



Ministerio de Educación Superior
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”
Facultad Metalurgia y Electromecánica
Departamento de Metalurgia – Química

RECUPERACIÓN DE NÍQUEL Y COBALTO EN LAS COLAS DE LA EMPRESA COMANDANTE ERNESTO CHE GUEVARA

TESIS EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO EN METALURGIA Y MATERIALES

Salom Wedeinge Peuyelenga Hamunyela

Moa

2015



Ministerio de Educación Superior
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”
Facultad Metalurgia y Electromecánica
Departamento de Metalurgia – Química

RECUPERACIÓN DE NÍQUEL Y COBALTO EN LAS COLAS DE LA EMPRESA COMANDANTE ERNESTO CHE GUEVARA

TESIS EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO EN METALURGIA Y MATERIALES

Diplomante: Salom Wedeinge Peuyelenga Hamunyela

Tutores: Prof. Tit., Ing. Pedro Enrique Beyris Mazar, Dr.C.

Prof. Aux., Ing. Amaury Palacios Rodríguez, Dr.C.

Moa

2015

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo: Salom Wedeinge Peuyelenge Hamunyela el autor de este trabajo de diploma Titulado: “Recuperación del níquel y cobalto en las colas de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara”, certifico su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, el cual podrá hacer uso del mismo para fines docentes y educativos.

Para que así conste firmo la presente a los _____ días del mes de _____ del ____.

Firma del Diplomante

Tutor Dr. Pedro E. Beyris Mazar

Tutor: Dr. Amaury Palacios Rodríguez

DEDICATORIA

- *Dedico este trabajo a la gran Revolución Cubana por la oportunidad y alojamiento que me ofrece durante 6 años de formación como ingeniero.*
- *A mi gobierno (Namibia) especialmente la rama NSFAP y embajada de la república de Namibia en Cuba.*
- *Este trabajo lo dedico a mis padres mee Loide Ndahafa Nghishongwa & tate Seblon Tangeni Hamunyela por su apoyo incondicional desde mi infancia.*
- *Mis primos Johanna N. Hashiti & Lazarus Jambainge por su apoyo en todo momento durante la toma de decisión para que estudie, por todo vale la pena.*
- *Eurídice por brindarme el tiempo, apoyo, cariño y paciencia, sin los cuales el camino habría sido mucho más difícil y que han sido parte fundamental y básica en la culminación de esta etapa de mi vida.*
- *Le dedico también a quienes me dieron el valor y coraje para seguir adelante.*

AGRADECIMIENTOS

Agradezco de forma sincera la colaboración de todos aquellos que han contribuido a la realización de este trabajo y todos aquellos que me apoyaron:

- *Mis tutores al Prof. Pedro Beyris Mazar & Prof. Amaury Palacios Rodríguez y profesores que nos guiaron para ser profesionales de éxito.*
- *A mis profesores & amigos y por haberme ayudado en todos momentos difíciles de mis estudios y quienes me apoyaron a pesar de caer varias veces me ayudaron a levantarme.*
- *Mi compañero Ing. Sinh Nguyen Duy por la perfección de este trabajo y consejo.*
- *A todos aquellos profesores y maestros que en su momento, jamás dejaron de creer en mí.*

PENSAMIENTOS

Creo en el milagro de lo que puede hacer el trabajo, de lo que puede hacer la ciencia y de lo que pueden hacer los hombres.

FIDEL CASTRO RUZ

Cuando nuestras actitudes superan nuestras habilidades, aún lo imposible se hace posible.

JOHN MAXWELL COETZEE

RESUMEN

En los depósitos de colas de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara se almacenan grandes volúmenes de la misma con metales valiosos de gran interés, pero estos no se han podido extraer. El propósito de la presente investigación fue recuperar el níquel y cobalto presentes en los productos de la separación hidrogravitacional (Elutriación) a través del proceso de lixiviación buscando vías de tratamiento de las colas. Se realizó un diseño de experimento factorial multinivel para determinar la influencia de la granulometría y la densidad de las colas sobre el proceso de recuperación y extracción de níquel y cobalto. La composición química se determinó a través de la técnica de Fluorescencia de Rayos X. Los experimentos se realizaron a escala de laboratorio y los resultados no son significativos, obtenidos a través del proceso de elutriación el níquel se concentra en las arenas de tamaño mayores que 0,04 mm y densidad de 3600 kg/m^3 con valor 0,46 % de níquel y al someterlas a la lixiviación ácida las arenas mayores que 0,04 mm poseen una extracción de 72,5 % de níquel y además en el producto de reboso con tamaño menor que 0,02 mm se obtuvo una extracción de 49 % de cobalto.

Palabras claves: *Colas, elutriación, lixiviación, níquel y cobalto.*

ABSTRACT

The tailing deposits of the company Comandante Ernesto Che Guevara have huge volumes of the deposit, with valuable metals of the great interest, but have not been possible to extract. The purpose of the present investigation was to recover the nickel and cobalt present in the products of the separation hydro-gravitational (Elutriation) through the leaching process seeking for ways of treatment of the tailing. The design multilevel factorial experiments were carried out to determine the influence of the granulometry and the density of the tailing on the process of the recovery and extraction of nickel and cobalt. The chemical composition was determined through the technique of Fluorescence of X-Rays. The experiments were carried out at a laboratory scale and the results obtained are not significant, confirm that through the elutriation the nickel concentrates on the sand particles size greater than 0,04 mm and density of 3600 kg/m³ with the value of 0,46 % of nickel and when subjecting to the acid leaching the sand particles size lower than 0,02 mm possesses an extraction de 72,5 % of nickel and also in the product of the overflow with lower than 0,02 mm an extraction of 49 % cobalt were obtained.

Key words: *Tailing, elutriation, leaching, nickel and cobalt.*

ÍNDICE.....	Pág.
INTRODUCCIÓN	2
1. MARCO TEÓRICO	6
1.1. Generalidades de la concentración gravimétrica	6
1.2. Concentración por elutriación	6
1.3. Fundamentos de la lixiviación	8
1.4. Aspectos teóricos sobre el proceso de lixiviación ácida.....	10
1.5. Estado de arte.....	11
1.5.1. Investigaciones relacionadas a las colas de la tecnología Carbonato Amoniacal.	11
1.5.2. Tratamiento de las colas por el método de beneficio de materiales	11
1.5.3. Tratamiento de las colas por el método hidrometalúrgico.....	13
Conclusiones del capítulo	14
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	15
2.1. Materiales empleados	16
2.1.1. Características físicas de la materia prima (colas).....	16
2.1.2. Composición química de las colas.....	16
2.1.3. Composición mineralógica de las colas	17
2.2. Métodos empleados en la investigación	18
2.3. Reactivos, equipos y materiales utilizadas.....	18
2.3.1. Reactivos	18
2.3.2. Equipos.....	19
2.3.3. Materiales	19
2.4. Metodología de la experimentación	19

2.4.1. Muestra.....	20
2.4.2. Secado.....	21
2.4.3. Homogeneización	21
2.4.4. Pesado.....	22
2.4.5. Elutriación	22
2.4.6. Lixiviación	28
2.5. Técnicas de análisis químicos – físicos empleadas	35
2.5.1. Análisis químico por método de fluorescencia de Rayos X (FRX)	35
2.5.2. Determinación de la densidad media de las colas por método picnométrico	35
Conclusiones del capítulo	37
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	39
3.1. Composición química de las colas elutriadas	39
3.2. Resultados de la determinación de densidad de las colas.....	40
3.3. Análisis estadísticos de los resultados de la elutriación	41
3.4. Influencia de los principales parámetros en la elutriación	45
3.5. Análisis de los resultados de la lixiviación.....	47
3.6. Evaluación económica	53
3.7. Evaluación ecológica	54
Conclusiones del capítulo	55
CONCLUSIONES	56
RECOMEDACIONES.....	57
BIBLIOGRAFÍA	58
ANEXO	62

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

Cuba ocupa un lugar cimero en las reservas mundiales de minerales lateríticos de níquel, los que están caracterizado por una distribución desigual de los valores metálicos en las distintas capas que componen el perfil ferruginoso. De lo cual se deriva que las tecnologías diseñadas para procesarlos no logren su aprovechamiento racional, en el que se generan grandes volúmenes de residuales de los procesos mineros y tecnológicos.

Los yacimientos lateríticos cubanos se encuentran ubicados fundamentalmente en el nordeste de la provincia de Holguín, donde actualmente operan las dos industrias metalúrgicas que se dedican a su procesamiento; una con la Tecnología Ácida a Presión y una con la Tecnología Carbonato Amoniacal (proceso CARON), la que logra extracciones de níquel de un 86 % y de cobalto no más de un 30 %, en la que gran parte de las especies metálicas quedan en los sólidos no lixiviados del proceso; además existe un proyecto en ejecución para la producción de Ferroníquel (Loyola, 2012).

La generación de colas de la industria del níquel cubana, se comenzó con la puesta en marcha en 1943 de la empresa “Comandante René Ramos Latourt” de Nicaro, seguida en 1959 con el inicio de la empresa “Comandante Pedro Soto Alba” (Moa níckel S.A.), y posteriormente en 1986 con la arrancada de la fábrica “Comandante Ernesto Che Guevara” (ECG) de Punta Gorda. Las colas, además de residual, constituyen una importante materia prima para la obtención de otros elementos valiosos contenidos como el cobalto (García, 2011). Los volúmenes de colas se incrementan en la medida que aumenta la producción de níquel en las empresas; en la actualidad se vierten más de 7 millones de toneladas al año.

Nuevas alternativas tecnológicas para el aprovechamiento de los recursos minerales constituyen una gran importancia, de manera tal que permitan un tratamiento integral y posibiliten la sostenibilidad del desarrollo minero de la región. La tecnología utilizada hasta hoy en día no se ha recuperado el níquel y cobalto en la cola y los distintos investigadores (Urgelles, 2014, Correa, 2013, Loyola, 2012, García, 2011, Turro et al,

2003) ellos trataron diversos caminos para extraer el níquel y cobalto y todavía no se ha encontrado una tecnología que permita extraer estos metales. En este trabajo se determinó la recuperación del níquel y cobalto utilizando otros métodos; por separación hidro-gravitacional y luego los productos obtenidos se lixiviaron.

Según lo antes expuesto se declara como **situación problemática** es la necesidad de establecer vías para el tratamiento de las colas producidas por la tecnología carbonato amoniacal para la recuperación de níquel y cobalto.

Por lo que se define como **problema científico** el insuficiente conocimiento sobre la recuperación del níquel y cobalto presentes en los productos de la separación hidro-gravitacional a través de la lixiviación ácida de las colas de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara para disminuir su impacto en el medio ambiente.

Por lo que el **objetivo general** es recuperar el níquel y cobalto presentes en los productos de la separación hidro-gravitacional a través de la lixiviación ácida de las colas de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara para disminuir su impacto en el medio ambiente.

El **objeto de investigación** es proceso de separación hidro-gravitacional y lixiviación ácida de los productos obtenidos a partir de las colas de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.

El **campo de acción** consiste en transformaciones físicas y físicos-químicas de las colas en la elutriación y la lixiviación.

Se enuncia como **hipótesis**: si se realiza la separación de los productos por el método de hidro-gravimétrico de las colas de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara se podrá realizar la lixiviación para extraer el níquel y cobalto y disminuir su impacto en el medio ambiente.

Para dar cumplimiento al objetivo general se plantean los siguientes **objetivos específicos**:

- Separar las colas por el método de separación hidro-gravimétrico (elutriación).
- Realizar la lixiviación ácida de los productos obtenidos del proceso hidro-gravimétrico.
- Determinar la influencia de granulometría y densidad sobre la recuperación de níquel y cobalto.
- Realizar una valoración económica y ambiental.
- Obtener el modelo estadístico.

Metodología de investigación.

Obtenida la información bibliográfica, primeramente se realiza el método de elutriación y se aplica el diseño de experimento factorial multinivel donde se clasifican las colas de la tecnología carbonato amoniacal. Luego se realizó el proceso de lixiviación ácida de los productos obtenidos para la extracción de níquel y cobalto contenidos en las colas separadas. Por último se procesaron los resultados obtenidos en el software Statgraphics 5.1 Plus y por métodos computacionales como el EXCEL.

Los aportes de la investigación son:

En lo científico:

- Comportamiento de los principales parámetros (granulometría y densidad) tecnológicos de proceso de lixiviación de las colas de la tecnología carbonato amoniacal separadas por elutriación, para la extracción de níquel y cobalto.

En lo económico:

- Obtención de mayores ingresos por concepto de la extracción del níquel y cobalto.

En lo social:

- Disminución de la contaminación ambiental.
- Aprovechamiento racional e integral de los recursos minerales.
- Generación de fuente de empleo.

CAPÍTULO 1 MARCO TEÓRICO

1. MARCO TEÓRICO

En el capítulo se realiza el análisis bibliográfico de las investigaciones relacionadas tanto con el método de separación hidro-gravimétrico (elutriación) como con el proceso de lixiviación ácida a presión atmosférica de las colas de la tecnología carbonato amoniacal. Además, se disponen las generalidades referentes a los procesos de estudio.

1.1. Generalidades de la concentración gravimétrica

La concentración gravimétrica continúa como uno de los métodos más importantes empleados para la separación de minerales, el cual es basado en sus densidades relativas. Durante el proceso, el movimiento de una partícula dentro de un fluido depende no solamente de su densidad relativa sino también de su tamaño, ya que las partículas grandes serán más afectadas que las más pequeñas.

El movimiento de las partículas relativamente pequeñas es dominado principalmente por la fricción superficial, las cuales influyen negativamente en los métodos gravimétricos de alta capacidad. En la práctica, es necesario controlar el tamaño de partículas en la alimentación para reducir el efecto de tamaño y hacer que el movimiento relativo de las mismas dependa de sus densidades relativas.

1.2. Concentración por elutriación

La elutriación es un proceso de clasificación de partículas por medio de una corriente ascendente de un fluido, generalmente aire o agua. Dicha clasificación se realiza en una serie de recipientes tubulares o cónicos de tamaño creciente, por lo que el régimen de flujo decrece en forma sucesiva. En general, al aplicar la ley de Stokes el proceso requiere de un flujo laminar con respecto tanto a la partícula como al recipiente, condiciones que no siempre se encuentran en la práctica. Aun así, pueden llevarse a cabo separaciones cuando las condiciones son turbulentas o de transición, pero debe tenerse en cuenta que se mide un diámetro nominal diferente. Las fuerzas a las que

está sometida una partícula en las condiciones mencionadas anteriormente se señalan en la figura 1.1

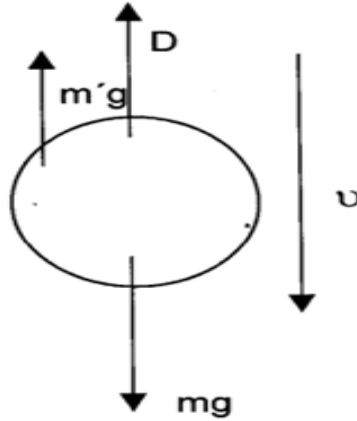


Figura 1.1. Fuerzas que actúan sobre una partícula en el seno de un fluido.

Una inconveniencia de la elutriación es el perfil de velocidad que existe transversalmente a la corriente del fluido, debido a la resistencia de rozamiento con las paredes del recipiente. La cual indica que las partículas están sujetas a velocidades variables, como el resultado de que las partículas de regímenes variables de asentamiento son captadas por los diferentes recipientes. En realidad, las partículas son arrastradas hacia la región de corriente más rápida por diferencias de presión sobre su superficie, y en consecuencia, son eventualmente captadas por la velocidad máxima del fluido.

