Estudio de la extracción de Ni, Co y Fe en lateritas por medio de lixiviación ácida en columnas

C. di Yorio*, E. Betancourt*, R. Vivas* y J. Rus**

Resumen

En el siguiente trabajo se plantea la posibilidad de la extracción de níquel por vía hidrometalúrgica en lateritas niquelíferas. El mineral se caracteriza con el fin de conocer su composición y estructura, por medio de difracción de rayos X, análisis químico elemental por microscopía electrónica y análisis químico cuantitativo. El trabajo busca estudiar la viabilidad técnica de la extracción de níquel y cobalto por medio de la aplicación de la lixiviación en pila. Una vez caracterizado el mineral, se mezcla con ácido sulfúrico a relaciones 0,05, 0,1 y 0,2 g ácido/g mineral y se procede a aglomerar en pellas y en pasta con el fin mejorar la percolación en el lecho de la columna que, debido a la naturaleza arcillosa del mineral, es de 0,305 a $1,06 \times 10^{-1} \text{ l/h}\cdot\text{m}^2$ y, en la condición de aglomerado, la percolabilidad mejora al intervalo 3,05 a $6,11 \times 10^{-1} \text{ l/h}\cdot\text{m}^2$. Los aglomerados son tostados con el fin de consolidarlos y adecuar químicamente el mineral, mediante la sulfatación de los óxidos del mineral a altas temperaturas, para que sea susceptible a la lixiviación. Este preparado del mineral es sometido a diversos ensayos de lixiviación como ensayos batch y ensayos en columnas. Los ensayos batch fueron realizados para distintas relaciones sólido-líquido de 0,05 a 0,50103 g/l, distintas concentraciones de la solución lixivante y distintos tiempos de reacción de 24 a 168 h. En cuanto a los ensayos en columnas, las variables estudiadas fueron la relación de mezcla ácido/mineral, la continuidad del riego de lixiviación, la reutilización del licor de lixiviación y la temperatura de tostación, la cual se realizó 673, 873 y 1.023 K. Con estas pruebas, se encontraron condiciones de selectividad para las cuales el níquel y el cobalto se hacen solubles con respecto al hierro, recuperando 17 veces más níquel que hierro y hasta 26 veces más cobalto que hierro y con una excelente velocidad del proceso, en donde la mayoría de la recuperación se realiza en las primeras 24 h.

Palabras Clave

Lixiviación. Ácido sulfúrico. Percolación. Níquel. Cobalto.

Ni, Co recovery study and Fe by acid leaching in columns

Abstract

In the following work the possibility of the nickel recovery by hydrometallurgy extraction for nickeliferous laterites is studied. The work looks for to study the technical viability of the extraction of nickel and cobalt by means of the application of heap leaching. The ore is chemically and physically characterized with the purpose of analyzes its composition and mineral phase, by means of x-rays diffraction, quantitative chemical analysis and elementary chemical analysis by electronic microscopy. Once the ore is characterized, it is mixed with sulfuric acid to relations 0.05; 0.1 and 0.2 g acid/g to agglomerated pellets and paste, with the aim to improve the percolation in column, due to the argillaceous nature of the ore leaching rate ranged from 0.305 to $1.06 \times 10^{-1} \text{ l/h}\cdot\text{m}^2$ and in the agglomerate condition of the percolation $\text{l/h}\cdot\text{m}^2$ improves at interval 3.05 to $6.11 \times 10^{-1} \text{ l/h}\cdot\text{m}^2$. Additionally the agglomerate ones are roasted with the purpose of consolidating them and chemically preparing the ore so that it is susceptible to the leaching, by means of oxides sulphation

* Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencias de los Materiales.

** Fundación Instituto de Ingeniería, Centro de Tecnología de Materiales.

of the ore to high temperatures. This ore preparation is subject under diverse leaching tests like: dynamic tests and columns tests. The dynamic tests were made for different relations solid-liquid from 0.05 from 0.5×10^3 g/l, different concentrations of the leaching solution and different reaction times from 24 to 168 h. As far as the columns tests showed, the variables studied were acid/ore mixture ratio, continuity of the leaching irrigation, reusability of the liquor of leaching and roasted temperature which was done from 673, 873 and 1023 K. With these tests times selectivity for nickel and cobalt versus iron were found, obtaining recovery 17 more times nickel than iron and up to 26 more times cobalt than iron and with an high process speed, where most of the recovery is made in the first 24 h.

