



Minería y Geología

ISSN: 0258-8959

revistamg@ismm.edu.cu

Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa

'Dr Antonio Nuñez Jiménez'

Cuba

Ageyi, George; Beyris Mazar, Pedro E.

Modelación de la distribución fraccional magnética de la mena oxidada níquelífera de Cuba

Minería y Geología, vol. 27, núm. 4, octubre-diciembre, 2011, pp. 40-63

Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa 'Dr Antonio Nuñez Jiménez'

Holguín, Cuba

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223522428004>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

# Modelación de la distribución fraccional magnética de la mena oxidada níquelífera de Cuba

George Ageyi  
Pedro E. Beyris Mazar

## Resumen

Con el propósito de ahondar en el conocimiento de las regularidades de distribución de la mena ferroníquelífera oxidada que se suministra al proceso Caron en Moa, Cuba, la mena se fraccionó en clases de tamaño según distintas intensidades de inducción magnética para determinar la distribución másica y del contenido. Se caracterizaron las propiedades físicas más contrastantes (tamaño de partículas y susceptibilidad magnética) mediante métodos de distribución fraccional y técnicas de Fluorescencia de Rayos-X y Absorción Atómica. Como resultado se describen las regularidades de la distribución másica y del contenido de níquel, cobalto, hierro, aluminio y SiO<sub>2</sub> por intervalos de tamaño de las partículas e intensidades de corriente. Además, se determinan las funciones de distribución másica del contenido y sus combinaciones bidimensionales, herramientas que aportan nuevos conocimientos sobre las potencialidades de preconcentración de los componentes, lo que contribuiría a regular la calidad de mena níquelífera suministrada al proceso extractivo Caron.

## Palabras clave

Fracciones magnéticas; funciones de distribución; mena laterítica; proceso Caron; yacimiento Punta Gorda.

## **Modelling of magnetic fractionation distribution of nickel oxide laterite present in Cuba**

### **Abstract**

In order to deepen knowledge about the content distribution irregularities of ferronickel mines; which provide the ore feed to the Caron process in Moa, fractionation by size classes was performed based on different intensities of magnetic induction to determine mass and content distribution. Fractional distribution methods were used as well as analytical techniques such as X-ray Fluorescence and Atomic Absorption to characterize the contrasting physical properties (size and magnetic susceptibility). The results provide a description of the regularities of mass and content distribution for Ni, Fe, Al, Mg and SiO<sub>2</sub> in different particle size ranges and magnetic induction. In addition, mass and content distribution functions and their two-dimensional combinations are identified; which are tools providing new insights into identifying potential pre-concentrations of the components. Their result may contribute to quality improvements of nickel deposits that feed the extraction process.

### **Keywords**

Magnetic fractions; distribution functions; lateritic ore; Caron process; Punta Gorda ore deposit.

## 1. INTRODUCCIÓN

En el contexto de la actual crisis financiera mundial el encarecimiento de los procesos tecnológicos actuales, debido al alto costo energético y a la caída o fluctuaciones del precio de los metales en el mercado internacional, ha generado cuestionamientos en los investigadores y tecnólogos que tratan de encontrar procesos tecnológicos alternativos.

La búsqueda de alternativas en el procesamiento metalúrgico de menas lateríticas ferroniquelíferas debe enfocarse hacia el beneficio de la mena, sobre todo hacia la evaluación de los contrastes de propiedades físicas como la susceptibilidad magnética y el diámetro de la partícula mineral, con miras a la posible preconcentración de sus componentes o macrofases.

La mena niquelífera oxidada formada a partir de la meteorización de las rocas básicas y ultrabásicas serpentinizadas del nordeste de Cuba constituye la materia prima del proceso Caron en la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara (ECG) de Moa. El proceso metalúrgico Caron demanda una mena que contenga más de treinta y cinco por ciento de hierro y más de uno por ciento de níquel (Vera 1979). Desde la perspectiva del aprovechamiento integral de los recursos minerales se considera, además, la extracción de otros metales existentes en la mena oxidada (aluminio, cromo, cobalto y manganeso), para lo cual se requiere conocer en la misma la distribución fraccional de estos metales.

Ponce y Carrillo (1984) estudian la composición sustancial, la granulometría y el carácter magnético de la mena ferroniquelífera en el yacimiento "La Delta". Luego, sobre la base de una muestra patrón de laterita, determinan la composición mineralógica por fracciones granulométricas y electromagnéticas en un rango de tamaño bastante amplio; ellos reportan que la clase (0,05-0,01 mm) es predominante y que como fases principales aparecen la goethita-hidrogoethita, minerales arcillosos, magnetitas, cromoespinelas, minerales de grupo de la serpentina y minerales de manganeso.

Otros investigadores (Almaguer & Zamarsky 1993; Almaguer 1995, 1996a, 1996b; Beyris 1997; Rojas 1995) indican algunos contrastes en la concentración de los diferentes elementos por zonas de explotación y clases granulométricas; por ejemplo, con la profundidad, en la medida que aumentan los contenidos de sílice y magnesio disminuyen los de hierro y níquel.

El níquel y el hierro suelen concentrarse en las partículas más pequeñas (0,044 mm) mientras que los minerales que contienen cobalto, cromo y manganeso se concentran en partículas de granulometría intermedia (entre 0,2 y 0,02 mm) y por su mayor densidad pueden ser separados de los otros silicatos y óxidos acompañantes (Almaguer 1989, 1995; Almaguer & Zamarsky 1993; Rojas 1995 y Agyei *et al.* 2005, 2006, 2010).

Beyris (1997) evalúa la influencia en la sedimentación de la composición mineralógica de la pulpa cruda y demuestra que las fases silicatadas se concentran en las fracciones gruesas, mientras que las de óxidos de hierro se enriquecen en las más finas, lo que corrobora resultados previos obtenidos por Rojas & Beyris (1994) para diferentes frentes de explotación.

