



**Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa
Dr. “Antonio Núñez Jiménez”
Facultad de Metalurgia y Electromecánica
Departamento de Metalurgia**

**COMPORTAMIENTO DENSO-GRANULOMÉTRICO Y
QUÍMICO DE LAS COLAS DE LA EMPRESA
“COMANDANTE ERNESTO CHE GUEVARA”**

Tesis presentada en opción al título de Master en Metalurgia

YUNIOR CORREA CALA

Moa 2013



**Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa
Dr. “Antonio Núñez Jiménez”
Facultad de Metalurgia y Electromecánica
Departamento de Metalurgia**

**COMPORTAMIENTO DENSO-GRANULOMÉTRICO Y
QUÍMICO DE LAS COLAS DE LA EMPRESA
“COMANDANTE ERNESTO CHE GUEVARA”**

Tesis presentada en opción al título de Master en Metalurgia

Autor: Ing. Yunior Correa Cala

Tutores: Aux., Ing. Amaury Palacios Rodríguez, Dr.C.

Prof. Tit., Ing. Pedro E. Beyris Mazar, Dr.C

Moa 2013

Pensamiento

“...Es poco el sacrificio que hagamos para el bien que conquistaremos”.

José Luís Tassende.

Dedicatoria

Dedico este Trabajo de Maestría, a las personas que hicieron que mi sueño llegara a ser realidad.

- ◆ *Especialmente a mis Padres:*

Ramón Correa Senciales; Ilsa Cala Guilarte.

A mi esposa:

Arlenys Carbonell Pupo,

- ◆ *A mi hermana:*

Maiyet Correa Cala

Agradecimientos

Ofrezco mi agradecimiento a todos aquellos que de una forma u otra han contribuido a la realización de este trabajo, en especial:

- ◆ *A la Revolución Cubana por darme la oportunidad de estudiar en un país como Cuba,*
- ◆ *A mis padres por toda la confianza que han depositado en mi,*
- ◆ *A mi esposa por haberme brindado su apoyo en los momentos más difíciles,*
- ◆ *A mi hermanas,*
- ◆ *A mis tutores Amaury Palacios Rodríguez y Pedro Beyris Mazar por haberme guiado en todo el trabajo,*
- ◆ *A Orleidy Loyola Breffe a quien molesté frecuentemente,*
- ◆ *A todos mis compañeros de trabajo, en especial a:*
Roger Almenares Reyes.,
- ◆ *A los compañeros de la producción: Osvaldo y Euclides,*
- ◆ *A Ciro y su familia por atenderme desinteresadamente.*

A todos muchas gracias.

RESUMEN

El presente trabajo tiene como propósito determinar el comportamiento denso-granulométrico y químico de las colas de la tecnología carbonato amoniacal, ya que la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, vierte cada año una gran cantidad de residuales al medio ambiente con altas concentraciones de especies metálicas muy valiosas que pueden ser recuperadas. Por ello se sometió a la separación por elutriación utilizando el agua como fluido, con la combinación de las propiedades densidad y granulometría. La composición química se determinó a través de la técnica de Fluorescencia de rayos X. Se obtuvo que a 0,02 mm y 3600 kg/m³ se concentra el hierro en el Reboso, en 0,04 mm y 2800 kg/m³ de las Arenas se concentra el manganeso y a 3600 kg/m³ el cobalto, cinc y cromo; en el Reboso a 2800 kg/m³ se concentra el aluminio y en 0,08 mm a 2800 kg/m³ el níquel, magnesio y silicio alcanzan sus mayores concentraciones en el Reboso. Se demostró que es posible la separación de elementos valiosos a partir de las colas por medio de la elutriación.

Palabras clave: colas, densidad, elutriación, granulometría.

ABSTRACT

This paper aims to determine the behavior dense grain and chemical-tails of ammonium carbonate technology, as the company "Comandante Ernesto Che Guevara", poured each year a large amount of waste into the environment with high concentrations of species valuable metal that can be recovered. Thus was subjected to separation by elutriation using water as a fluid, with the combination of density and particle size properties. The chemical composition was determined using the technique of X-ray Fluorescence It was found that 0,02 mm to 3600 kg/m³ and the iron is concentrated in the overflow at 0,04 mm and 2800 kg/m³ is concentrated underflow 3600 kg/m³ manganese and cobalt, zinc and chromium; in overflow to 2800 kg/m³ focuses on aluminum and 0,08 mm and 2800 kg/m³ nickel, magnesium and silicon reach their highest concentrations in the overflow. It proved to be possible to separate valuable components from the tails through elutriation process. Keywords: tails, density, elutriation, granulometry.

ÍNDICE

PÁG.

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL	5
1.1. Fundamentos teóricos de la separación de las partículas	5
1.1.1. Generalidades sobre la separación gravitacional.....	7
1.1.2. Equipos empleados en la separación gravitacional	8
1.1.3. Operación de elutriadores.....	10
1.2. Investigaciones realizadas a las colas de la tecnología Carbonato Amoniacal.....	11
1.2.1. Investigaciones realizadas a los métodos gravitacionales	18
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS	23
2.1. Métodos empleados en la investigación	23
2.2. Materia prima utilizada en la investigación. Características.....	24
2.3. Diseño de experimento	25
2.4. Metodología para determinar el flujo de agua.....	27
2.5. Metodología experimental.....	28
2.5.1. Toma y preparación de la muestra.....	29
2.5.2. Secado	30
2.5.3. Homogeneización	31
2.5.4. Pesado	32
2.5.5. Elutriación	32
2.6. Determinación de la densidad media de las colas	37
2.7. Análisis químico utilizado	39

2.7.1. Fundamentos del método Espectroscopía de Fluorescencia de rayos X.....	39
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	41
3.1. Características de las colas	41
3.1.1. Análisis químico	41
3.2. Resultados de la técnica de Picnometría.....	42
3.3. Resultados de la elutriación.....	43
3.3.1. Análisis estadístico de los experimentos.....	44
3.4. Comportamiento denso–granulométrico de las colas	48
3.5. Comportamiento químico de los elementos en la concentración denso-granulométrica.....	52
3.6. Análisis del impacto ambiental.....	58
CONCLUSIONES	60
RECOMENDACIONES	61
BIBLIOGRAFÍA	62
ANEXOS	

INTRODUCCIÓN

En diversos países del mundo como Australia, Nueva Caledonia, Filipinas e Indonesia existen grandes reservas de minerales lateríticos. Cuba ocupa un lugar cimero en las reservas mundiales de estos tipos de minerales, los que están caracterizados por una distribución desigual de los valores metálicos en las distintas capas que componen el perfil ferruginoso.

Los yacimientos lateríticos cubanos se encuentran ubicados en San Felipe (Camaguey) y en el nordeste de la provincia de Holguín. En la región más oriental operan actualmente dos industrias metalúrgicas que se dedican a su procesamiento; una con tecnología ácida a presión y la otra carbonato amoniacal (proceso CARON). Esta última logra un 86 % de níquel en su extracción y no más de un 30 % de cobalto, en la que gran parte de las especies metálicas quedan en los sólidos no lixiviados del proceso (colas); además existe un proyecto en ejecución para la producción de Ferroníquel (FeNi).

Se plantea que para la recuperación y avance de la economía cubana es necesario intensificar el desarrollo de la industria minero-metalúrgica y como objetivo estratégico incrementar la producción de concentrado de níquel, con la mayor eficiencia en las inversiones, es por ello que todo lo que se haga para elevar la productividad y la eficiencia de tales industrias repercutirá de manera directa en la sociedad.

En aras de incrementar los niveles de eficiencia en el proceso productivo, se llevan a cabo diferentes investigaciones (Reid 1984; Chang y Bobkovski 1993 y otros) que van, desde el análisis de la calidad de la materia prima suministrada al proceso metalúrgico, hasta la caracterización de los residuos sólidos no lixiviados o colas del proceso.

Se conoce que en la eficiencia metalúrgica influyen factores de diversa índole, entre los que cabe mencionar la composición de la materia prima mineral. Si la composición química y mineralógica del mineral que ingresa al proceso es determinante en la calidad del producto final, el conocimiento de la composición sustancial de las colas obtenidas en cada etapa del proceso es un elemento para considerar, que puede incluso contribuir a incrementar la eficiencia del mismo mediante la modificación de ciertos parámetros operacionales; además, permite trazar líneas perspectivas para el uso del recurso.

En el costo de extracción del níquel y en la eficiencia de su proceso tecnológico incide significativamente el tratamiento de las colas, las que contienen minerales útiles que se depositan en diques para su aprovechamiento futuro. Las colas son de fina granulometría, lo mismo se debe a que el mineral que se procesa en la planta de níquel es previamente molido hasta 80 % de las partículas menores de 0,074 mm.

