

# Estudio fraccional densométrico de la mena laterítica: evaluación del enriquecimiento

## *Fractional densometric assessment for the laterite ore body: Enrichment evaluation*

Alberto Hernández Flores<sup>1</sup>, George Agyei<sup>2</sup>, Arturo Luis Rojas Purón<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular Adjunto. Centro de Ingeniería e Investigaciones Químicas. La Habana, Cuba [ahflores@inor.ciiq.minem.cu](mailto:ahflores@inor.ciiq.minem.cu)

<sup>2</sup>Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Universidad de Minas y Tecnología, Tarkwa, Ghana [geogeagyei@yahoo.com](mailto:geogeagyei@yahoo.com)

<sup>3</sup>Doctor en Ciencias Geológicas. Profesor Auxiliar. Departamento de Geología. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Holguín, Cuba [artrojaspuron@ismm.edu.cu](mailto:artrojaspuron@ismm.edu.cu)

---

### Resumen

Se realiza el análisis fraccional al intervalo granulométrico  $-2,0+0,074$  mm de una muestra del yacimiento Punta Gorda, atendiendo a las propiedades físicas de diámetro y densidad de las partículas. Mediante la combinación del análisis de cribado y de la separación de las fracciones de densidad con el empleo de diferentes medios densos se obtiene la función bidimensional de distribución, por el grosor o diámetro y por la densidad, y a través del análisis químico se determina la función experimental. Se realiza la evaluación del beneficio con el empleo del modelo Teoría de separación y se obtienen los parámetros tecnológicos. Como resultado fundamental se logra un concentrado con la separación de la mayor cantidad del magnesio y aluminio de 94,89 % y 91,15 %, respectivamente. Esto permite pronosticar un mejoramiento en la calidad y estabilidad de la mena de alimentación al proceso extractivo y diversificar el uso del recursos.

**Palabras clave:** granulometría; análisis fraccional; enriquecimiento; mena laterítica; densidad; función de distribución.

## **Abstract**

The purpose of this investigation is to conduct a fractional analysis to a Punta Gorda ore sample within the granulometric interval of 2,0+0,074 mm considering physical characteristics, diameter and particle density. A bi-dimensional function is obtained by the thickness or diameter and by the density through the combination of screening analysis and density fraction separation with the use of different dense media. The experimental function is determined through chemical analysis. The evaluation of the benefits is carried out using method of the separation theory and the technological parameters are obtained. The main result is a concentrate with the separation of a higher percent of magnesium and aluminum of 94,89 % and 91,15 %, respectively. This allows foreseeing the improvement of the quality and stability of the ore feed to the mining process and diversifying the use of resources.

**Keywords:** granulometry; fractional analysis; enrichment; laterite ore body; density; distribution function.

## **1. INTRODUCCIÓN**

Las investigaciones geológicas sobre yacimientos lateríticos desarrolladas en Cuba y otras regiones (Almaguer y Zamarsky 1993, Almaguer 1995; Ponce y Carrillo 1988; Rojas 1995; Rojas et al. 2005; Tokashiki et al. 2003; Valix y Cheung 2002), indican contrastes significativos en la concentración de los diferentes elementos químicos y compuestos mineralógicos en dependencia de las propiedades físicas diámetro y la densidad de las partículas que lo componen. Se observa por ejemplo el predominio de las granulometrías finas, más del 75% de la masa mineral tiene dimensiones menores a 200 mallas y dentro de estas alrededor del 50% de las partículas se encuentran por debajo de los 10 micrómetros de diámetro. El hierro y el níquel se concentran hacia las clases de tamaños más finas, por el contrario el contenido de sílice y el magnesio resulta predominante en las partículas de mayor tamaño, mientras que los minerales que contienen de manera significativa cobalto, cromo y manganeso se concentran en clases de tamaño intermedias que oscila entre 20 y 200 micrómetros.

Los estudios de caracterización realizados a los yacimientos Punta Gorda (Vera 2001) manifiestan el predominio de los óxidos ferrosos en casi todo el perfil, pero con la tendencia a concentrarse en mayor medida hacia las clases granulométricas más finas, por ejemplo la goethita (FeOOH) fase

mineralógica principal portadora de níquel presenta la tendencia a concentrarse en las partículas de mayor fineza, al mismo tiempo fases mineralógicas como la gibbsita ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) y lizardita ( $\text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6$ ) se concentran hacia las clases de tamaño de mayor grosor.

La densidad de las partículas como propiedad física que caracteriza el comportamiento de las fases minerales en los yacimiento lateríticos ha sido poco estudiada debido a lo complejo que resulta manejar una gran masa de partículas finas y muy finas, sin embargo se conoce que entre las fases mineralógicas principales existe contraste respecto a la densidad, por ejemplo la densidad de las fases que están compuestas fundamentalmente de óxidos ferrosos oscila entre 4 y 5,2  $\text{g/cm}^3$ , y fases como gibbsita, lizardita, cuarzo, litioforita poseen una densidad que oscila entre 2,43 y 2,7  $\text{g/cm}^3$  (Hernández 1997; Hernández et al. 2000; Hernández, Trujillo y Toirac 2009, Hernández et al 2010).

En la actualidad no se aprovechan todas las potencialidades que ofrece el contraste en la concentración de los elementos químicos y compuestos mineralógicos de acuerdo a las propiedades físicas de las partículas que componen los yacimientos lateríticos. Es por ello que el objetivo del trabajo sea estudiar en el yacimiento Punta Gorda el contraste que manifiestan las partículas que componen la mena laterítica en cuanto a las propiedades físicas diámetro y densidad para su posible enriquecimiento.

El yacimiento Punta Gorda es un típico depósito residual de hierro, níquel, y cobalto, asociado a una corteza de meteorización desarrollada en forma de un potente manto, esencialmente laterítico casi continuo, sobre un macizo de rocas ultrabásicas serpentinizadas, que se puede caracterizar por aspectos entre los que destacan los geológicos y geoquímicos (Rojas et al. 2005).

La mineralogía del yacimiento Punta Gorda es sumamente compleja y está constituida por óxidos, esméctitas, minerales del grupo de la serpentina y minerales primarios de las ultramafitas serpentinizadas; no menos de 30 minerales se alimentan al proceso metalúrgico de la planta proveniente de este yacimiento.

