN1-P4. ISSN 2307-499X

Peña Abreu R. E., Matos Elías L., Pérez Padilla O., Ortiz Romero E., Robles Labacena V. 2007. Propuesta de Clases Patrones en Yacimientos Lateríticos. Memorias 2da Convención de Ciencias de la Tierra. III Simposio Geología, Exploración y Explotación de las Lateritas Niquelíferas. MIN2-025. ISBN: 978-959-7117-16-2.

Peña Abreu R.E, Sam Palanco C. M. 2013. Optimización del muestreo tecnológico en yacimientos lateríticos cubanos. *Ciencias de la Tierra y el Espacio*. Vol. 14, No.1. ISSN: 2310-0060. Págs. 38-50.

Peña Abreu R.E. 2015 a. Modelación matemática para optimizar el diseño de las redes del muestreo de exploración y explotación en yacimientos lateríticos de Ni y Co. Tesis doctoral. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.

Peña Abreu R.E. 2015 b. Modelación matemática para optimizar las redes de muestreo en yacimientos lateríticos cubanos. Sexta Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, GEOCIENCIAS´2015. VI Congreso Cubano de Minería. Simposio Geología, Exploración y Explotación de las Lateritas. Del 4 al 8 de mayo, La Habana. [CD-ROM], MIN1-O13. ISBN: ISSN 2307 – 499X.

Peña Abreu R.E., L. O. Vera Sardiñas. 2013. Identificación de clases patrones para la modelación matemática en yacimientos de cubanos níquel. *Ciencias de la Tierra y Espacio*. Vol. 14. No. 2. ISSN: 1729-3790. Págs. 38-50. Disponible en: http://www.iga.cu/Publicaciones/revista/index.htm.

Rojas Purón A, Rômulo Simões A, Orozco Melgar G. 2012. Identificación mineralógica de los óxidos de manganeso del yacimiento laterítico Punta Gorda, Moa, Cuba. *Minería y Geología*, v.28 n.1, enero-marzo, pgs: 1-26.

Rojas Purón A., Orozco Melgar G., Vera S O., Muñoz Gómez N., Arderí A., 2005 Caracterización mineralógica y geoquímica de las fases minerales de Mn portadoras de Co en perfiles lateríticos del yacimiento Punta. Gorda. Primera Convención Cubanas de Ciencias de la Tierra, Memorias en CD-ROM, La Habana, 5-8 de abril del 2005.

Sagapoa C. V, Imai A, Ogata T, Yonezu K, and Watanabe K. 2011. Laterization process of peridotites in Siruka, Choiseul, Solomon Islands. J. SE Asian Appl. Geol., Jul–Dec, Vol. 3(2), pp. 76-92

Sobol S.I. 1968. Composición de las lateritas de Moa y su influencia sobre los procesos de lixiviación de minerales por ácido sulfúrico en autoclaves. Revista Tecnológica, No. 5 y 6.

Webmineral. Consulta 18/03/2016. http://webmineral.com

Wilson M. J. 2004. Weathering of the primary roc-forming minerals: processes products and rates. Clay Minerals. No 39. pp. 233-266.

Acerca de los autores:

Ramón Eddie Peña-Abreu: Doctor en Ciencias Técnicas y Máster en Física y Matemática, con 26 años de experiencia, 23 de los cuales han sido dedicados a la actividad científica y docente, ha dirigido proyectos de investigación y servicios científicos. Ha impartido alrededor de 15 asignaturas de cursos regulares en el Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, y cursos de postgrados. Participa en congresos internacionales. Ha publicado más de 35 artículos. Es miembro de varias sociedades científicas y del comité científico de varios eventos. Actualmente se desempeña como jefe de proyectos y un servicio de investigación para la industria del níquel.

Yuslieni Cala-Cardero: Ingeniera geóloga graduada del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Oriente, Cuba. Se desempeña como Investigadora Aspirante en el Centro de Investigaciones del Níquel (CEDINIQ). Recibió entrenamiento en Comunicación Científica, en la Universidad Central de Las Villas. Desde el 2013 trabaja en CEDINIQ, ocupa la plaza de Especialista B en investigaciones. Realizó búsqueda bibliográfica para el desarrollo de los Proyectos y Servicios Científicos Tecnológicos en relación a la geoquímica y mineralogía de las lateritas. Participó en la extracción de tres muestras tecnológicas de minerales. Ha participado en consejos científicos, eventos internacionales y locales.

Neicis Capote Flores: Licenciada en Química en la Universidad de Oriente en Sgto. de Cuba en 1988. Investigadora Auxiliar y Master en Química Inorgánica. Posee 29 años de experiencia en actividades de investigación. Varias publicaciones en revistas científicas relacionadas con la caracterización de materiales. En colaboración con la Universidad de Oriente de Santiago de Cuba y el ISMM de Moa tutora de tesis de grado y colaboración en varias tesis de maestría.

Carlos Alfredo Toledo-Sánchez: Licenciado en Física en la Universidad de la Habana, en 1978, obtuvo el master esta ciencia en el año 2004 con el tema "Empleo de la Microscopía Electrónica en la Identificación de Sustancias Tóxicas". Se desempeña en la actividad investigativa de laboratorio vinculada al *análisis instrumental*, principalmente la *espectroscopía de emisión atómica*, la *difracción de rayos X*, la *microscopía óptica confocal* y *electrónica* y empleo de las Espectrometrías de Rayos X y Raman, emplea el español y el inglés en su labor.

Abdel Casanova-Gómez: Licenciado en Química en la Universidad de la Habana en 2007. Investigador Agregado. Trabaja en el Centro de Investigación para la Industria Minero-Metalúrgica (CIPIMM) desde 2009, en el laboratorio de análisis de fases y mineralogía del departamento de caracterización de materiales. En el mismo se ha desempeñado como especialista de rayos X y análisis térmico en el análisis de minerales y productos finales. Ha participado en una elevada cantidad de proyectos nacionales e internacionales, y servicios científico técnico. Ha presentado trabajos en varios fórum y eventos nacionales. Ha participado como autor o coautor, con más de veinte trabajos, en congresos internacionales celebrados en el país.

Inés Milia-González: Graduada de Ciencias Naturales en 1963 en la Universidad de la Habana. Ejerció la docencia universitaria en las universidades de la Habana y Santiago, en la asignatura mineralogía. En el CNIC trabajó en análisis de minerales durante 18 años y realizó la maestría en Ciencias Químicas. De 1990 a 2011, perteneció al departamento de Mineralogía y Petrología del Instituto de Geología y Paleontología en el cual continua bajo contrato, después de jubilada. Ha participado en proyectos de investigación, eventos científicos y publicaciones en temáticas referentes a mineralogía de la meteorización, docencia de la mineralogía y la petrografía y otros aspectos relacionados con minerales, rocas y sus procesos de génesis y transformaciones.

Evelio Lisabet-Sarracén: Licenciado en Geografía, graduado en la UH, 1990. Actualmente trabaja en el Instituto de *Geología y Paleontología del Ministerio de Energía y Minas* en el área de Mineralogía Petrología por más de 40 años con vasta experiencia en la actividad. Ha participado en proyectos relacionados con la búsqueda y exploración de minerales metálicos y no metálicos, así como él análisis mineralógico de las muestras. Autor de los Proyecto Manual de Minerales y del Atlas de Menas Metálicas de Cuba. En la actualidad participa en el Proyecto Sistematización Geológica Inventario, Conservación y Gestión del Patrimonio Geológico Mineralógico cubano.