Keywords

Leaching. Sulfuric acid. Percolation. Nickel. Cobalt.

1. INTRODUCCIÓN

La extracción y recuperación hidrometalúrgica del níquel y el cobalto está basada en tres procesos como son: lixiviación ácida a presión, tostación-reducción y lixiviación amoniacal (en lateritas) y tostación sulfatante-lixiviación para las menas de sulfuros^[1-5]. La disponibilidad de menas de sulfuros ha decrecido notablemente en los últimos años, por lo que la importancia de los yacimientos lateríticos se ha incrementado^[1]; adicionalmente, este tipo de yacimiento es abundante en regiones tropicales donde hay baja explotación. De esta manera, los estudios para la determinación de la ruta tecnológica a aplicar están básicamente orientados a los procesos antes mencionados para las lateritas^[1]. Trabajos publicados en los años ochenta^[6] encontraron un incremento notable en la selectividad en la lixiviación ácida del níquel, *versus* hierro, por medio de tostación sulfatante, empleando H_2SO_4 como fuente de azufre. Recientemente, procesos alternos de tostación sulfatante-lixiviación agitada^[7], han sido explorados, esta vez, empleando SO_2 y aire. Por otra parte, estudios detallados de lixiviación a presión^[8 y 9] proponen mejoras y nuevos conocimientos de los procesos de lixiviación ácida.

En el presente trabajo se propone una ruta alternativa de procesamiento de lateritas niquelíferas venezolanas, aglomerando la mena en pellas o en una simple pasta mediante el empleo de una solución de H_2SO_4 , seguido de un proceso de tostación hasta 923 K en aire para acondicionar la mena a la lixiviación y posterior lixiviación en columnas.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1. Recolección de muestras

Las muestras fueron extraídas del depósito mineral, de diferentes frentes y cotas con el fin de obtener un perfil representativo del mismo.

2.2. Caracterización

Se emplearon distintas técnicas sobre la mena y sobre la mena tratada para observar los cambios inducidos, sobre la estructura química de esta, para lo cual se empleo difracción de rayos X^[10]. Se sometió a difracción a las muestras representativas de cada lugar de recolección del depósito, así como al compuesto (mezcla de muestras de distintos sitios del depósito) y a la mena tostada en presencia de ácido^[7].

2.3. Análisis elemental por microscopia electrónica

Las muestras fueron sometidas al análisis mediante EDX. Las muestras seleccionadas para tal fin fueron.

- Mena en bruto
- Mena aglomerada con relación 0,2 g/g y tostado a 673 K.
- Colas de la mena aglomerada con relación 0,2 g/g y tostado a 673 K.
- Mena aglomerada con relación 0,2 g/g y tostado a 1.023 K.
- Colas de la mena aglomerada con relación 0,2 g/g y tostado a 1.023 K.
- Mena peletizada con relación 0,1 g/g y tostado a 673 K.

Se busco relacionar morfología con composición y relaciones entre los elementos.

2.4. Análisis químico cuantitativo

Para saber el porcentaje de los metales de interés en el mineral se realizó el análisis químico cuantitativo. Dicho análisis se efectuó por dos vías, llevando el mineral a solución para, posteriormente, medir los porcentajes por medio de adsorción atómica^[10] en la solución obtenida. Estos métodos fueron la fusión de las muestras en crisoles de grafito y posterior disolución con ácido clorhídrico y la digestión de las mismas en agua regia.

La mena es acondicionada para todos los ensayos, dependiendo de las necesidades de este.

2.5. Preparación de la mena

La mena se homogeniza, tritura y muele para, posteriormente ser mezclada con ácido a relaciones 0,05, 0,1 y 0,2 en peso de ácido/mena. La mena preparada con ácido es peletizada para mejorar la percolabilidad^[11] en pellas de tamaños variables de 0,5 a 1,3 10⁻²m de diámetro para las relaciones de 0,05 y 0,1 g/g. La otra técnica empleada para la aglomeración consistió en crear una pasta o especie de barro con la mena mezclada con el ácido, la cual se seca en la estufa quedando como una pastilla dura que es fragmentada por impacto y triturada para dar el tamaño final a los aglomerados. Los aglomerados se tostaron en un horno de mufla a gas a temperaturas de 673, 873 y 1.023 K.