La elutriación con líquidos no es más que un proceso de separación o subseparación de tamaños de partículas dentro de una corriente de un fluido que frecuentemente suelen ser el agua. Si el material es predominante de una sola gravedad específica, los grados resultantes pueden ser marcadamente

La figura 1.2 esquematiza un elutriador, en el cual, representa la clasificación de partículas la cual tiene lugar por medio de una corriente de fluido ascendente, generalmente agua o aire. El proceso es el inverso de la sedimentación por gravedad.

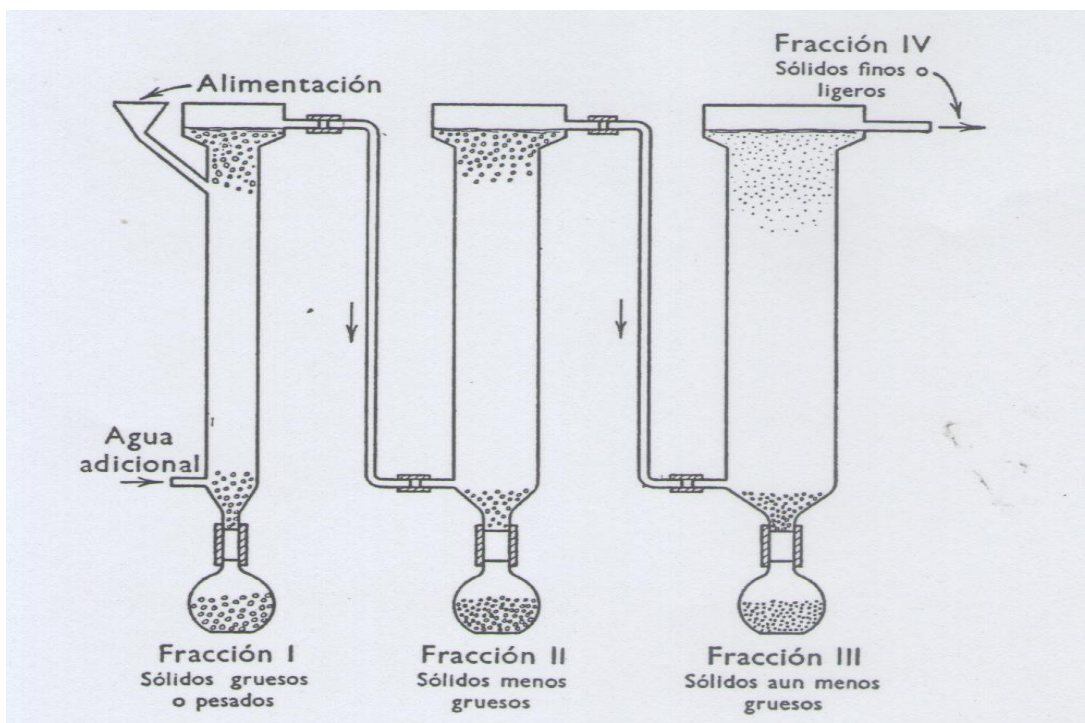


Figura 1.2. Esquema de un elutriador mediante sedimentación libre

(Fuente: Jorge, 2014).

Todos los elutriadores consisten en una o más columnas de separación en las cuales el fluido asciende a una velocidad constante. Las partículas introducidas dentro de la columna de clasificación se separan en dos fracciones de acuerdo a sus velocidades terminales, calculadas por la ley de Stokes.

Las partículas con una velocidad terminal menor que la del fluido tienden a ser suspendidas, mientras que aquellas que tengan una velocidad mayor que la del fluido se precipitan hacia la descarga. La elutriación se lleva a cabo hasta que no hay signos visibles de que tenga lugar una clasificación adicional o hasta que la proporción en el cambio de los pesos de los productos es despreciable.

1.3. Fundamentos de la lixiviación

La lixiviación es un proceso heterogéneo de extracción sólido – líquido mediante el cual pasan a la solución de forma selectiva uno o varios elementos, en presencia de un agente lixivante bajo determinadas condiciones de temperatura, presión del reactivo

gaseoso, régimen de agitación de la pulpa, granulometría del mineral, contenido de sólido, concentración de reactivos, entre otros. El proceso de lixiviación puede ser directo o indirecto, es decir, a través del cual se puede pasar a la solución de forma selectiva un metal o un grupo de metales de interés en el proceso que se lleva a cabo, o se puede pasar a la solución aquellos elementos contenidos en el mineral que constituyan impurezas dentro del mismo.

Además, la lixiviación es la separación de uno o varios solutos contenidos en una fase sólida mediante su contacto con un disolvente líquido que los disuelve selectivamente, pudiendo tratarse de una simple disolución física o de una reacción química que libera al soluto de la matriz sólida.

La cinética del proceso de lixiviación consiste en cinco etapas principales:

1. Difusión del reactivo desde el volumen de la solución hasta la superficie del sólido.
2. Difusión del reactivo a través de la nueva capa de sólido formada o de los elementos inertes del sólido (mineral).
3. Reacción química.
4. Difusión del producto de la reacción química a través de la nueva capa de sólido formada o de los elementos inertes del mineral.
5. Difusión de los productos de la reacción química hacia el volumen de solución.

Las etapas difusivas pueden ocurrir, en dependencia de las características del sólido a lixiviar y la formación o no durante la operación de una nueva fase sólida. (Zelitsman 1975; Perry's 1999; Levenspiel 1986).

La cantidad de reactivo consumido o de sólido disuelto en la unidad de tiempo depende de principales factores como:

- Concentración de los reactivos.
- Temperatura.
- Agitación.
- Naturaleza del mineral.

- Superficie de la fase sólida.
- Presencia de un agente externo.

1.4. Aspectos teóricos sobre el proceso de lixiviación ácida

El comportamiento de los minerales de níquel y cobalto ante determinados reactivos es diferente, lo que motiva plantear que el origen de los minerales contenedores de níquel es totalmente diferente a los minerales contenedores de cobalto, (Mustaphá, 1977) no queriendo esto decir que en las ferralitas neo-caledonianas dichos minerales se presentan de igual manera que en las menas lateríticas cubanas, donde el níquel y el cobalto están distribuidos. Varios investigadores del tema (Mustaphá, 1977; Almaguer y Vitezslav, 1993; Rojas, 1995; Lavaout, 1998) han llegado a la conclusión de que entre el 80 y 90 % del cobalto y entre el 10 y 20 % de níquel está asociado a los minerales oxidados de manganeso (asbolanas) de las menas lateríticas. De manera simultánea (Sobol, 1968; Almaguer y Vitezslav, 1993; Rojas Purón, 1995; Lavaout, 1998) plantean que entre el 58 y 90 % de níquel y el 5 y 6 % de cobalto se encuentran absorbidos en los geles de hierro (goethita y hematita principalmente).

La tecnología carbonato amoniacal consta de siete procesos fundamentales según se muestra en la figura 1.3.

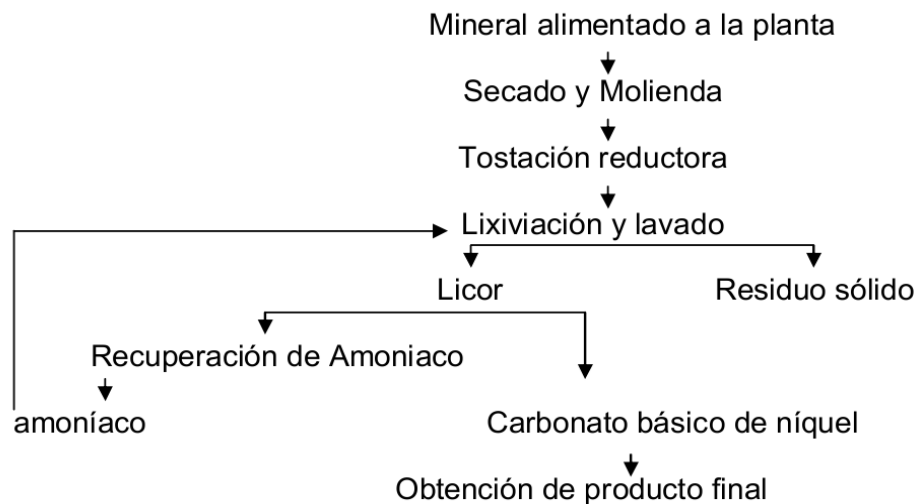


Figura 1.3. Procesos fundamentales de la tecnología carbonato amoniacal.

(Fuente: Palacios, 2001).

1.5. Estado de arte

1.5.1. Investigaciones relacionadas a las colas de la tecnología Carbonato Amoniacal.

El proceso CARON en comparación con otras tecnologías hidrometalúrgicas, además de la baja extracción de níquel y cobalto posee como desventaja relativa, el alto consumo de energía y combustible, involucrado mayoritariamente en el secado, reducción y sinterización como proceso pirometalúrgico. (Chang, 2000).

Las colas se caracterizan como un producto que contienen un porcentaje muy bajo del níquel y cobalto, por lo cual no siempre es posible económicamente su elaboración preliminar especial, cuyo objetivo es la separación de la mayor parte posible de la ganga del mineral y el aumento del contenido del metal que se quieren extraer (García, 2011). Dicha elaboración preliminar se denomina enriquecimiento, el cual disminuye sensiblemente el costo de operación de la metalurgia extractiva de estos metales. Para acelerar las reacciones químicas y separar en fases el material tratado, los procesos metalúrgicos se dividen en dos pirometalúrgicos e hidrometalúrgico, (Urbano, 1985).

1.5.2. Tratamiento de las colas por el método de beneficio de materiales

Turro (2002) realizó un estudio sobre el hidrotransporte de las colas del proceso CARON de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”. En el trabajo caracterizó las propiedades granulométrica, química y mineralógica de la fase sólida, y resultó que las fases principales presentes fueron: la maghemita, la magnetita y el cuarzo. Por otra parte, se obtuvo una caracterización reológica de sedimentación y de estabilidad a partir de sus hidromezclas en medio amoniacal. Se determinó que las partículas inferiores a los 43 μm , con una composición química muy uniforme están conformadas por varias fases mineralógicas, en las que sobresalen principalmente la magnetita (Fe_3O_4) y la maghemita ($\sigma\text{-Fe}_2\text{O}_3$). Los resultados obtenidos aportan como base de datos para las posteriores investigaciones, pero no se llegó a plantear una adecuada metodología para la recuperación de los elementos de interés contenidos en las colas estudiadas.

Palmero (2011) realizó una investigación sobre la cola de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” mediante la separación magnética por vía seca en un separador ЭБС138-T. En la cual se determinó la composición química de la muestra inicial y a los productos a través de las técnicas analíticas de: fluorescencia de rayos X, fotometría por absorción atómica y espectrofotometría de emisión por plasma (ICP). A partir de la susceptibilidad magnética con un Kappameter digital, se obtuvo que las colas presenten un contenido de 0,36 % de níquel, 0,091 % de cobalto y 43,93 % de hierro. Los principales resultados confirmaron una de las posibles vías para el proceso de beneficio de las colas por vía seca.

Loyola (2012) experimentó y propuso un esquema de beneficio de la colas de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, mediante la separación magnética por vía seca, con variación de la intensidad del campo desde 0,05 hasta 0,15 A , a tres clases granulométricas: gruesa (+0,2 mm), media (-0,2 +0,045 mm) y fina (-0,045 mm); cuya susceptibilidad magnética incrementa con la disminución del tamaño de las partículas, con valores de $97 \cdot 10^{-3}$, $106 \cdot 10^{-3}$ y $126 \cdot 10^{-3}$ m³/kg respectivamente, lo que demuestra el carácter ferromagnético. Además, analizó la composición química a través de la técnica de Fluorescencia de rayos X y obtuvo que el cinc, cromo y aluminio se concentran en el producto no magnético a 0,15 A en la clase de tamaño media; así como en la gruesa a 0,15 A se concentran el Cu, Ni, Mg y SiO₂ en el producto no magnético. El hierro se concentra en el producto magnético de las clases media y gruesa a 0,05 A. Sin embargo, en la clase fina la aplicación de un campo magnético no ejerce efectos significativos.

Correa (2013), en su investigación de determinación del comportamiento denso-granulométrico y químico de la cola de la empresa de “Comandante Ernesto Che Guevara” mediante la separación por elutriación utilizando el agua como fluido, con la combinación de las propiedades densidad y granulometría. Determinó la composición química a través de la técnica de Fluorescencia de rayos X. Por otra parte, resultaron que a 0,02 mm y 3600 kg/m³ el hierro se concentra en el reboso, mientras en 0,04 mm y 2800 kg/m³ de las arenas se enriquece el manganeso y a 3600 kg/m³ el cobalto, cinc y

cromo. En 0,08 mm a 2800 kg/m³ el níquel, magnesio y silicio alcanzan sus mayores concentraciones en el reboso. Los resultados obtenidos señalaron la posibilidad de separar las colas por vía húmeda, pero no se llegó a experimentar los productos finales para evaluar la recuperación de los elementos de interés contenidos en las colas.

1.5.3. Tratamiento de las colas por el método hidrometalúrgico

García (2011) realizó la lixiviación ácida con empleo de ácido sulfúrico a las colas de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”. Obtuvo una extracción de cobalto mayor que 89,3 % en 15 minutos antes de realizar el experimento, determinó la composición química promedio de las colas a través del método de Fluorescencia de Rayos X (FRX) obtuvo que el contenido níquel en la colas es 0,38 % y cobalto es 0,08 % pero no realiza ningún proceso previo para concentrar los metales contenidos en las colas.

Cruz & Rodríguez (2012) estudió sobre la lixiviación ácida de los concentrados de los residuales sólidos de la tecnología carbonato amoniacal “René Ramos Latour”. Para llevar a cabo el propósito de la investigación empleó el diseño factorial completo, donde estudió como variables independientes: la temperatura, la concentración inicial de sulfato de hierro (II), el contenido inicial del sólido y la concentración inicial de ácido sulfúrico, cuya realización fue a escala de laboratorio en un reactor de 2 litros de capacidad. Se obtuvo un modelo matemático, el que permitió analizar la influencia de los principales parámetros, determinándose que los mismos influyen positivamente en la extracción de níquel, cobalto e hierro, de la siguiente manera: temperatura, contenido de sólido inicial, concentración inicial de ácido sulfúrico y concentración inicial de sulfato de hierro (II).

Alexander (2013) estudió sobre la lixiviación ácida de la colas de la empresa René Ramos Latour” con el empleo de una muestra del concentrado magnético. Para el análisis granulométrico por vía húmeda, se emplaron los tamices de 0,149, 0,074 y 0,044 mm . Se llegó a determinar la composición química de la fracción magnética y se caracterizó el concentrado magnético de las colas lixiviadas, el 88,25 % presentó un diámetro promedio de partícula inferior a 0,06 mm. Se lixivió el concentrado magnético

de las colas, para el cual se obtuvo la extracción de níquel entre 20,2 % y 45,4 % y el cobalto alcanzó valores entre 24,2 % y 47,0 %.

Urgelles (2014) investigó sobre la lixiviación ácida de las colas de la tecnología carbonato amoniacal donde obtuvo un modelo cinético. Para la preparación de las muestras se empleó el método de tamizar por vía húmeda. Resultó que la extracción del cobalto fue de 50 % con la granulometría menor de 0,044 mm, mientras que las partículas de tamaño mayor de 0,044 mm presentaron una recuperación 39,3 % en 15 minutos. Pero no obtuvo mayor extracción del cobalto para las condiciones establecidas.

Conclusiones del capítulo

1. Para el tratamiento de las colas de la tecnología carbonato amoniacal todavía no se ha encontrado tecnología para extraer el níquel y cobalto.
2. Existen grandes reservas en Cuba de residuales sólidos (colas) industriales producidos por la tecnología carbonato amoniacal.
3. Los residuales sólidos industriales de la tecnología carbonato amoniacal están constituidos fundamentalmente por Fe y en menor cantidad existe níquel, cobalto y otros metales.