Es considerado por varios especialistas que el proceso minero futuro de la región de Moa estará vinculado a la explotación de los minerales almacenados en las presas de colas, ya que la actual explotación de los minerales lateríticos tiene un tiempo de vida limitado y constituyen recursos no renovables.

Las grandes acumulaciones de residuales ocasionan un serio desequilibrio en los ecosistemas de la región. Las colas están consideradas como una mena compleja multicomponente, constituidas fundamentalmente por hierro, silicio, aluminio, magnesio, cromo y en menor cantidad níquel, bismuto, cobalto, cadmio, titanio y molibdeno (Garbey 2005).

Al tratamiento de las colas has sido muchas las investigaciones llevadas a cabo y dentro de los investigadores que más se destacan se encuentran Ponce 1979; Zamora *et al.* 1981; Turro 2002; Mavrommatis *et al.* 2002; Rojas & Turro 2003; García 2011; Hernández 2011 donde estuvieron enmarcados fundamentalmente a los procesos de separación magnética y lixiviación.

Para el Grupo Empresarial Cubaníquel, la generación de colas por las industrias del territorio, con alto contenido de hierro y otros metales pesados por más de 50 años, constituye uno de los principales problemas de mayor impacto ambiental; por ser una

fuentes de contaminación que afectan la erosión de los suelos, la flora y la fauna terrestre, las zonas costeras adyacentes a los depósitos y a las aguas superficiales y subterráneas como consecuencia del alto régimen de precipitación en la región. Además de las molestias y contaminaciones atmosféricas ocasionadas en los asentamientos poblacionales cercanos a los depósitos en época de sequía.

La creatividad de los científicos y tecnólogos cubanos en función de desarrollar alternativas tecnológicas que aminoren estas grandes acumulaciones de residuales y por ende que mitiguen el deterioro ambiental, constituye una necesidad imperiosa para la disposición y uso de estos residuales sólidos de las industrias de níquel cubana.

Un aspecto importante se encuentra en que las nuevas alternativas tecnológicas cuenten con infraestructuras especializadas, sobre la base de los procesos convencionales, para lograr un tratamiento sostenible de los residuales, de manera tal que permitan un tratamiento integral y posibiliten la sostenibilidad del desarrollo minero de la región.

El beneficio de las colas con el aprovechamiento de las propiedades físicas y químicas, constituye una opción para el tratamiento del residuo de la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara". En tal sentido se plantea como **situación problemática**: La existencia de grandes volúmenes de colas generados por la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara", que contienen elementos metálicos valiosos y poseen características físicas que no se han tenido en cuenta para su posible aprovechamiento.

Problema: Insuficiente conocimiento del comportamiento denso-granulométrico y químico de las colas de la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara".

Objetivo general: Determinar el comportamiento denso-granulométrico y químico de las colas de la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara" para su futuro aprovechamiento.

Objeto de investigación: Colas de la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara".

Hipótesis: Si se realiza la separación de las colas de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, teniendo en cuenta la densidad y granulometría, entonces se podrá determinar su comportamiento denso-granulométrico y químico.

Objetivos específicos:

1. Caracterizar químicamente las colas de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.
2. Aplicar la separación denso-granulométrica a las colas de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.

Campo de acción: Transformaciones físicas de las colas de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.

Metodología de investigación: Obtenida la información bibliográfica previa, respecto a los antecedentes y actualidad del tema a investigar, se aplica el método Factorial Multinivel de las principales variables que intervienen en el proceso, así como el análisis estadístico, auxiliado por métodos computacionales para determinar la influencia de los principales parámetros. Se emplea una metodología experimental para el procesamiento de las colas basada en la elutriación.

Los aportes que se esperan obtener del presente trabajo son:

Metodológico. La metodología experimental para el procesamiento de las colas por elutriación.

Científico. Modelo estadístico-matemático.

Económico. Ingreso de nuevas ganancias al país, así como al trabajador.

Ecológico. Disminución de contaminación ambiental.

Tecnológico. Nuevas vías para el tratamiento de las colas.

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

Las investigaciones que tienen como objeto de estudio las colas de la industria del níquel se enfocan fundamentalmente a la obtención de concentrados de hierro y cromo por el método de beneficio. La separación magnética y gravimétrica son los métodos más empleados.

En el presente capítulo se expresan los fundamentos teóricos relacionados con los procesos de beneficio, además se presentan diversos trabajos relacionados con las colas y los métodos de concentración gravitacional.

1.1. Fundamentos teóricos de la separación de las partículas

Al sedimentar una partícula en un líquido sobre ella actúa la fuerza de gravedad dirigida hacia abajo, la fuerza de empuje dirigida hacia arriba y la fuerza de resistencia del líquido. El valor de la velocidad límite de sedimentación depende del diámetro de la partícula y de su densidad. Los granos de igual masa de un mismo material sedimentan en las mismas condiciones a diferentes velocidades de sedimentación debido a la variedad de su forma (Fomenko 1980).

Las partículas sólidas en un medio fluido en reposo tienden a sedimentar por acción de la fuerza de gravedad, cuando caen en un medio extenso y sin considerar la acción de otras fuerzas que no sea la resistencia del medio, las mismas alcanzan una velocidad máxima, a la que se le denomina velocidad límite de caída libre. Depende de su tamaño, densidad y de otras propiedades del fluido.

Cuando precipitan varias partículas, a la resistencia del medio se suman otras fuerzas que obstaculizan la sedimentación, al fenómeno se le denomina régimen de caída contrariada. El grado de contrariedad y la disminución de la velocidad se encuentran en dependencia directa de la concentración de las partículas que se

hunden. En el caso de las lamas del orden de varios micrones, el peso y la velocidad de caída resultan más pequeños que las fuerzas superficiales y las interacciones pueden mantenerlas en suspensión.

Cuando se combina una mezcla de partículas pequeñas y otras más grandes, ocurre que estas últimas para precipitar tienen que vencer no solo la resistencia del líquido sino también desplazar a otras que poseen menor velocidad de caída.

En una suspensión que contiene mayor cantidad de partículas pequeñas que grandes, entonces el proceso de sedimentación demora más, se debe, a que las más pequeñas tienden a mantenerse en suspensión y retardan el proceso. Si la concentración es de elementos metálicos pesados como hierro y manganeso, entonces el proceso de sedimentación es rápido (Otero *et al.* 2009). Por otra parte si la densidad del material es inferior a la del fluido en el cual se alimenta, se elevan flotando en el seno del líquido, mientras si es más densa se hunde.

En la figura siguiente se muestra cómo el fluido se mueve en dirección contraria a la velocidad de sedimentación de las partículas.

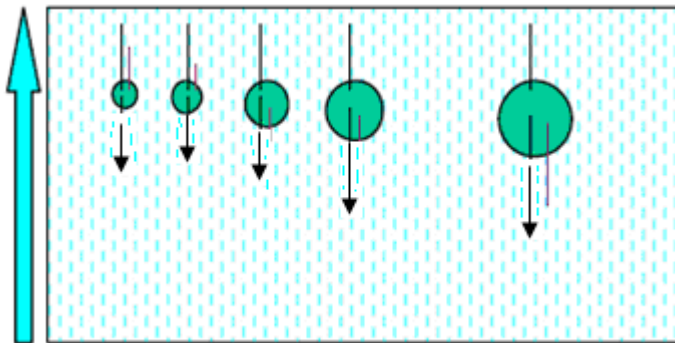


Figura 1.1. Movimiento de partículas respecto al fluido.

Existen algunos factores a considerar en la separación de las partículas, tal es el caso de la viscosidad, en la cual existe una dependencia directa entre tamaño de partícula y su concentración. Los flujos laminares en partículas pequeñas, así como su velocidad de desplazamiento (en este caso la viscosidad del fluido), constituyen un factor importante como parte de la resistencia del flujo, si es turbulento, así como su velocidad de desplazamiento, entonces se forman remolinos o torbellinos que le

ofrecen una gran resistencia al flujo, en este caso la viscosidad del fluido se desprecia. La temperatura es otro factor a considerar, al aumentar existe una relación proporcional a la velocidad de sedimentación (Brown 1980).

1.1.1. Generalidades sobre la separación gravitacional

La separación o concentración gravimétrica es un método simple, de alta capacidad, sin reactivos peligrosos, de bajo costo y de gran eficacia, para separar minerales pesados de gran valor de la carga bruta, lo cual explica su amplio uso en la pequeña minería.

Los avances técnicos en la concentración gravimétrica se consideran un desafío para diversas generaciones de mineros e ingenieros, un gran número de máquinas se desarrollan a través de los años. Algunos no transitan del período experimental, pero la investigación científica y las constantes pruebas sobre la base de subsanación de errores llevan a una mejora constante de tales técnicas; así por ejemplo, la introducción de equipos desarrollados como los concentradores centrífugos, los que se someten a mejoras constantes y de los que cada año aparecen nuevos modelos en el mercado.