Al estar listo el mineral, de esta manera, se procedió a la realización de los ensayos de lixiviación, que a su vez son de dos tipos: agitados y estáticos.

2.5.1. Ensayos agitados

Se prepara una pulpa mezclando mena con ácido, todo sometido a agitación en un matraz de vidrio el cual es puesto en agitación en un orbital^[12]. Las variables controladas, en este caso, son el tiempo de agitación, la relación sólido-líquido de la pulpa y la concentración de la solución lixivante.

2.5.2. Ensayos estáticos

Los ensayos agitados dan las bases de las condiciones a emplear en los ensayos estáticos, los cuales simulan el comportamiento en una pila de lixiviación. Esta, consiste en una columna en la que se coloca la MENA y que posee una tapa en su parte inferior con unos pequeños orificios que permiten la salida del licor. Encima del mineral se coloca una capa de algodón y sobre ésta una capa de goma-espuma las cuales distribuyen lo mejor posible la solución lixivante a través de la sección del área de la columna. Se realizaron ensayos exploratorios^[13] con columnas transparentes con dimensiones de: diámetro, 0,063m y 0,07m, con una altura del mineral de 0,3 m, aproximadamente, que permiten observar la dinámica del flujo por el lecho del mineral. Estos ensayos exploratorios de columna, se hicieron con las siguientes modalidades:

- Con mena en bruto.
- Con mena en bruto con solución recirculado.
- Con mena peletizada con bentonita
- Con mena aglomerada y tostada.

Los ensayos de columna finales se realizaron con el mineral acondicionado para una mayor recuperación, en columnas de PVC, de 0,078m de diámetro y

una altura de 0,23 m, aproximadamente, con las siguientes modalidades:

- Con mena peletizada con ácido sulfúrico con relaciones de 0,05 y 0,1 g/g ácido/mineral y tostado a 673, 873 y 1.023 K.
- Con mena aglomerada con ácido sulfúrico con relación de 0,2 g/g ácido/mineral con ácido sulfúrico y tostado a 673, 873 y 1023 K.

Todas las soluciones recolectadas de los ensayos de lixiviación fueron analizadas por adsorción atómica con el fin de conocer la el porcentaje de hierro, níquel y cobalto recuperados.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1. Caracterización del mineral

De la caracterización química de la mena los resultados son de 1,092 ± 0,123 % de níquel, 0,101 ± 0,020% de cobalto y 30,8 ± 1,5 % de hierro.

De forma más detallada, podemos apreciar en la tabla I la composición de la mena según su granulometría, pudiéndose apreciar que el níquel solo se ve empobrecido para la granulometría retenida en la malla 16, aunque esta no se descarta por el alto contenido de cobalto presente en ella.

Por otra parte, el análisis por medio de difracción de rayos X arrojó la composición mineralógica de la mena. El níquel se encontró en tres posibles fases la Willemseita (Ni,Mg)3Si₄O₁₀(OH)₂, la Garnierita (Ni,Mg)3Si₂O₅(OH)₄ y la Trevorita NiFe₂O₄.

Por el alto contenido de hierro es fácil identificar las fases en las que se encuentran en este, como la hematina, Fe₂O₃ y la Goetita, Fe₂O₃.H₂O.

Se ve la gran afinidad que tiene el mineral a relacionarse químicamente con el agua, como sucede en el caso de la Garnierita, la Willemseita, la Goetita, además de las arcillas encontradas en los difracto-

Tabla I. Análisis químicos por granulometría, para cobalto y níquel en el mineral.

Table I. Cobalt and nickel chemical analysis by size distribution.

Tamiz	% Níquel	% Cobalto
Malla 16	0,560±0,001	0,142±0,005
Malla 30	1,176±0,080	0,355±0,006
Malla 70	1,189±0,023	0,197±0,002
Malla 100	1,039±0,011	0,078±0,001
Malla 150	1,006±0,056	0,054±0,007
Malla 270	0,982±0,024	0,032±0,009
Malla 400	1,085±0,064	0,037±0,011

gramas, las cuales son de la familias de la Montmorillonite y de la Kaolinita.