CAPÍTULO 2 MATERIALES Y MÉTODOS

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El propósito del capítulo es caracterizar los materiales empleados en la investigación y plantear la metodología para la separación hidro-gravimétrica (elutriación) de las colas de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara y la lixiviación de los productos clasificados.

2.1. Materiales empleados

Es necesario caracterizar los materiales empleados en la investigación, ya que estos son la base para el desarrollo de la misma. Las características de las colas y los reactivos se exponen a continuación.

2.1.1. Características físicas de la materia prima (colas)

Las colas de forma general como se muestra en la figura 2.1, es de color negro, y sus densidad promedio es 3200 kg/m^3 (Yunior, 2013). Por otra parte, las mismas se caracterizan por una gravedad específica entre 2,63 y 3,85 t/m^3 y el peso volumétrico varía entre 1,30 y 1,46 t/m^3 (Fernández, 1979).



Figura 2.1. Muestra de las colas de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

2.1.2. Composición química de las colas

En las investigaciones metalúrgicas es imprescindible tener en cuenta las características químicas del material para valorar cualitativa y cuantitativamente su comportamiento ante un proceso determinado.

El resultado del análisis de la composición química inicial de las muestras se muestra en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Composición química inicial de las colas

Elemento	Ni	Co	Fe	Mg	Cu	Zn	Mn	Ca	Al	Cr	SiO ₂	Otros
%	0,38	0,08	44,69	4,77	0,02	0,04	0,76	0,15	4,5	1,83	5,65	37,13

En la tabla se observa que el hierro es el elemento principal que compone las colas, su contenido es de 44,69 %, mientras que el porcentaje de níquel y cobalto es relativamente bajo pero son significativos, por lo que es necesario emplear una metodología adecuada para recuperarlos. Al comparar el resultado obtenido con los las investigaciones precedentes: Rojas & Turro (2003); Hernández (2011); García (2011) y Loyola (2012), demostró una similitud entre los mismos. De igual forma, las colas contienen cantidades apreciables de níquel y cobalto, dado por la ineficiencia tecnológica de la planta que los procesan; lo que brinda una posible fuente de estudio para su futura recuperación.

2.1.3. Composición mineralógica de las colas

La composición mineralógica de la materia prima fue obtenida a través del análisis por difracción de rayos X (DRX) como se expone en la tabla 2.2 (Ponce, 1979).

Tabla 2.2 Composición mineralógica de las colas

Fase mineralógica.	Fórmula	Contenido, %.
Magnetita.	FeO. Fe ₂ O ₃	51,20
Cromita.	(Fe, Mg)O. (Cr, Al) ₂ . O ₃	8,20
Forsterita.	2(Mg _{0,96} Fe _{0,04})O.SiO ₂	25,10
Andalucita	Al ₂ O ₃ . SiO ₂	4,80
Fase Desconocida.	Fe – Si Mineral.	8,00

En la tabla se observa que mineralógicamente las colas están compuestas principalmente por la magnetita y la forsterita que presentan 51,20 y 25,10 % respectivamente.

2.2. Métodos empleados en la investigación

En el desarrollo de la investigación se aplican los siguientes métodos:

Método de análisis y síntesis: El análisis es el proceso por el cual se examina un objeto en sus partes dirigido a lo individual, mientras que la síntesis es la unión de lo que se adquiere en el análisis, es decir, nos aporta el todo, lo general.

En la investigación el método se emplea para analizar los diferentes procesos gravitacionales aplicados a las colas, específicamente la elutriación, la cual se encarga de concentrar las especies metálicas que componen la muestra y de esta forma estudiar su posible futuro aprovechamiento.

Método inductivo y deductivo: Es un proceso que permite la búsqueda de información, toma como referencia la relación de los aspectos generales a los particulares y viceversa (Taylor & Bogdan, 1984).

El método permite abordar las referencias teóricas que se utilizan para sustentar la indagación científica, así como las investigaciones precedentes aplicadas a las colas y a los métodos gravitacionales.

Método de modelación estadística – matemática: El método constituye la base para demostrar con resultados concretos la influencia de los parámetros que se experimentaron durante los procesos de separación hidro-gravimétrico y lixiviación, a partir de dichos resultados probar la efectividad del mismo.

2.3. Reactivos, equipos y materiales utilizadas

A continuación se exponen y explican los reactivos, equipos y materiales utilizados durante la investigación.

2.3.1. Reactivos

Los reactivos empleados para la realización de los experimentos son:

- Ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4) con 98 % de pureza.

- Sulfato de hierro (II), (FeSO_4).

2.3.2. Equipos

- Plancha eléctrica (IKA C-MAG HP 10).
- Termómetro de referencia.
- Reactor de 1000 mL de capacidad.
- Agitador magnético con impelente (Bunsen AGV – 10).
- Pera de succión.
- Reloj.
- Beaker (250 mL).
- Bomba al vacío (No serie 020 01).
- Embudos.
- Estufa (modelo DH6-9146A).
- Espátula.
- Balanza analítica (marca *Sartorius BS 124S*)
- Probeta (500 mL).
- Elutriador.
- Picnómetros (25 mL y 50 mL).

2.3.3. Materiales

- Filtro de papel (F1001 grade y 88).
- Materiales de protección (Guantes de amianto, Bata).

2.4. Metodología de la experimentación

La figura 2.2 muestra un esquema de flujo general de estudio experimental. La metodología seguida en la investigación a partir de la elutriación estuvo basada en las experiencias de las investigaciones precedentes como (Correa, 2013) y (Garcia, 2011, Urgelles, 2014).

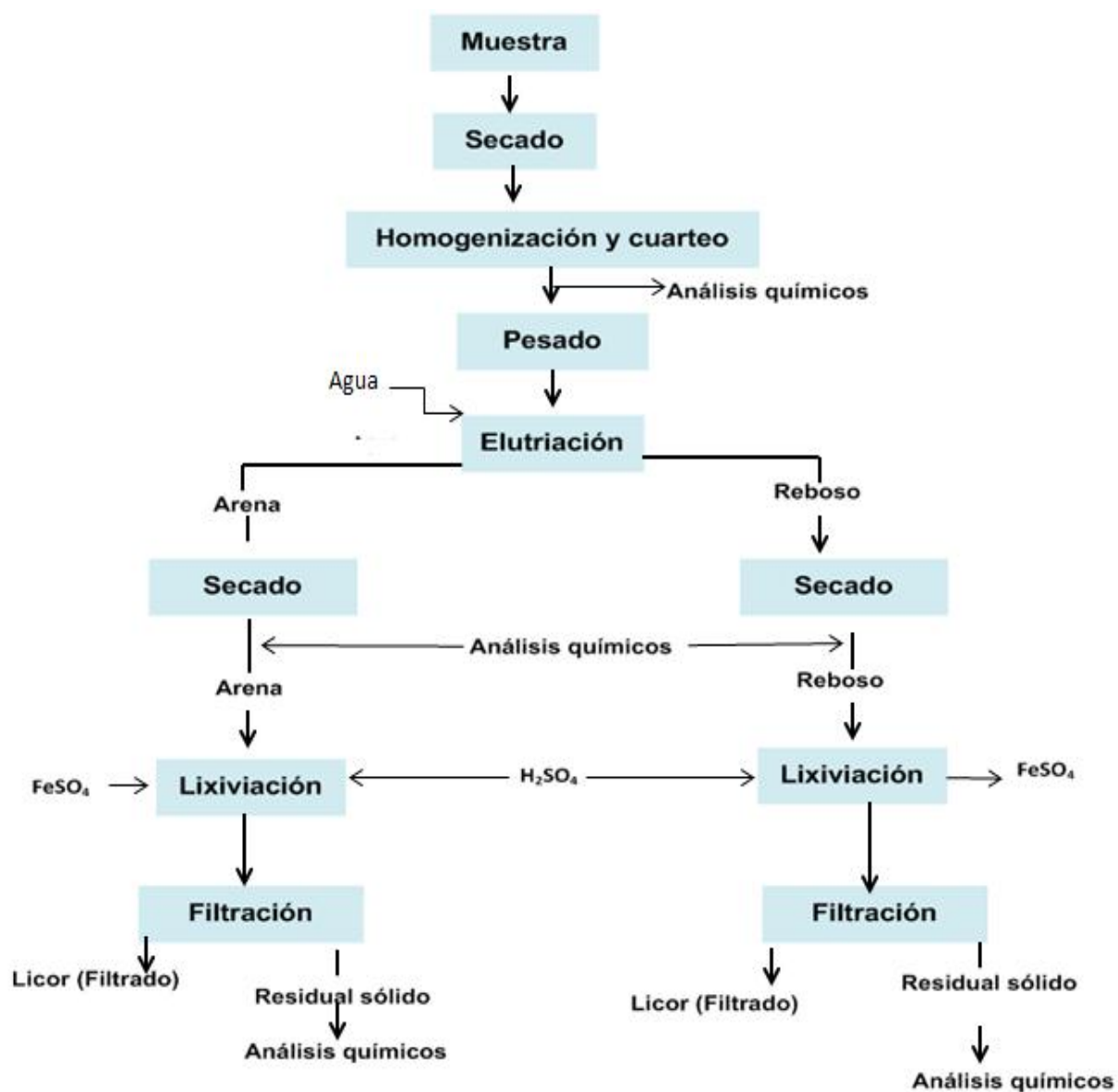


Figura 2.2. Esquema de flujo general para el tratamiento de las colas por elutriación y lixiviación.

El procedimiento de cada uno de las etapas se describe a continuación.

2.4.1. Muestra

Para realizar la investigación se tomó una masa de 9 kg de las colas en el laboratorio de beneficio de minerales del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.

2.4.2. Secado

Las muestras se sometieron a un proceso de secado preliminar en un tiempo aproximado de 2 horas, a temperatura de 100 °C, con el fin de evitar que la humedad provoque el aumento de la fuerza de adhesión mutua entre las partículas finas.

El secado de la muestra inicial y de cada uno de los productos que se obtienen en la separación por elutriación con la combinación de densidad y granulometría, se realizó en una estufa de control digital modelo DH6-9146A, la cual está ubicada en el Laboratorio de Análisis Químico del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.

2.4.3. Homogeneización

Después del proceso de secado se procedió a la homogeneización del material a través del método de cuarteo (cono y anillo) como se observa en la figura 2.3.

Primeramente se amontonan las colas hasta conformar una pila, luego se introduce un tubo de acero inoxidable de 100 mm de diámetro por la parte frontal para tomar la muestra que se va a utilizar ya que se cuenta con suficiente masa, la operación se realiza en tres niveles (superficie, centro y profundidad), se aplica el método de cuarteo según Mitrofánov (1982) que consiste en la deposición del material en forma de cono. Con la ayuda de una pala se conforma un talud distribuyéndolo uniformemente por todos sus lados, el material restante se recoge minuciosamente y se arroja en el vértice del talud, después se aplasta con una tabla hasta obtener un cono truncado.

Luego se selecciona una tabla de madera delgada y se introduce de forma horizontal en el material, aproximadamente a una profundidad equivalente al ancho de la tabla, se realizan dos cortes a todo lo largo hasta obtener una división de cuatro partes iguales. Después a simple vista se enumeran cada una de las partes y se recogen los cuadrantes 1 y 3 para depositarlo uno encima del otro en otra área. Seguidamente se realiza la operación tres veces, y se obtiene una reducción y homogeneización de la muestra para obtener como producto final la masa a emplear en la investigación.



Figura 2.3. Método de cuarteo para la preparación de la muestra.

2.4.4. Pesado

Una vez culminado el secado del material, se dividieron en sesenta partes de 50 g empleando una balanza digital para someterlas al proceso de separación por elutriación.

2.4.5. Elutriación

2.4.5.1. Diseño experimental para la elutriación

El diseño factorial multinivel de experimento fue empleado para evaluar la influencia de las variables de entrada (densidad y granulometría de las colas) en la variable de salida, siendo la composición química de los productos elutriados (arenas y reboso).

La cantidad total de las pruebas se determina a través de la siguiente expresión:

$$N = p \cdot q \quad (2.1)$$

donde:

N. Número de experimentos.

p. Niveles del factor granulometría.

q. Niveles del factor densidad.

En la tabla 2.3 se muestran las combinaciones llevadas a cabo en los experimentos, donde cada fracción granulométrica se combina con los tres rangos de densidades.

Tabla 2.3. Combinaciones para desarrollar los experimentos

Granulometría, Mm	Densidad, kg/m³
0,02	2 800
	3 200
	3 600
0,04	2 800
	3 200
	3 600
0,06	2 800
	3 200
	3 600

Los niveles de la granulometría fueron establecidos debido a la experiencia industrial y los estudios precedentes, donde confirman que el 80 % del material se encuentra por debajo de la fracción 0,04 mm, al considerarlo como un nivel básico (patrón) se procedió a evaluar las fracciones menor y mayor que el valor promedio. De igual manera, se seleccionan tres niveles de densidad (2800, 3200 y 3600 kg/m³), ya que las colas estudiadas poseen una densidad promedio de 3200 kg/m³ (Correa, 2013).

De acuerdo con la ecuación 2.1 se tiene que:

$p = 3$ (nivel del factor granulometría).

$q = 3$ (nivel del factor densidad).

Por tanto, la cantidad total de experimentos es 9.

2.4.5.2. Instalación experimental para la elutriación

Para la realización de los experimentos en el elutriador se prefijó a 3000 g y sobre la base de la capacidad del equipo las corridas se realizaron con 50 g, es decir se realizaron 60 corridas para cada muestra y al final se mezclan los productos para continuar con las otras operaciones. Posteriormente se desmenuza en agua la materia prima para no entrar terrones que incluyan perturbaciones en el proceso, después se establece el gasto de agua que separa las partículas a través de un método de cálculo;

con el apoyo del método de tanteo se mide en una probeta graduada la cantidad de agua que rebosa en el elutriador en un instante determinado de tiempo, se basa en la ley de Stokes y la fórmula del Gasto Volumétrico.

En la figura 2.4. se muestra la instalación que se emplea para realizar los experimentos, consta de un tanque que se encarga de suministrar agua al proceso, el cual tiene conectada una válvula a la salida que debe estar abierta con el objetivo de permitir el paso del agua a la bomba, (la cual se encarga de bombear el fluido al elutriador) a la salida de la bomba hay acoplada otra válvula que tiene como fin regular el flujo de agua calculado que se suministra al elutriador. Una vez que se fija el flujo de agua en el equipo se controla cada 10 min para detectar cualquier variación.