La concentración gravimétrica es el método de procesamiento de minerales más importante en la pequeña minería, la diferencia en peso específico entre el mineral valioso y las gangas se utiliza para alcanzar su recuperación. La separación se lleva a cabo en los diversos movimientos de las partículas, bajo la influencia de la fuerza de gravedad y de otras en un medio fluido, por lo general agua o aire. Una característica de todos los métodos de concentración gravimétrica es que las partículas tienen que ser separadas por la dinámica del flujo, para lograr la formación de capas de minerales livianos y pesados. Disponible en: <http://www.gama-peru.org/libromedmin/capitulo/5/5-4-2.htm>.

El enriquecimiento en medios densos se fundamenta en la separación de los componentes minerales de una mena según la densidad. Si una mezcla de partículas se introduce en un medio fluido, cuya densidad ocupa una posición intermedia entre los minerales ligeros y los pesados, sucederá la separación de la mezcla en sus

componentes. Los granos cuya densidad es mayor que la del medio denso se hundirán, mientras que los más ligeros emergerán a su superficie (Fomenko 1980).

1.1.2. Equipos empleados en la separación gravitacional

En los procesos de concentración gravitacional se utilizan una serie de equipos muy eficientes para el tratamiento de diversos minerales, los que se basan en la densidad de la materia prima para su procesamiento. A continuación se describe el principio de funcionamiento y partes fundamentales de algunos de ellos.

Mesa de concentración

El beneficio en las mesas de concentración es un proceso de separación de minerales de acuerdo a su densidad en un flujo de agua, el cual fluye en una superficie con obstáculos, sometidos a movimiento de avances y retrocesos. Se utiliza para el enriquecimiento de las clases finas. El proceso de separación se efectúa con un chorro de agua que corre en forma de una capa fina por un plano inclinado. Se dividen en móviles e inmóviles.

Las inmóviles se utilizan para el tratamiento de minerales auríferos en las fábricas de extracción de oro y en otras plantas de enriquecimiento de minerales. Las móviles son de cinta, circulares y vibrantes. Las vibrantes adquieren el uso más amplio en el beneficio de diversos minerales, en el cual se concentran por gravedad el mineral de granulometría fina.

En las mesas modernas la dirección de oscilación del piso es perpendicular a la del movimiento del flujo de agua, a consecuencia de ello, el material se dispone en el piso en forma de abanico y puede ser dividida en la cantidad necesaria de productos (Priester 1991).

Concentradores centrífugos

Los concentradores centrífugos constituyen la principal invención realizada a las técnicas de concentración gravimétrica de oro. En un periodo muy corto ocupan gran aceptación para la recuperación en minas grandes; con sistematicidad se emplean en los circuitos de molienda para separar oro libre y evitar exceso de procesamiento,

se emplean también antes del proceso en las plantas de cianuración o flotación para recuperar material grueso. Existen muchas aplicaciones en plantas industriales y en la minería aurífera aluvial.

Otra aplicación especial para los concentradores centrífugos es la recuperación del oro como un producto secundario, por ejemplo en canteras de grava. Todos los concentradores centrífugos operan con el mismo principio: básicamente, un recipiente que rota, efectúa la separación gravitacional de la carga en un campo centrífugo. Los tipos de concentradores centrífugos más utilizados se basan en el mismo principio pero difieren en su diseño técnico. Se encuentran los concentradores Knelson, Knudsen y Falcón, así como algunos de fabricación brasileña. Disponible en: <http://www.gama-peru.org/libromedmin/capitulo/5/5-4-2-1-6.htm>.

Hidrociclones

Los hidrociclones se emplean en las plantas de minería como clasificadores en ciclos de trituración y molienda, los índices tecnológicos compiten con los clasificadores mecánicos y en muchos casos los superan. La pulpa entra a alta presión y la energía consumida por la bomba hace que se encarezca el proceso.

Constan de una parte cónica y una cámara cilíndrica en la cual existe una entrada tangencial para la suspensión de la alimentación (feed). La parte superior presenta un tubo para la salida de la suspensión diluida (overflow) y en la parte inferior existe un ducto de salida para la suspensión concentrada (underflow). El conducto de alimentación se denomina inlet, el tubo de salida de la suspensión diluida se denomina vortex y el orificio de salida del concentrado se denomina apex.

La suspensión es bombeada a presión y entra a través del tubo de alimentación, se genera un movimiento de tipo espiral descendente debido a la forma del equipo y la acción de la fuerza de gravedad. Este movimiento produce una zona de muy baja presión a lo largo del eje del equipo, por lo que se desarrolla un núcleo de aire en ese lugar. A medida que la sección transversal disminuye en la parte cónica, se superpone una corriente interior que genera un flujo neto ascendente también de tipo

espiral a lo largo del eje central del equipo, lo que permite al flujo encontrar en su camino el vortex que actúa como rebalse (Fomenko 1980).

Clasificador de espiral

Consiste en un tanque inclinado en el cual uno o dos espirales giran despacio y libremente sin tocar los costados o el fondo del tanque. La máquina realiza una clasificación de los sólidos de acuerdo con el tamaño y/o la gravedad específica a través de los diferentes promedios de decantación de las partículas en suspensión en la cuba. Es de mecanismo simple, fuerte, fácil de mantener para las operaciones continuas de decantación de agua, así como finas partículas en suspensión llamadas reboso y simultáneamente drenar y transportar las partículas gruesas denominadas hundido o arenas fuera del clasificador.

La alimentación es a través de un conducto y en algunos casos por ambos lados del tambor, el reboso es descargado por la parte más baja que recibe el nombre de rebosadero ajustable. En diversos equipos los puntos de alimentación y descarga están cambiados. Los sólidos más pesados o gruesos decantan en el fondo y en las máquinas simples avanzan por la acción de la espira a lo largo de la parte más baja. En el caso de máquinas dobles, las espirales operan una hacia la otra y la arena es transportada hacia arriba (Fomenko 1980).

1.1.3. Operación de elutriadores.

Después de efectuarse la revisión bibliográfica se decide que el elutriador es el equipo seleccionado para realizar el proceso de separación denso-granulométrico de la presente investigación, es un equipo muy económico y de fácil operación tecnológica, de fácil manipulación para el mantenimiento y además el fluido utilizado es agua, la cual es abundante en el territorio.

Un elutriador es esencialmente una cámara vertical de asentamiento y está formado por uno o más tubos verticales o torres en serie, por dentro de los cuales fluye hacia arriba una corriente de agua o gas contaminado con pequeñas partículas, con una velocidad definida por la rapidez del flujo y el área de la sección transversal del tubo. Las partículas grandes, con velocidades de asentamiento superior a la velocidad del

flujo ascendente, son separadas y recolectadas en el fondo de la cámara. Las partículas más pequeñas con menor velocidad de asentamiento, son arrastradas por el flujo hacia la parte superior. El tamaño de partícula que se separa, varía al cambiar la velocidad del flujo. Las tolvas se utilizan por lo general para recolectar al material asentado (EPA 1982; 1998).

En la figura se muestra el arrastre de las partículas en el proceso de elutriación.

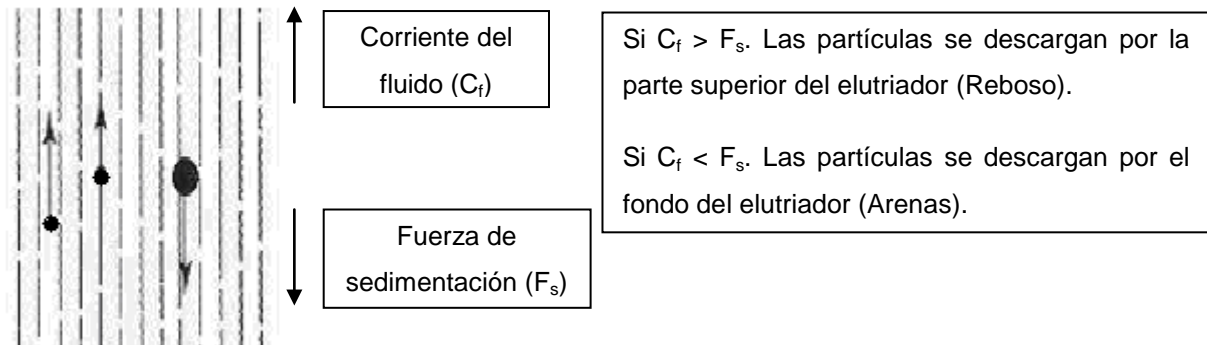


Figura 1.2. Comportamiento de las partículas en los elutriadores.

Los elutriadores comparten muchas de las ventajas de otros colectores mecánicos, como es el caso de bajo costo de capital y energía, falta de partes móviles, por tanto, pocos requerimientos de mantenimiento y bajos costos de operación, buen funcionamiento, baja caída de presión, el equipo no está sujeto a la abrasión, debido a las bajas velocidades del líquido.