En el horizonte limonítico del yacimiento, la goethita representa alrededor del 70 % de la mena niquelífera del horizonte. Por otra parte el mineral principal portador de cobalto resulta ser la asbolana - m ( $\text{Co, Ni}$ )  $\text{O.MnO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ , que se distribuye en todo el corte del perfil, además de otros minerales de manganeso como la pirolusita y el psilomelano.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó con una muestra tecnológica tomada en el yacimiento Punta Gorda y elaborada en el frente de explotación, desde el fondo hasta el techo, que abarca los pozos 44 y 45 del bloque M-49, con una potencia de 35,1m y 24m, respectivamente. La muestra se preparó por el método del cono y del anillo hasta obtener una masa necesaria de 1 400 kg. La investigación se desarrolló según el esquema que se expone en la figura 1.

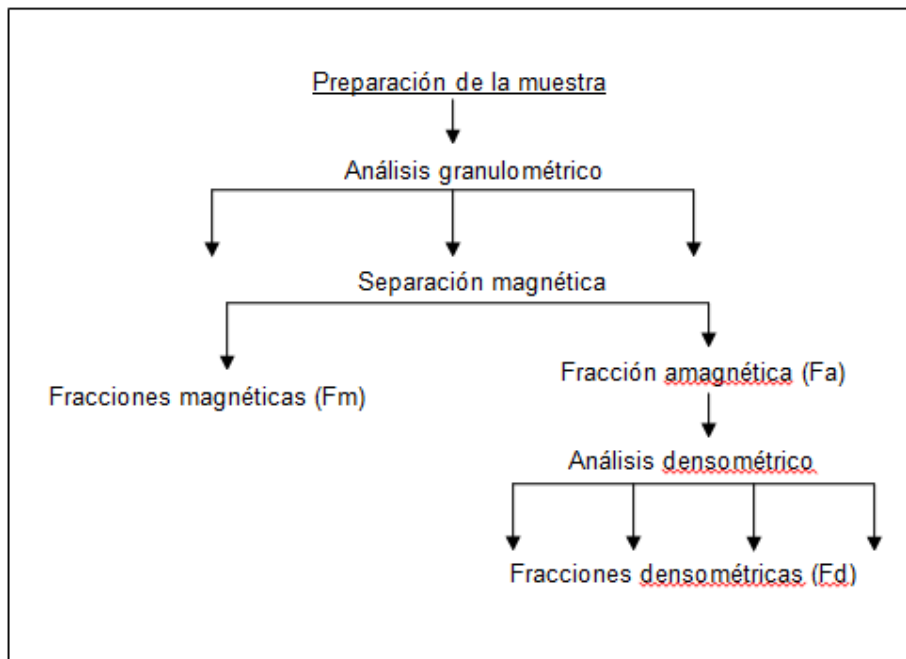


Figura. 1 Esquema de trabajo utilizado en la investigación.

Para la realización de los análisis fraccionarios se utilizaron juego de tamices según serie de Taylor desde 10mm hasta 0,045mm con módulo de escala 2, Para la caracterización de los productos o fracciones obtenidos de las separaciones granulométrica y densométrica se utilizan las siguientes técnicas analíticas: Fluorescencia de Rayos- X, Phillips PW 1480 y Absorción Atómica. Microscopio óptico modelo AXIOLAB POL de la CARL ZEISS, Difracción de Rayos - X utilizando un difractor alemán del tipo HZG - 4. Para el registro y tratamiento de los datos roentgenométricos se emplearon el software ANALIZE, para las determinaciones cualitativas de minerales y AUTOQUAN, para las determinaciones cuantitativas de la SEIFERT X - Ray Technology (Versión 2.26), de procedencia alemana. También se empleó El difractor de la marca PHILIPS, modelo PW 3710 BASED. En el proceso de lectura e interpretación de los difractogramas

obtenidos se emplearon los software APD (PHILIPS) y el Xpert High Score 1b. 2002, con la base de datos de la ICDD (Internacional Center for Diffraction Data) de 1998. Se empleó el equipamiento conjugado TG y ATD según modelo PL - STA Thermal Science con analizador térmico simultáneo STA 1000/1500, de la Stanton Rederoff Ltd, (Agyey, 2006). Para el estudio en medios densos se utiliza el tetrabromoetano,  $\text{CHBr}_2$ .  $\text{CHBr}_2$ - PRS líquido orgánico denso, inerte con densidad de  $2,935\text{g/cm}^3$  entre 20 y 24 °C, contenido de agua de 0,05%, buena filtración y poco volátil (Agyey 2006). Como métodos de investigación científica se emplearon en análisis fraccionario y el modelo Teoría de separación de minerales útiles (Mitrofanov 1980; Tijonov 1990).

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Análisis granulométrico

Los resultados del análisis granulométrico de la muestra del yacimiento Punta Gorda (Tabla 1) indican similitud con otros yacimientos cubanos y con yacimientos de otras regiones en cuanto a la composición granulométrica; existe predominio de las fracciones finas particularmente por debajo de 0,2 mm y la clase de tamaño menor a 0,045 mm resulta mayoritaria (68,79 %).

Tabla 1. Resultados experimentales de análisis granulométrico de la mena niquelífera de Punta Gorda

Clase de tamaño (mm)	Salida %	Salida acumulativa (+)	Salida acumulativa (-)
-10+8	0,1	0,1	100
-8+4	0,63	0,73	99,9
-4+2	0,36	1,09	99,27
-2+1	2,28	3,37	98,91
-1.+0.4	5,53	8,9	96,63
-0.4+0.2	4,28	13,18	91,1
-0.2+0.074	10,12	23,3	86,82
0.071+0.044	7,9	31,2	76,7
-0.044	68,79	100	68,79

Se distinguen tres grupos, respecto a la composición granulométrica de la muestra. Una parte, que se caracteriza por su granulometría gruesa, mayor de 2 mm, que representan aproximadamente el 1,0 % de la muestra. Un

grupo granulométrico intermedio, compuesto por las fracciones menores de 2,0 mm y mayores de 0,2 mm, que representan alrededor del 13 % y El tercer grupo con una granulometría más fina, menor de 0,2 mm, que resulta mayoritaria y constituye cerca del 87 % de la muestra, este debe ser el grupo granulométrico que decide el comportamiento de la laterita de balance del yacimiento Punta Gorda. Resulta significativo que en la composición granulométrica las fracciones menores de 1,0 mm, representan el 96,63 % de la masa total.