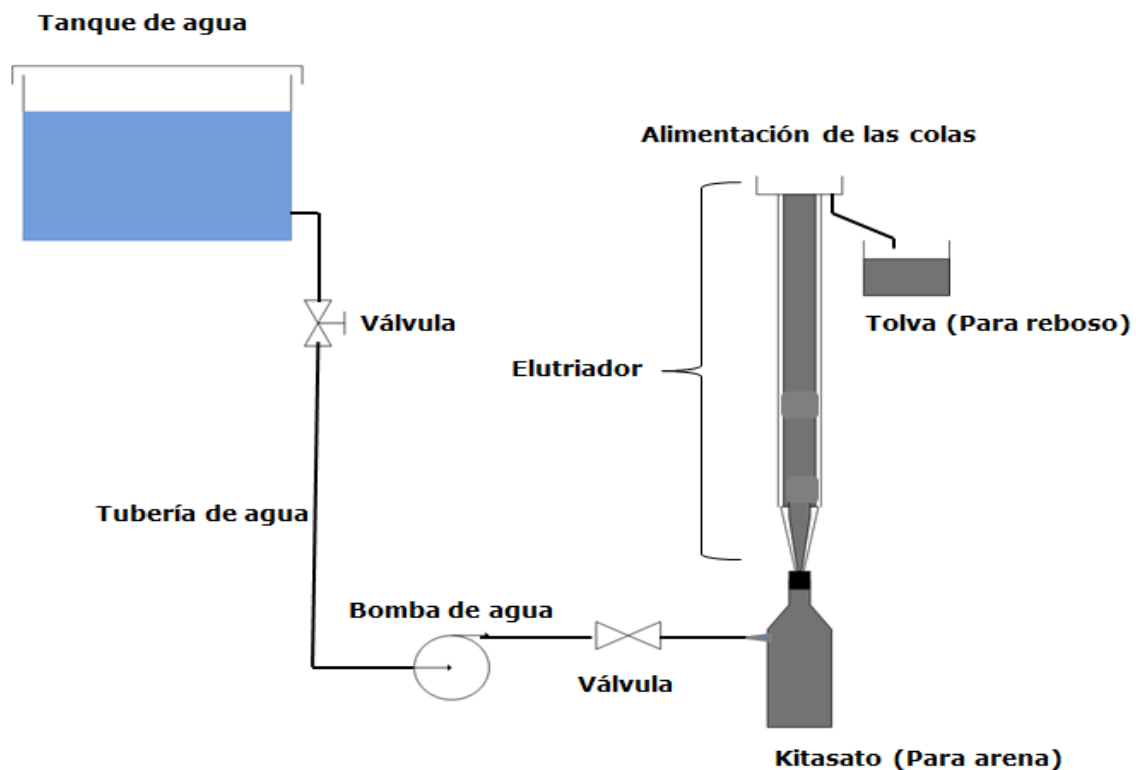


Figura 2.4. Instalación experimental del proceso de elutriación.

En la parte inferior del elutriador se instala un kitasato, el cual se encarga de recoger el producto “arenas”, y en la parte superior se conecta un recipiente recolectar el otro producto “reboso”.

Durante el proceso se debe tener en cuenta la relación existente entre la velocidad de sedimentación de las partículas y el gasto volumétrico, la cual garantiza la ocurrencia de la elutriación.

Los productos obtenidos de la separación por elutriación son: el reboso (R) y las arenas (A), el primero producto serían las partículas menos densas, las cuales pertenecen a la combinación de densidad y granulometría determinada; el segundo pertenece al producto que se obtiene en el fondo del equipo, que corresponden a las partículas de mayor densidad.

En la figura 2.5. se muestra el esquema a seguir para la aplicación de la técnica de elutriación. Las fracciones granulométricas y los niveles de densidades se encuentran en un rango, ya que en la ecuación del gasto volumétrico al fijar un valor de granulometría y de densidad del sólido se separan todas las partículas que están por debajo de estos valores.

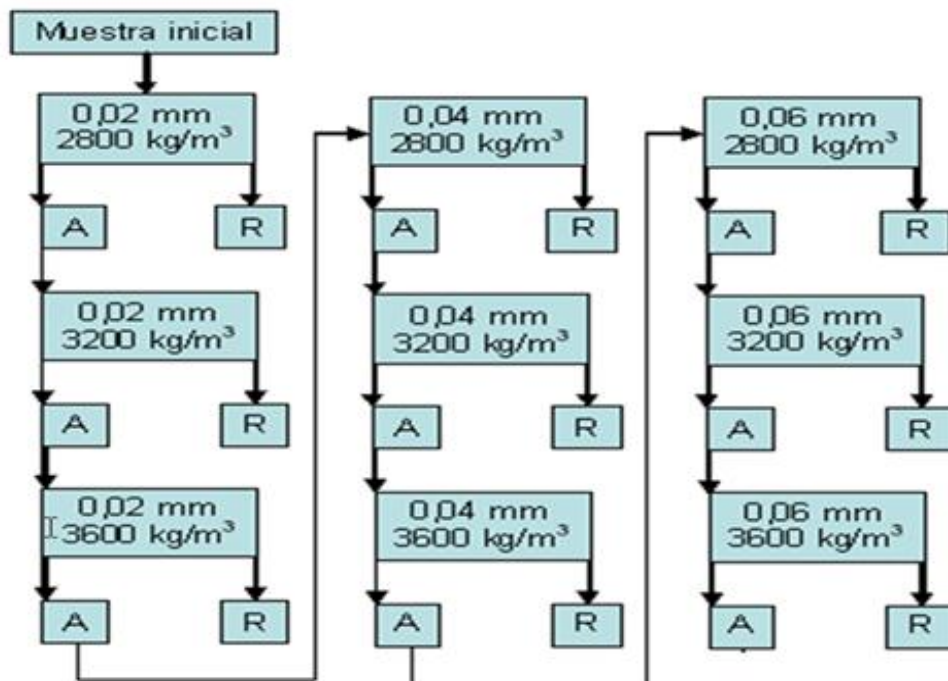


Figura 2.5. Esquema de flujo para la técnica de elutriación

(Fuente: Correa, 2013).

En el primer experimento se separan las partículas menores a la combinación 0,02 mm y 2800 kg/m³, el resultado pertenece al reboso (R); el producto arenas (A) se somete a la próxima prueba (masa de análisis) correspondiente a la misma condición granulométrica pero a la densidad de 3200 kg/m³ y el último experimento se realiza con igual granulometría pero a la densidad de 3600 kg/m³. El proceso se realiza escalonadamente, es decir se parte de una masa de análisis que corresponde al resultado del anterior experimento.

El producto arenas, obtenido de la combinación 0,02 mm y 3600 kg/m³ se somete a la misma operación, pero esta vez a la condición de cálculo de 0,04 mm con las respectivas densidades y terminada esta combinación se realiza el mismo procedimiento pero con las condiciones de 0,06 mm.

La variación del gasto volumétrico para el proceso de elutriación se vincula con la combinación de la densidad y granulometría (para cada tamaño de partícula de forma ascendente con un valor de densidad definido, el flujo de agua aumenta).

Toda la experimentación se realiza a una corrida original y dos réplicas para corroborar la veracidad de los resultados.

2.4.5.3. Características del elutriador empleado en los experimentos

Para realizar el proceso de separación se utiliza un elutriador criollo perteneciente al laboratorio de Beneficio de Minerales del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, con una instalación como la que se muestra en la figura 2.4. El que posee las siguientes características:

Diámetro del tubo: 0,046 m; Altura del tubo: 0,61 m; Volumen: 1 L; Concentración de sólido admisible: 50 g/L; Material de construcción: Vidrio Pires.

Posee en la parte superior un recogedor (tolva) para recibir las partículas finas provenientes del reboso. En la parte inferior posee un cono con un ángulo de salida de 45°.

2.4.5.5. Determinación del flujo de agua para la elutriación

El principio de la operación está basado en hacer pasar un flujo de agua constante y de forma contra corriente con el flujo, descenden de las partículas sólidas. El tiempo de retención de las partículas está en dependencia de varios factores como: la altura del elutriador, el flujo de agua, el tamaño y la densidad de las partículas. El gasto volumétrico del flujo de agua se determina empleando las siguientes leyes:

Ley de Stokes:

$$W_p = \frac{g \cdot d^2 \cdot (\rho_p - \rho_a)}{18 \cdot \mu} \quad (2.2)$$

Ley del gasto volumétrico:

$$V = W_a \cdot F \quad (2.3)$$

donde:

W_p : Velocidad de sedimentación de las partículas sólidas, $m \cdot s^{-1}$;

W_a : Velocidad del agua, $m \cdot s^{-1}$

V : Gasto volumétrico del agua; $m^3 \cdot s^{-1}$

d : Diámetro de las partículas, m ;

ρ_p y ρ_a : Densidades de las partículas sólidas y del agua respectivamente, $kg \cdot m^{-3}$;

μ : Coeficiente de viscosidad dinámica del agua, $Pa \cdot s$;

F : Área de la sección transversal del elutriador, m^2 .

Si se considera que $W_p = W_a$, entonces el gasto volumétrico de agua se determina derivando las ecuaciones 2.2 y 2.3, y se obtiene:

$$V = \frac{g \cdot d^2 \cdot (\rho_p - \rho_a)}{18 \cdot \mu} \cdot F \quad (2.4)$$

Se tienen en cuenta los siguientes datos: densidad y viscosidad del agua a 28 °C son 996,40 kg/m³ y 843,20·10⁻⁶ Pa·s respectivamente (Pavlov, 1981).

En anexo 1 se muestran los valores de la velocidad de sedimentación de las partículas y el gasto volumétrico del agua durante la realización de los experimentos.

2.4.6. Lixiviación

2.4.6.1 Instalaciones experimentales para la lixiviación

Para la realización de las pruebas de lixiviación ácida reductora se empleó un beaker de 1000 mL como un tanque de lixiviación (reactor), además un calentador fue utilizado para calentar y mantener la pulpa a una temperatura constante. Un agitador mecánico fue empleado para mezclar la pulpa, es decir, suspender las partículas sólidas en la solución lixivante para garantizar una mejor interacción entre el sólido y los reactivos. En la figura 2.6, se aprecia la instalación.



Figura 2.6. Instalación experimental empleada en la lixiviación.

Una vez obtenidos los productos sólidos de la lixiviación, los cuales fueron sometidos a un proceso de filtración con el fin de caracterizar sus composiciones químicas

posteriormente. La instalación experimental de la filtración de los sólidos lixiviados se muestra en la figura 2.7.



Figura 2.7. Instalación empleado para la filtración.

2.4.6.2. Principales parámetros que influyen en la lixiviación

Con el fin de evaluar la influencia de los principales factores sobre el proceso de lixiviación se estudiaron los siguientes parámetros:

- Contenido de sólido.
- Concentración inicial del agente reductor (sulfato de hierro (II)).
- Temperatura del proceso.
- Concentración inicial de ácido sulfúrico.
- Granulometría.
- Número de Reynolds.

Los niveles de los parámetros de estudio fueron tomados a partir de las experiencias prácticas de la industria e investigaciones preliminares realizadas (Samalea, 1986; Del Toro, 2003; Palacios, 2001, Lobaina 2003; Martínez, 2006; Medrano, 2007). Además de los parámetros de temperatura y composición química de la solución referidos en el capítulo anterior, es necesario determinar la influencia de las variables que intervienen directamente en el proceso de lixiviación (Zelitman, 1975).

2.4.6.3 Reacciones químicas fundamentales

Las principales transformaciones físicas - químicas que pueden ocurrir durante la lixiviación de las colas de la tecnología carbonato amoniacal con ácido sulfúrico y en presencia de sulfato de hierro (II) como agente reductor (García, 2011). La lixiviación de las colas carbonato amoniacal mediante soluciones de ácido sulfúrico y sulfato de hierro (II) tiene lugar por las siguientes reacciones:

1. $\text{Co}_{(s)} + 2\text{FeSO}_{4(ac)} + 2\text{H}_2\text{SO}_{4(ac)} = \text{CoSO}_{4(ac)} + \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3(s) + 2\text{H}_2(g)$
2. $\text{Co}_{(s)} + \text{H}_2\text{SO}_{4(ac)} = \text{CoSO}_{4(ac)} + \text{H}_2(g)$
3. $\text{Co}(\text{OH})_2(s) + \text{H}_2\text{SO}_{4(ac)} = \text{CoSO}_{4(ac)} + 2\text{H}_2\text{O}$
4. $\text{Co}_2\text{O}_3(s) + 2\text{FeSO}_{4(ac)} + 3\text{H}_2\text{SO}_{4(ac)} = 2\text{CoSO}_{4(ac)} + \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3(s) + 3\text{H}_2\text{O}$
5. $\text{Co}_2\text{O}_3(s) + 2\text{H}_2\text{SO}_{4(ac)} = 2\text{CoSO}_{4(ac)} + \frac{1}{2}\text{O}_2(g) + \text{H}_2\text{O}$
6. $\text{CoO}(s) + \text{H}_2\text{SO}_{4(ac)} = \text{CoSO}_{4(ac)} + \text{H}_2\text{O}$
7. $\text{Cr}_2\text{O}_3(s) + 3\text{H}_2\text{SO}_{4(ac)} = \text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3(ac) + 3\text{H}_2\text{O}$
8. $\text{MnO}_2(s) + 2\text{FeSO}_{4(ac)} + 2\text{H}_2\text{SO}_{4(ac)} = \text{MnSO}_{4(ac)} + \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3(s) + 2\text{H}_2\text{O}$
9. $\text{MnO}_2(s) + \text{H}_2\text{SO}_{4(ac)} = \text{MnSO}_{4(ac)} + \frac{1}{2}\text{O}_2(g) + \text{H}_2\text{O}$

Las principales transformaciones físico - químicas que experimenta el compuesto de cromo es, en primer orden, la ecuación 7, pero el sulfato de cromo (III) $[\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3]$ obtenido puede interactuar con los óxidos superiores de manganeso, cobalto e hierro, produciéndose el cromo en forma hexavalente por las transformaciones 10, 11 y 12.

10. $3\text{MnO}_2(s) + \text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3(ac) + 2\text{H}_2\text{O} = 3\text{MnSO}_{4(ac)} + 2\text{H}_2\text{CrO}_{4(ac)}$
11. $3\text{Co}_2\text{O}_3(s) + \text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3(ac) + 3\text{H}_2\text{SO}_{4(ac)} = 6\text{CoSO}_{4(ac)} + 2\text{H}_2\text{CrO}_{4(ac)} + \text{H}_2\text{O}$
12. $3\text{Fe}_2\text{O}_3(s) + \text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3(ac) + 3\text{H}_2\text{SO}_{4(ac)} = 6\text{FeSO}_{4(ac)} + 2\text{H}_2\text{CrO}_{4(ac)} + \text{H}_2\text{O}$

El sulfato de hierro (II) tiene la función de agente reductor y evita la formación de cromo (VI), disminuyendo la presencia de este en la solución; producto de la interacción del sulfato de hierro (II) con los óxidos superiores de manganeso y cobalto.

2.4.6.4. Metodología de experimentación para la elutriación - lixiviación

La metodología que se utilizó para la realización de los experimentos del proceso de elutriación - lixiviación se muestra a continuación:

1. Se tomó una muestra representativa de residuo sólido (colas) del depósito y se sometió a un proceso de homogenización y selección mediante el método de cuarteo.
2. El producto obtenido se sometió a análisis químico por Fluorescencia de Rayos X para determinar la composición química de la materia prima.
3. Se sometió a la separación por elutriación utilizando el agua como fluido, con la combinación de las propiedades densidad y granulometría.
- 4 Los productos obtenidos (reboso y arenas) se sometieron a un análisis químico por Fluorescencia de Rayos X para determinar la composición química de los mismos.
5. La lixiviación se llevó a cabo a escala de laboratorio, donde se realizó el cálculo para determinar el volumen útil ($V_{\text{útil}}$), debido a que los experimentos se realizaron en un reactor de 1 L y el coeficiente de utilización (α) es del 85 %

$$V_{\text{útil}} = V_{\text{total}} \cdot \alpha \quad (2.4)$$

$$V_{\text{útil}} = 1 \cdot \frac{85}{100}$$

$$V_{\text{útil}} = 0,85 \text{ L}$$

6. Teniendo en cuenta el diseño, se establecieron los niveles de cada variable de estudio, los cuales se muestran en la tabla 2.4.

Tabla 2.4 Factores y niveles de experimentación para la lixiviación.

Factores	Temperatura (°C)	cFeSO ₄ (g/L)	cH ₂ SO ₄ (g/L)	Contenido de sólido (%)	Agitación (Rev/min)	Tiempo (min)
Niveles	85	17	90,5	33	1000	25

El proceso de lixiviación de cada producto de la elutriación se realiza bajo las mismas condiciones para demostrar las características de selectividad de los concentrados. Considerando que la densidad de la materia prima empleada es de 3,2 kg/L.