Carthy & Falcón (1985) y Leyva *et al.* (1995) reportan la obtención de concentrados de cromita a partir de un esquema combinado de clasificación, separación magnética y beneficio gravitacional de las colas en la planta metalúrgica "Comandante René Ramos Latour" de Nicaro. Falcón & Hernández (1993) aplican un esquema de lavado para la laterita de balance y demuestran que en el rebose de la clasificación se incrementan los contenidos de hierro y níquel y disminuyen los de aluminio y magnesio.

A finales de la década de los 80 y principios de los 90 del pasado siglo, investigadores del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa realizaron investigaciones encaminadas, desde distintos enfoques, al beneficio de la laterita y de sus escombros (Falcón & Hernández 1993; Falcón *et al.* 1997a, 1997 b; Hernández *et al.* 1995, 1997, 2000; Bey-

realiza un análisis teórico sobre la posibilidad de la concentración de los principales componentes del mineral laterítico, aplicando los elementos metodológicos aportados por Tijonov (1984). De acuerdo con sus resultados, es posible en el rebose de la clasificación el incremento de níquel en un 0,08 %; una disminución del contenido de aluminio en 8,56 % y del de magnesio en 6,58 %.

El índice de contraste, según Tijonov (1984), puede expresarse como:

$$I_{cont} = \beta_{\min}^{-1} \int_{\xi_{\min}}^{\xi_{\max}} \left| \beta(\xi) - \beta_{\text{inic}} \right| \gamma(\xi) d\xi \quad (1)$$

Donde:

$\gamma(\xi)$  - distribución diferencial másica

$\beta(\xi)$  - distribución diferencial de contenido

Coello *et al.* (1998) plantean que, atendiendo a la expresión (1), menas con distintos grados de beneficiabilidad  $\gamma(\xi)$  y  $\beta(\xi)$  pueden tener igual índice de contraste, de manera que no es aconsejable el uso de este criterio en caso de menas complejas (multicomponentes), como las lateritas; su utilización como medida de beneficiabilidad puede conducir a errores impredecibles. Por otra parte, el enfoque clásico en la investigación de la beneficiabilidad de los minerales (curva de beneficiabilidad y contraste de propiedades físicas, físico-químicas u otras) no brinda toda la información necesaria para el pronóstico y diseño tecnológico del tratamiento de menas complejas.

En investigaciones acerca del escombros laterítico Coello *et al.* (1998) consideran las curvas de beneficiabilidad como vía eficiente para la evaluación de la separación de menas cuyos minerales se diferencien en una sola propiedad física (densidad, susceptibilidad magnética u otra). Sin embargo, después de un riguroso análisis de los trabajos precedentes, fundamentan la inconveniencia de usar las curvas de beneficiabilidad para el estudio de los minerales lateríticos y de sus escombros y proponen el uso del enfoque fraccional por las razones siguientes:

- Las partículas minerales se diferencian, no por una propiedad física, sino por varias, lo cual implica el uso de diferentes propiedades de separación.
- Las partículas minerales son portadoras de varios minerales útiles, no de uno solo.
- La utilización del enfoque fraccional por más de una propiedad de separación permite acotar los límites de separación de las fases mineralógicas presentes en el escombro laterítico.

Las funciones  $\gamma(\xi)$  y  $\beta(\xi_r)$  son un medio sencillo, necesario y suficiente para caracterizar cualquier materia prima mineral o producto (Tijonov 1984). Estas funciones de distribución no solamente permiten el cálculo de los indicadores clásicos del beneficio, sino también el pronóstico de los índices tecnológicos de cualquier esquema de beneficio, independientemente de la propiedad de separación. Cualquier otro método es insuficiente o excesivamente complicado, como es el caso de las curvas de beneficiabilidad cuando los componentes se diferencian por más de dos propiedades físicas (Coello *et al.* 1998).

El estudio y comprensión de las potencialidades de la preconcentración de los componentes de la mena laterítica es aún insuficiente. Para cualquier estudio orientado a la inclusión en el proceso Caron de operaciones de beneficio en calidad de preconcentración es preciso valorar en la mena laterítica la distribución fraccional de elementos químicos y de fases minerales, abarcando las partículas en el rango de tamaño desde 8,0 hasta 0,044 mm.

El objetivo de este trabajo es determinar la distribución fraccional de la composición substancial de la laterita de balance (mena del proceso Caron), considerando como propiedades de análisis el tamaño de las partículas y la susceptibilidad magnética, así como las combinaciones de ambas para la predicción de las regularidades de la distribución másica y del contenido de la mena niquelífera que ingresa al proceso metalúrgico extractivo Caron en la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Las muestras se seleccionaron de los pozos 44 y 45 del bloque M-49 del yacimiento Punta Gorda, con profundidades de 35,1 y 24 m, respectivamente. El yacimiento se encuentra en la provincia de Holguín, nordeste de Cuba (Figura 1). Se hizo muestreo en todos los perfiles geológicos de ambos pozos seleccionados en un frente activo de explotación minera. Se preparó una muestra tecnológica compósito de 1 400 kg de mena niquelífera oxidada y fue sometida a homogeneización y cuarteo.



Figura 1. Localización geográfica del yacimiento niquelífero Punta Gorda, Moa.

La Tabla 1 recoge la composición química de la muestra de laterita de balance del yacimiento Punta Gorda, la cual es esencialmente ferrosa, con un contenido de hierro en la mena inicial de 47 %.