Estos equipos también poseen algunas desventajas como gran tamaño físico, eficiencias de colección de partículas relativamente bajas cuando se sobrecarga mucho e inadecuado para materiales pegajosos o aglutinantes (Wark 1981; Perry 1984; Corbitt 1990; EPA 1998).

1.2. Investigaciones realizadas a las colas de la tecnología Carbonato Amoniacal

Varios investigadores del territorio han realizado estudios referentes a las colas de la tecnología carbonato amoniacal, entre los que se destacan (Ponce 1979, 1986; Herrera 1961; Ariza *et al* 2004; Palmero 2011 y del Toro 2003).

En el ámbito mundial una de las posibles soluciones encontradas para la disminución de los volúmenes de colas, es su empleo en la industria de la construcción; como relleno en la fabricación de carreteras, caminos, terraplenes y ferrocarriles, además como aditivo en la fabricación de cemento, asfalto, concreto y en la manufactura de ladrillos de silicato de calcio o como fuente de material puzolánico; aunque muchas veces su uso se ve limitado por su fineza, alto contenido de impurezas y deslave de metales trazas (*Mineral Processing Wastes* 2006).

Las colas constituyen el desecho industrial de la planta de níquel “Comandante Ernesto Che Guevara” y está compuesto fundamentalmente por hierro, níquel, cobalto, aluminio, magnesio, silicio y otros, donde se encuentran presentes casi todos los metales existentes, que si se logran recuperar resuelve un gran problema a la sociedad, desde el punto de vista económico, social y ambiental, además de constituir una fuente de materia prima para la industria nacional, en la obtención de subproductos que a la vez se empleen en algunas de las ramas de la economía. Las colas de la tecnología CARON son depositadas en la presa de colas, estos residuales no son utilizados por no contar con una tecnología capaz de procesarlas, además se vierten anualmente alrededor de 7 millones de toneladas (García 2011).

La demanda creciente de los minerales de hierro en el mercado abre una posible alternativa para la utilización del residual; en la cual es considerada la posibilidad de obtener un concentrado de hierro a partir del mismo, porque representa aproximadamente el 45 % del volumen total. Después del enriquecimiento en los contenidos de hierro, níquel, cobalto y cromo, las colas pueden ser comercializadas como un nuevo producto con alto valor agregado para los consumidores de minerales de hierro, que lo convierten en un producto codiciado por los aceristas.

Dentro de la metalurgia el estudio del residuo sólido de la tecnología carbonato amoniacal, se encuentra dividido en tres ramas fundamentales, como son: procesos de beneficio de minerales, pirometalúrgicos e hidrometalúrgicos, en la presente indagación científica se hace énfasis en los métodos de beneficio, con especificidad en la concentración gravimétrica.

Las primeras referencias de trabajos realizados con el objetivo de aprovechar las colas en forma de concentrado de hierro aparecen en 1952 por la *National Lead Company*; en las investigaciones se realiza una nodulación de las colas y se calcinan a 900 °C, los nódulos se mezclan con cisco de coque y carbonato de calcio, se calientan hasta 1150 °C, se enfrían, trituran y se realiza la separación magnética seca, donde se obtiene un producto magnético con 71,2 % de hierro y recuperación del 83,4 %. Similar procedimiento se realiza con mezcla 1:1 de colas y mineral de hierro de baja ley para obtener un producto magnético con 91,1 % de hierro_{total} y recuperación del 73,9 % (Kowalski 1953). Pero tiene como inconveniente que es un proceso altamente consumidor de energía.

En investigaciones realizadas en el Instituto Mejanobr de Leningrado se encuentran la presencia de hidrocarburos en las colas; lo que afecta notablemente el proceso de beneficio por el método de flotación. Con la aplicación del método no se logran resultados significativos en la obtención de concentrados de hierro, ya que el valor máximo es 46 % en el producto final. Realizan además análisis por difracción de rayos X y llegan a determinar las fases mineralógicas existentes en las mismas (Herrera 1961).

Los estudios con mayor grado de profundidad y sistematicidad efectuados a las colas se realizaron en el Instituto Mejanobr de Leningrado, los cuales se inician en 1961 y su objetivo principal es la determinación de las características de concentración de una muestra de la planta de Nicaro, para determinar un flujo de beneficio adecuado con vistas a la proyección de una planta de beneficio a escala piloto para la producción de concentrado de hierro. Se determina que la vía idónea para el beneficio del residual es la separación magnética húmeda a baja intensidad del campo magnético. En la experimentación se obtuvo un concentrado con 58,1 % de hierro, que según su composición química es apto para la utilización siderúrgica, se recomendó además un esquema de beneficio para una prueba de concentración semi-industrial (Herrera 1961).

Otras investigaciones para determinar la posibilidad de obtención de semi-acero a partir de colas de Nicaro se desarrollan durante el año 1970 en la República

Democrática de Corea, donde se emplea 3 000 t de colas con 40 % de hierro y se obtiene un concentrado entre 53 y 55 % de hierro por separación magnética húmeda a baja intensidad, por el esquema Peletización-Proceso Krupp-Renn, se logran lupias con 92,5 % de hierro; 0,86 % de cromo y 0,56 % de níquel. Posteriormente se obtiene un acero semi-aleado entre 1,94 y 2,38 % de carbono, 0,72 y 0,92 % de cromo y entre 0,61 y 0,70 % de níquel, por el procedimiento de convertidor de oxígeno. Los resultados son atractivos pero los procesos pirometalúrgicos incluidos en el esquema estudiado para el aprovechamiento de los residuales incrementan los costos del proceso, debido a los altos consumos energéticos que traen aparejado estas operaciones (Resumen Taller de colas 2005).

En el Instituto Mejanobr de Leningrado, se realizan pruebas de sinterización y peletización a un concentrado de hierro y al comparar los resultados, se concluye que el método de peletización es poco efectivo en comparación con la sinterización, debido a su baja productividad específica (0,30 t/h) (Resumen Taller de colas 2005).

Otro estudio relacionado con el tema lo realiza *Nippon Steel Corporation* en 1977, donde se confirman las fases mineralógicas en la materia prima determinada en investigaciones precedentes, el análisis se realiza por difracción de rayos X, y determinan que las colas se encuentran formadas por magnetita, cromita, forsterita, andalucita y fase desconocida. El examen al microscopio revela la presencia de las pseudopartículas, en las cuales la magnetita o la cromita forman el núcleo rodeada por partículas finas de ganga que se adhieren (Resumen Taller de colas 2005).

En los años del 1979 al 1981 se realiza en el Instituto Mejanobr de Leningrado y el SIME en Cuba, pruebas de separación magnética de la mezcla de colas tomadas del depósito y la producción corriente en la planta de Nicaro, con el objetivo de determinar los índices de beneficio y luego producir concentrado para las pruebas de sinterización. Se aplica la filtración y sinterización a los concentrados obtenidos. Se obtienen concentrados entre 55,9 y 57,0 % de hierro y entre 1,8 y 2,0 % de cromita adecuado para las pruebas de sinterización, pero poseen la desventaja de la presencia de hidrocarburos en la cola tomadas, el cual ejerce influencia negativa en

la estabilidad de los procesos de separación y filtración así como en los índices tecnológicos correspondientes (Resumen Taller de colas 2005).

Luego de 1983 se analiza una modificación del esquema de beneficio de minerales de magnetita, con vista a aumentar el contenido de hierro en la mezcla. Considerados satisfactorios los resultados obtenidos en las pruebas de beneficio y sinterización, se exhorta realizar pruebas a mayor escala en la Planta Piloto Siderúrgica Integrada de Nicaro (CIS) con la obtención de 12 000 t de concentrado de hierro a partir de colas de Nicaro, pero solo se aplica la separación magnética húmeda a baja intensidad. El concentrado se procesa en el combinado de *TULACHERMET*, en Rusia, a nivel industrial por las siguientes etapas: Sinterización–Alto Horno–Convertidor de oxígeno, donde se obtiene arrabio y acero (Resumen Taller de Colas 2005).

Ponce (1979) estudia la mineralogía y composición sustancial de las colas de Nicaro, emplea difracción de rayos X, microscopía óptica y ensayos térmicos, donde determina las fases mineralógicas siguientes: magnetita, hematita, cromita, forsterita, andalucita. El mismo investigador en el año 1986 estudia la granulometría de los residuos sólidos de este proceso en el depósito de Moa. En el trabajo no se expone una tecnología para el tratamiento de las colas.

Col & García (1984) ensayan las características físicas y químicas de las colas de la empresa “Comandante René Ramos Latour”, la muestra se toma directamente del producto de rechazo de la planta de recuperación de amoníaco, se determina por análisis espectral cualitativo la composición elemental de las colas, donde la misma está constituida fundamentalmente por hierro, silicio, aluminio, magnesio, cromo, en menor cantidad existe níquel y pequeñas cantidades de bismuto, cobalto, cadmio, titanio, molibdeno y fósforo. A pesar de todo no se determinó la mineralogía del residual.