### **3.1.1. Concentración de los elementos químicos en las clases granulométricas.**

La laterita de balance del yacimiento Punta Gorda es esencialmente ferrosa, donde el hierro se concentra en valores entre un 20 % y un 49,7 % en las diferentes fracciones granulométricas, se encuentran además como elementos mayoritarios (Figura 2) en esta mena el MgO, Al, SiO<sub>2</sub>, Cr, y Mn. El níquel y el cobalto aparecen como microelementos pero de mucho interés desde el punto de vista técnico y económico. Los resultados del análisis granulométrico y químico efectuado al yacimiento Punta Gorda resultan atractivos para evaluar la posibilidad y efectividad de la introducción del proceso de beneficio con vistas a concentrar o separar los elementos químicos y compuestos que componen la mena laterítica, se observa la tendencia del hierro y el níquel a concentrarse hacia las clases de tamaño más finas, por el contrario la sílice y el magnesio lo hacen hacia las mayores granulometrías, es decir existe contraste en la concentración de estos en virtud de la diferencia del diámetro de las partículas de la mena (figura 3)

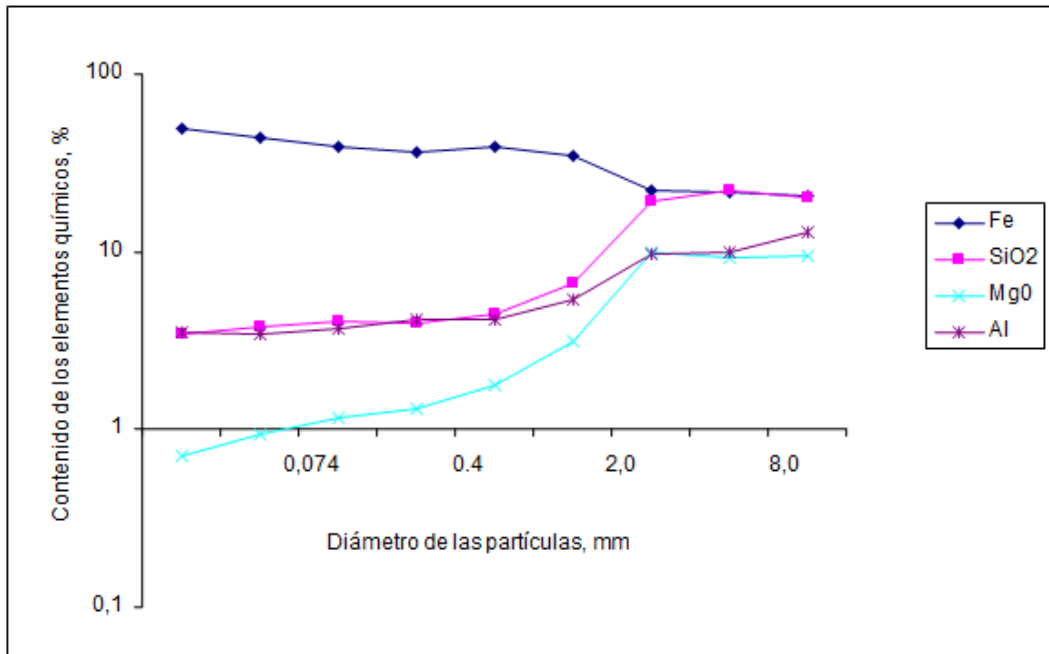


Figura 2. Variación de contenido de los componentes mayoritarios, Fe-Al-MgO-SiO<sub>2</sub> en la laterita de balance del yacimiento Punta Gorda

En la figura 3 se expone la distribución en las diferentes clases de tamaño de los elementos químicos cobalto, manganeso, cromo y aluminio donde se aprecia la tendencia de los dos primeros a concentrarse fundamentalmente en los intervalos de tamaño intermedios que varía desde 20 μm hasta los 200 μm.

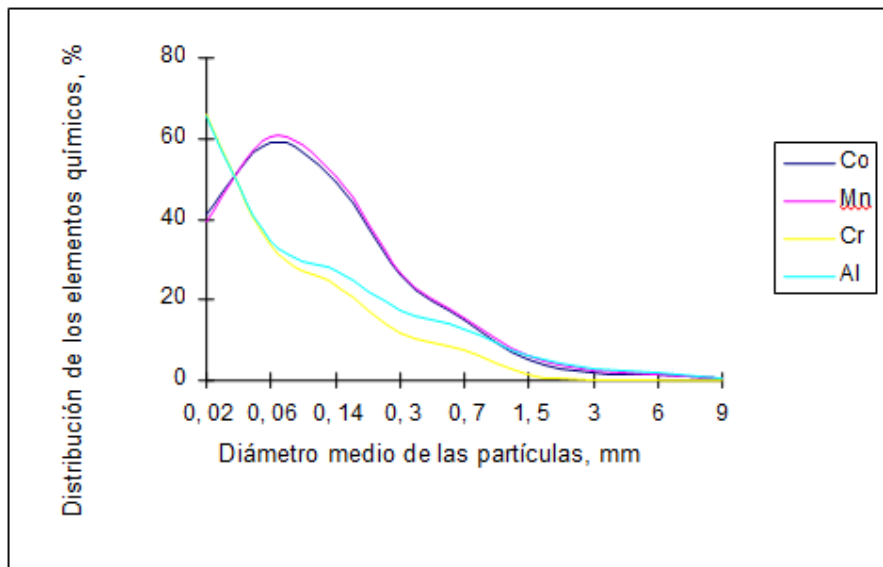


Figura 3. Distribución de los elementos químicos por clases granulométricas (Co-Mn-Cr-Al)

Las curvas que describen la concentración y la distribución de los principales elementos químicos que componen la muestra (figura 3 y 4) manifiestan contraste en cuanto a su concentración en los intervalos granulométricos estudiados, por ejemplo el magnesio que constituye un componente nocivo tanto para la tecnología HPAL como para la tecnología Caron incrementa su contenido gradualmente en la medida que aumenta el diámetro de las partículas, de manera similar resulta el comportamiento de la sílice.

### **3.1.2. Mineralogía de las fracciones granulométricas**

La determinación cuantitativa por clases granulométricas se realizó con empleo del software AUTOQUAN (Agyei 2006, 2010) en las fracciones comprendidas entre 10 y 2,0 mm es apreciable la concentración de las fases cloritas, gibbsita y lizardita lo que se corresponde con los altos contenido de aluminio, magnesio y sílice expuestos en los resultados del análisis químico, la goethita se concentra mayoritariamente en todas las clases de tamaño, pero alcanza el máximo contenido en las fracciones menores a 0,2 mm y principalmente en la clase -0,044 mm. Esta concentración de la goethita hacia las clases de mayor tamaño puede ser una de las causas del alto contenido de níquel en ellas, aunque por la poca masa que representan las fracciones mayores a 4 mm la distribución de níquel no sobrepasa el 3 % del total.

En la figura 4 las curvas que describen la concentración de las fases mineralógicas en dependencia del diámetro de las partículas, presentan similitud en la trayectoria que describen las curvas de los elementos químicos expuesto en las figuras 3 y 4 la goethita, fase mineralógica compuesta por óxido ferroso y principal portadora de níquel resulta mayoritaria en la composición de la mena laterítica y presenta la tendencia a disminuir su concentración en la medida que se incrementa el diámetro de las partículas, por su parte las fases restantes que contienen fundamentalmente elementos químicos como aluminio, sílice y magnesio se incrementan en su contenido en la medida que aumenta la granulometría de las partículas.