Tabla 1. Composición química promedio de la muestra inicial de Punta Gorda

Contenido (%)										
	Ni	Co	Fe	Mn	Mg	Cr	Al	SiO <sub>2</sub>	Cu	Zn
Ponderal	1,36	0,146	45,83	0,72	3,4	3,96	2,02	1,08	0,018	0,046
Experimental	1,34	0,134	46,928	0,42	3,69	3,18	2,00	0,92	0,019	0,037

Los análisis químicos fueron realizados mediante espectrometría de absorción atómica en equipo Perkin Elmer modelo 3110, con cámara de grafito modelo 1100 B. También se utilizó espectrómetro secuencial de Fluorescencia de Rayos-X Phillips PW 1480, utilizando un tubo de Rayos-X con Rh tipo PW2182/00, régimen de 3000 W y 100 kV al vacío con colimador.

El análisis de tamaño se realizó según estándar de Tyler, para diámetros entre 8 y 0,044 mm, teniendo en cuenta los resultados de investigaciones similares (Mitrofanov *et al.* 1974. Falcón 1993; Hernández 1997; Coello *et al.* 1998; Ramírez 2002). A todas las clases se le aplicó intensidades de corriente de 0,5; 1; 2; 4 y 6 A. Se realizó análisis magnético por vía seca a las fracciones gruesas y por vía húmeda a las fracciones finas. En este trabajo fueron arbitrariamente consideradas como finas las fracciones por debajo de 1 mm. El análisis magnético por vía húmeda se realizó en un Tubo de Davis, siguiendo los procedimientos establecidos para su uso.

El análisis magnético para las fracciones granulométricas gruesas se hizo en un separador de rodillos marca 13b-C $\delta$ , el cual sirve para el enriquecimiento en seco de pequeñas muestras de minerales y materiales débilmente magnéticos. El separador empleado tiene un rodillo de 100 mm de diámetro y 80 mm de longitud; la intensidad del campo alcanzó los 950 k A/m; el peso del separador es de 149 kg. Las dimensiones exteriores son las siguientes:

Longitud-----900 mm

Ancho-----520 mm

Altura-----545 mm

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Según el análisis granulométrico se aprecia el incremento hacia las fracciones más finas del valor de la función de distribución másica  $\gamma(l,I)$  lo que puede apreciarse en la Tabla 2. Resultados similares obtienen para materiales lateríticos Falcón *et al.* (1993); Coello *et al.* (1998) y Hernández *et al.* (1997, 2000).

Tabla 2. Resultados experimentales de la función de distribución másica  $\gamma(l)$  de Punta Gorda

Clase de tamaño (mm)	Salida %	Salida acumulativa según el retenido (+)	Salida acumulativa según el cernido (-)
-10+8	0,1	0,1	99,9
-8+4	0,63	0,73	99,27
-4+2	0,36	1,09	98,91
-2+1	2,28	3,37	96,63
-1+0,4	5,53	8,9	99,11
-0,4+0,2	4,28	13,18	86,82
-0,2+0,071	10,12	23,3	76,7
0,071+0,044	7,9	31,2	68,8
-0,044	68,79		

La expresión matemática de la distribución másica de la mena indica que las partículas aumentan de forma exponencial hacia las partículas más finas. La ecuación (2) describe la función de distribución másica que caracteriza la mena, tomando como propiedad de análisis el tamaño de la partícula.

$$\gamma(l) = \int_{l_{\min}}^{l_{\max}} (15,0351e^{-1.3063l}) dl \quad (2)$$

$$R^2 = 0,9864$$

### 3.1. Análisis de función de distribución de contenido según tamaño de las partículas

Químicamente, la laterita de balance del yacimiento Punta Gorda es esencialmente ferrosa (Tabla 3), con un contenido de hierro que varía entre el 20 y el 49,7 % en las distintas fracciones granulométricas. En la MENA, como elementos mayoritarios, se encuentran también el Mg, Al, SiO<sub>2</sub>, Cr y Mn. El Ni y el Co son microelementos de mucho interés, como también lo reportan Almaguer & Zamarsky (1993); Almaguer (1995, 1996a, 1996b); Rojas (1995) y Beyris (1997).

La efectividad del proceso de beneficio con vista a la concentración de los metales importantes de la mena laterítica se evidencia mejor cuando se analiza la composición química al nivel de fracciones granulométricas. A partir de un material inicial (Tabla 1), compuesto principalmente por Fe (casi un 47 %), con ciertas cantidades de Mg (3,7 %) y Cr (3,2 %), Al (2 %), SiO<sub>2</sub> (1,0 %) y Mn (0,4 %), sin descontar el Ni que llega a un 1,33 % y el Co (0,13 %), se pueden obtener fracciones granulométricas enriquecidas en estos metales.

El hierro tiende a concentrarse en las fracciones granulométricas inferiores a 1 mm, en particular en la fracción más fina (- 0,044 mm). Se aprecia una diferencia en los contenidos de Fe a partir de las fracciones por debajo de 2 mm: se incrementa hacia las más finas alcanzando valores entre 35 y 50 %. En las fracciones por encima de los 2 mm el contenido de Fe disminuye hasta llegar al 20 %.

Contrario a las tendencias de concentración del hierro, el Al se enriquece hacia las fracciones de tamaños mayores que 2 mm, registrando valores que oscilan entre 9 y 10 %, mientras en las clases más finas disminuye por debajo de 3,6 %.

El SiO<sub>2</sub> y el Mg se enriquecen en las fracciones mayores que 2 mm, en las que el primero alcanza valores de hasta 22,16 % y el segundo de 5,67 %. Sus contenidos disminuyen en las fracciones menores que 2 mm, donde el SiO<sub>2</sub> posee valores entre 7 y 3,5 % y el Mg entre 1,9 y 0,5 %. De manera general, el tamaño 1 mm constituye una "barrera" significativa para concentrar Mg, Al y SiO<sub>2</sub>, atendiendo a la representatividad de éstos en la composición granulométrica de la mena.

El cromo se concentra en los granos menores que 1 mm y en los mayores que 0,044 mm, describiendo una función potencial, y alcanza su máximo contenido en la clase granulométrica (-0,071 + 0,044 mm).