Peña (1986) estudia la granulometría de las colas de Nicaro para la obtención de un concentrado más rico de hierro, analiza diferentes métodos de estudio, como la variación en el esquema de separación magnética y utilización de la flotación. Llega a la conclusión de que la separación magnética es el método más apropiado para el beneficio de las colas, mientras que por el método de flotación no se puede obtener

un concentrado final con altos contenidos de hierro. Se considera realizar un análisis mineralógico para el estudio de las diferentes fases del hierro y obtener mejores resultados en la concentración.

Samalea (1996) determina la composición química a las colas de Nicaro a partir de lo planteado por diversos investigadores, emplea como agente reductor para la lixiviación el SO_2 y el H_2SO_3 , donde obtiene altas extracciones de cobalto, superiores al 90 %, pero existe el inconveniente de la necesidad de producir el gas reductor, el cual encarece el proceso.

En Alemania en el año 2002 se realizan pruebas de inyección de colas al baño metálico de un horno de inducción de 50 kg a escala de laboratorio, con el objetivo de evaluar el comportamiento de los diferentes elementos. Las pruebas se repiten a escala mayor en el año 2004 en el horno de arco eléctrico de 1,5 t del taller de hierro gris en la Antillana de Acero, en la que se obtuvo un acero que por sus características se encuentra entre las marcas normalmente producidas en Cuba. La desventaja de la investigación es que se añade colas sin un previo tratamiento (Resumen del Taller de Colas 2005).

Rojas (2003) realiza una caracterización mineralógica de las colas de la tecnología CARON donde encuentra la existencia de las fases cromoespinelas: Mg cromita $(\text{Mg,Fe})(\text{Cr}_2\text{O}_3)$, donathita $((\text{Fe,Mg})(\text{Cr,Fe})_2\text{O}_4)$ y trevorita $(\text{Ni,Fe}_2\text{O}_4)$ y como fases mineralógicas secundarias Cuarzo (SiO_2) y silicatos de Fe y Mg de la serie del Olivino, Forsterita-Fe $(\text{Mg,Fe})_2(\text{SiO}_4)$.

Rojas & Turro (2003) analizan la composición mineralógica, química y granulométrica de las colas del proceso CARON de Moa, ambos toman muestras de las plantas de lixiviación y recuperación de amoniaco, los cuales llegan a la conclusión de que las colas obtenidas presentan tres grupos granulométricos principales: uno predominante, constituido por la fracción menor de 0,044 mm; otro que agrupa las clases granulométricas (+0,175 mm); (-0,147+0,074 mm) y (-0,074+0,044 mm) y la clase granulométrica algo gruesa (0,175+0,147 mm). Los óxidos de hierro maghemita y/o magnetita constituyen las fases mineralógicas principales y además no existen diferencias notables en cuanto a la composición química de las colas en ambas

plantas. En la investigación no se aporta una tecnología para el tratamiento de las colas.

Medrano (2007) efectúa un estudio físico y químico a las colas de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, en el análisis químico se obtienen resultados muy parecidos a los realizados por Col & García (1984) a las colas de Nicaro. El análisis picnométrico refleja que esta posee un 42,5 % de poros y una humedad molecular capilar de 42,4 %. El contenido del hierro aumenta con la disminución del tamaño de las partículas, mientras que para el cromo los mayores contenidos están entre 0,125 y 0,030 mm, los contenidos de óxido de aluminio presentan una regularidad bien definida y se encuentran alrededor del 3 %. A pesar de los buenos resultados se considera que se debe realizar análisis mineralógico de los elementos para analizar su comportamiento.

García (2011) ejecuta una investigación con las colas de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, donde los resultados del análisis químico son muy parecidos a los realizados por Col & García, (1984) y Medrano, (2007), encuentra además la existencia del manganeso entre los minerales que más se reportan. Emplea para la lixiviación como agente reductor el FeSO_4 . La desventaja de la investigación es que no realizan ningún proceso previo para concentrar metales.

Loyola *et al.* (2011) determinan la composición química a una muestra inicial de colas y a los productos de la separación magnética en la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, analizan la susceptibilidad magnética. Concluyen que las colas presentan un contenido de 0,36 % de níquel, 0,091 % de cobalto y 43,93 % de hierro, pero el análisis químico se realiza a través de fluorescencia de rayos X, fotometría por absorción atómica y espectrofotometría de emisión por plasma (ICP), o sea, emplean tres tipos de análisis químico.

Sobre la base de los resultados obtenidos en las investigaciones analizadas se puede concluir que el procedimiento más utilizado para la concentración del hierro y cromo en las colas de la tecnología carbonato amoniacal es la separación magnética húmeda a baja intensidad de campo magnético; las cuales logran alcanzar concentrados con valores entre 50 y 60 % de hierro.

1.2.1. Investigaciones realizadas a los métodos gravitacionales

Torres & Gordín (1980) realizan la propuesta de un esquema tecnológico de beneficio hidrogravimétrico para el procesamiento de minerales de manganeso del yacimiento Los Chivos, donde se basan fundamentalmente en la densidad del mineral. Emplean una mesa de concentración de 24,6 m² en dependencia de la capacidad a utilizar y del flujo aplicado a la misma, pero al mezclar las fracciones -1,2 mm y la fracción que sale del clasificador (-0,2 mm) la cantidad de material a tratar en la mesa sería muy grande y tendrían que utilizar 4 mesas, lo que encarece el proceso.

Castro (1980) plantea el cambio de un hidrociclón por un clasificador de espiral en el circuito 1 en la planta "El Cobre", donde el bombeo es de régimen intermitente, el cual hace que el trabajo del hidrociclón no sea estable y que la clasificación se vea interrumpida por el tiempo de producción perdido debido a las interrupciones en la bomba. Para la propuesta se realizan análisis tecnológicos, toma de densidades y granulometría en las muestras y concluyen que el cambio disminuye el gasto de mantenimiento.

Otros autores como Rosales & Risco (1981) proponen un flujo tecnológico para el beneficio de los minerales de manganeso en el yacimiento "Los Chivos", plantean que el producto que sale del clasificador de espiral se someta a la mesa de concentración para aprovechar las propiedades densométricas, en la misma se obtiene un concentrado final de manganeso metálico y colas; esta última pasa al proceso de flotación. Se determina utilizar tres mesas de concentración y se emplea un clasificador de espiral no sumergido después del circuito de molienda determinado según la capacidad del reboso.

Kriboi (1992) determina las propiedades físicas, químicas y mineralógicas de las muestras iniciales de las colas de Nicaro, en la cual utiliza a escala de laboratorio los procesos de enriquecimiento de separación magnética húmeda a baja, media y alta intensidad, concentración gravitacional, deslamación y la combinación entre ellos. En la investigación los procesos gravitacionales empleados solo se utilizan para deslamar.

Álvarez en 1996 propone un esquema tecnológico para la obtención de cromo espinela, el mismo consiste en la separación por hidrociclones, separación magnética, clasificador de espiral y mesas de concentración. Concluye que la vía fundamental para el aprovechamiento de las colas desde el punto de vista económico y tecnológico son los procesos gravitacionales.

Valdivieso *et al.* (1999) aplican la concentración gravimétrica-centrífuga a los minerales de oro y plata, en la misma utiliza dos concentradores centrífugos marca FALCÓN de diferentes diámetros, con la aplicación del circuito de molienda se aumenta la recuperación de los elementos en un 3 %, para tener una recuperación total de 93 % de plata y 94 % de oro. Con estos concentradores, se recupera entre el 10 % y 20 % de los minerales, y es posible disminuir el consumo de cianuro de sodio en 0,2 g/t en la lixiviación. Plantean además que es el método más sencillo y más económico dentro del beneficio de minerales.

Falcón *et al.* en el 2000 proponen un nuevo método gravitacional muy parecido a la elutriación: la clasificación hidroneumática, donde realizan diversos experimentos para comprobar la factibilidad de la misma. Concluyen que la variable más importante es el flujo de agua, aunque se debe prestar atención a los choques y a la disminución del área de flujo, debido a la presencia de las burbujas de aire. Además, se comprueba que el 80 % del material se colecta al cabo de los 30 min. Enfatizan además que es necesario tener en cuenta el flujo de aire alimentado y con ello la presencia de las burbujas, las cuales tienen gran influencia a la hora de separar las partículas, pues incrementan la velocidad del flujo y el resultado es mayor que el previsto mediante la ecuación de Stokes. Con esta investigación se aporta una gran novedad a la investigación científica.

Flores *et al.* (2009) proponen una tecnología de clasificación fina de mineral metálico y no metálico mediante un Cyclosizer. Distribuye en fracciones simples todas las partículas que tienen una velocidad de sedimentación en un rango específico, opera con precisión en el intervalo de 9 a 14 L/min y posee un container (recipiente de muestras), caja de control del interruptor de la bomba y un controlador para el tiempo. Difiere de la elutriación convencional en que la acción de separación

toma lugar en un ciclón hidráulico donde el fluido gira y las fuerzas centrífugas muchas veces, debido a la gravedad, actúan sobre las partículas.