3.2. Ensayos de percolación

Estos, miden una variable fundamental en los procesos de lixiviación en pila y, como era de esperar, debido a la característica arcillosa y granulométrica del mineral, la percolación del mineral en bruto triturado fue deficiente, alcanzándose valores de percolación del orden de $0,30$ a $1,06 \cdot 10 \text{ l/h} \cdot \text{m}^2$; esto, indica que es imposible aplicar un proceso de lixiviación en pila para este material. Al peletizar o aglomerar la mena la percolación aumenta a un intervalo de $3,05$ a $6,11 \cdot 10 \text{ l/h} \cdot \text{m}^2$ lo que indica un aumento de entre 3 y 20 veces más percolabilidad en la mena aglomerada que en la mena sin aglomerar, como se ve en la bibliografía^[11].

3.3. Ensayos de lixiviación

3.3.1. Ensayos agitados

En estos se recogen los datos de cómo el mineral se comporta frente a las distintas variables de la solución lixivante, esto es, relación sólido líquido, concentración de la solución lixivante, tiempos de reacción y acondicionamiento químico del mineral.

La relación sólido/líquido (Kg/l) indica con cuánto volumen de solución hay que trabajar, además de ser muy importante por el calculo del flujo másico de agua a emplear, por lo que conviene que esta relación sea lo más alta posible.

Como se ve en la figura 1 la relación sólido/líquido no parece tener una influencia significativa sobre la recuperación del níquel, lo que indica que los ensayos se pueden realizar con poca solución y ello

Figura 1. Influencia de la relación sólido/líquido sobre la recuperación del Ni, en ensayos *batch* a 0,5M.

Figure 1. Ni recovery influence by solid/liquid relation, in dynamic tests at 0.5M.

es beneficioso desde el punto de vista de un menor consumo de agua y, al mismo tiempo, se obtiene una solución más concentrada.

En cuanto a la concentración de la solución lixivante se busca que esta sea lo más diluida posible. En la figura 2 se observa el efecto de la molaridad sobre la recuperación del níquel.

La concentración de la solución lixivante varia la extracción de níquel. Se observa que para extraer 17,35% de níquel es necesaria una solución, sólo, 1M, mientras que para obtener 30% se necesita una concentración 15M. Esto, indica que para aumentar la recuperación a un poco menos del doble es necesaria la utilización de soluciones 15 veces más concentradas, lo que implica, en planta, un alto costo en consumo de reactivos. Por tanto, no es rentable para el proceso aumentar tan bruscamente la concentración de los reactivos si la recuperación no aumenta de la misma manera.

Tabla II. Ensayos "batch" realizados con mineral.

Table II. Dynamic test performed with ore.

Premezclado con ácido a una relación 0.05 g/g y calcinado a 873 K Ensayo	1	2	3	4
R : Sólido / líquido (g/l)	0,285	0,285	0,285	0,285
mg/l de Ni en solución	538,8	588	715	720
% Níquel recuperado	18,85	20,58	25,02	25,20
mg/l de Co en solución	128,3	148	155	160
% Cobalto recuperado	44,90	51,80	54,25	56,00
mg/l de Fe en solución	2.300	3.000	5.000	6.800
% Hierro recuperado	2,79	3,63	6,06	8,24
Molaridad de la solución lixivante	0,5	1	3	5
Tiempo (h)	24	24	24	24

Tabla III. Ensayo en matraz realizado con mineral premezclado con ácido a una razón de 0,5 g/g.

Table III. Dynamic test done with pre mixed acid ore at a 0.5 g/g rate.

R : Sólido / líquido	0,285
$\times 10^{-3}$ kg/m ³ de Ni en solución	1.774
%Níquel recuperado	62,09
$\times 10^{-3}$ kg/m ³ de Co en solución	146,7
%Cobalto recuperado	51,34
$\times 10^{-3}$ kg/m ³ de Fe en solución	25.650
%Hierro recuperado	31,07
Molaridad de la solución lixiviante	0,5
Tiempo (h)	24

Figura 2. Influencia de la concentración de la solución lixiviante sobre la recuperación del Ni, con mineral pasante de la malla 200 en tamizaje en seco.

Figure 2. Ni recovery influence on leaching concentration solution with ore passing 200 messes in dry screening.

En cuanto a la cinética del proceso, basado en modelos simples^[14], se ven los resultados representados en la figura 3, concretamente, la mayor parte de la lixiviación tiene lugar en las primeras 24 h del proceso; posteriormente, el proceso avanza lentamente y el aumento es, de apenas, 0,8% entre las 24 y las 72 h.