El manganeso muestra una tendencia de concentración peculiar e irregular en el material laterítico, apareciendo en dos grupos granulo-

ficamente en tamaños mayores que 8 mm, donde alcanza el 2,9 %; y en las fracciones medianamente finas, entre 0,4 y 0,07 mm logrando valores de hasta 2,84 %.

Respecto a los metales de máximo interés, Ni y Co, su contenido en el material laterítico de balance cumple las exigencias industriales. Vale destacar la existencia de altos contenidos de Co en las partículas menores de 0,071 mm.

El níquel mostró una tendencia de enriquecimiento de forma polinómica entre tamaños de 1 mm hasta 0,044 mm. Otros investigadores (Almaguer & Zamarsky 1993, Rojas 1995, Coello *et al.* 1998 y Agatzini *et al.* 2004) habían reportado para este metal una concentración hacia las fracciones más finas. En el material ocroso niquelífero de perfiles lateríticos de Moa, el Ni tiende a concentrarse hacia las fracciones finas, menores de cuarenta y cinco micrones. Los altos valores de níquel reportados en las fracciones mayores que 1 mm podrían explicarse por la presencia de goethita, hematita, antigorita, lizardita y cloritas que predominan en estas fracciones gruesas.

Tabla 3. Función experimental del contenido  $\beta(l)$  de Punta Gorda

Tamaño (mm)	Tamaño promedio (mm)	Composición química (%)							
		Ni	Co	Fe	Mn	Mg	Cr	Al	SiO <sub>2</sub>
-10+8	9,0	1,80	0,365	20,69	3,08	5,67	0,27	12,76	20,16
-8+4	6,0	1,56	0,229	21,85	2,18	5,54	0,23	9,83	22,16
-4+2	3,0	1,60	0,323	22,18	2,72	5,92	0,27	9,62	19,38
-2+1	1,5	1,08	0,225	34,63	1,71	1,87	1,30	5,32	6,71
-1+0,4	0,7	1,20	0,264	39,20	1,84	1,08	2,11	4,15	4,43
-0,4+0,2	0,3	1,42	0,404	36,50	2,98	0,79	2,09	4,10	3,94
-0,2+0,071	0,1355	1,50	0,349	38,91	2,57	0,70	2,37	3,65	4,01
0,071+0,044	0,0575	1,40	0,192	43,90	1,40	0,57	2,68	3,44	3,75
-0,044+0	0,022	1,38	0,092	49,66	0,63	0,43	1,96	3,51	3,41

Las expresiones matemáticas (de la 3 a la 7) describen la función de distribución de contenido utilizando como propiedad el tamaño de la partícula expresado en la Tabla 3.

$$\beta^{Ni}(l) = \int_{l_{\min}}^{l_{\max}} (-0,0342l^2 + 0,177l + 1,229) dl \leq 1 \text{ mm} \quad (3)$$

$$R^2 = 0,92$$

$$\beta^{Fe}(l) = \int_{l_{\min}}^{l_{\max}} (-3,6227l + 50) dl \quad (4)$$

$$R^2 = 0,91$$

$$R^2 = 0,90$$

$$\beta(l)^{Al} = \int_{l_{\min}}^{l_{\max}} (3,275e^{0,1752l}) dl \quad (5)$$

$$R^2 = 0,95$$

$$\beta(l)^{SiO_2} = \int_{l_{\min}}^{l_{\max}} (4,54e^{0,2687l}) dl \quad (6)$$

$$R^2 = 0,85$$

$$\beta(l)^{Mg} = \int_{l_{\min}}^{l_{\max}} [(0,8 \div 2)e^{0,1116l}] dl \quad (7)$$

$$R^2 = 0,92$$

Tabla 4. Estadística del modelo y reproducibilidad de los valores experimentales atendiendo al  $\beta(i)$  de Punta Gorda

Tamaño	Ni		Fe		Al		SiO <sub>2</sub>		Mg	
	$\beta(l)$	$\beta(l)$	$\beta(l)$	$\beta(l)$	$\beta(l)$	$\beta(l)$	$\beta(l)$	$\beta(l)$	$\beta(l)$	$\beta(l)$
	exp	mo- delo	exp	mo- delo	exp	mo- delo	exp	mo- delo	exp	mo- delo
-10+8	1,80	1,5	20,69	18,24	12,76	13,28	20,16	38,96	5,67	4,88
-8+4	1,56	1,42	21,85	28,65	9,83	6,59	22,16	13,30	5,54	3,13
-4+2	1,60	1,33	22,18	35,90	9,62	4,64	19,38	7,77	5,92	2,50
-2+1	1,08	1,11	34,63	40,20	5,32	3,90	6,71	5,94	1,87	0,89
-1+0,4	1,20	1,25	39,20	43,01	4,15	3,51	4,43	5,06	1,08	0,84
-0,4+02	1,42	1,35	36,50	44,00	4,10	3,39	3,94	4,79	0,79	0,82
-0,2+0,071	1,50	1,47	38,91	44,64	3,65	3,31	4,01	4,63	0,70	0,81
-0,071+0,044	1,40	1,39	43,90	44,78	3,44	3,30	3,75	4,59	0,57	0,80
-0,044+0,00	1,38	1,36	49,66	44,99	3,51	3,27	3,41	4,54	0,43	0,80
Análisis de datos										
R <sup>2</sup>	0,92		0,91		0,95		0,85		0,92	
F cal	1,08		0,77		0,60		0,002		0,68	
F crítico	4,49		4,49		4,49		4,49		4,49	
Probabili- dad	0,32		0,39		0,044		0,97		0,41	

En la Tabla 4 aparecen reflejados los valores de  $\beta(i)$  experimentales y del modelo para las diferentes clases granulométricas. Los coeficientes de correlación calculados y el análisis de varianza corroboran estos resultados. En todos los casos, el Fisher calculado es menor que el Fisher crítico, con probabilidad mayor que 0,05 lo que demuestra la reproducibilidad de las ecuaciones obtenidas.