Goodell (1980) en la patente de invención estudia la técnica de separación por elutriación de partículas de coque fino de los desechos de descarga, para reducir el óxido de hierro en un horno giratorio. El fluido que emplea es aire y el procedimiento de elutriación es el mismo que los que operan con agua.

Peña (1982) realiza una distribución fraccional al producto de la planta de Preparación de Pulpa de la empresa "Comandante Pedro Soto Alba", la misma se lleva a cabo en un elutriador para separar las fracciones de -20 y +20 mallas. Los cálculos para la separación se realizan a diferentes tipos de frentes de explotación minera, que presentan desiguales densidades y diversos tamaños de las partículas. La instalación para realizar los experimentos tiene la desventaja de utilizar un nivel del líquido a la mitad del tanque, esto puede traer como consecuencia que el flujo esté sometido a perturbaciones.

En otro estudio que se desarrolla sobre la elutriación de oro y plata en una matriz de óxido y sulfuro respectivamente, analizan los propios elementos de forma libre y una muestra de arenas negras, comparan la susceptibilidad de estos materiales a la concentración gravimétrica. Las técnicas analíticas aplicadas son la Difracción de rayos X y Fluorescencia de rayos X. Se aplica el método del picnómetro para determinar la densidad media de cada material. En la elutriación se obtienen tres productos, concentrados, medios y colas, pero solo se separa una fracción granulométrica de cada material del ensayo.

Algunos trabajos como los de Frías *et al.* (1990) tratan un estudio comparativo con las técnicas de tamizado y elutriación aplicado a materiales puzolánicos. El equipo que se utiliza para la concentración gravimétrica es el elutriador-centrifugador Bahco. La separación de cada una de las fracciones granulométricas se realiza mediante la suspensión de la muestra en un flujo de aire. Pero aunque se obtienen buenos resultados existe complejidad en la instalación utilizada.

Santana (1999) investiga la simulación y experimentación de un generador de partículas con el uso de un lecho fluidizado, donde emplea la elutriación y llega a una

aproximación de los datos experimentales de partículas finas desde lechos fluidizados del modelo de elutriación propuesto, basado en que las partículas finas se encuentran en el lecho como, finas libres, aglomeraciones de finas o finas adheridas a grandes partículas, representa además el proceso de elutriación mediante ecuaciones cinéticas de primer orden.

Tapia (2004) presenta una alternativa para reducir la generación de finos (partículas de tamaño inferior a 212 μm) en el proceso de chancado de mineral de cobre, para esto emplea entre otras técnicas la elutriación. Plantea como conclusiones que las partículas finas son efectivamente elutriadas en todas las muestras ensayadas en función de un flujo ascendente de aire, que el proceso es función del tamaño y tipo de respuesta de la partícula a la fluidización neumática, de modo tal que aumenta con la velocidad superficial del aire. El investigador considera que la técnica se puede aplicar para la distribución fraccional del mineral.

Chanona (2005) propone un sistema de control basado en lógica difusa para la producción de áridos grasos volátiles en un proceso de fermentación-elutriación de fango primario, con el objetivo de desarrollar un sistema capaz de controlar la altura del manto de sólidos y el pH del efluente en un decantador primario. El equipo empleado es similar al utilizado por García 1988 y la desventaja del proceso de elutriación es que pueden existir grandes acumulaciones de fango y entorpecer la separación.

Montero en 2012 separa los granos de montmorillonita de las tobas vítreas. Para ello se realiza un análisis granulométrico del material al pasar por dos etapas de trituración y una de molienda. Se realiza la preparación mecánica del mineral a través de trituración, molienda, tamizado y separación por elutriación. Los productos son sometidos a análisis químico por el método de ICP, los resultados de la investigación indican que la montmorillonita no se separa de las rocas vitroplásticas de forma eficiente por el método de elutriación.

García (1988) propone un esquema para el tratamiento futuro de las colas de la empresa “Comandante René Ramos Latour”, el mismo consiste en el cribado, elutriación, separación magnética, mesa de concentración y esclusa. El elutriador

trabaja con flujo de agua y separa la fracción -0,180 mm, en el reboso se obtiene la fracción -0,03 y en el fondo +0,03. A la mesa de concentración es enviado el producto no magnético obtenido en la separación magnética, en ella se obtienen 3 productos, la fracción pesada, intermedia y ligera. Finalmente estas son sometidas a la separación en la exclusiva con el objetivo de lograr un concentrado de cromita, plantea además que la separación gravimétrica es la vía fundamental para el aprovechamiento de las colas desde el punto de vista económico y tecnológico. La desventaja de la investigación consiste en la aplicación de un proceso complejo pues emplean diferentes instalaciones experimentales.

Loyola (2012) investiga las colas de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, utiliza la separación magnética por vía seca, con variación de la intensidad del campo desde 0,05 hasta 0,15 A, a tres clases granulométricas, emplea además el método de elutriación para deslamar antes de la separación magnética.

Conclusiones parciales.

- Las investigaciones realizadas sobre las colas de la tecnología CARON han estado encaminadas fundamentalmente a la separación magnética a baja intensidad del campo magnético.
- Una de las técnicas más utilizadas en los métodos de beneficio es la separación gravitacional, ya que se propone en diversos esquemas tecnológicos para la concentración de metales, además es la vía fundamental para el aprovechamiento de minerales desde el punto de vista económico y tecnológico.
- No se ha hecho un estudio del comportamiento denso-granulométrico por elutriación a las colas de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

El avance de toda investigación requiere del empleo de un instrumental metodológico para la obtención y confiabilidad de los resultados. La adecuada selección de los métodos y materiales que se utilizan certifican los resultados logrados, por tal motivo a continuación se detallan los métodos y técnicas empleadas en el estudio de las colas con el propósito de su futuro aprovechamiento.

2.1. Métodos empleados en la investigación

Toda investigación implica la utilización de métodos que viabilicen el cumplimiento del proceso investigativo, además, es la forma de abordar la realidad, de estudiar los fenómenos de la naturaleza, la sociedad y el pensamiento, con el propósito de descubrir la esencia de los mismos y sus relaciones.

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 histórico-lógico: El método histórico-lógico permite indagar en los referentes teóricos que identifican las relaciones entre el proceso cognoscitivo lógico y el desarrollo histórico de los procesos en su conjunto y del conocimiento en particular.

El mismo es aplicable para estudiar las colas desde sus inicios, así como el surgimiento de los procesos gravitacionales, además se aplica para igualar las leyes de Stoke y el gasto volumétrico y de esta forma sustentar científicamente la investigación.

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).

Permite abordar los referentes teóricos que se utilizan para sustentar la indagación científica, así como las investigaciones precedentes aplicadas a las colas y a los métodos gravitacionales.

2.2. Materia prima utilizada en la investigación. Características

La cola es una pulpa de color negro y constituye el desecho de la planta de Lixiviación y Lavado, la que se somete a destilación para recuperar el NH_3 y CO_2 que contiene. La temperatura de vertimiento es de $43\text{ }^\circ\text{C}$ y la relación líquido-sólido de 80 % (García 2011).

El sólido contenido en el residuo se constituye por mineral reducido, cuya densidad real es de $3,8\text{ t/m}^3$. Posee un predominio de las partículas finas, ya que el 60 % de ellas está por debajo de los $0,044\text{ mm}$; la porosidad es de 42,5 % y su humedad molecular capilar es de 42,4 %. Se debe fundamentalmente a que en los hornos de reducción de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, la hematita se reduce a magnetita, producto de la reducción se evacua del mineral parte del oxígeno contenido y deja pequeños poros en los granos de magnetita, lo que provoca una configuración esponjosa (Peláez 2002). La gravedad específica de las colas se encuentra en el rango de 2,63 a $3,85\text{ t/m}^3$ y su peso volumétrico entre 1,30 y $1,46\text{ t/m}^3$ (Fernández 1979).

La composición química fundamental (en %) del material es la siguiente (García 2011).

Ni = 0,38; Co = 0,08; Fe = 44,69; Cu = 0,02; Zn = 0,04; Mn = 0,76; Mg = 4,77;

Cr = 1,83; Al = 4,50 y SiO₂ = 15,65.

Su composición mineralógica cualitativa y cuantitativa (en %) está constituida por las siguientes fases (Rojas & Turro 2003).

Fallalita [(Fe,Mg)₂(SiO₄)] = 11,84

Maghemita [σ -Fe₂O₃] = 37,64

Cromoespinelas [(Mg,Fe)Cr₂O₃] = 6,92

Magnetita [Fe₃O₄] = 42,67

Cuarzo [SiO₂] = 0,90

2.3. Diseño de experimento

El diseño de experimentos aplicado es: Factorial Multinivel.

