

## **Lixiviación alcalina de las colas de la tecnología carbonato amoniacal para la extracción de aluminio**

Yennis Ávila-Torres  
Eulícer Fernández-Maresma  
Carmen Hernández-Fernández  
Yuriannis Labrada-Peña

### **Resumen**

Se estudió la termodinámica del proceso de lixiviación alcalina de las colas derivadas del proceso carbonato amoniacal para conocer la espontaneidad de las reacciones y comprobar la posibilidad de extracción del aluminio utilizando como agente lixivante el hidróxido de sodio (NaOH). Las colas, una vez caracterizadas químicamente, se lixiviaron a escala de laboratorio aplicando un diseño experimental factorial completo. La variación de energía libre indica que es posible extraer aluminio de las colas, lixiviándolas con hidróxido de sodio; para un 45 % de sólido las mayores extracciones se obtienen a 200 °C y 30 min. El silicio y el magnesio también mostraron selectividad con el reactivo utilizado.

**Palabras clave:** Lixiviación alcalina; extracción de aluminio; termodinámica; colas.

## **Alkaline leaching of the tails of the ammoniacal carbonate technology for aluminum extraction**

### **Abstract**

Thermodynamics of the alkaline leaching process of tails derived from ammoniacal carbonate technology was analyzed to know the spontaneity of the reactions that occur in the process and to verify the possibility of the aluminum extraction, employing sodium hydroxide as leaching agent. Tails, chemically characterized, were leached at laboratory scale using a complete factorial experimental design. The free energy change indicates that it is possible to extract aluminum from tail, leaching this with sodium hydroxide; for a 45 % of solids the largest extraction were obtained at 200 °C and 30 min. Silicon and magnesium also show selectivity with the reagent used.

**Key words:** Alkaline leaching; aluminum extraction; thermodynamics; tails.

## 1. INTRODUCCIÓN

El proceso hidrometalúrgico de lixiviación, ya sea esta ácida o alcalina, tiene amplia aplicación en la extracción de metales a partir de minerales pobres y difíciles de enriquecer. Al nivel mundial la lixiviación alcalina ha sido utilizada generalmente para obtener alúmina, con el método desarrollado por Karl J. Bayer en Austria, en 1888. Este proceso se fue imponiendo hasta convertirse, a partir de del 1960, en la única fuente industrial de alúmina, y por tanto de aluminio, en el mundo

En Cuba la lixiviación alcalina, se utiliza en la empresa productora de níquel de Moa *Ernesto Che Guevara* (EECG) dentro de la tecnología Caron para el procesamiento de menas lateríticas ferroniquelíferas (Fernández-Maresma 1992).

La selectividad que ofrece la lixiviación para el tratamiento de las colas industriales de la tecnología Caron motivó el uso de la vía ácida para disolver, principalmente, elementos pesados como el níquel y el cobalto. Resultados en este campo han obtenido Samalea (1996), Del Toro (2001), Palacios (2001), Garbey (2005), Godinez (2005), Ferreiro-Guerrero *et al* (2006), García *et al.* (2010) y Giralt (2010), quienes tributan al diseño de una tecnología completa para obtener el mayor número posible de elementos comercializables y, a la vez, disminuir el impacto ambiental negativo.

Los análisis químicos y mineralógicos de Ponce (1979) practicados a las colas, revelan la presencia en estas de contenidos importantes de hierro, silicio, magnesio, cromo y aluminio. La extracción de metales ligeros, como el aluminio, podría resultar un gran aporte económico al país y se concentrarían otros metales útiles para su posterior obtención, como es el caso del hierro, de amplia aplicación en la industria siderúrgica (Ferreiro-Guerrero *et al.* 2012).

Sin embargo, hasta el momento, las investigaciones no han centrado su atención en la lixiviación alcalina, método que tiene gran selectividad con el aluminio y otros metales ligeros presentes en los residuos sólidos (colas). Es por ello que esta investigación tiene como objetivo realizar el análisis termodinámico del proceso de lixiviación alcalina para la extracción del aluminio contenido en las colas utilizando como agente lixivante el hidróxido de sodio (NaOH).