### 3.2. Función de distribución másica según tamaño y susceptibilidad magnética de las partículas

Este análisis expresa el resultado de fraccionamiento de las clases de tamaño según distintas intensidades de corriente del analizador mag-

una combinación de la función exponencial que describe el tamaño y las distintas funciones polinómicas que describen los análisis magnéticos de las distintas fracciones granulométricas.

La distribución másica bidimensional es similar a la función de distribuciones por separado; existe aumento de la función en el sentido de la disminución del tamaño de la partícula, por otra parte aumenta en el sentido de la disminución de la intensidad de corriente en el analizador magnético (Tabla 5).

Tabla 5. Resultados experimentales de la función de distribución másica  $\gamma(I,I)$  en mm.A

Clases de tamaño (mm)	Intensidad de corriente (A)				
	0,0-0,5	0,5-1,0	1,0-2,0	2,0-4	4,0-6,0
-10+8,0	0,00010	0,00008	0,00003	0,00002	0,00001
-8,0+4	0,00031	0,00024	0,00011	0,00005	0,00004
-4,0+2,0	0,00055	0,00039	0,00012	0,00006	0,00006
-2,0+1,0	0,00871	0,00634	0,00294	0,00125	0,00082
-1,0+0,2	0,00000	0,00000	0,00494	0,00175	0,00065
-0,4+0,2	0,00000	0,00312	0,01280	0,00546	0,00436
-0,2+0,071	0,00000	0,00324	0,06233	0,02128	0,00921
-0,071+0,044	0,00000	0,06119	0,19225	0,07119	0,02625
-0,044+0	0,00000	0,00000	0,15304	0,21659	0,16271

Las ecuaciones de las funciones de distribución másica, tomando como propiedad el tamaño y la susceptibilidad magnética, se relacionan a continuación:

$$\gamma^{-0,044}(I,I) = \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} [(15,035e^{-1,3063I}) (0,0003I^4 - 0,0003I^3 + 0,0216I^2 - 0,0375I + 0,0198)] dIdI \quad (8)$$

$$R^2_L = 0,99; R^2_I = 0,98$$

$$\gamma^{+0,044}(I,I) = \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} [(15,035e^{-1,3063I}) (0,0093I^4 - 0,1109I^3 + 0,4458I^2 - 0,6792I + 0,335)] dIdI \quad (9)$$

$$R^2_L = 0,99; R^2_I = 0,98$$

$$\gamma^{+0,071}(I,I) = \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} [(15,035e^{-1,3063I}) (0,0151I^4 - 0,1845I^3 + 0,7641I^2 - 1,2239I + 0,6291)] dIdI \quad (10)$$

$$R^2_L = 0,99; R^2_I = 0,98$$

$$\gamma^{+0.2}(l,I) = \int_{l_{\min}}^{l_{\max}} \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} [(15,035e^{-1.3063l}) (0,0091I^4 - 0,1096I^3 + 0,445I^2 - 0,6898I + 0,3453)] dIdl \quad (11)$$

$$R^2_L = 0,99; R^2_I = 0,98$$

$$\gamma^{+0.4}(l,I) = \int_{l_{\min}}^{l_{\max}} \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} [(15,035e^{-1.3063l}) (0,0105I^4 - 0,1289I^3 + 0,5368I^2 - 0,8663I + 0,4478)] dIdl \quad (12)$$

$$R^2_L = 0,99; R^2_I = 0,98$$

$$\gamma^{+1.0}(l,I) = \int_{l_{\min}}^{l_{\max}} \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} [(15,035e^{-1.3063l}) (-0,0059I^4 + 0,0794I^3 - 0,3514I^2 + 0,4828I + 0,1778)] dIdl \quad (13)$$

$$R^2_L = 0,99; R^2_I = 0,98$$

$$\gamma^{+2.0}(l,I) = \int_{l_{\min}}^{l_{\max}} \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} [(15,035e^{-1.3063l}) (-0,0104I^4 + 0,1321I^3 - 0,5583I^2 + 0,8135I - 0,0675)] dIdl \quad (14)$$

$$R^2_L = 0,99; R^2_I = 0,98$$

$$\gamma^{8.0}(l,I) = \int_{l_{\min}}^{l_{\max}} \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} [(15,035e^{-1.3063l}) (-0,0039I^4 + 0,053I^3 - 0,2376I^2 + 0,3541I + 0,0305)] dIdl \quad (15)$$

$$R^2_L = 0,99; R^2_I = 0,98$$

### 3.3. Análisis de la distribución del contenido según el tamaño y el análisis magnético

Los resultados de la función experimental de contenido, según el tamaño y la intensidad de la corriente  $\beta(l,I)$ , se analizan desde la Tabla 6 hasta la 10. La función de contenido,  $\beta(l,I)$  para el níquel en la Tabla 6 sigue una tendencia homogénea para todas las intensidades de corriente y el tamaño de las partículas. Nótese que el níquel alcanza valores de hasta 2 % en varios productos magnéticos de las fracciones granulométricas. El incremento de las intensidades de corriente no produce el empobrecimiento del níquel.

Este resultado confirma la asociación íntima de níquel con la goethita, fase de hierro predominante en los productos débilmente magnéticos y las hematitas y magnetitas, fases de hierro en los productos fuertemente magnéticos. Cordeiro y Cordiero (1987) y Rojas (1995) habían argumentado que la goethita, además de otros óxidos, es el principal mineral portador de níquel.

La función  $\beta(I,I)$  para el hierro (Figura 2) muestra una tendencia de crecimiento hacia la disminución de las intensidades del analizador magnético (las fracciones fuertemente magnéticas) y las fracciones finas, alcanzando valores de hasta 57,20 %, a intensidad de 2 A para la fracción -0,044 mm.