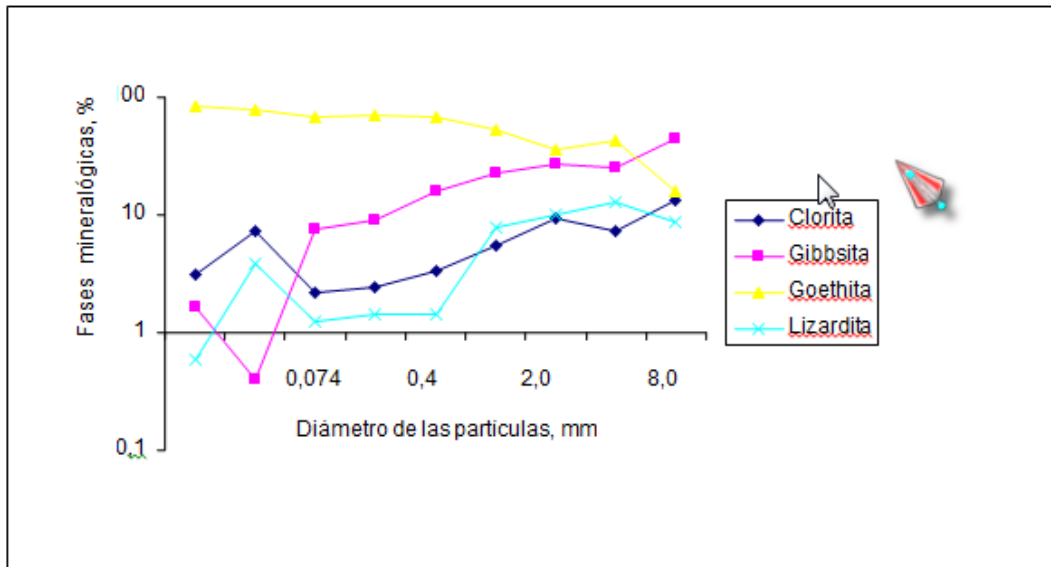


Figura 4. Contenido de las fases mineralógicas según diámetro de las partículas.

Los resultados de los análisis mineralógicos ponen de manifiesto el predominio de fases de óxidos de hierro principalmente la goethita. En las figuras 5, 6 y 7 se exponen los difractogramas del análisis mineralógico efectuado a las diferentes clases granulométricas.

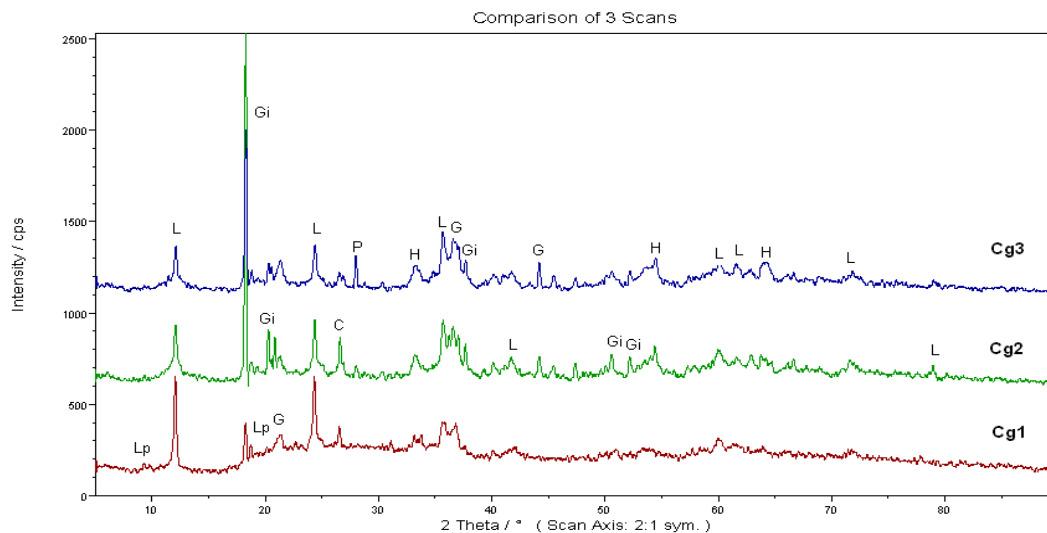


Figura 5. Difractograma de rayos -X de las fracciones granulométricas (-10+8mm); (-8+4 mm); (-4+2 mm. G: Goethita, Gi: Gibbsita, H: Hematita, L: Lizardita, C: Cuarzo

Es significativa también la presencia de gibbsita, sobre todo en las fracciones más gruesas, y en tercer orden están los silicatos de magnesio:

una fase de serpentina y clorita, que se concentran en las fracciones de mayor grosor. Se detectan las fases de hematita, maghemita y magnesioferrita, aunque en contenidos por debajo del 10 %.

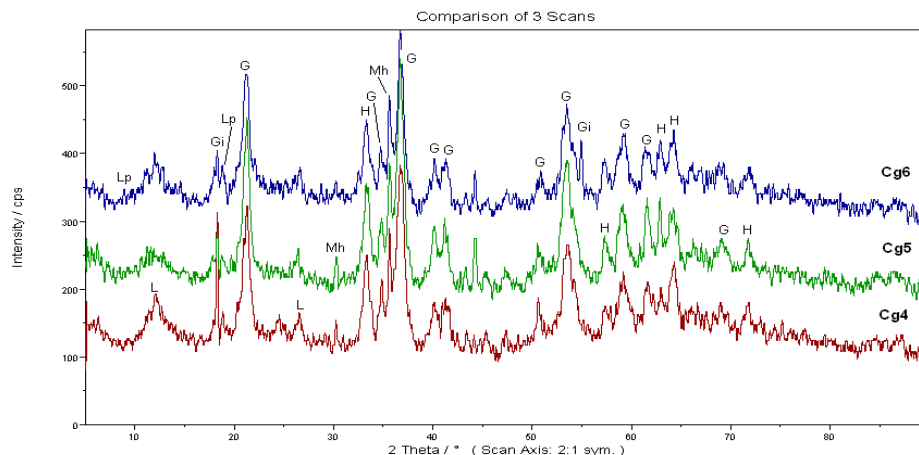


Figura 6. Difractograma de rayos  $-X$  de las fracciones granulométricas (-2+1 mm); (-1+0,4 mm); (-0,4+0,2 mm). G: Goethita, Gi: Gibbsita, H: Hematita, L: Lizardita, Mh: maghemita, Lp: Lioforita.