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó un muestreo por pozos en una amplia sección de la presa de colas, tomando muestras a 50 cm de profundidad y 100 m de distancia entre pozos, aproximadamente. Para homogenizar y lograr la

representatividad se empleó el método del anillo y el cono (Mitrófanov *et al.* 1974a).

Experimentalmente se simuló, a escala de laboratorio, el proceso de lixiviación alcalina con un reactor de agitación mecánica, aplicando un diseño de experimentos factorial completo, el cual permite realizar todas las posibles combinaciones entre las variables en estudio y los niveles escogidos, y determinar la influencia de los parámetros presentes en el proceso. Se tomaron dos niveles y tres factores; la tabla 1 muestra la matriz de experimentación obtenida. El número de experimentos se determina (Mitrófanov *et al.* 1974b) por la expresión siguiente:

$$N = n^{\theta}$$

$$N = 2^3$$

$$N = 8$$

N: número de experimentos

n: número de niveles

$\theta$  : número de factores.

Tabla 1. Matriz de experimentación

Nº de Exp.	Temp. (°C)	C(NaOH), (g/L)	% sólido
1	250	300	45
2	200	300	45
3	250	270	45
4	200	270	45
5	250	300	42
6	200	300	42
7	250	270	42
8	200	270	42

Las condiciones de trabajo se escogieron a partir de la teoría planteada por el método de Bayer (1888) con el objetivo de lograr una solución de aluminato y, a partir de esta, obtener el aluminio.

El análisis químico de las colas se realizó por absorción atómica en la entrada y salida del proceso. Los resultados se contrastaron con los obtenidos por Ponce (1979).

## 2.1 Composición granulométrica de las colas

Se utilizaron para este estudio los resultados granulométricos obtenidos por Rojas-Purón & Turro-Brefe (2003) para las colas del proceso

amoniaco de la EECG, usando los tamices: 0,175 mm; 0,147 mm; 0,074 mm y 0,044 mm. Los referidos autores definen tres grupos granulométricos, en los que predomina, con un 66 % en peso de la muestra, una fracción muy fina (menor a 0,044 mm). Alrededor del 3 % lo componen partículas gruesas, entre 0,147 y 0,175 mm y el resto son partículas entre 0,044 y 0,147 mm.

Estos datos apuntan a que las colas derivadas del proceso carbonato-amoniaco tienen una granulometría esencialmente fina, lo cual concuerda con los resultados de Ponce (1979) para las colas de la empresa René Ramos Latour, de Nicaro, que utilizaba esta misma tecnología.

## **2.2. Composición mineralógica**

La maghemita es una fase mineral principal de las colas, con un cuadro difractométrico bien definido (Rojas-Purón & Turro-Brefe 2003). Constituye un material de color negro muy magnético, brillo semimetálico, y se caracteriza por una granulometría fina, inferior a los 0,044 mm; el material es predominantemente magnético. La técnica de difracción de rayos X, según método policristalino, mostró que las características mineralógicas de las colas pueden ser expresadas por la presencia de las siguientes fases minerales:

Maghemita ( $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$ )

Trevorita ( $\text{NiFe}_2\text{O}_4$ )

Magnesio cromita [ $(\text{Mg},\text{Fe})\text{Cr}_2\text{O}_3$ ]

Donathita [ $(\text{Fe},\text{Mg})(\text{Cr},\text{Fe})_2\text{O}_4$ ]

Cuarzo ( $\text{SiO}_2$ )

Fayalita  $(\text{Fe},\text{Mg})_2(\text{SiO}_4)$

Forsterita- $\text{Fe}(\text{Mg},\text{Fe})_2(\text{SiO}_4)$

Corindón ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )

## **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **3.1. Características químicas**

De la tabla 2 puede inferirse la presencia de un mineral polimetálico que al llevarlo a un proceso previo de beneficio se aprovecharía integralmente.