Es importante destacar que los ensayos descritos anteriormente se realizaron con el mineral sin acondicionamiento químico para la lixiviación. Este, resulta poco susceptible a la lixiviación con ácido sulfúrico por lo cual se decide tostar la mena en presencia de ácido sulfúrico para promover la formación de sulfatos solubles^[7]. Con la mena acondicionada químicamente para la lixiviación también se realizaron ensayos agitados exploratorios.

En la tabla II se observa el comportamiento de la mena acondicionada a la lixiviación con el ácido sulfúrico. En este caso, la mena se vuelve más susceptible a la lixiviación, a pesar de la baja relación ácido/mineral con la que fue tostada la mena. Como se

Tabla IV. pH de licores a relación ácido/mineral = 0,05 g/g.

Table IV. Liquor pH at acid/ore =0.05 g/g.

Vol. Circ.	673 K	873 K	1.023 K
1	0,89	0,95	0,85
2	0,98	0,93	0,86
3	1,03	1,12	0,98
4	1,20	1,21	0,99

Figura 3. Cinética del proceso de lixiviación de Ni con solución a 0,5M.

Figure 3. Ni kinetic leaching process at 0.5M solution.

ve, la lixiviación del níquel aumenta de alrededor de 6 % hasta 18,8 % para una solución de ácido sulfúrico 0,5M. Además de obtenerse excelentes valores en la recuperación del cobalto de hasta 56 %. El hierro presenta una recuperación muy baja, que convierte el proceso en una lixiviación selectiva. Estos resultados indican que esta es la ruta a seguir para el acondicionamiento de la mena para la lixiviación selectiva del níquel y el cobalto. Por esta razón se realizó un ensayo agitado con la condición máxima considerada para los ensayos. Esta condición y sus resultados se observan en la tabla III, donde se observa el aumento significativo de la recuperación del níquel pero con la limitante del aumento de la recuperación del hierro, llegando a 25g/l la concentración de este en solución, para estas condiciones.

En cuanto al efecto de la concentración de la solución lixiviante sobre la recuperación, se muestra en la figura 4. Para el aumento de la concentración, la cantidad de hierro aumenta linealmente y, para el caso del níquel y el cobalto, la recuperación tiene un aumento significativo de 0,5 a 3M. Por esta razón, se decidió mantener la concentración del ácido lo más baja posible con el fin de no elevar la concentración de hierro en el licor. Así, se estableció

Tabla V. Coeficientes de selectividad níquel/hierro α_1 y cobalto/hierro α_2 de recuperaciones para las distintas condiciones de los ensayos en columna.

Table V. Ni/Fe α_1 and Co/Fe α_2 coefficient recovery selectivity for different column test conditions.

Temperatura de tostación y relación ácido mineral	α_1	α_2
400; 0,05	1,71	3,90
600; 0,05	3,64	9,48
750; 0,05	6,22	21,51
400; 0,1	1,73	3,06
600; 0,1	4,06	7,74
750; 0,1	11,24	25,90
400; 0,2	2,41	2,30
600; 0,2	4,50	3,99
750; 0,2	17,21	15,17

Figura 4. Efecto de la concentración de la solución lixivante sobre la recuperación.

Figure 4. Leaching solution concentration effect over recovery.

la concentración de la solución de riego para los ensayos en columna en 0,5M.

3.3.2. Ensayos estáticos

Una vez realizados los ensayos agitados, de percolación y de acondicionamiento de la mena se establecieron las condiciones para la realización de los ensayos estáticos (en columnas). Con las condiciones fijas, se procedió a estudiar la recirculación del ácido en las columnas. Este efecto, se compara para las mismas condiciones de relación ácido/mineral y temperatura de tostación (0,05 g/g y 873 K). Estos resultados se ven en la figura 5.

Se puede apreciar el comportamiento de la recuperación de níquel y cobalto. La diferencia de recuperación no es significativa, lo que indica que el efec-

Figura 5 Comparación entre columnas con reutilización del licor y con utilización de licor fresco. Con relación ácido/mineral 0,05 y tostado a 873 K.