En la fracción -10+8 mm se reporta la presencia de cuarzo, que llega alcanzar valores próximos al 10 %. La magnetita sólo se detecta en dos muestras y en poca cantidad. En la clase de tamaño comprendida de 2,0 a 0,074 mm se observó una fase de manganeso, la lioforita detectada por difracción de rayos  $-X$  según los reflejos  $4,72 \text{ \AA}$  y  $9,49 \text{ \AA}$ .

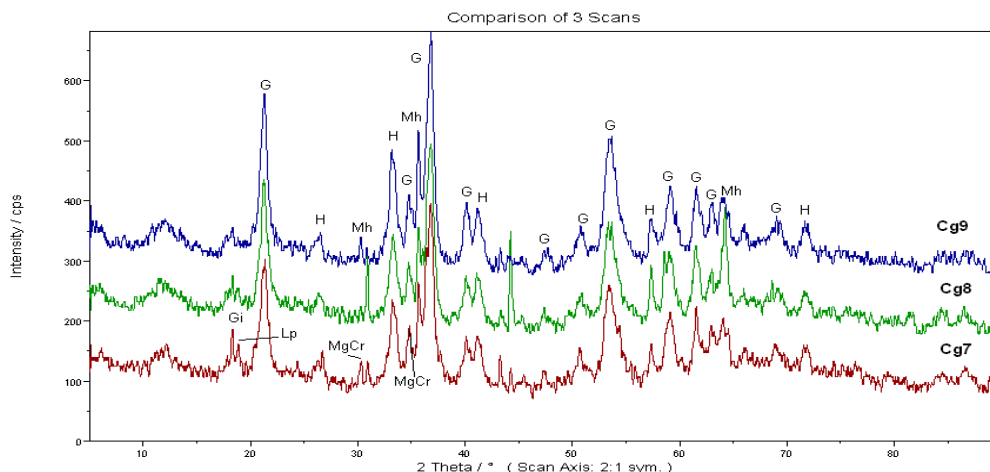


Figura 7. Difractograma de rayos  $-X$  de las fracciones granulométricas (-0,2+0,071 mm); (-0,071+0,044 mm); (-0,044+0 mm). G: Goethita, Gi: Gibbsita, H: Hematita, Mh: maghemita, Lp: Lioforita.

### 3.2. Análisis densométrico

En la tabla 2 aparecen los resultados de la determinación de la densidad para cada clase granulométrica, y se aprecia como tendencia que hacia las clases de mayor tamaño en la que se concentran los granos gruesos disminuye la densidad de la fracción (Hernández 2009, 2010; Ageyi, Rojas y Hernández 2010).

Tabla 2. Densidad de las fracciones granulométricas del yacimiento Punta Gorda.

Clase de tamaño, mm	+8,0	+4,0	+2,0	+1,0	+0,4	+0,2	+0,074	+0,044	-0,044
Densidad de la clase, g/cm <sup>3</sup>	2,52	2,54	2,59	2,82	3,01	2,92	2,94	3,48	3,40

Del estudio de caracterización para determinar la densidad de las clases granulométricas del yacimiento Punta Gorda se pueden establecer tres grupos que coinciden con la composición granulométrica de la muestra pero en proporción inversa; un grupo de partículas ligeras que se concentran en las clases de mayor tamaño, un segundo grupo de partículas caracterizadas por una densidad intermedia cuyo rango oscila entre 2,92 g/cm<sup>3</sup> y 3,01 g/cm<sup>3</sup>, que se concentran en las fracciones intermedias desde 1,0 hasta 0,071 mm, y un tercer grupo de partículas pesadas que se concentran en las clases granulométricas más finas menores a 0,071 mm con un rango de densidad de 3,40 g/cm<sup>3</sup> a 3,48 g/cm<sup>3</sup> en la que deben predominar las fases mineralógicas compuestas por óxido de hierro como la goethita cuya densidad es superior a 4 g/cm<sup>3</sup>.

La mena en su composición granulométrica posee un amplio espectro de partículas, desde las microscópicas que resultan mayoritarias hasta los granos con decenas de milímetros, las partículas muy pequeñas del orden de los micrómetros por su gran superficie específica y sus propiedades superficiales como electroconductividad y composición iónica tienden a la formación de conglomerados lo que altera su comportamiento en el medio acuoso, en el medio aéreo se requiere de una humedad muy pequeña para el manejo eficiente de estas partículas. También se conoce de la diferencia en la concentración de las fases mineralógicas en función del diámetro de las partículas, las fases gibbsita, lizardita, cuarzo, portadoras de elementos químicos como aluminio, magnesio y sílice se concentran en las mayores granulometrías, pero además la densidad de estas fase minerales oscila

entre los 2,4 y los 2,7 g/cm<sup>3</sup> es decir son la fases más ligeras. Por estas razones y en aras de evitar el efecto de aglomeración de las partículas muy pequeñas y el fenómeno de isodromía o equisedimentación, es que el análisis fraccional densométrico se efectúa para las clases de tamaño comprendidas en el intervalo de partículas de 2 a 0,074 mm, que representa el 22,21 % de la muestra.

La función bidimensional de distribución por el grosor o diámetro  $\xi_1$ ,  $\gamma(\xi_1, \xi_2)$  se obtiene por la combinación del análisis de cribado y de la separación de las fracciones con el empleo de diferentes densidades del medio, y mediante el análisis químico se determina  $\beta(\xi_1, \xi_2)$ , los valores de la función distribución en masa para cada intervalo granulométrico  $\xi_1$  y de cada densidad del medio  $\xi_2$ ,  $\gamma(\xi_1, \xi_2)$  se obtuvo por la ecuación:

$$\gamma(\xi_1, \xi_2) = \frac{\gamma(\xi_1)\gamma(\xi_2)}{\Delta\xi_1 * \Delta\xi_2} \quad (1)$$

Donde:

$\gamma(\xi_1, \xi_2)$  - función de distribución,

$\gamma(\xi_1)$  - salida o porcentaje en peso de la fracción granulométrica, %.

$\gamma(\xi_2)$  - salida o porcentaje en peso de la fracción de densidad, %

$\Delta\xi_1$  - magnitud del intervalo o fracción granulométrica.

$\Delta\xi_2$  - magnitud del intervalo o fracción de densidad.