Tabla 2. Composición química de los elementos no lixiviados (colas)

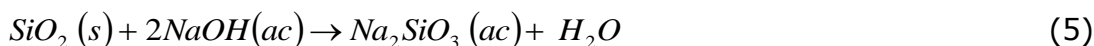
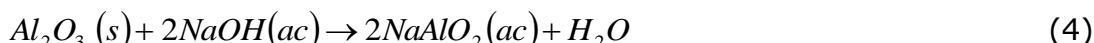
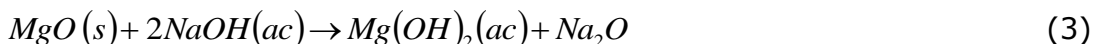
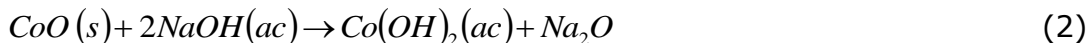
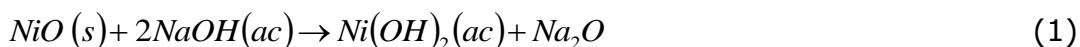
Elementos (g/L)							
Ni	Co	Fe	Mg	Mn	Al	Cr	SiO <sub>2</sub>
0,274	0,086	52,33	4,77	0,76	4,5	1,83	5,65

### 3.2. Regularidades físico-químicas

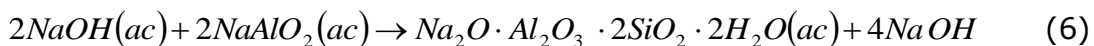
La relación entre las variables e estudio (temperatura, concentración de hidróxido de sodio (NaOH) y el contenido de sólido) requieren partir de la termodinámica para conocer las principales reacciones del proceso.

#### 3.2.1. Análisis termodinámico

Las principales transformaciones físico-químicas que ocurrirán durante el proceso, según la forma en que se encuentran los diferentes compuestos son:



El silicato de sodio, al reaccionar después en la solución con el aluminato de sodio, forma hidrosilicato de aluminio de sodio insoluble:



Según indica la ecuación 6, se produce una eliminación del SiO<sub>2</sub> y esto ocasiona ciertas pérdidas de álcali y alúmina ya extraída.

Los óxidos de Al, Si y Mg contenidos en las fases mineralógicas de las colas reaccionarán con mayor facilidad. Las reacciones secundarias ocurren en menor medida por la poca solubilidad que presentan ante este agente lixivante.

Para realizar el cálculo termodinámico de las reacciones planteadas se utiliza la ecuación de Gibbs-Helmholtz, cuyo fundamento radica en la

relación entre la variación de energía libre ( $\Delta G$ ), la variación de entalpía ( $\Delta H$ ), el producto de la temperatura ( $T$ ) y la variación de entropía ( $\Delta S$ ).

$$\Delta G = \Delta H - T * \Delta S \quad (7)$$

Para la determinación de esta magnitud ( $\Delta G$ ), en todos los rangos de temperatura, es necesario conocer la dependencia matemática de esta en función de la temperatura, según la ecuación de Kirchoff y la de Gibbs-Helmholtz.

Al rectificar en la ecuación 9 los valores de ( $\Delta G$ ), ( $\Delta H$ ) y ( $\Delta S$ ), a partir de las condiciones de temperatura y capacidades caloríficas ( $C_p$ ), la expresión que se obtiene es:

$$\Delta G = \Delta G_{298}^0 + \int_{298}^T \Delta C_p dT - T \int_{298}^T \frac{\Delta C_p}{T} dT \quad (8)$$

O de una forma más detallada:

$$\Delta H = \Delta H_{298}^0 + \int_{298}^T C_p dT \quad (9)$$

Por la variación de la presión de vapor total en el sistema cerrado se puede decir que un incremento de la temperatura trae consigo un aumento de la presión, pero no existe una influencia del valor de la capacidad calorífica directamente sobre la presión, de ahí que se obtiene un término por medio de la expresión 10.

$$\Delta S = \Delta S^0 + \int_{298}^T \frac{C_p}{T} dT - R \ln \frac{P}{P_0} \quad (10)$$

Y como resultado se obtiene de forma integrada la ecuación de Gibbs:

$$\Delta G = \Delta H_{298}^0 - T \Delta S_{298}^0 + \int_{298}^T C_p dT - T \int_{298}^T \frac{C_p}{T} dT + RT \ln \frac{P}{P_0} \quad (11)$$

El comportamiento de las principales transformaciones físico-químicas durante el proceso de lixiviación posee la siguiente forma (Figura 1):