Figure 5. Comparison between columns with fresh and recycled liquor. At a 0.05M acid/ore relation and roasted at 873 K.

to de las especies disueltas en el licor no es perjudicial a la extracción. Esto, ahorra significativamente el consumo de reactivos y el espacio de almacenamiento del licor obtenido en el proceso y, como se ve en la tabla IV, el pH en el licor queda ácido libre después de pasar por el lecho de las columnas.

3.4. Recuperación de níquel

De estos resultados se dice que, para el caso del níquel, la relación ácido/mineral en la tostación de la mena juega un papel de suma importancia ya que la recuperación del níquel, es enormemente susceptible a esta. Como se observa en la figura 6, el comportamiento para todas las temperaturas de tostación es el mismo. La recuperación de níquel, en cada caso, es mayor a medida que aumenta la relación ácido/mineral. Sin embargo, esta diferencia se acentúa a medida que aumenta la temperatura. Esto quiere decir que, a mayor cantidad de ácido hay mayor formación de sulfatos solubles de níquel, lo que está en contradicción con lo expuesto en la bibliografía^[6]. La recuperación máxima del níquel es lograda a la primera circulación de la solución lixivante. A partir de esta, se mantiene bastante estable hasta el final del ensayo.

3.5. Recuperación de cobalto

Para el cobalto, existe un comportamiento relacionado para la temperatura y la relación ácido/mineral. Se aprecia, en la figura 7, que la relación ácido/mineral tiene influencia sobre la variación en la recuperación de este a los 673 K, influencia que

Figura 6. Recuperación de níquel al final de los ensayos en columna para todas las relaciones y temperaturas.

Figure 6. Ni recovery at columns tests end in all conditions.

pierde al aumentar la temperatura de tostación ya que para 873 K se ve que las relaciones de 0,05 y 0,2 tienen la misma recuperación, con excepción de la 0,1 g/g, que parece ser la mejor condición de extracción de cobalto; sin embargo, el valor discrepa sólo en un 5%, que podría ser consecuencia del error del equipo de medición. A la temperatura de 1.023 K también se reproduce el comportamiento y a 873 K, en donde la relación ácido/mineral pierde la influencia sobre la recuperación.

3.6. Recuperación de hierro

El hierro es uno de los grandes problemas de esta ruta tecnológica, por el alto consumo de ácido que produce, unido a la contaminación del licor por las altas concentraciones alcanzadas. Por esta razón se busca que el proceso sea lo mas selectivo posible. En este sentido se analizan los resultados obtenidos para decir que la concentración del ácido también influye sobre la recuperación de este. A medida que aumenta la relación ácido/mineral para una misma temperatura aumenta la recuperación de hierro. Sin embargo, se ha encontrado un efecto positivo con el aumento de la temperatura de tostación sobre la extracción del hierro. Como se ve en la figura 8, la recuperación del hierro disminuye notablemente con el aumento de la temperatura, lo que concuerda con la bibliografía^[6] que establece que el hierro forma sulfatos insolubles, siendo la temperatura la que promueve este fenómeno.

Para el caso del hierro, la recuperación de este aumenta con cada circulación de volumen de lixiviación, por lo que es recomendable reducir el número de circulación de volúmenes de ácido, en la práctica,

Figura 7. Recuperación de cobalto al final de los ensayos en columna para todas las relaciones de ácido/mineral y temperaturas.

Figure 7. Co recovery at columns tests end in all conditions.

para disminuir la concentración de la especie hierro en el licor.

3.7. Selectividad del proceso

Lo ideal en un proceso de lixiviación es que este sea selectivo y, por supuesto, en este trabajo es uno de los objetivos buscados. En las condiciones ensayadas varían las relaciones de recuperación entre los elementos estudiados. En la tabla V, se ve como cambian estos coeficientes, los cuales se designa con la letra α .

De los coeficientes de la tabla V se observa que el proceso es muy selectivo a favor a los intereses del trabajo.

Como se aprecia, la selectividad entre el níquel y el hierro aumenta con el aumento de la temperatura de tostación. Además, esta se acentúa con el incremento en la relación ácido/MENA, lo que indica que el proceso es muy selectivo para estos dos elementos, a altas relaciones ácido/mena y a altas temperaturas de tostación. En este caso, el comportamiento de los dos elementos es el deseado, sumándose a la selectividad del proceso para la mejor condición, de 0,2 g/g y tostado a 1.023 K, obteniéndose una recuperación aceptable de níquel y alcanzándose el 51% de recuperación.