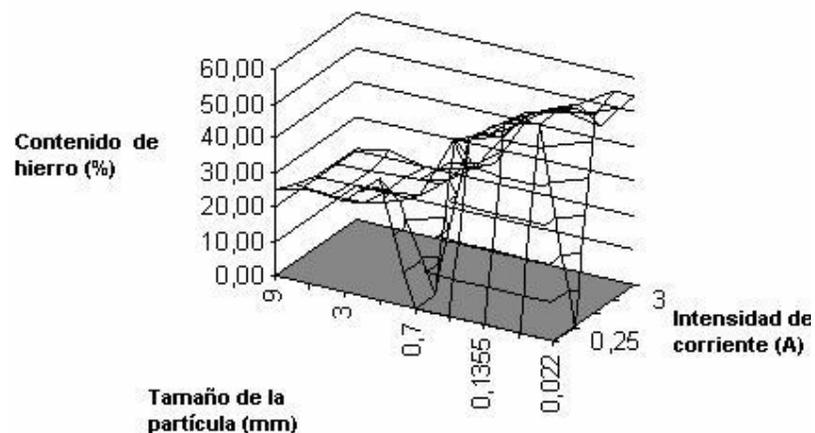


Figura. 2 Distribución estereológica del hierro.

El aluminio (Tabla 9) se distribuye de forma homogénea en todo el espectro de intensidad de corriente y para las partículas gruesas. Sin embargo, disminuyen sus contenidos en todas las clases de tamaño para las intensidades bajas.

La función de distribución  $\beta(I,I)$  para el dióxido de silicio (Tabla 10), presenta una tendencia de enriquecimiento con el aumento de la intensidad de corriente en el analizador y con el aumento de tamaño. Sus valores relativamente bajos se encuentran para todas las clases de tamaño en la fracción fuertemente magnética.

El magnesio muestra alta concentración en las fracciones intermedias y gruesas, y en las altas intensidades magnéticas. En las ecuaciones de la 16 a la 21 se muestran las expresiones matemáticas correlacionales que describen las funciones de contenido  $\beta(I,I)$  con base en las propiedades como el tamaño y la susceptibilidad magnética.

$$\beta(I, I)^{Ni} = \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} [(-0,0342I^2 + 0,1771I + 1,229)(0,2797I + 0,9288)] dIdI \quad ; I, I \leq 1 \quad (16)$$

$$R^2_L = 0,92; \quad R^2_I = 0,94$$

$$\beta(I, I)^{Co} = \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} (0,6351e^{-0,2654}) dIdI \quad ** \quad (17)$$

$$R^2 = 0,89$$

$$\beta(I, I)^{Fe} = \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} [(-3,6227I + 50)((30 - 50)e^{-0,1099I})] dIdI \quad (18)$$

$$R^2_L = 0,91 \quad R^2_I = 0,80$$

$$\beta(I, I)^{Al} = \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} [(3,275e^{0,1752I})(1,2 - 6,42)e^{0,1079I}] dIdI \quad (19)$$

$$R^2_L = 0,95; \quad R^2_I = 0,98$$

$$\beta(I, I)^{SiO_2} = \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} [(4,5e^{0,2687I})(1,2 - 15)e^{0,1248I}] dIdI \quad (20)$$

$$R^2_L = 0,85; \quad R^2_I = 0,86$$

$$\beta(I, I)^{Mg} = \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} [(0,8 - 2)e^{0,3716I})(2 - 5,41)e^{0,0712I}] dIdI \quad (21)$$

$$R^2_L = 0,92; \quad R^2_I = 0,89$$

En la Tabla 11 aparecen reflejados los valores de las funciones de distribución de contenido  $\beta(I, I)$ , experimentales y teóricas, para distintas clases granulométricas y diferentes intensidades de corriente, lo cual confirma lo expuesto con anterioridad. Este resultado se puede corroborar, además, a través de los análisis estadísticos, los cuales reflejan de forma general coeficientes de correlación superiores a 0,80 en todos los casos, además el valor Fisher calculado es menor que el Fisher crítico, lo que demuestra la reproducibilidad de los modelos obtenidos.

Tabla 6 .Función experimental de distribución,  $\beta^{Ni}(l,I)$  de Punta Gorda

Tamaño Promedio (mm)	Contenido de Ni (%)				
	Intensidad Promedio (A)				
	0,25	0,75	1,5	3	5
9	2,01	2,14	1,98	2,24	1,80
6	1,52	1,98	2,15	2,35	2,22
3	1,58	2,10	2,34	2,42	2,81
1,5	1,15	1,80	2,22	2,07	1,69
0,7	0,00	0,00	1,39	1,60	1,38
0,3	0,00	1,34	1,49	1,64	1,53
0,1355	0,00	1,02	1,06	1,03	1,25
0,0575	0,00	0,84	0,93	0,96	1,16
0,022	0,00	0,00	0,85	1,02	1,27

Tabla 7. Función experimental de distribución,  $\beta^{Mg}(l,I)$  de Punta Gorda

l (mm)	Contenido de Mg (%)				
	Intensidad promedio (A)				
	0,25	0,75	1,50	3	5
9	5,12	5,20	5,26	5,64	7,20
6	6,52	6,53	6,54	7,22	7,34
3	6,30	5,62	6,57	7,42	7,83
1,5	5,18	5,91	6,42	5,61	6,46
0,7	0,00	0,00	2,96	3,63	2,42
0,3	0,00	0,62	0,72	0,63	0,54
0,1355	0,00	0,76	0,88	0,94	0,76
0,0575	0,00	0,72	0,74	0,77	0,66
0,022	0,00	0,00	0,49	0,50	0,40

Tabla 8. Función experimental de distribución,  $\beta^{Fe}(l,I)$  de Punta Gorda