Se parte de la expresión siguiente:

$$\frac{1}{\rho_{Pulpa}} = \frac{X_{sólido}}{\rho_{sólido}} + \frac{1 - X_{sólido}}{\rho_{líquido}} \quad (2.5)$$

donde:

ρ_{pulpa} , $\rho_{sólido}$, $\rho_{líquido}$ densidad de la pulpa, densidad del sólido y densidad del líquido.

$X_{sólido}$, $1 - X_{sólido}$ fracción másica del contenido de sólido y líquido.

Sustituyendo:

Para un 33 % de sólido

$$\frac{1}{\rho_{Pulpa}} = \frac{X_{sólido}}{\rho_{sólido}} + \frac{1 - X_{sólido}}{\rho_{líquido}}$$

$$\frac{1}{\rho_{Pulpa}} = \frac{0,33}{3,2} + \frac{1 - 0,33}{1}$$

$$\frac{1}{\rho_{Pulpa}} = 0,773$$

$$\rho_{pulpa} = \frac{1}{0,773} = 1,293 \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1}$$

De ahí que la masa total de pulpa se calcula por medio de:

$$m_{pulpa} = \rho_{pulpa} \cdot V$$

Sustituyendo:

$$m_{pulpa} = 1,293 \cdot 0,85$$

$$m_{pulpa} = 1,099 \text{ kg}$$

A partir del resultado se determina la masa de sólido.

$$m_{sólido} = m_{pulpa} \cdot \%_{sólido}$$

$$m_{sólido} = \text{kg} \cdot \frac{\%}{\%} = \text{kg}$$

Para un 33 % de sólido

$$m_{sólido} = 1,099 \cdot 0,33$$

$$m_{sólido} = 0,363 \text{ kg}$$

A partir del resultado se determina la masa de líquido inicial.

$$m_{líquido} = m_{pulpa} \cdot (1 - \%sólido)$$

Para un 33 % de líquido

$$m_{líquido} = 1,099 \cdot (1 - 0,33)$$

$$m_{líquido} = 0,737 \text{ kg}$$

La concentración inicial de ácido se determinó por cálculos estequiométricos, basados en la composición química del mineral y la posible extracción según experiencias obtenidas industrialmente y a escala de laboratorio. (Michal, 1970; Levenspiel, 1986; Del Toro, 2001).

Masa de ácido sulfúrico

$$m(H_2SO_4) = c(H_2SO_4) \cdot V_{líquido}$$

$$m(H_2SO_4) = \frac{g}{L} \cdot L$$

$$m(H_2SO_4) = c(H_2SO_4) \cdot \frac{m_{líq}}{\rho_{líq.}}$$

Para 90,5 g/L y 33 % de sólido

$$m(H_2SO_4) = 90,5 \cdot \frac{0,737}{1}$$

$$m(H_2SO_4) = 0,067 \text{ kg}$$

La concentración inicial de sulfato de hierro (II) se determinó en base a cálculos estequiométricos de acuerdo a la cantidad de cobalto y manganeso que existe en la cola.

Masa de sulfato de hierro (II)

$$m(FeSO_4) = c(FeSO_4) \cdot V_{líquido}$$

$$m(FeSO_4) = c(FeSO_4) \cdot \frac{m_{líq}}{\rho_{líq.}}$$

Para 17 g/L y 33 % de sólido.

$$m(FeSO_4) = 17 \cdot \frac{0,737}{1}$$

$$m(FeSO_4) = 0,013 \text{ kg}$$

7.- Se realizaron las pesadas de la muestra y reactivos y se introdujeron en el reactor para la ejecución de las pruebas experimentales, bajo las condiciones prefijadas.

8.- Posteriormente el producto lixiviado se sometió a un proceso de separación líquido – sólido. El licor filtrado se envió al laboratorio para análisis químico.

9.- El sólido se lavó con agua caliente y se secó en una estufa a 65 °C, el que se envió al laboratorio analítico para análisis químico por Fluorescencia de Rayos X.

2.4.6.5 Determinación de las extracciones de níquel y cobalto

Para determinar las extracciones de los metales se aplicó la ecuación (2.6)

$$\xi_{Me} = \frac{\%Me_{mineral} - \%Me_{cola} \cdot f}{\%Me_{mineral}} \cdot 100 \quad (2.6)$$

donde:

ξ_{Me} : Extracción del metal hacia la solución, %

$\%Me_{Mineral}$; Contenido de metal en la muestra inicial, %

$\%Me_{Cola}$; Contenido de metal en la muestra lixiviada, %

f : Factor de variación del elemento trazador.

Las figuras de extracciones de metales fue trazada con la utilización de programas profesionales de la materia como el EXCEL se expresa el valor medio, con su previa limpieza de datos en los casos necesarios.

2.5. Técnicas de análisis químicos – físicos empleadas

2.5.1. Análisis químico por método de fluorescencia de Rayos X (FRX)

Consiste en hacer incidir un haz de rayos X con energía suficiente para excitar los diferentes elementos que componen la muestra. Los átomos excitados al pasar al estado normal emiten radiaciones X cuya longitud de onda va a ser característica de cada elemento y la intensidad de su fluorescencia es proporcional al contenido de dicho elemento en la muestra. El espectrómetro es capaz de separar las diferentes longitudes de onda y determinar su intensidad y mediante la resolución de un sistema de ecuaciones se calculan las concentraciones de los diferentes elementos relacionándolos con una serie de muestras patrones con las que se calibra el equipo. Se utiliza en la determinación de la composición química de las muestras sólidas que se obtuvieron producto de la lixiviación, ubicada en el laboratorio analítico de la empresa “Comandante Ernesto che Guevara”.

2.5.2. Determinación de la densidad media de las colas por método picnométrico

La técnica empleada para determinar la densidad media de las colas en la muestra inicial y a los resultados de cada una de las separaciones es el picnómetro, la que consiste en pesar las colas hasta obtener un valor al que se denomina (M), seguidamente se limpia el picnómetro con agua destilada y se seca perfectamente, luego se llena de agua destilada hasta la señal de enrase y se pesa, al valor determinado se le suma el que se obtiene de (M) y aparece un nuevo valor (MI). Por último se pesa el picnómetro lleno de agua pero esta vez con la cola dentro y enrasado, arrojando un valor (MIH).

A través de la diferencia de las dos últimas pesadas se obtiene el valor de la masa del agua desalojada:

$$M_0 = MI - MII \quad (2.7)$$

donde:

M : masa de las colas, g;

M_0 : masa del agua desalojada, g;

MI : masa de la suma del picnómetro lleno de agua y de las colas, g;

II : masa del picnómetro con la mezcla de agua y colas, g.

Una vez cuantificada el valor del agua desalojada, se escoge la densidad de ellas para realizar los cálculos, para ello se tiene en cuenta la temperatura a la cual se realiza el proceso, la misma de 28 °C, pues los experimentos se realizan a temperatura ambiente, a través de la tabla la densidad del agua es de 996,4 kg/m³ (Pavlov, 1981).

Sustituyendo en la siguiente expresión se obtiene la densidad media de las colas.

$$\rho = \frac{M \cdot \rho_{H_2O}}{M_0} \quad (2.8)$$

donde:

ρ : densidad media de las colas, kg/m³;

ρ_{H_2O} : densidad del agua, kg/m³.

Como se muestran en la figura 2.8, los picnómetros empleados en los experimentos se encuentran ubicados en el laboratorio de Procesos Metalúrgicos del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Los experimentos se realizan en dos picnómetros de diferentes volúmenes, 25 y 50 mL. Las pruebas se realizan tres veces en cada recipiente para verificar la veracidad de los resultados.



Figura 2.8. Picnómetros que se utilizan para determinar la densidad.

Conclusiones del capítulo

1. La investigación se llevó a cabo por la separación hidro-gravimétrico (elutriación).de las colas de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”. y luego por lixiviación ácida de los productos obtenidos.
2. Se empleó el diseño experimental multinivel para evaluar la influencia de la granulometría y densidad de los productos separados por elutriación.
3. Se empleó el software Statgraphics 5.1 Plus para confeccionar el modelo estadístico matemático de los productos obtenidos por el método hidro-gravimétrico (elutriación) y métodos computacionales como el EXCEL.para analizar la influencia de las principales variables en el proceso de lixiviación ácida a presión atmosférica para la extracción de níquel y cobalto.

CAPÍTULO 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A continuación se muestran los principales resultados de la investigación, así como el análisis realizado a cada uno de las variables de estudio.

3.1. Composición química de las colas elutriadas

La tabla 3.1 muestra los resultados químicos, de los productos de elutriadores, que se separaron en fracción granulométrica de 0,02; 0,04 mm y 0,06 mm.

Tabla 3.1. Composición química de las colas obtenidas por elutriación

Fracción granulométrica, mm	Densidad, kg/m ³	Productos elutriados	Composición química, %			
			Ni	Co	Fe	Otros
0,02	2800	Reboso	0,390	0,085	43,7	55,8
		Arena	0,400	0,080	45,9	53,6
	3200	Reboso	0,385	0,085	43,7	55,8
		Arena	0,400	0,050	43,8	55,8
	3600	Reboso	0,380	0,085	48,2	51,3
		Arena	0,410	0,050	43,7	55,8
0,04	2800	Reboso	0,380	0,085	43,3	56,2
		Arena	0,395	0,079	45,4	54,1
	3200	Reboso	0,330	0,086	40,1	59,5
		Arena	0,450	0,070	41,7	57,8
	3600	Reboso	0,345	0,084	40,9	58,7
		Arena	0,460	0,070	41,2	58,3
0,06	2800	Reboso	0,385	0,086	38,6	60,9
		Arena	0,400	0,079	45,6	53,9
	3200	Reboso	0,385	0,085	43,6	55,9
		Arena	0,390	0,060	41,3	58,3
	3600	Reboso	0,380	0,085	43,7	55,8
		Arena	0,400	0,060	40,5	59,0

Al comparar los resultados mostrados con los de la composición química inicial de las colas (tabla 2.1), se aprecia que el níquel en las tres fracciones granulométricas se concentra hasta 0,450 % del valor máximo en las arenas, pero en el reboso su valor mínimo es de 0,330 % . Por otra parte, el cobalto se concentra a reboso en las tres

fracciones de granulometría con valor máximo de 0,086 % y su valor mínimo de 0,050 %. Además, el contenido de hierro en las arenas es mayor que en el reboso.

3.2. Resultados de la determinación de densidad de las colas

Para la determinación de densidad de las colas iniciales por la técnica de picnometría, la masa de las muestras recomendadas es de 0,98 g, a partir de las cuales se obtuvo una serie de resultados. Los valores de la densidad de colas antes de realizar la elutriación se muestran en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Densidad de las colas antes de realizar la elutriación

Parámetros	Picnómetro, 25 mL	Picnómetro, 50 mL
Masa de la suma del picnómetro lleno de agua y de la cola (M_I): g	44,8750	81,1956
Masa del picnómetro con la mezcla de agua y cola (M_{II}): g	44,5699	80,8905
Masa del agua desalojada (M_0): g	0,3051	0,3051
Densidad media: $kg \cdot m^{-3}$	3200,1301	3200,0121

Como se indica en la tabla, la densidad media de las colas determinada por los tres picnómetros es un tanto superior a los 3200 kg/m³; lo que corrobora el resultado de García (2011); en la presente investigación se redondea al número entero para buscar tener facilidad a la hora de fijar el gasto volumétrico en el elutriador. El resultado se debe a que existe un equilibrio entre los elementos que componen las colas, es decir, hay elementos muy densos y otros con una baja densidad. En la aplicación de la técnica se tienen en cuenta los elementos que no se evidencian en el resultado del análisis químico.

Como resultado del proceso de elutriación se obtienen dos productos: reboso y arenas, a los que se le realiza análisis picnométrico para valorar la veracidad de los resultados. En la tabla 3.3. se muestran los valores medios de densidad de los productos de la picnometría planteada.

Tabla 3.3. Densidad de los productos de la elutriación

Tamaño de partícula, mm	Densidad analizada en la elutriación, kg/m ³	Densidad en el reboso, kg/m ³	Densidad en las arenas, kg/m ³
0,02	2800	819,4	2900,7
	3200	872,3	3255,1
	3600	1052,3	3760,4
0,04	2800	840,5	2921,7
	3200	991,3	3395,3
	3600	1242,3	3721,8
0,06	2800	872,4	3897,7
	3200	1028,9	3537,1
	3600	1091,9	3895,8

La tabla señala que para la combinación 0,02 mm y 3600 kg/m³ del reboso, la densidad alcanza su mayor valor de 1052 kg/m³ y se debe fundamentalmente a la concentración del hierro de 48,2 %. En la combinación 0,06 mm y 2 800 kg/m³, la densidad alcanza su menor valor de 863 kg/m³ debido a la disminución del hierro hasta 38,6 %.

En las arenas existe una aumenta de la densidad desde 2900 hasta 3 895,8 kg/m³ a medida que crece la granulometría desde 0,02 hasta 0,06 mm.

3.3. Análisis estadísticos de los resultados de la elutriación

El análisis estadístico de los resultados de la separación hidro-gravimétrica tiene como objetivo caracterizar las influencias de las variables de entrada en la de salida. En el caso de estudio, se estudiaron los efectos de las variables de entrada (granulometría y densidad de las colas) sobre el contenido de níquel y cobalto en las mismas.

En la figura 3.1. se muestran los efectos principales sobre el porcentaje de níquel en las arenas. Se observa que el contenido de níquel en las arenas aumenta al incrementar la densidad y la granulometría de 0,02 a 0,038 mm. Al contrario, con un incremento de la granulometría desde 0,038 hasta 0,06 mm existe una disminución en la concentración del elemento hasta 0,40 %.

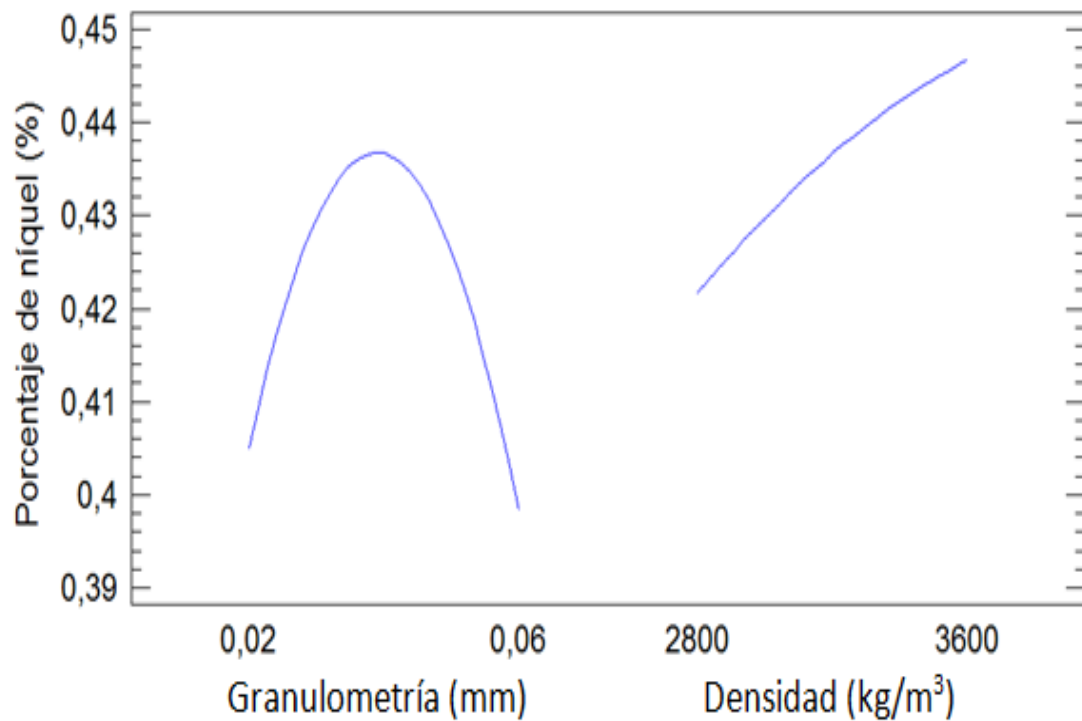


Figura 3.1. Efectos principales sobre el contenido de níquel en las arenas.