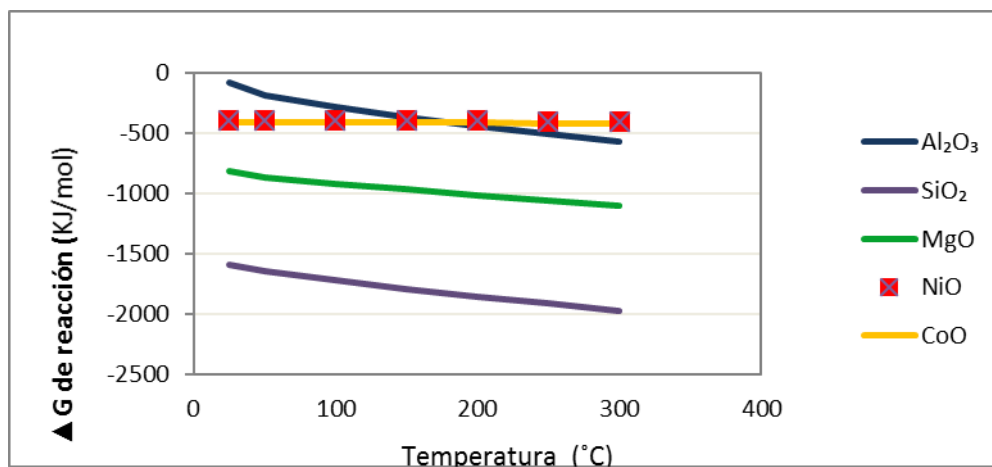


Figura 1. Variación del  $\Delta G$  de reacción con respecto a la temperatura.

En el gráfico se muestra la estabilidad de los compuestos analizados a las diferentes temperaturas que se realizó el estudio termodinámico. Se puede apreciar que las reacciones del Al, SiO<sub>2</sub> y Mg son las más espontáneas en el proceso, sin embargo, el cobalto y el níquel no varían su energía libre con el aumento de la temperatura.

### 3.4. Concentración de las especies metálicas lixiviadas

En todos los casos, para el tiempo de 60 min se logró lixiviar la mayor cantidad, como se muestra en las Figuras 2 y 3; no obstante, el proceso obtiene valores significativos a partir de 30 min y pudiera considerarse que a 45 min se logra pasar a solución un alto contenido de los elementos.

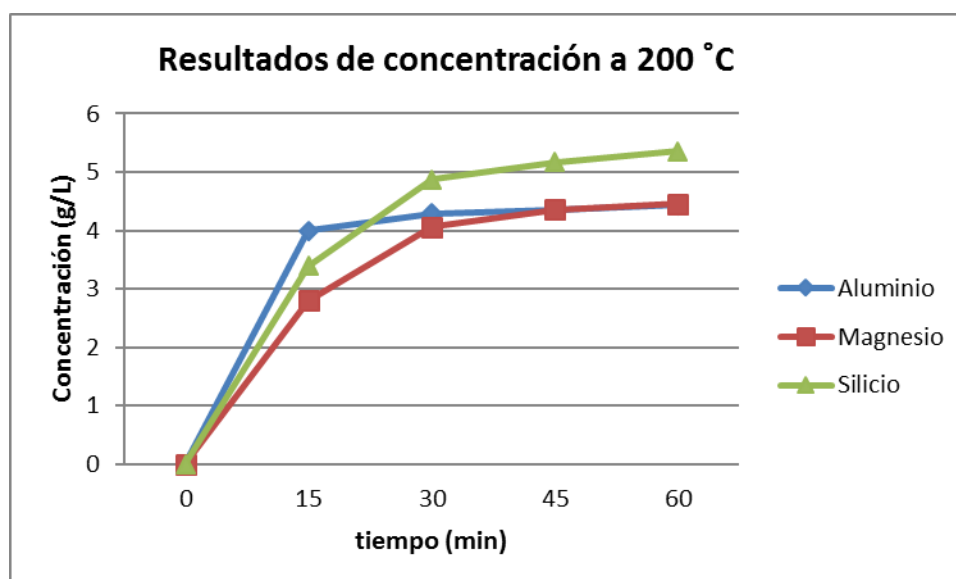


Figura 2. Concentración de SiO<sub>2</sub>, Al y Mg en el tiempo a 200 °C.