Tamaño Promedio (mm)	Contenido de Fe (%)				
	Intensidad Promedio (A)				
	0,25	0,75	1,50	3	5
9	25,00	22,40	20,57	20,50	20,43
6	27,11	21,80	20,73	20,67	22,30
3	26,41	21,74	21,10	21,37	20,11
1,5	35,26	24,78	22,37	21,39	21,91
0,7	0,00	0,00	40,61	28,80	25,58
0,3	0,00	47,70	44,85	42,30	42,37
0,1355	0,00	54,20	53,23	49,72	45,32
0,0575	0,00	55,93	56,53	54,10	43,28
0,022	0,00	0,00	57,20	59,85	54,48

Tabla 9. Función experimental de distribución,  $\beta^{Al}(I,I)$  de Punta Gorda

Tamaño Promedio (mm)	Contenido de Al (%)				
	Intensidad Promedio (A)				
	0,25	0,75	1,5	3	5
9	6,29	7,57	7,29	7,61	7,78
6	7,96	6,41	7,41	7,79	9,06
3	7,00	8,14	9,03	9,73	10,98
1,5	4,94	7,44	9,02	10,65	11,67
0,7	0,00	0,00	5,41	6,43	6,97
0,3	0,00	3,30	3,56	3,79	3,78
0,1355	0,00	2,89	3,27	3,43	3,67
0,0575	0,00	2,47	2,82	2,99	3,71
0,022	0,00	0,00	2,43	2,56	3,45

Tabla 10. Función experimental de distribución,  $\beta^{SiO_2}(I,I)$  de Punta Gorda

Tamaño Promedio (mm)	Contenido de SiO <sub>2</sub> (%)				
	Intensidad Promedio (A)				
	0,25	0,75	1,50	3	5
9	16,64	21,21	21,99	25,21	25,50
6	15,42	20,48	20,78	22,83	24,44
3	14,98	17,24	18,20	18,64	19,24
1,5	12,81	13,69	14,85	16,63	17,09
0,7	0,00	0,00	3,35	4,21	5,84
0,3	0,00	3,06	3,10	3,08	3,44
0,1355	0,00	2,31	2,60	2,66	3,25
0,0575	0,00	2,36	2,48	2,62	3,51
0,022	0,00	0,00	2,34	2,39	3,01



0,2	0,5	0,0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
	1	1,3	1,21	47,70	44,80	3,30	1,34	3,06	1,36	0,62	2,15		
	2	1,5	1,49	44,85	40,13	3,56	1,27	3,10	1,54	0,72	2,31		
	4	1,6	2,05	42,30	32,21	3,79	1,34	3,08	1,98	0,63	2,66		
	6	1,5	2,61	42,37	25,86	3,78	1,27	3,44	2,54	0,54	3,07		
	0,071	0,5	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	
1		1,0	1,21	54,20	44,80	2,89	7,15	2,31	1,36	0,76	2,15		
2		1,1	1,49	53,23	40,13	3,27	7,97	2,60	1,54	0,88	2,31		
4		1,0	2,05	49,72	32,21	3,43	9,89	2,66	1,98	0,94	2,66		
6		1,2	2,61	45,32	25,86	3,67	12,27	3,25	2,54	0,76	3,07		
0,044		0,5	0,0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,28	0,00	0,00	
	1	0,8	1,21	55,93	44,80	2,47	1,34	2,36	1,36	0,72	2,15		
	2	0,9	1,49	56,53	40,13	2,82	1,27	2,48	1,54	0,74	2,31		
	4	1,0	2,05	54,10	32,21	2,99	1,34	2,62	1,98	0,77	2,66		
	6	1,2	2,61	43,28	25,86	3,71	1,27	3,51	2,54	0,66	3,07		
	-0,044	0,5	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
1		0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
2		0,9	1,49	57,20	40,13	2,43	1,27	2,34	1,54	0,49	1,52		
4		1,0	2,05	59,85	32,21	2,56	1,34	2,39	1,98	0,50	1,30		
6		1,3	2,61	54,48	25,86	3,45	1,27	3,01	2,54	0,40	1,27		
Análisis de datos													
R <sup>2</sup>			0,94			0,80			0,98			0,86	0,89
F <sub>cal</sub>			0,59			2,38			0,19			0,05	1,29
F <sub>crit</sub>			3,95			3,95			3,95			3,95	3,95
Prob.			0,45			0,13			0,67			0,82	0,26

No se consideró necesario realizar la comprobación de la distribución másica porque al conocer su función de distribución  $\gamma(l,I)$  y la distribución del componente útil en la mena inicial puede asumirse que el contenido  $\beta(l,I)$  del componente útil es una función de  $\gamma(l,I)$ , ya que depende de esta propiedad física. Esta dependencia da sentido a la

sificar las partículas de acuerdo con el valor de  $(l, I)$  se garantiza la obtención de poblaciones con concentraciones diferentes del componente útil.

#### 4. CONCLUSIONES

Se determinaron las ecuaciones íntegro-diferenciales  $\gamma(l)$   $\gamma(I)$  y sus combinaciones bidimensionales másica  $\gamma(l, I)$  y del contenido  $\beta(l)$ ,  $\beta(l, I)$  para la mena niquelífera del proceso Caron, tomando como propiedades de análisis el tamaño de las partículas y la susceptibilidad magnética que describen la distribución de Ni, Fe, SiO<sub>2</sub>, Al y Mg .

El estudio sobre las propiedades magnéticas de la mena niquelífera, incorporando modernas técnicas analíticas y efectivos métodos, muestra que existen diferencias en las propiedades magnéticas de los minerales componentes de la mena; el análisis fraccional permitió obtener, entre 2 y 4 A, productos magnéticos enriquecidos en hierro, níquel, cobalto y cromo; y en el producto no magnético, el dióxido de sílice, aluminio y magnesio.