La ecuación del modelo de regresión ajustada para el níquel en la arena es:

$$\text{Ni_Arena} = 0,003333 + 7,833330 \cdot G + 0,000144 \cdot D - 87,500000 \cdot G^2 - 0,000313 \cdot G \cdot D - 1,562500 \cdot 10^{-8} \cdot D^2 \quad (3.1)$$

Los efectos principales sobre el porcentaje de níquel en el reboso se muestran en la figura 3.2, donde se observa que el contenido de níquel en el reboso disminuye al incrementar la densidad y la granulometría de 0,02 a 0,038 mm y al aumentar la granulometría incrementa el contenido de níquel en el reboso.

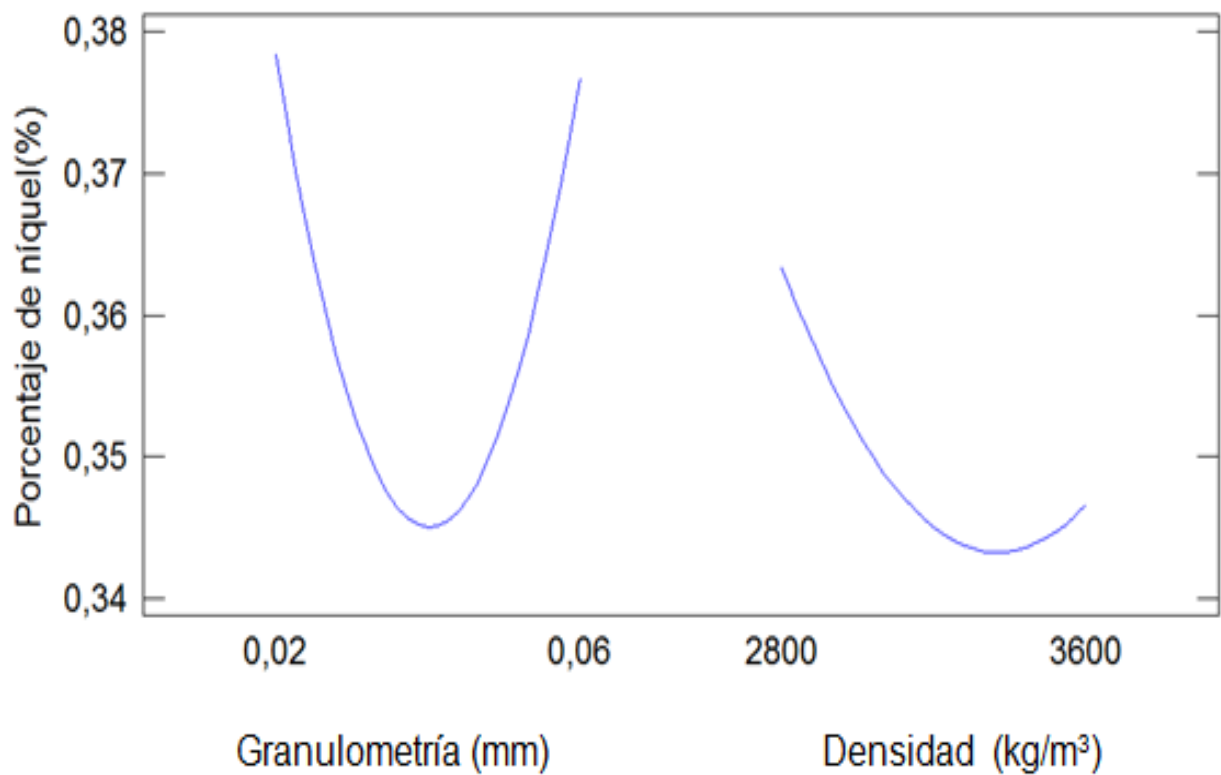


Figura 3.2. Efectos principales sobre el contenido de níquel en el reboso.

La ecuación del modelo de regresión ajustada para el níquel en el reboso es:

$$\text{Ni_reboso} = 1,20333 - 7,04167 \cdot G - 0,000427083 \cdot D + 81,25 \cdot G^2 + 0,00015625 \cdot G \cdot D + 6,25 \cdot 10^{-8} \cdot D^2 \quad (3.2)$$

La figura 3.3, señala los efectos principales sobre el porcentaje de cobalto en la arena, en la cual se aprecia que el contenido de cobalto en el reboso aumenta al incrementar la granulometría y al disminuir la densidad desde 3 065,88 hasta 2 800 kg/m³.

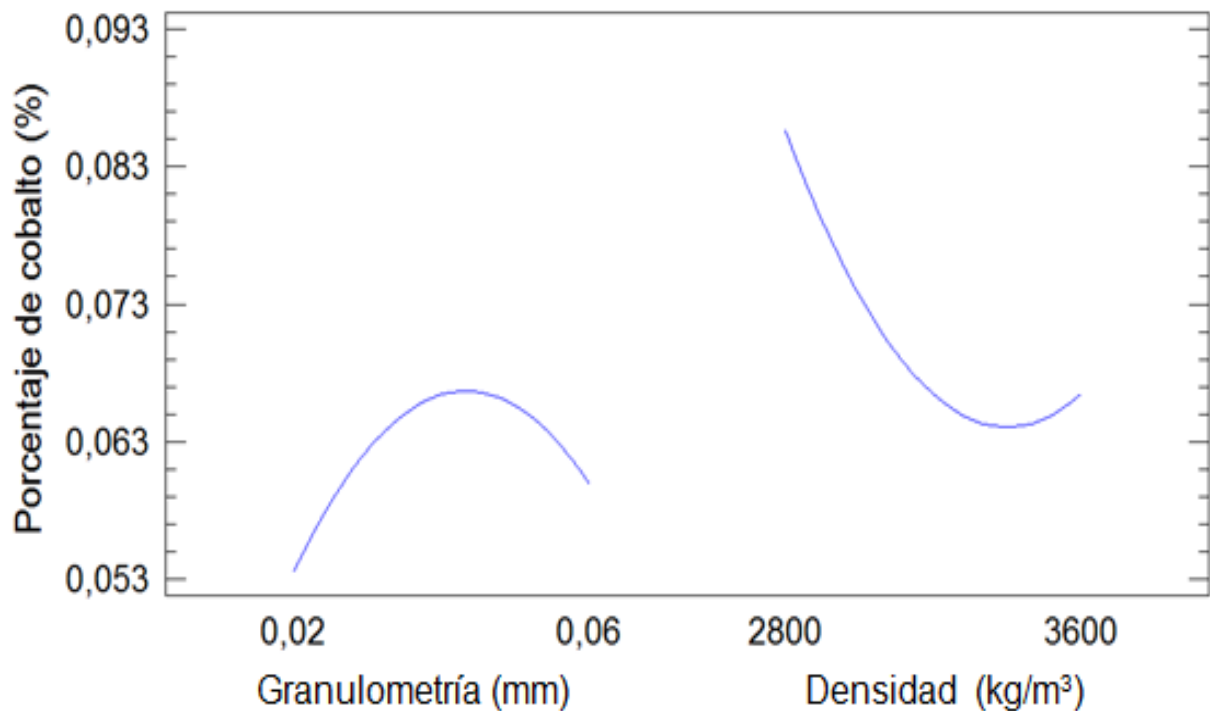


Figura 3.3. Efectos principales sobre el contenido de cobalto en la arena.

La ecuación del modelo de regresión ajustada para el cobalto en la arena es:

$$\text{Co_arena} = 0,755444 + 0,991667 \cdot G - 0,000421042 \cdot D - 24,1667 \cdot G^2 + 0,00034375 \cdot G \cdot D + 5,98958 \cdot 10^{-8} \cdot D^2 \quad (3.3)$$

La figura 3.4. Señala los efectos principales sobre el porcentaje de cobalto en el reboso, en la cual se aprecia que el contenido de cobalto en el reboso aumenta al incrementar la granulometría y la densidad de 2 800 a 3 065,88 kg/m³ . Por lo contrario, con un incremento de la densidad de 3 065,88 a 3 600 kg/m³ existe una disminución en la concentración del elemento.

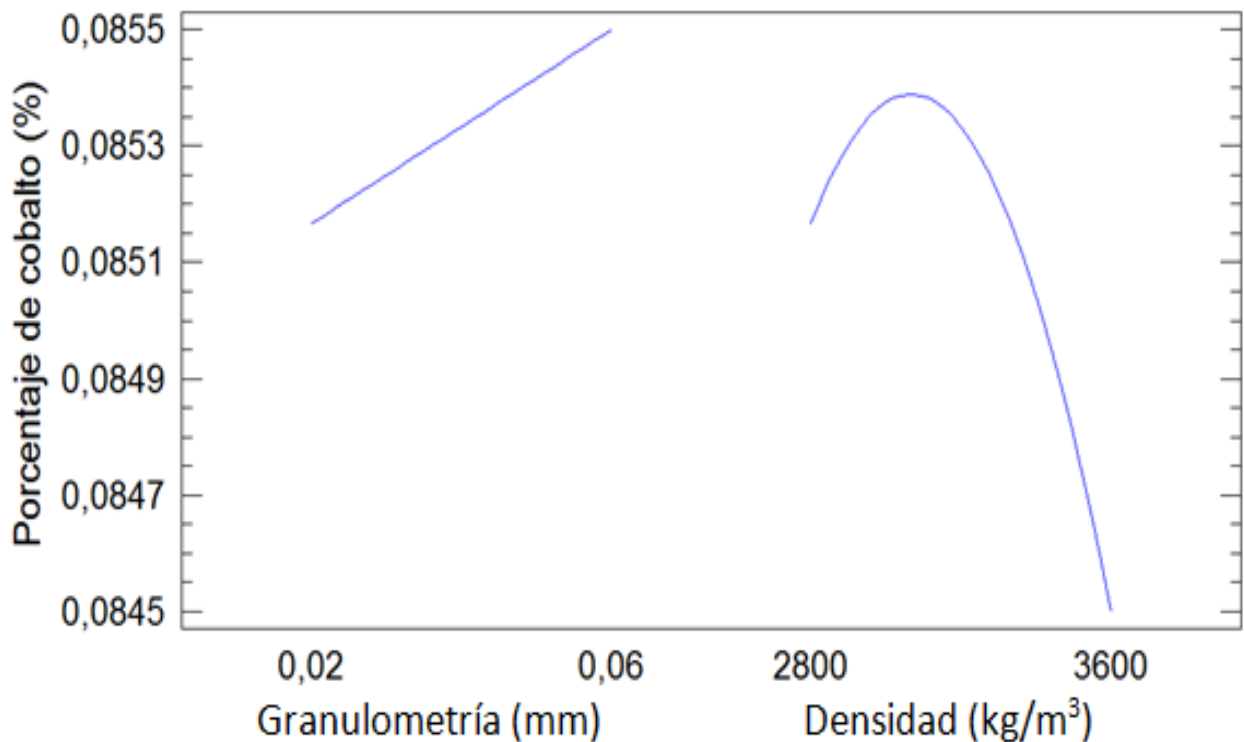


Figura 3.4. Efectos principales sobre el contenido de cobalto en el reboso.

La ecuación del modelo de regresión ajustada para el cobalto en el reboso es:

$$\text{Co_reboso} = 0,055667 + 0,008333 \cdot G + 0,000019 \cdot D - 3,125000 \cdot 10^{-9} \cdot D^2 \quad (3.4)$$

3.4. Influencia de los principales parámetros en la elutriación

El parámetro que tiene mayor efecto sobre la elutriación es la granulometría, por lo que el diámetro de la partícula en la ecuación 2.3 expuesta, se encuentra elevado al cuadrado y cualquier variación pequeña siempre que sea para elevarla, aumenta considerablemente el flujo volumétrico, sin embargo al aumentar la densidad el flujo crece en pequeños rangos.

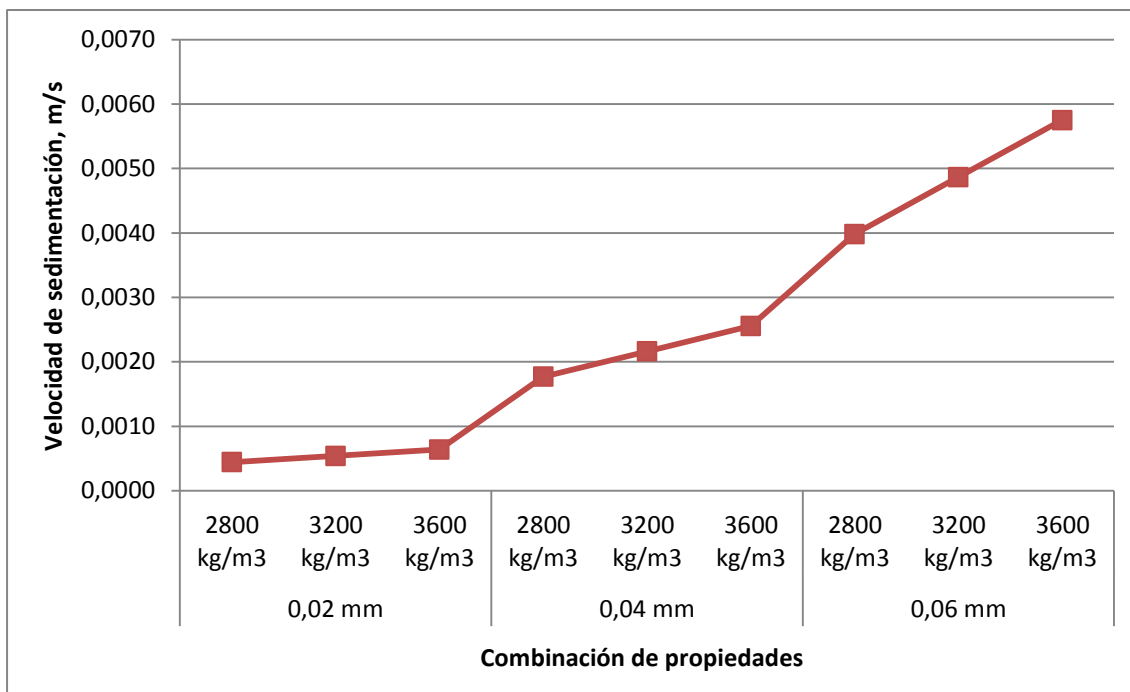


Figura 3.5. Comportamiento de la velocidad de sedimentación de las partículas y densidad.

En la figura se puede observar que la velocidad de sedimentación de las partículas es relativamente pequeña y aumenta a medida que se incrementa el tamaño de partículas y al incrementar el tamaño de las partículas y las densidades prefijadas, aumentan sus velocidades de sedimentación.