Para la extracción de  $\text{SiO}_2$ , a  $200\text{ }^\circ\text{C}$ , se logró recuperar  $5,36\text{ g/L}$ , a  $60\text{ min}$ , el cual fue el tiempo máximo empleado; sin embargo, en los  $30$  y  $45\text{ min}$  se obtuvieron  $4,87\text{ g/L}$  y  $5,18\text{ g/L}$ , respectivamente, valores que representan extracciones de  $86,27\%$  y  $91,61\%$ .

En la Figura 3 se observa un crecimiento brusco de la recuperación del  $\text{SiO}_2$  y el  $\text{Mg}$ , en los  $45\text{ min}$  prácticamente todos los elementos se han lixiviado; los valores obtenidos en estas condiciones fueron de  $5,54\text{ g/L}$  y  $4,45\text{ g/L}$ . El aluminio mostró alta velocidad de reacción; a los  $15\text{ min}$  se lograron buenos resultados, y a los  $45\text{ min}$  la extracción fue de  $99,78\%$ , para una concentración de  $4,36\text{ g/L}$ .

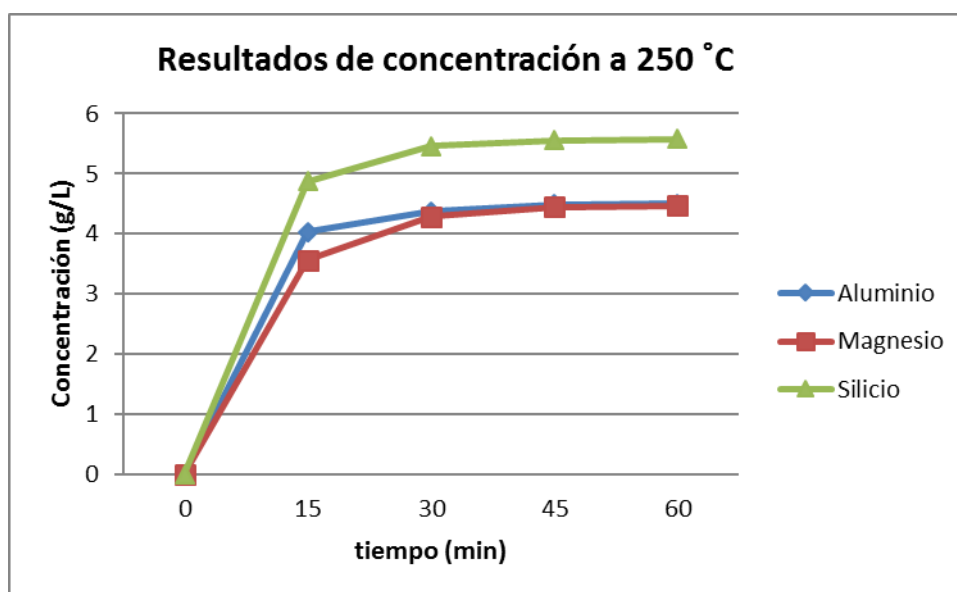


Figura 3. Concentración de  $\text{SiO}_2$ , Al y Mg en el tiempo a  $250\text{ }^\circ\text{C}$ .

A continuación se representan en las Figuras 4 y 5 los niveles de extracción del Al, Mg y  $\text{SiO}_2$ , logrados en la lixiviación en los tiempos de mejores extracciones, para  $200\text{ }^\circ\text{C}$  y  $250\text{ }^\circ\text{C}$ .

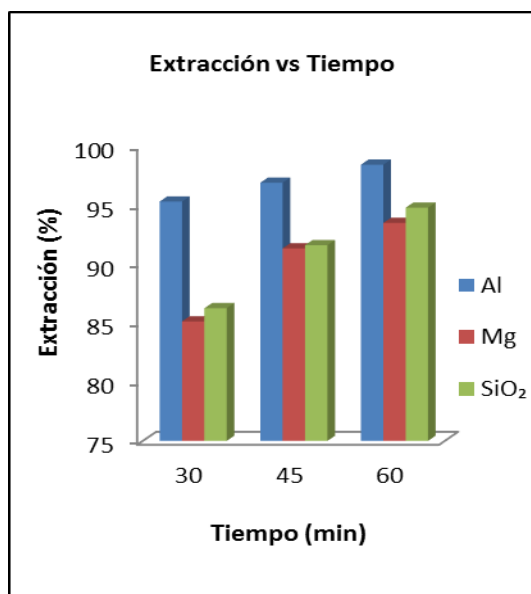


Figura 4. Extracción de SiO<sub>2</sub>, Al y Mg a 200 °C.