Los resultados del análisis fraccionario densométrico para los principales elementos químicos (níquel, cobalto, hierro, magnesio, sílice, aluminio, cromo y manganeso) que componen la mena laterítica se exponen en la tabla 3, en la primera columna después de la magnitud de la clase de tamaño aparecen en las filas segunda la salida de la clase granulométrica en porcentaje respecto a la muestra total. La distribución de la masa de partículas de mineral en función de su diámetro y densidad manifiesta la tendencia al incremento progresivo de las fracciones ligeras en la medida que aumenta la granulometría, y en la medida que disminuye el diámetro de las partículas se experimenta una mayor concentración de las fracciones pesadas.

Tabla 3. Resultados del análisis fraccional densométrico

Clase de tamaño en mm	Densidad del medio, g/cm <sup>3</sup>	Salida de las fracciones densométricas $\gamma(\xi_2)$ , %	Función de distribución $\gamma(\xi_1, \xi_2)$	Función experimental $\beta(\xi_1, \xi_2)$					
				Ni	Co	Fe	MgO	Cr	Al
0,2+0,074 (15,21)	2,40	9,27	0,54	2,01	0,429	36,67	0,73	0,65	3,82
	2,60	6,12	0,36	2,01	0,349	23,36	0,85	0,72	4,15
	2,80	6,33	0,37	1,02	0,230	27,88	0,66	0,74	4,17
	2,92	78,28	1,53	1,72	0,368	39,56	0,69	2,89	3,88
0,4+0,2 (1,02)	2,40	18,32	0,04	2,28	0,266	27,84	3,1	0,07	5,58
	2,60	3,70	0,009	1,53	0,313	30,32	1,1	0,02	6,1
	2,80	3,98	0,01	1,70	0,518	28,59	0,59	0,01	6,19
	2,92	74,0	0,06	1,60	0,554	31,91	0,54	0,10	5,14
1+0,4 (0,91)	2,40	30,25	0,23	1,94	0,192	19,52	5,52	0,21	15,49
	2,60	1,10	0,0008	2,16	0,120	20,5	2,14	0,00	6,28
	2,80	2,39	0,018	1,66	0,288	20,83	2,49	0,00	6,01
	2,92	66,26	0,01	1,33	0,454	25,9	1,33	0,00	5,64
-2+1 (5,07)	2,40	73,54	0,18	1,74	0,124	20,64	4,89	0,06	9,94
	2,60	2,90	0,007	1,93	0,065	33,0	3,35	0,00	4,51
	2,80	3,58	0,009	1,69	0,72	33,61	2,84	0,01	4,51
	2,92		0,02	1,06	0,835	38,06	1,01	0,03	4,24

El níquel reporta mayores concentraciones en el intervalo granulométrico desde -0,4 mm hasta 0,071 mm para densidades de 2,40 y 2,60 g/cm<sup>3</sup> con valores que oscila entre 2,01 % y 2,28 %, la tendencia en la concentración del níquel observada de los experimentos no guarda relación con la densidad de la fase goethita, pero sí con la fineza de las partículas que la componen. Es conocido que la goethita posee una densidad entre 4 y 4,4 g/cm<sup>3</sup> pero el análisis mineralógico cuantitativo expresa la tendencia a concentrarse en las clases de tamaño más finas. El contenido de cobalto se presenta con un comportamiento irregular, aunque las mayores concentraciones se observan en la clase de tamaño -2+1 mm, para las densidades de 2,80 y 2,92 g/cm<sup>3</sup> con valores de 0,720 g/cm<sup>3</sup> y 0,835 g/cm<sup>3</sup> respectivamente.

Los mayores contenidos de magnesio y aluminio se reportan para la fracción más ligera (densidad de 2,40 g/cm<sup>3</sup>) en el intervalo de tamaño -1+0,4 mm con valores de 15,49 % y 5,52 % respectivamente.

### 3.3. Evaluación del beneficio de la mena

Las ecuaciones básicas para realizar el cálculo de los parámetros tecnológicos son:

$$\bar{\gamma}_{conc} = 100 \int_{\xi_1 \min}^{\xi_1 \max} \int_{\xi_2 \min}^{\xi_2 \max} \gamma(\xi_1, \xi_2) \varepsilon_{conc}(\xi_1, \xi_2) d\xi_1 d\xi_2 \quad (2)$$

$$\bar{\beta}_{conc} = \frac{100}{\gamma_{conc}} \int_{\xi_1 \min}^{\xi_1 \max} \int_{\xi_2 \min}^{\xi_2 \max} \beta(\xi_1, \xi_2) \gamma(\xi_1, \xi_2) \varepsilon_{conc}(\xi_1, \xi_2) d\xi_1 d\xi_2 \quad (3)$$

$$\bar{\varepsilon}_{conc} = \frac{\bar{\gamma}_{conc} \cdot \bar{\beta}_{conc}}{\bar{\beta}_{inic}} \quad (4)$$

En la tabla 4 están representadas cuatro clases de grosor y cinco fracciones de intensidad de corriente, cada grupo de partículas  $\Delta\xi_i \Delta\xi_j$  se caracteriza por cuatro números en el siguiente orden:  $100\gamma(\xi_i, \xi_j) \Delta\xi_i \Delta\xi_j$ ,  $\gamma(\xi_i, \xi_j)$ ,  $\text{cm}^3/(\text{mm.g})$ ;  $\beta(\xi_i, \xi_j)$ , % de níquel, cobalto, magnesio y aluminio de la izquierda a derecha (tercera fila)

La característica principal de separación  $\varepsilon_{conc}(\xi_i, \xi_j)$  se toma de una separación escalonada o ideal: Las partículas que están por encima de la línea de separación  $\varphi_s$  pasan completamente al concentrado ( $\varepsilon_{conc} = 1$ ); las que están por debajo se obtienen totalmente solo en las colas ( $\varepsilon_{conc} = 0$ ); esta línea separadora o de demarcación en el ejemplo que se explica ha sido seleccionada convenientemente por el contenido magnesio en las partículas: Las que contienen magnesio por encima del 2,49 % y un contenido de aluminio superior a 6,01 % se envían a las colas, por esta razón las que están por encima de  $\varphi_s$  tienen un  $\varepsilon_{conc}(\xi_i, \xi_j) = 1$ , las que están por debajo  $\varepsilon_{conc}(\xi_i, \xi_j) = 0$ .

Para el cálculo de  $\bar{\gamma}_{conc}$  según la fórmula (2) es necesario sumar el producto de cifras primeras y cuartas solo por encima de  $\varphi_s$ , debido a que las primeras cifras que son menores que  $\varphi_s$  se multiplican por la integral  $\varepsilon_{conc}(\xi_i, \xi_j) = 0$ .

Entonces se obtiene:

$$\bar{\gamma}_{conc} = (16,33 + 0,91 + 0,93 + 2,31 + 1,92 + 0,036 + 0,04 + 0,144 + 0,07 + 0,24) = 22,93\%$$

Tabla 4. Valores de las funciones bidimensionales.