El comportamiento del gasto volumétrico y de la velocidad de sedimentación de las partículas se muestra en la figura 3.6

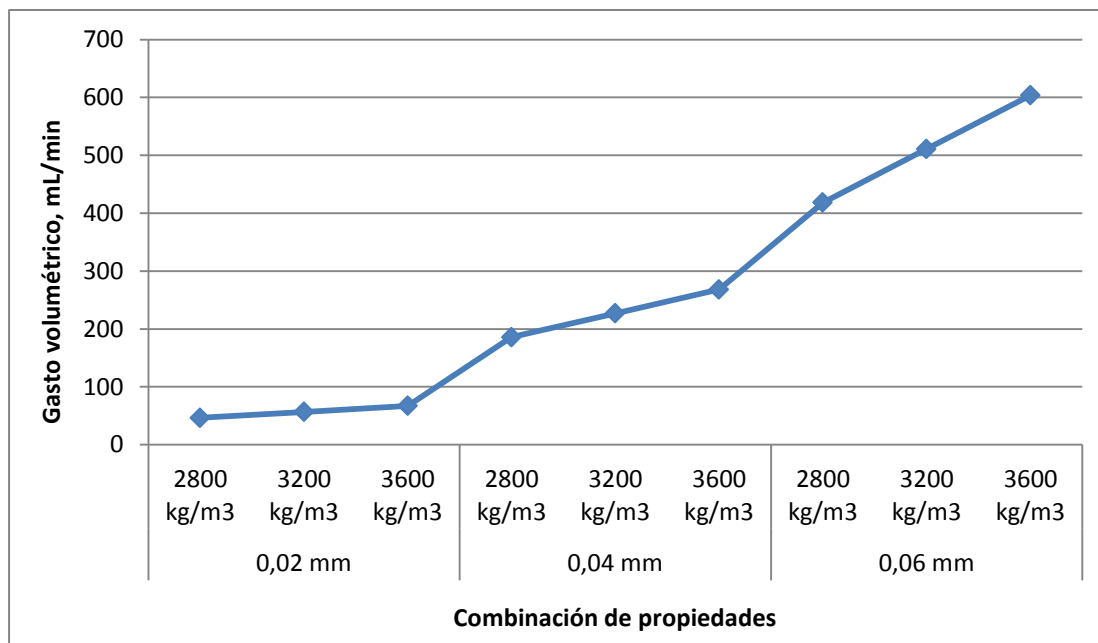


Figura 3.6. Comportamiento del gasto volumétrico de las partículas y densidad.

La figura demuestra que al incrementar el tamaño de las partículas y las densidades prefijadas, aumentan el gasto volumétrico que las arrastra, por tanto, existe una dependencia proporcional en estos aspectos.

Para la fracción de 0,02 mm, combinada con los tres rangos de densidades, la velocidad de sedimentación y el gasto volumétrico muestran un comportamiento aproximadamente lineal y experimentan un ligero crecimiento. A partir de las combinaciones para la clase de 0,04 mm existe un comportamiento más progresivo y para la clase de 0,06 mm, combinada con los tres rangos de densidades, la velocidad de sedimentación y el gasto volumétrico alcanzan sus mayores valores.

3.5. Análisis de los resultados de la lixiviación

Como se conoce, una de las etapas principales en la cinética de la lixiviación de las colas es el acto de la reacción química que ocurre en la superficie del óxido lixiviable. La magnitud de esta superficie es determinante en la velocidad de la reacción y la misma depende en gran medida de la granulometría de la cola que se alimenta al proceso.

3.5.1. Resultados de la extracción de níquel contenido en las arenas

A mayor tamaño de partículas la recuperación del metal es menor debido a que se dificulta el transporte del reactivo lixiviante hasta el centro de las partículas, limitando el contacto con los elementos principales a lixiviar. Por otra parte, con la disminución de la granulometría se incrementa la interface de contacto, lo que conlleva a un aumento de la extracción del níquel durante el proceso.

La figura 3.7 indica que la mejor extracción de níquel se obtuvo con las arenas de tamaño menor de 0,02 mm, donde su máximo alcance es de 72,50 % en un tiempo de 20 minutos. Además, para las arenas que poseen la granulometría mayor de 0,06 mm sólo alcanza un 25 % de níquel extraído. También se observa que el comportamiento de las partículas de clase media es similar a los anteriores, es decir que el máximo contenido del níquel extraído está dentro del rango entre 25 y 72,50 %, en este caso el valor del mismo es de 50 %.

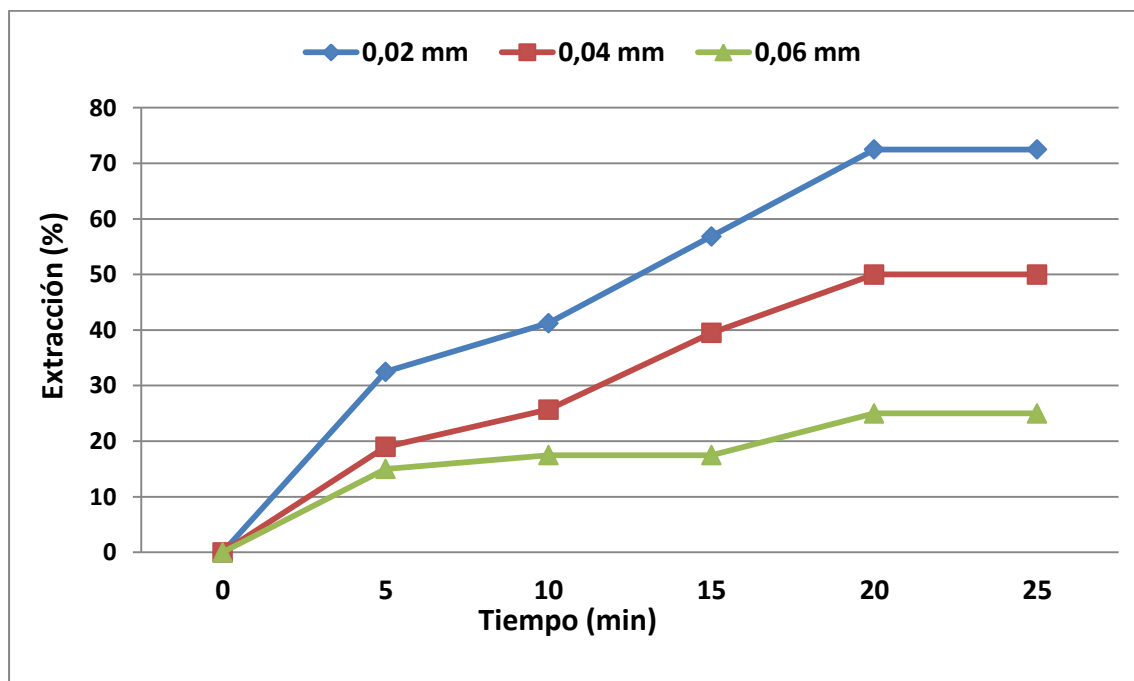


Figura 3.7. Extracción de níquel contenido en las arenas.

Los resultados obtenidos confirman que a través del proceso de elutriación el níquel se concentra en las arenas, y al someterlas a la lixiviación las arenas más finas poseen

una mejor extracción que las más gruesas. Por lo que se debe clasificar las mismas antes de ser lixiviadas para lograr una mejor eficiencia del proceso de recuperación de níquel.

3.5.2. Resultados de la extracción de cobalto contenido en las arenas

Según los resultados de la elutriación donde el contenido de cobalto en las arenas es relativamente pequeño en comparación con el de níquel. Además, bajo las mismas condiciones establecidas para el proceso de lixiviación el elemento níquel se caracteriza por una mayor afinidad que el cobalto, debido a lo cual, la extracción de cobalto en las arenas es menor que la del níquel.

Como se muestra en la figura 3.8, la granulometría es una de las variables influyentes en el proceso de lixiviación ácida a presión atmosférica de las colas de la tecnología carbonato amoniacal. En el caso de la extracción de cobalto contenido en las arenas tiene una influencia directamente proporcional con respecto a la extracción, es decir, con el incremento de la granulometría se incrementa la extracción de cobalto.

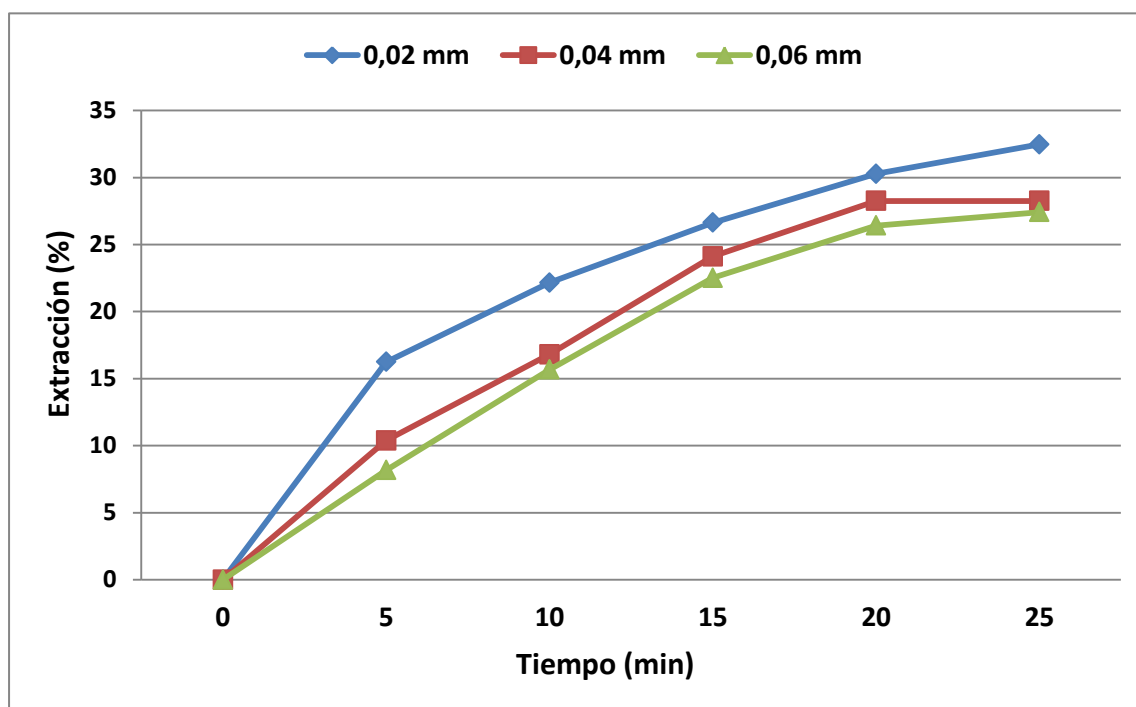


Figura 3.8. Extracción de cobalto contenido en las arenas.

En la figura se aprecia que para valores de granulometría menor de 0,02 mm se obtiene una extracción de cobalto alrededor de 32,47 %, mientras que para granulometrías mayor de 0,06 mm, la extracción de cobalto no supera el 28 % para un tiempo de lixiviación de 20 min, lo que indica que no existe una influencia significativa de la granulometría de las arenas para la extracción de cobalto. Por lo que tiene que ser considerada como un parámetro fundamental dentro del proceso de lixiviación a presión atmosférica de las colas de la tecnología carbonato amoniacal para la extracción del cobalto.

Como regularidad en las curvas se observa que tanto para las partículas de clases menor de 0,02 mm como para las de mayor de 0,06 mm, las mayores extracciones de cobalto se alcanzan en aproximadamente 20 minutos y a partir de ese tiempo los incrementos de las extracciones de cobalto son mínimos, llegando a ser constantes.

3.5.3. Extracción de níquel contenido en el reboso.

A partir de los resultados obtenidos del proceso de elutriación, en los cuales resultan que durante la lixiviación las partículas más finas poseen una mejor extracción que las más gruesas, pero el máximo alcance de extracción de níquel en este caso es menor que el de las arenas. Los resultados de la extracción de níquel contenido en el reboso se ilustran en la figura 3.9.

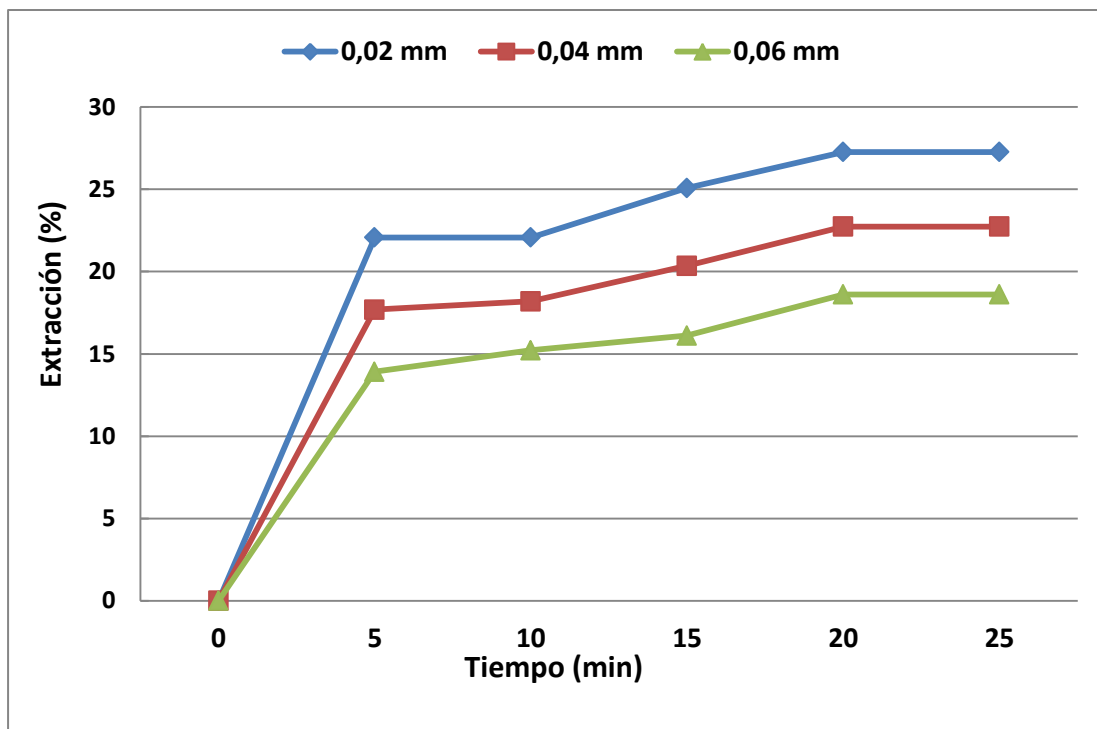


Figura 3.9. Extracción de níquel contenido en el reboso.

La figura 3.9 demostró que la mejor extracción de níquel se obtuvo con el reboso de tamaño menor de 0,02 mm , donde su máximo alcance es de 27,27 % en un tiempo de 20 minutos . Además, para las partículas de tamaño mayor de 0,06 mm solo alcanza un 18,61 % de níquel extraído. Por otra parte, se observa que el comportamiento de las partículas de clase media es similar a los anteriores, es decir que el máximo contenido del níquel extraído está dentro del rango entre 18,61 y 27,27 % , en este caso el valor del mismo es de 22,74 %. A partir de los resultados ilustrados se arrojó que el comportamiento de la lixiviación del reboso es similar que el de las arenas pero presenta una mejor recuperación de cobalto.

3.5.4. Extracción de cobalto contenido en el reboso

Los resultados señalados mostraron la ineficiencia en la extracción de níquel contenido en el reboso, debido a su bajo porcentaje en el mismo. Por lo contrario, la lixiviación de cobalto resultó con mayor efectividad que en el caso de las arenas, lo que confirma

nuevamente la importancia de la separación hidro-gravimétrica para enriquecer los minerales antes del proceso de lixiviación.

En la figura 3.15 también se aprecia que tanto para las partículas de clases menor de 0,02 mm como para las de mayor de 0,06 mm, las mayores extracciones de cobalto se alcanzan en aproximadamente 20 minutos y a partir de ese tiempo los incrementos de las extracciones de cobalto son mínimos, hasta llegar a ser constantes.