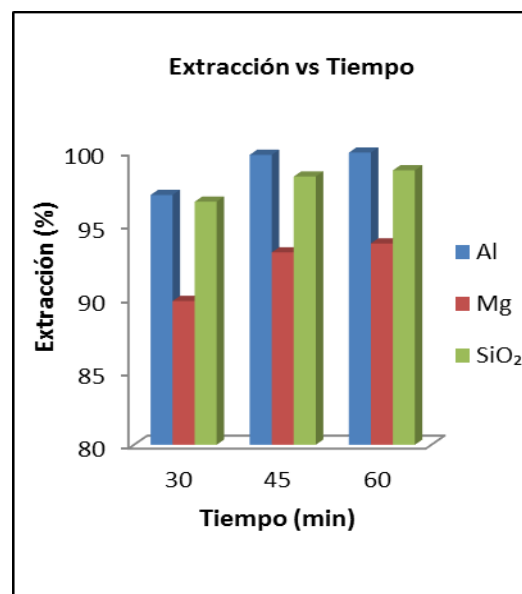


Figura 5. Extracción de SiO<sub>2</sub>, Al y Mg a 250 °C.

El aluminio mostró su selectividad con el reactivo lixiviante utilizado, a los 30 min fue el elemento de mayores extracciones para ambas temperaturas. A 250 °C se obtuvieron mayores extracciones para todos los elementos.

A los 30 min la extracción del aluminio fue de 95,31 % (Figura 4); en este tiempo el magnesio y el dióxido de silicio fueron extraídos en un 85,14 % y 86,27 %, respectivamente, valores inferiores comparados con lo obtenido para tiempos de 45 y 60 min. A mayores tiempos el aluminio experimenta un ligero aumento, alcanzando hasta el 98 % a los 60 min, mientras que el magnesio y el dióxido de silicio alcanzan extracciones de 93,50 % (Mg) y 94,80 % (SiO<sub>2</sub>).

Para temperatura de 250 °C (Figura 5) se obtienen extracciones de dióxido de silicio cercanos a los de aluminio (96,58 % de SiO<sub>2</sub> y 97,04 % de Al). Este comportamiento se mantiene para los tres valores de tiempo. La lixiviación del dióxido de silicio trae consigo reacciones colectoras del aluminio, que generan pérdidas en forma de lodos, lo que encarece el proceso y eleva el consumo de reactivo, por esta razón no es recomendable trabajar a temperatura de 250 °C.

#### 4. CONCLUSIONES

La variación de energía libre demostró la posibilidad de ocurrencia de la reacción del aluminio al utilizar el hidróxido de sodio como agente

lixiviante y se comprobó que las mejores condiciones para mantener la rentabilidad del proceso extractivo fueron a 200 °C, en un tiempo de 30 min, para un 45 % de sólido.