$\xi_1, \text{ mm}$	Valores de las funciones $\xi_2, \text{ g/cm}^3$			
	0 - 2,40 ( j = 1 )	2,40 - 2,60 ( j = 2 )	2,60 - 2,80 ( j = 3 )	2,80 - 2,92 ( j = 4 )
0,2+0,0 74 ( i = 1 )	16,33 0,54 (2,01)(0,429) (0,73)(3,82) 1,0	0,91 0,36 (2,01)(0,349) (0,85)(4,15) 1,0	0,93 0,37 (1,02)(0,23) (0,66)(4,17) 1,0	2,31 1,53 (1,72)(0,368)(0,69) (3,88) 1,0
-	1,92 0,04	0,036 0,009	0,04 0,01	0,144 0,006
0,4+0,2 ( i = 2 )	(2,28)(0,266) (3,10)(6,10) 1,0	(1,53)(0,313) (1,10)(6,10) 1,0	(1,70)(0,518) (0,59)(6,19) 1,0	(1,60)(0,554)(0,54) (5,14) 1,0
$\varphi_s$	33,12	0,0096	2,16	0,07
-	0,23	0,0008	0,018	0,01
1,0+0,4 ( i = 3 )	(1,94)(0,192) (5,52)(15,5) 0,0	(2,16)(0,12) (2,14)(6,28) 0,0	(1,66)(0,288) (2,49)(6,01) 0,0	(1,33)(0,454)(1,33) (5,64) 0,0
-2,0 + 1,0 ( i = 4 )	4,32 0,18 (1,74)(0,124) (4,89)(9,94) 0,0	0,14 0,007 (1,93)(0,065) (3,35)(4,51) 0,0	0,180 0,009 (1,69)(0,72) (2,84)(4,51) 0,0	0,24 0,02 (1,06)(0,835)(1,08) (4,24) 0,0
				..... $\varphi_s$

El cálculo de  $\bar{\beta}_{conc}$  se realiza por la ecuación (3) y es necesario sumar los productos de las cifras primeras y terceras por encima de  $\varphi_{sr}$  y este resultado se divide por  $\bar{\gamma}_{conc}$ .

Al evaluar el posible beneficio de la mena atendiendo al análisis fraccional magnético se puede pronosticar un concentrado con la siguiente composición y recuperación de los elementos fundamentales:

Para el níquel:

$$\bar{\beta}_{conc} = \frac{100}{\bar{\gamma}_{conc}} = (16,33 \cdot 2,01 + 0,91 \cdot 2,01 + \dots + 0,07 \cdot 1,33 + 0,24 \cdot 1,06) = 1,95\%$$

$$\bar{\varepsilon}_{conc} = \frac{\bar{\beta}_{conc} \cdot \bar{\gamma}_{conc}}{\bar{\beta}_{inic}} = \frac{1,95 \cdot 22,93}{1,85} = 24,17\%$$

Para el cobalto:

$$\bar{\beta}_{conc} = \frac{100}{\gamma_{conc}} = (16,33 \cdot 0,429 + 0,91 \cdot 0,349 + \dots + 0,07 \cdot 0,454 + 0,24 \cdot 0,835) = 0,40\%$$

$$\bar{\varepsilon}_{conc} = \frac{\bar{\beta}_{conc} \cdot \bar{\gamma}_{conc}}{\bar{\beta}_{inic}} = \frac{0,40 \cdot 22,93}{0,212} = 24,17\%$$

Para el magnesio:

$$\bar{\beta}_{conc} = \frac{100}{\gamma_{conc}} = (16,33 \cdot 0,73 + 0,91 \cdot 0,85 + \dots + 0,07 \cdot 1,33 + 0,24 \cdot 1,08) = 0,936\%$$

$$\bar{\varepsilon}_{conc} = \frac{\bar{\beta}_{conc} \cdot \bar{\gamma}_{conc}}{\bar{\beta}_{inic}} = \frac{0,93 \cdot 22,93}{4,17} = 5,11\%$$

Para el aluminio:

$$\bar{\beta}_{conc} = \frac{100}{\gamma_{conc}} = (16,33 \cdot 3,82 + 0,91 \cdot 4,15 + \dots + 0,07 \cdot 5,64 + 0,24 \cdot 4,24) = 4,03\%$$

$$\bar{\varepsilon}_{conc} = \frac{\bar{\beta}_{conc} \cdot \bar{\gamma}_{conc}}{\bar{\beta}_{inic}} = \frac{4,03 \cdot 22,93}{10,38} = 8,9\%$$

De la misma manera para el cromo se puede pronosticar que:

$$\bar{\beta}_{conc} = \frac{100}{\gamma_{conc}} = 0,82\%$$

$$\bar{\varepsilon}_{conc} = \frac{\bar{\beta}_{conc} \cdot \bar{\gamma}_{conc}}{\bar{\beta}_{inic}} = \frac{0,82 \cdot 22,93}{0,28} = 67,15\%$$

Los resultados que se exhiben en la tabla 4 corroboran las regularidades establecidas en los trabajos de caracterización realizados con anterioridad (Rojas et al 2005; Hernández et al 2010), se observa la concentración del cobalto hacia las clases granulométricas intermedias, para todas las funciones bidimensionales  $\beta(\xi_i, \xi_j)$  los mayores valores se corresponden con el intervalo de densidad comprendido entre 2,80 g/cm<sup>3</sup> y 2,92 g/cm<sup>3</sup> particularmente en la fracción pesada de la clase de tamaño -2,0+1,0 mm [(i=4, j=4)] el contenido de cobalto alcanza el 0,835 %. Tanto el magnesio como el aluminio exhiben las mayores concentraciones en los intervalos granulométricos -1,0+0,4 mm y -2,0+1,0 mm, y para una densidad del medio de 2,40 g/cm<sup>3</sup> lo que se corresponde con su presencia en fases



mineralógicas que se caracterizadas por un diámetro relativamente grande de sus partículas y densidades que oscilan alrededor de  $2,50 \text{ g/cm}^3$  como la lizardita  $\text{Mg}_2(\text{Si}_2\text{O}_2)$  y la gibbsita  $(\text{Al}(\text{OH})_3)$ .

Los resultados (figura 8) de la evaluación de enriquecimiento de la mena e indican la posibilidad de concentrar los elementos químicos que componen el intervalo granulométrico  $-2,0+1,0 \text{ mm}$  en diferentes fracciones de tamaño y de densidad; se puede obtener un producto denominado convenientemente *concentrado* compuesto por todas las fracciones granulométricas inferiores a  $0,4 \text{ mm}$  más las fracciones gruesas y pesadas [( $i=3, j=4$  ;  $i=4, j=4$ )] caracterizado por el alto contenido de níquel, cobalto y cromo, y otro producto denominado *colas del proceso* donde se concentran significativamente el magnesio y el aluminio. Esto puede contribuir a la diversificación del uso de la mena laterítica y la racionalidad en la explotación del recurso.