La distribución másica confirma que la mena niquelífera del yacimiento Punta Gorda está compuesta en el 87 % de la muestra por partículas menores que 0,2 mm, y dentro de éstas las menores de 0,04 representan el 70 %.

#### 5. REFERENCIAS

- AGATZINI, S. L.; SAFIRATOS, I. G. & SPATHIS, D. 2004: Beneficiation of Greek serpentinitic Nickeliferous ore: Part I. *Hydrometallurgy* 74(3-4):259-265.
- AGYEI, G. 2006: *Distribución fraccional de las especies metálicas y mineralógicas de la mena niquelífera de un perfil del yacimiento Punta Gorda, Moa, Holguín, Cuba*. Tesis doctoral. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 92 p.
- AGYEI, G.; ROJAS-PURON, A. L. & HERNÁNDEZ, A. F. 2005: Caracterización mineralógica de la mena niquelífera en un perfil laterítico del yacimiento Punta Gorda, Holguín, Cuba. En: Primera Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, Geociencias '2005. Memorias. La

- AGYEI, G.; ROJAS-PURRÓN, A. L. & HERNÁNDEZ, A. F.** 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.
- ALMAGUER A. F. & 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* 2(93):17-24.
- ALMAGUER, A.** 1995: Cortezas de intemperismo: algunas características de sus partículas finas. *Minería y Geología* 1(95):9-19.
- ALMAGUER, A. F.** 1996a: Petrología y corteza de intemperismo del yacimiento "Vega Grande", Nicaro, Cuba. *Minería y Geología* 12(1):9-12.
- ALMAGUER, A. F.** 1996b: Composición de las pulpas limonititas de la planta "Pedro Sotto Alba". Parte II. Periodo de crisis de sedimentación. *Minería y Geología* 13(1):27-30.
- BEYRIS, P.** 1997: *Mejoramiento del proceso de sedimentación de la pulpa del mineral laterítico de la empresa Pedro Sotto Alba-Moa Nickel S.A.* Tesis doctoral. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 118 p.
- CARTHY, G. C. & FALCÓN, J. H.** 1985: Consideraciones preliminares sobre el beneficio de las colas de Nicaro. *Minería y Geología* 3(2):124-131.
- COELLO-VELÁSQUEZ, A. L.; BEYRIS, P.; HERNÁNDEZ, A. F. & RAMÍREZ, B.** 1998: Distribución fraccional de los valores metálicos en el escombros laterítico. *Minería y Geología* 15(1):37-42.
- CORDEIRO, C; CORDIERO, A.** 1987: Determinación experimental de la distribución del Ni entre las macrofases del mineral laterítico cubano. *Minería y Geología* 5(2):57-64.
- FALCÓN, J. H.; BEYRIS, P.; FERRER, E. A. & MONTERO, M.** 1997a: Sedimentación de la pulpa cruda en la empresa Moa Níquel S.A. *Minería y Geología* 14(1):31-36.
- FALCÓN, J. H.; HERNÁNDEZ, A. F. & COELLO-VELÁSQUEZ, A. L.** 1997b: Preparación mecánica de los minerales lateríticos. *Revista Tecnológica* 1(1):9-17.
- HERNÁNDEZ A.; FALCÓN, J. H.; TRUJILLO, R. & TOIRAC, M.** 2000: Análisis teórico del beneficio de la laterita. *Minería y Geología* 17(3-4):73-78.
- HERNÁNDEZ, A. F.; TOIRAC, M. & COELLO-VELÁSQUEZ, A. L.** 1995: Estudio preliminar para la obtención de concentrados de cromo a partir del yacimiento de cortezas de intemperismo "Casimba" Pinares

- HERNÁNDEZ, A. F.** 1997: *Determinación de esquemas racionales para la preparación y beneficio integral de minerales lateríticos*. Tesis doctoral. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. 94 p.
- LEYVA, E. R.; RODRÍGUEZ, J. E.; JESÚS & ORTIZ, J. B.** 1995: Contribución al estudio estructural de los minerales componentes de las colas de Nicaro. *Minería y Geología* 12(2):9-15.
- MITROFANOV, C. N.; BARSKI, L. A. & SAMIGIN, V. D.** 1974: *Investigación de la capacidad de Enriquecimiento de los Minerales*. Editorial Mir, Moscú, 437 p.
- PONCE, N. & CARRILLO, D.** 1984: Mineralogía y composición sustancial de las menas ferro níquelífera del yacimiento Delta, Moa. *Serie Geológica* 1:3-16.
- RAMÍREZ, M.** 2002: *Estudio de beneficiabilidad de los escombros lateríticos de la región Moa*. Tesis de Maestría. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 54 p.
- ROJAS, A. L. & BEYRIS, P.** 1994: Influencia de la composición mineralógica en la sedimentación del material limonítico de frentes de explotación de la industria Pedro Sotto Alba. *Minería y Geología* 11(1):13-17
- ROJAS-PURON, A. L.** 1995: *Principales fases minerales portadores de níquel en los horizontes lateríticos*. Tesis doctoral. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 75 p.
- TIJONOV, O. N.** 1984: *Regularidades de la separación de minerales en los procesos de beneficio mineral* (en ruso). Editorial Nedra, Moscú, 294 p.
- VERA, A. Y.** 1979: *Introducción a los yacimientos de níquel cubanos*. Editorial Orbe, La Habana, 213 p.

**George Ageyi**  
Doctor en Ciencias Técnicas.  
Universidad de Minas y Tecnología, Tarkwa, Ghana

[geogeageyi@yahoo.com](mailto:geogeageyi@yahoo.com)

**Pedro E. Beyris-Mazar**  
Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Titular.  
Departamento de Metalurgia.  
Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, Cuba

[pbeyris@ismm.edu.cu](mailto:pbeyris@ismm.edu.cu)