## 5. REFERENCIAS

- BAYER, K.J. 1888. Process of obtaining alumina. United State Patent Office. Patent No. 382.505, May 8, 1988
- BUSTAMANTE ET AL. 2007. Estudio preliminar de la lixiviación de las colas de Nicaro con disoluciones ácidas de HCl y H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. *Revista Cubana de Química*. XIX (3): 3 -9.
- DEL TORO A. 2001. Lixiviación de residuales sólidos de la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara" utilizando el sulfato de hierro II como agente reductor y ácido sulfúrico para lixiviar. Trabajo de diploma. Moa, ISMM.
- FERNÁNDEZ-MAREMA 1992. Estudio preliminar de la lixiviación ácida en los residuos sólidos de la lixiviación alcalina de las lateritas. *Minería y Geología*, 9 (1):19-26
- FERREIRO-GERRERO Y.; SANTIESTEBAN, E.; LEYVA, E.; LEYVA, O. Y MACHADO, M. 2006. Evaluación experimental de la recuperación del cobalto con ácido orgánico a partir de las colas de la empresa "René Ramos Latour" de Nicaro. *Tecnología Química*. XXVI (2): 76-82
- FERREIRO-GERRERO, SÁNCHEZ A.; SANTIESTEBAN, E. Y PALACIOS, A. 2012. Obtención de metalizados de hierro a partir de los residuos sólidos de la industria del níquel en Nicaro, Cuba. *Minería y Geología*. 28 (1): 62-75
- GARBEY, A. 2005. Lixiviación orgánica de las colas de la Empresa "Comandante Ernesto Che Guevara" de Moa para la recuperación de cobalto. Trabajo de Diploma, ISMM Moa, 75 p.
- GARCÍA, E.; PALACIOS, A.; RODRÍGUEZ, M. & HERNÁNDEZ, Y. 2013. Lixiviación ácida de residuales sólidos de la tecnología carbonato amoniacal. *Minería y Geología*. 29 (1): 17-28
- GIRALT, G.; PENEDO, M.; HERNÁNDEZ, J. Y ARIZA, S. 2010. Comportamiento de la extracción y selectividad de níquel y cobalto de colas amoniacales con ácido piroleñoso de bagazo de caña. *Tecnología Química*, XXX (3): 58-66.
- GODINEZ, M. 2005. Lixiviación del sólido residual de la tecnología carbonato amoniacal con ácido sulfúrico y sulfato de Fe II como agente reductor en lecho fijo en columnas. Trabajo de Diploma. ISMM Moa, ISMM.
- MITROFÁNOV, I.; BARSKI, L.A. & SAMYGIN, V.D. 1974a: Capítulo V. Selección de muestras para la investigación. Traducción al español. Sagués. 1982. Investigación de la capacidad de enriquecimiento de los minerales. Editorial Mir, Moscú, 102 - 116
- MITROFÁNOV, I.; BARSKI, L.A. & SAMYGIN, V.D. 1974b: Capítulo IV. Métodos estadísticos de planificación de los experimentos. Traducción al

- español. Sagués. 1982. Investigación de la capacidad de enriquecimiento de los minerales. Editorial Mir, Moscú, 102 - 116
- PALACIOS, R. A. 2001: *Recuperación de cobalto por medio de la lixiviación ácida de los escombros lateríticos*. Tesis doctoral. Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, 100 p.
- PONCE, N. 1979. Mineralogía y composición sustancial del yacimiento artificial Colas de Nicaro. Informe. Biblioteca Empresa Niquelera René Ramos. 7p
- ROJAS-PURÓN, A. & TURRO-BREFFE, A. 2003. Composición mineralógica de las colas del proceso Caron en Moa, Holguín, Cuba. *Minería y Geología*, 19(3-4):21-28
- SAMALEA G. 1996. Lixiviación de las colas viejas de la tecnología carbonato amoniacal en medio ácido con SO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>. Informe Técnico. Centro de Investigación del Níquel, Nicaro. Cuba

**Yennis Ávila Torres [yavila@ismm.edu.cu](mailto:yavila@ismm.edu.cu)**

Ingeniera Metalúrgica. Profesora Instructora del Departamento de Metalurgia-Química. Instituto Superior Minero Metalúrgico, Holguín, Cuba.

**Eulícer Fernández Maresma [efmaresma@ismm.edu.cu](mailto:efmaresma@ismm.edu.cu)**

Doctor en Ciencias Metalúrgicas. Profesor Titular. Departamento de Metalurgia-Química. Instituto Superior Minero Metalúrgico, Holguín, Cuba.

**Carmen Hernández Fernández [hfdz@ismm.edu.cu](mailto:hfdz@ismm.edu.cu)**

Master en Metalurgia. Profesora Asistente. Departamento de Metalurgia-Química. Instituto Superior Minero Metalúrgico, Holguín, Cuba.

**Yuriannis Labrada Peña [ylabrada@ecg.moa.minbas.cu](mailto:ylabrada@ecg.moa.minbas.cu)**

Ingeniero Metalúrgico. Empresa Comandante Ernesto Che Guevara, Holguín, Cuba.