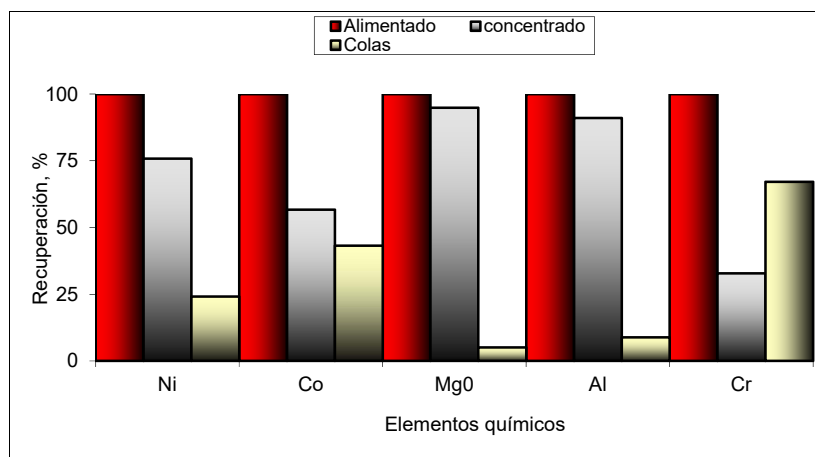


Figura 8. Resultados de la modelación del proceso de beneficio.

En cuanto a la distribución o recuperación de los elementos químicos fundamentales en los productos del beneficio, resulta atractivo el hecho de que en el producto colas del proceso formado por las fracciones de mayor grosor ( $-2,0+0,4 \text{ mm}$ ) y que presentan valores de densidad entre  $2,4$  y  $2,8 \text{ g/cm}^3$  se obtienen considerables recuperaciones de cobalto y cromo con valores de  $43,26 \%$  y  $67,15 \%$  respectivamente.

#### 4. CONCLUSIONES

- El empleo del contraste que manifiestan la fracción granulométrica comprendida en el intervalo  $-2,0+0,074 \text{ mm}$  de la mena laterítica

respecto al diámetro y densidad de las partículas que la componen, permite la separación y concentración de los elementos químicos. Se puede obtener un producto comprendido en el intervalo granulométrico  $-2,0+0,4$  mm y en un rango de densidad de  $2,40$  g/cm<sup>3</sup> a  $2,80$  g/cm<sup>3</sup> en el que se distribuye el 94,89 % y el 91,1 % de magnesio y aluminio respectivamente, lo que se puede utilizar como vía para mejorar la calidad de la mena de alimentación al proceso extractivo y a la vez aprovechar estos recursos para otros fines.

## 5. REFERENCIAS

- AGYEI, G.; ROJAS, A. Y HERNÁNDEZ, A. 2010: Distribución fraccional de metales y minerales en la laterita de balance del yacimiento Punta Gorda, Moa, Cuba. *Minería y Geología* 26(4): 36-52.
- AGYEI, G. 2006: *Distribución fraccional de las especies metálicas y mineralógicas de la mena niquelífera de un perfil del yacimiento Punta Gorda, Moa, Cuba*. Tesis doctoral. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Cuba. 92 p.
- ALMAGUER, A. Y ZAMARSKY, V. 1993: Estudio de la distribución del Fe, Ni y Co en los tamaños de granos que componen el perfil de las cortezas de intemperismo de las rocas ultrabásicas hasta su desarrollo laterítico y su relación con la mineralógica. *Minería y Geología* 10(2): 17-24.
- ALMAGUER, A. 1995: Cortezas de intemperismo: algunas características de sus partículas finas. *Minería y Geología* 12(1): 9-19.
- HERNÁNDEZ, A. 1997: *Preparación húmeda de la mena laterítica*. Tesis doctoral. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 94 p.
- HERNÁNDEZ, A.; FALCÓN, J.; LEGRÁ, A.; TRUJILLO, R. Y TOIRÁC, M. 2000: Análisis teórico del beneficio de la laterita. *Minería y Geología* 27(3-4): 73-78.
- HERNÁNDEZ, A.; TRUJILLO, R. Y TOIRÁC, M. 2009: Separación y concentración de fases minerales en la mena laterítica. *Minería y Geología* 25(4): 1-14.
- HERNÁNDEZ, A.; LEGRÁ, A.; TRUJILLO, R. Y TOIRÁC, M. 2010: Beneficio de la mena laterítica actualidad y perspectivas. *Minería y Geología* 26(1): 76-95.
- PONCE, N. Y CARRILLO, D. 1988: Mineralogía y composición sustancial de las muestras patrones de lateritas. *Serie Geológica* 3: 75-82.
- ROJAS, A. 1995: Principales fases minerales portadores de níquel en los horizontes lateríticos. Tesis doctoral. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 75 p.

- ROJAS, A.; OROZCO, G.; VERA, O. Y ARDERÍ, A. 2005: Caracterización mineralógica de los perfiles lateríticos del yacimiento Punta Gorda. En: I Convención Cubana de Ciencias de la Tierra. Memorias. La Habana, abril 2005. ISSN 0258 5979.
- MITROFANOV, K. A. 1980: *Investigación de la capacidad de enriquecimiento de los minerales*. Nedra, Moscú, 365 p.
- TIJONOV, O. N. 1990: *Beneficio de minerales útiles en Asia, África y América Latina*. Nedra, San Petersburgo, 260 p.
- TOKASHIKI, Y.; HENTONA, M.; SHIMO, L. Y ARACHCHI, P. 2003: Improvement of the successive selective dissolution procedure for the separation of birnessite, lithiophorite, and goethite in soil 310 temperatu nodules. *Soil Science Society American Journal* 67: 837-843.
- Valix, M. y Cheung, H. 2002: Study of phase transformation of laterite ores at high temperature. *Minerals Engineering* 15: 607-612.
- VERA, O. 2001: *Procedimiento para la determinación de las redes racionales de explotación de los yacimientos de níquel y cobalto en la región Moa*. Tesis doctoral. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 111 p.

Recibido: 16/02/2017

Aceptado: 30/05/2017

*Alberto Hernández Flores*, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular Adjunto, Centro de Ingeniería e Investigaciones Químicas, La Habana, Cuba  
[ahflores@inor.ciiq.minem.cu](mailto:ahflores@inor.ciiq.minem.cu)