Cuenta con la combinación de dos variables de entrada; densidad y granulometría. Siendo las variables de salida la masa mineral y la composición química. Los parámetros constantes son el pH; contenido de sólido y la temperatura.

Consiste en un diseño del tipo:

$$N = p \cdot q; \tag{2.1}$$

donde:

N. Número de experimentos

p. Nivel del factor granulometría

q. Nivel del factor densidad

En la tabla 2.1 se muestran las combinaciones llevadas a cabo en los experimentos, donde cada fracción granulométrica se combina con los tres rangos de densidades.

Tabla 2.1. Combinaciones para desarrollar los experimentos.

Granulometría, mm	Densidad; kg/m ³	Granulometría, mm	Densidad; kg/m ³
0,02	2800	0,06	2800
	3200		3200
	3600		3600
0,04	2800	0,08	2800
	3200		3200
	3600		3600

Se escogieron 4 fracciones granulométricas, esto se debe a que en estudios precedentes se arriba a las conclusiones de que el 80 % del material se encuentra por debajo de la fracción 0,074 mm y se define analizar hasta la fracción de 0,08 mm, se divide en cuatro partes iguales para tener un conocimiento del comportamiento de las colas en dichos rangos y de esta forma se estrecha más su estudio ya que en investigaciones precedentes solo se estudiaban entre dos y tres fracciones granulométricas. Se seleccionan los tres niveles de densidad (mínimo, medio y máximo) después de determinar el valor medio de la materia prima.

De la ecuación 2.1 se tiene que:

$$p = 4. \text{ (nivel del factor granulometría)}$$

$$q = 3 \text{ (nivel del factor densidad)}$$

Por tanto, la cantidad de experimentos es 12.

Los resultados obtenidos se procesaron en el *software Statgraphics 5.1 Plus* con el objetivo de confeccionar el modelo estadístico matemático de los diferentes productos en los elementos que poseen mayor influencia. El cual consiste en la operación básica de programar y analizar datos, creando análisis estadísticos. Muestra cada uno de los efectos estimados, proporciona la ecuación del modelo de regresión que se ajusta a cada uno de los productos.

2.4. Metodología para determinar el flujo de agua

La operación se fundamenta en hacer pasar un flujo de agua constante y ascendente a través de un tubo cilíndrico vertical por el cual descienden las partículas diseminadas del material (con concentración admisible de 50 g/L); es decir, integrando las Leyes de Stokes y del Gasto Volumétrico. Para ello tiene que cumplirse que los tiempos de retención del agua y de las partículas cuyo tamaño y densidad se desean eliminar se igualen; por lo que para una misma altura del elutriador, la velocidad de precipitación de las partículas (W_p), determinada por la Ley de Stokes, se iguala a la velocidad del agua (W_a), dada por la Ley del Gasto Volumétrico (V).

Ley de Stokes:

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

Ley del Gasto Volumétrico:

$$V = W_a \cdot F; \text{ m}^3/\text{s} \quad (2.3)$$

donde:

W_p : velocidad de sedimentación de las partículas, $\frac{m}{s}$;

W_a : velocidad del agua, $\frac{m}{s}$;

V : gasto volumétrico, $\frac{m^3}{s}$;

d : diámetro de las partículas, m ;

ρ_p y ρ_a : densidades de las partículas sólidas y del agua, kg/m^3 ;

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

F : superficie por donde se mueve el flujo, m^2 .

Si consideramos que $W_p = W_a$, entonces la ecuación para determinar el gasto de agua que debe pasar para arrastrar un tamaño de partícula determinado, se deriva de la integración de las ecuaciones 2.2 y 2.3, y queda de la siguiente manera:

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

2.5. Metodología experimental

El propósito fundamental de la investigación es determinar el comportamiento de las colas de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, mediante la combinación de las propiedades densidad y granulometría. Se toma como base las posibilidades que brinda el método de separación en correspondencia con las propiedades del material al cual se le realiza la separación denso-granulométrica, todo en función de lograr un tratamiento integral del residual para su aprovechamiento futuro.

La metodología seguida en la investigación a partir de la elutriación estuvo basada en las experiencias de trabajos precedentes para distintos materiales (Goodell 1980; Peña 1982; García 1988). El estudio experimental se lleva a cabo bajo el esquema de la figura 2.1. Toda la experimentación se realiza a una corrida original y dos réplicas para corroborar la veracidad de los resultados.

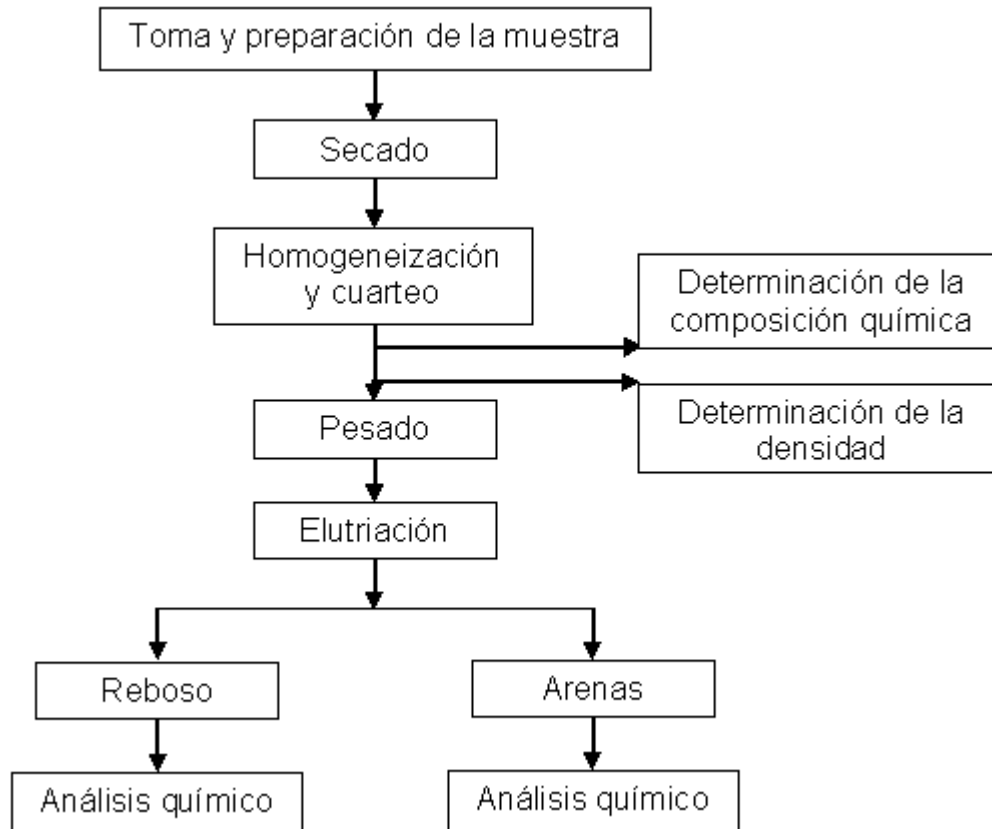


Figura 2.1. Esquema de flujo general para el tratamiento de las colas por elutriación.

2.5.1. Toma y preparación de la muestra

En la figura 2.1 se describe el flujo general para el tratamiento de las colas por elutriación, el primer paso consiste en la toma y preparación de la muestra. Para realizar el estudio se toma una muestra directamente de la presa de colas perteneciente a la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”. Según la masa mineral para un sector dado y la superficie de afloramiento accesible, se aplican diferentes métodos de muestreo.

Para su selección se utiliza el método de redes y puntos (Mitrofanov 1982) aplicado a un sector de la presa de cola. Primeramente se selecciona la zona de la presa de colas a muestrear, se traza una red cuadrada con una distancia entre sus líneas de 1,5 m; donde los nudos son los puntos escogidos para realizar la toma del mineral a procesar. Luego con la ayuda de una retroexcavadora pequeña se realizan 200

pozos (ya que dependen de la regularidad del área de almacenaje y la dimensión superficial sujeta al muestreo, entre mayor sea el número de puntos, menor será el error en la toma del material), los mismos se realizan con una profundidad de 1,0 m con el objetivo de acceder a las muestras en la parte más profunda de cada uno de ellos. En cada pozo se toman alrededor de 5 kg, siendo la masa total de aproximadamente 1000 kg.

2.5.2. Secado

El material se seca para someterlo a los posteriores procesos, ya que posee un alto contenido de humedad por estar expuesto a condiciones ambientales. Se somete a una etapa de secado preliminar en un tiempo aproximado de 2 horas, a temperatura de 100 °C, para 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 realiza en una estufa de control digital modelo DH6-9146A, ubicada en el Laboratorio de Análisis Químico del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, la que se representa en la figura 2.2.



Figura 2.2. Estufa utilizada para el secado de las muestras.