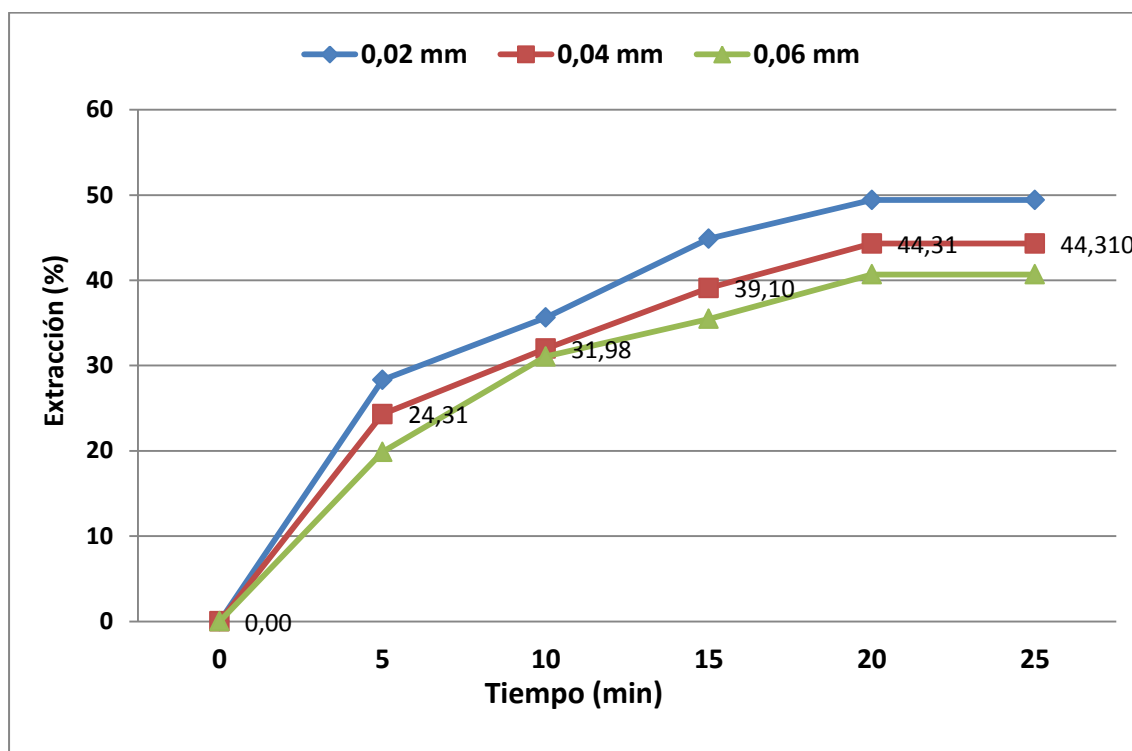


Figura 3.10. Extracción de cobalto contenido en el reboso.

La figura muestra que para valores de granulometría menor de 0,02 mm se obtiene una extracción de cobalto alrededor de 49 %, mientras que para granulometrías mayores que 0,06 mm, la extracción de cobalto no supera el 41 % para un tiempo de lixiviación de 20 min.

3.6. Evaluación económica

Partiendo de los beneficios que pudiera aportar la aplicación del proceso de lixiviación ácida a presión atmosférica para la recuperación del níquel y cobalto contenido en las colas del proceso carbonato amoniacal como elemento primario, se toma como base de cálculo el consumo de reactivos en el proceso de lixiviación como materiales auxiliares para procesar 1 t de cola.

En primer lugar se analiza la adición de sulfato de hierro (II) como agente reductor y el consumo de ácido sulfúrico por tonelada de cola procesada.

Considerando un consumo de sulfato de hierro (II) de 0,033 5 t y de ácido sulfúrico de 0,184 4 t se tendría que:

Si el costo promedio del ácido sulfúrico es de 72,53 USD la tonelada, entonces:

$$0,184\ 4 \cdot 72,53 = 13,37\ \text{USD/t de H}_2\text{SO}_4$$

Con respecto al sulfato de hierro (II) que se añade al proceso, con un precio en el mercado de 90.00 USD la tonelada, se tiene que:

$$0,033\ 5 \cdot 90,00 = 3,02\ \text{USD/t de FeSO}_4$$

Por lo que el costo por consumo de reactivo es de:

$$13,374\ 5 + 3,0150 = 16,39\ \text{USD/t}$$

Si se diseña una planta para producir 20 t de níquel y cobalto al año y si dicha planta tiene una eficiencia de 85 %, conociendo que el contenido inicial de níquel y cobalto en la materia prima son de 0,45 % y 0,09 % respectivamente, será necesario procesar una cantidad de 26 133 t de cola por lo que el consumo de reactivos para este propósito es:

$$26\ 133 \cdot 0,0335 = 875,46\ \text{t de FeSO}_4$$

$$26\ 133 \cdot 0,1844 = 4\ 818,93\ \text{t de H}_2\text{SO}_4$$

Por lo que el costo por consumo de reactivos para procesar 26133 t de cola sería de:

$$875,46 \cdot 90 = 78\ 791,40\ \text{USD/t de FeSO}_4$$

$$4\ 818,93 \cdot 72,53 = 349\ 516,64\ \text{USD/t de H}_2\text{SO}_4$$

$$78\,791,40 + 349\,516,64 = 428\,307,64 \text{ USD/t}$$

El costo por consumo de reactivos para procesar 26 133 t de cola sería de 428 307,64 USD/t.

3.7. Evaluación ecológica

La planta de níquel “Comandante Ernesto Che Guevara”, durante más de dos décadas de explotación ha ocasionado gran impacto sobre el medio ambiente. Desde sus inicios ha sido un alto consumidor de energía y reactivos, los cuales durante el proceso generan gases y residuos sólidos que afectan directamente al hábitat.

Uno de los desechos generados que inciden negativamente en el medio ambiente son las colas, las que constituyen un foco permanente de contaminación de las aguas superficiales y subterráneas, con el incremento de la concentración de una serie de elementos pesados por encima de los valores admisibles para el agua potable, los suelos y el aire; en el que resulta ser el hombre su mayor consumidor. Tales residuos aumentan cada día con el avance de la explotación de los yacimientos.

El residual es arrastrado como consecuencia del alto régimen de precipitación en la región por las aguas subterráneas y contaminan el lecho marino y de esta forma van extinguiendo algunas de las especies residentes en el lugar. Los contenidos de óxido de sodio y potasio, así como el cloro son mayores en colas depositadas por debajo del nivel del mar, este comportamiento se atribuye a la posible asimilación de estos por el agua de mar.

Cuando los residuos sólidos están bien secos debido a su fina granulometría son arrastrados por el viento y contaminan el medio ambiente, dañando de esta forma la salud de las personas y ensuciando todo el entorno. El área que ocupa el dique puede ser aprovechada para la rehabilitación minera y de esa forma favorece la biodiversidad.

Desde el punto de vista ecológico, el estudio se ha demostrado la posibilidad de proponer una vía para el tratamiento de las colas, pudo constatarse que a partir de la separación gravimétrica, especialmente la elutriación se puede concentrar especies

metálicas como el níquel en las arenas en la fracción 0,06 mm a la densidad de $2\,800\text{ kg/m}^3$, el hierro en la combinación 0,02 mm y $3\,600\text{ kg/m}^3$ en el mismo producto, entre otros. Con la puesta en marcha de la instalación empleada se puede reducir gran parte del residual depositado en la presa de colas, así como la generación de empleo a varios trabajadores de la comunidad minera de Moa.

Conclusiones del capítulo

1. Los productos (arenas y reboso) obtenidos por separación hidro-gravimétrica presentan un contenido de níquel y cobalto no significativos.
2. La mayor extracción de níquel se obtuvo a partir de las arenas de menor granulometría, de igual forma en el reboso de menor tamaño presenta mejor recuperación de cobalto.
3. Con el aprovechamiento adecuado del residual se resuelven problemas desde el punto de vista económico, social y ambiental, lo cual disminuiría su incidencia negativa en el medio ambiente y contribuiría al bienestar social.

CONCLUSIONES

En la presente investigación se llegó a las siguientes conclusiones:

- Se obtuvo que el proceso de separación de hidro-gravimétrica (elutriación) de los productos obtenidos de las arenas y reboso presentan una concentración no significativa para el contenido de níquel y cobalto.
- Se obtuvieron los modelos estadístico – matemáticos que demostraron la influencia de la granulometría y la densidad para la recuperación de níquel y cobalto contenidos en los productos elutriados.
- Se demostró a partir del proceso de lixiviación ácida, que los productos elutriados tuvieron una extracción de 72,5 % y 32,47 %, de níquel y cobalto en las arenas de tamaño mayor que 0,02 mm, mientras que en el reboso fue de 27,27 % y de 49 % logrado a los 20 min en las partículas con granulometría menores a 0,02 mm.

RECOMEDACIONES

- Buscar otras variantes de tratamiento de las colas de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara que permita mejorar la recuperación y extracción de níquel y cobalto.
- Evaluar composición química de otros elementos metálicos contenido en las colas.

BIBLIOGRAFÍA

1. ALEXANDER R. 2013. Lixiviación ácida del concentrado magnético de una muestra de cola de la empresa René Ramos Latour". Trabajo de Diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 70p.
2. ALMAGUER A., V. Z. 1993. Estudio de la distribución de hierro, níquel y cobalto en los tamaños de los granos que componen el perfil de la corteza de intemperismo de las rocas ultramáficas hasta su desarrollo laterítico y su relación con la mineralogía. Revista Minería y Geología. Vol. 2. Nº 2. Moa, ISMM.
3. CHANG A. 2000. Principales pérdidas de níquel y cobalto en la tecnología carbonato amoniacal. Informe de Investigación. Moa, ISMM.
4. Concentración por elutriación <http://www.tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/9187/Capitulo2.pdf>.com[Consulta: 02 de marzo de 2015].
5. DEL TORO, A. 2003. Consideraciones sobre la posible recuperación del cobalto contenido en las colas de la tecnología carbonato amoniacal. Trabajo de Diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 56p.
6. URGELLES D., T. 2014. Cinética de la lixiviación de las colas de la tecnología carbonato amoniacal para la recuperación de cobalto. Trabajo de Diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 66p.
7. CRUZ, D., V. 2012. Lixiviación ácida de los concentrados de los residuales sólidos de la tecnología carbonato amoniacal "René Ramos Latour" Trabajo de Diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 77p.
8. DONALD G Y DEYANIRA L. 2011, Métodos para determinar granulometría y densidad aparente del suelo, Universidad de Gante, Bélgica, Universidad Central de Venezuela, Facultad de Agronomía, Revisita Venesuelos 14:37-48.
9. FERNÁNDEZ J., A. 1979. Datos aportados sobre las colas de la empresa "René Ramos Latour". En: Informe técnico. Nicaro, Cuba, 45p.
10. FOMENKO, T.G. 1982. Procesos de enriquecimiento de minerales por gravitación. Moscú, Editorial Mir. 421p.

11. GARCÍA E., P. 2011. Extracción de cobalto por lixiviación ácida de los residuales sólidos de la tecnología carbonato amoniacal. Tesis de maestría. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 70p.
12. HERNÁNDEZ, C. M. 2011. Recuperación de Níquel, Cobalto y Hierro a partir del residuo sólido de la empresa "Ernesto Che Guevara. Tesis de Maestría. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 65p.
13. RODRÍGUEZ J., D. 2012. Recuperación de cobalto por lixiviación ácida a partir de los residuales sólidos de la tecnología carbonato amoniacal. Trabajo de Diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 54p.
14. JORGE R., H. 2014. Separaciones mecánicas por acción de la fuerza de gravedad, TEMA V, 17p.
15. LEVENSPIEL O. 1986. Ingeniería de las reacciones química. Editorial Pueblo y Educación. 638p.
16. LIANIS., Á. C. 2011. Modelación y simulación del proceso de lixiviación ácida de las colas de la tecnología carbonato amoniacal. Tesis de Maestría. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 54p.
17. LOBAINA D. 2003. Lixiviación de los residuales sólidos de la tecnología carbonato amoniacal en presencia de ácido sulfúrico como agente lixivante y sulfato de hierro II como reductor. Trabajo de Diploma. Moa, ISMM.
18. LOYOLA O., B. 2012. Comportamiento de las colas de la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara" ante la variación de la intensidad del campo magnético. Tesis de Maestría. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 61p.
19. MARTÍNEZ L. 2006. Lixiviación del sólido residual de la tecnología carbonato amoniacal con ácido sulfúrico y sulfato de Fe II como agente reductor. Trabajo de Diploma. Moa, ISMM.
20. MEDRANO A. 2007. Lixiviación Ácida de los Residuales Sólidos de la tecnología Carbonato amoniacal. Trabajo de Diploma. Moa, ISMM.
21. MICHAL E., C. W. 1970. Leaching of nickel lateritic ores with waste iron sulphate solutions. United State Patent. 3,761,566. American Metal Climax, Inc. N.Y.

22. MITROFANOV, S. I. 1982. Investigación de la capacidad de enriquecimiento de los minerales. Moscú, MIR. 440p.
23. MUSTAPHA C. 1977. Contribución a la valoración de las ferralitas níquelíferas de Nueva Caledonia. La Habana, CIPIMM.
24. PALACIOS A., R. 2001. Recuperación de cobalto por medio de la lixiviación ácida de los escombros lateríticos. Tesis en opción al grado de Doctor en Ciencias Técnicas. Moa. ISMM. 103p.
25. PALMERO A., R. 2011: Comportamiento de las colas de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” ante la intensidad de un campo magnético. Trabajo de Diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 45p.
26. PAVLOV, K. F. 1981: Problemas y ejemplos para el curso de operaciones básicas y aparatos en tecnología química. Moscú, MIR. 340p.
27. PERRY`S R., CH. C. 1999. Chemical Engineers Handbook. Editorial Pueblo y Educación. Tomo I.
28. PONCE N. 1979. Mineralogía y composición sustancial del yacimiento artificial colas de Nicaro. Revista “La minería en Cuba”. 5 (3).
29. Proyecto “Capacitación de Mineros en escuela Minera de Chiripujio 2006., Servicio Nacional de Geología y Técnico de Minas – SERGEOTECMIN. Manual de entrenamiento en concentración de minerales. sección IV clasificación 16p.
30. ROJAS A. 1995. Principales fases mineralógicas portadoras de níquel en los horizontes lateríticos del yacimiento Moa. Tesis en opción al título de Doctor en Ciencias. Moa, ISMM.
31. ROJAS A., P. y Turro A., B. 2003. Composición mineralógica de las colas del proceso CARON en Moa, Holguín, Cuba. Revista Cubana de Minería y Geología, ISSN 0258 5979, Nos. 3-4.
32. SAMALEA, G. 1996. Lixiviación de las colas viejas de la tecnología carbonato amoniacal en medio ácido con SO_2 y H_2SO_3 . En: Informe Técnico. Nicaro, Cuba, 23.

33. SOBOL S. 1968. Composición mineralógica de las lateritas de Moa y su influencia sobre las formas de lixiviación de minerales por ácido sulfúrico en autoclave. Revista Tecnológica. Vol. VI. N° 5 y 6. Cuba, La Habana.
34. TAYLOR, S. & BOGDAN, R. 1984. Introducción a los métodos cualitativos de la investigación. Nueva York, McGraw-Hill. 332p.
35. URBANO O, H. "et al". 1985. Tecnología de los metales tomo I. ISPJAE , La Habana, Cuba. 546p.
36. YUNIOR C., C. 2013. Comportamiento denso-granulométrico y químico de las colas de la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara". Tesis de Maestría. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 83p.
37. ZELIKMAN A., N. "et al". 1975. Teoría de los Procesos Hidrometalúrgicos. Editorial Metalurgia, Moscú. 492p.

ANEXO

Anexo 1. Parámetros operacionales de experimentación

Tamaño de partícula, mm	Densidad, kg/m ³	Velocidad de sedimentación de las partículas, m/s	Gasto volumétrico, mL/min
0,02	2800	0,0004	46,5
	3200	0,0005	56,8
	3600	0,0006	67,1
0,04	2800	0,0018	185,9
	3200	0,0022	227,1
	3600	0,0026	268,3
0,06	2800	0,0040	418,3
	3200	0,0049	511,0
	3600	0,0057	603,8