En cuanto a la selectividad del cobalto con respecto al hierro no se reproduce el comportamiento descrito para el níquel. En este caso, no hay un comportamiento proporcional al la relación ácido/mineral y la selectividad, pero se observa el incremento en la selectividad para el incremento en la temperatura de tostación.

4. CONCLUSIONES

- El mineral laterítico de la mina, no es susceptible a la lixiviación directa con ácido sulfúrico diluido, a presión y temperatura ambiente.
- La tostación a 673 K permite la formación de sulfatos $\text{FeSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ y $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, responsables del aumento de la solubilidad de las especies hierro y níquel a esta temperatura de tratamiento. Para la tostación a 1.023 K se mantiene $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, mientras que el hierro evoluciona probablemente a $\text{FeH}(\text{SO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, la cual es una fase insoluble y disminuye ventajosamente la extracción del hierro.
- Las relaciones sólido-liquido estudiadas no tienen influencia sobre la recuperación.
- La recuperación de níquel aumenta con el incremento de la concentración del ácido de la solución lixiviante, pero este aumento en la recuperación es marginal respecto al aumento del contenido ácido.
- La recuperación de níquel aumenta significativamente al premezclar el mineral con ácido y tostarlo.
- La percolabilidad de la mena aglomerada aumenta de 3 a 20 veces con respecto al material sin tratamiento.
- La aplicación de riego continuo o discontinuo sobre las columnas con mineral tostado no tiene influencia significativa sobre la recuperación, solo permite obtener una mayor recuperación en la primera circulación de volumen en las columnas con riego continuo.
- La reutilización o no del licor de lixiviación no marca una diferencia en la recuperación.
- La recuperación de níquel aumenta a mayor relación ácido/mineral, y se acentúa con el aumento en la temperatura de tostación.
- La recuperación de hierro aumenta con la relación ácido/mineral, pero la influencia de la temperatura de tostación es inversa.
- La cinética de los procesos en columna es exce-

lente ya que en la mayoría de los casos la máxima recuperación se obtiene en las primeras 24 h.

- La selectividad del proceso varía con la relación ácido/mineral y con la temperatura de tostación.
- El presente trabajo se muestra como una posible ruta tecnológica para la explotación de níquel y cobalto en este tipo de mena de bajo porcentaje de estos minerales.

5. REFERENCIAS

- [1] *Proc. Nickel-Cobalt 97 Int. Symp.* – Volumen I, Susbury, Ontario, Canada, 1997, p. 406.
- [2] *AME Mineral Economics. Nickel*, 2001.
- [3] M.H. CANON, *Fundamentals and practical factors in ammonia*. Vol. JMetls, New Cork, USA, 1950, p.67.
- [4] A. DE LA CUADRA, *Nueva tendencia en los procesos de obtención de Metales*, Guayaquil, Ecuador, 1995 p. 243.
- [5] V. OPRATKO Y J. E. BELL, *Canadian patent 922903*, (1970).
- [6] R. GOMEZ, S MIRANDA, *Rev. Latinoam. Metal. Mater.* 4 (1984).
- [7] B. B. KAR, Y. V. SWAMY, *Trans.Inst. Min. Metall. C* (2001).
- [8] D. H. RUBISION Y V. G. PAPANGELAKIS, *Hydrometallurgy* 58 (2000) 13-26.
- [9] D. H. RUBISION Y V. G. PAPANGELAKIS, *Hydrometallurgy* 58 (2000) 1-11.
- [10] O. HERREROS , G. FUENTES , R. QUIROZ Y J. VIÑALS, *Rev. Metal. Madrid*, 39 (2002) 90-98.
- [11] MC CLELLAND Y POOL, *Bur.Min.* (1983).
- [12] O. COTO Y D BLAS, *Curso Perspectivas y desafíos de la biotecnología en la industria minera-metalúrgica*, Caracas, Venezuela, 2002.
- [13] O'KANE CONSULTANTS INC., *Demonstration of application of unsaturated zone hydrology for heap leach optimization*. (2000).
- [14] H. SOHN Y M. WADSWORTH, *Cinética de los procesos de la metalurgia extractiva*. Editorial Trillas, 1986, p. 545.