2.5.3. Homogeneización

Después del secado se procede 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.

2.5.4. Pesado

Culminado el secado del material se pesan tres muestras con una masa de 250 g cada una, luego se dividen en cinco partes de 50 g para someterlas al proceso de separación por elutriación, pues la capacidad del equipo se limita a esta masa. Para ello se utiliza una balanza digital que se encuentra ubicada en el laboratorio de Química General del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.

La técnica se emplea además para contabilizar la cantidad de productos que se obtienen en el elutriador. El equipo es de marca *Sartorius BS 124S* como el que se muestra en la figura 2.4, con una capacidad máxima de 220 g y una desviación de 1 mg.



Figura 2.4. Balanza utilizada para el pesaje de las muestras.

2.5.5. Elutriación

Una vez que se define la relación existente entre la velocidad de sedimentación de las partículas y el gasto volumétrico capaz de arrastrarlas para que ocurra la elutriación, se determinan los valores necesarios para llevar a cabo el proceso, todo en dependencia de la combinación de densidad y granulometría planteada en la tabla 2.1.

En la tabla 2.2 se muestran los valores fundamentales para llevar a cabo los experimentos, en ella se puede observar que la velocidad de sedimentación de las partículas es relativamente pequeña y aumenta a medida que se incrementan las combinaciones, para el gasto volumétrico sucede similar a pesar de que su aumento es más progresivo.

Tabla 2.2. 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	0,00047	46,47
	3200	0,00057	56,78
	3600	0,00067	67,08
0,04	2800	0,0018	185,89
	3200	0,0022	227,12
	3600	0,0027	268,34
0,06	2800	0,0042	418,25
	3200	0,0051	511,02
	3600	0,0061	603,78
0,08	2800	0,0075	743,57
	3200	0,0091	908,48
	3600	0,0108	1073,38

Además se tienen en cuenta los siguientes datos:

Densidad y viscosidad del agua a 28 °C = 996,40 kg/m³ y 843,20·10⁻⁶ Pa·s respectivamente (Pavlov 1981).

Aceleración de la gravedad: 9,81 m/s².

Después de realizar el pesado de las muestras se aplica la técnica de separación por elutriación, donde se obtienen dos productos: Reboso (R) y Arenas (A), el primero serían las partículas menos densas, las cuales pertenecen a una 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.

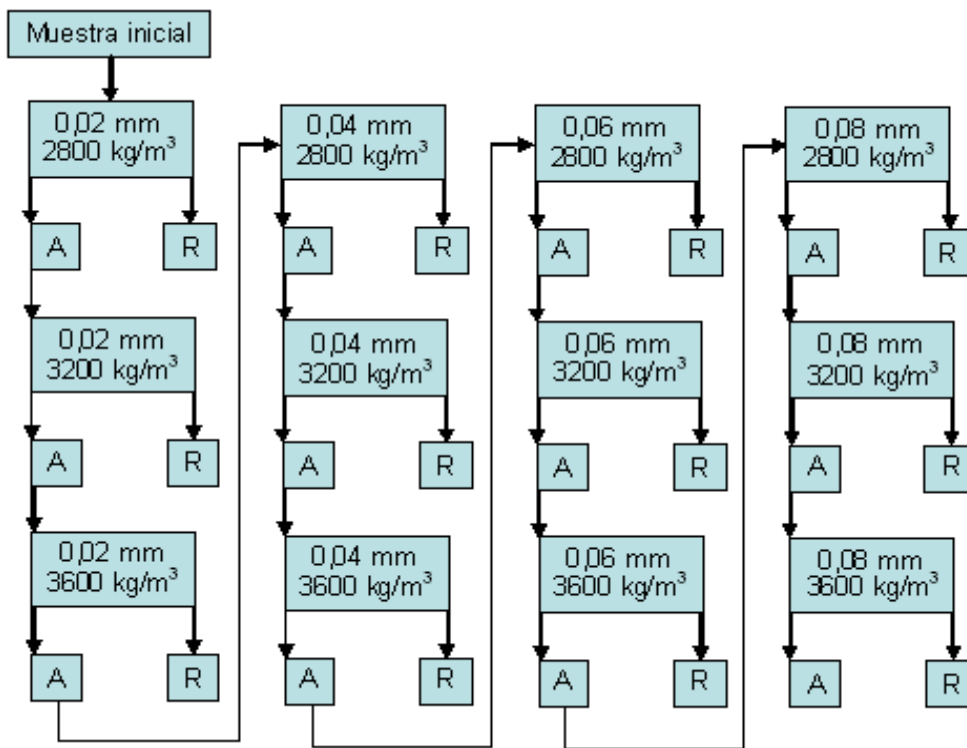


Figura 2.5. Esquema de flujo para la técnica de elutriación.

En el primer experimento se obtienen dos productos, uno sería las partículas menores a la combinación 0,02 mm y 2800 kg/m³, las cuales pertenecen al Reboso y el otro serían las partículas mayores a la combinación y pertenecen a las Arenas. El producto Arenas 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/m^3 . El proceso se realiza escalonadamente con el producto Arenas, es decir se parte de una masa de análisis que corresponde al resultado del anterior experimento.

El producto Arenas, obtenido de la combinación $0,02 \text{ mm}$ y 3600 kg/m^3 se somete a la misma operación, pero esta vez a la condición de cálculo de $0,04 \text{ mm}$ con las respectivas densidades, terminada esta combinación se realiza el mismo procedimiento pero con las condiciones de $0,06$ y $0,08 \text{ mm}$.

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).

Metodología para realizar la elutriación

Como se explica en el epígrafe 2.5.4 la masa que se utiliza para la realización de los experimentos en el elutriador se prefijó a 250 g y sobre la base de la capacidad del equipo las corridas se realizaron con 50 g , es decir se realizaron 5 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 volumétrico 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 2.6 se muestra la instalación que se emplea para realizar los experimentos, consta de un tanque que se encarga de suministrar agua al proceso, donde tiene conectada una válvula a la salida que debe estar abierta con el objetivo de brindar 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.

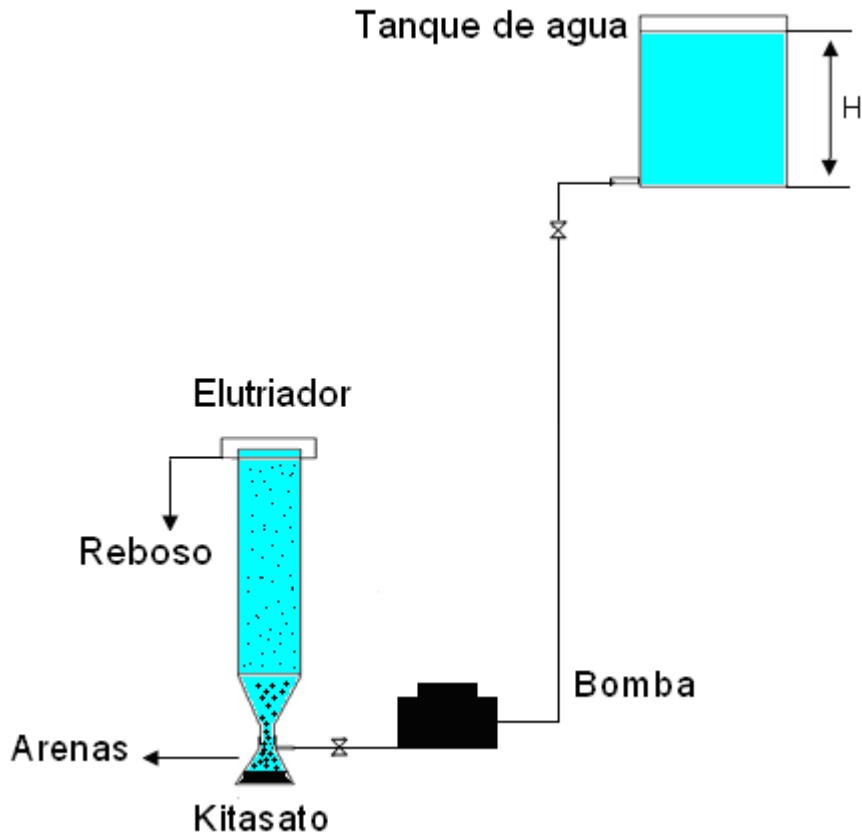


Figura 2.6. Esquema para la realización de los experimentos.

En la parte inferior del equipo se encuentra instalado un kitasato, el cual se encarga de recoger el producto Arenas, en la parte superior se conecta un recipiente que se encarga de recibir producto Reboso. Ambos se obtienen en forma de pulpa, por tanto, hay que dejarlos sedimentar por un espacio de 24 horas aproximadamente, después hay que decantarlos y secarlos para poder obtener el material sólido y continuar con el flujo tecnológico propuesto.

Los dos productos después que se secan, se someten a análisis químico para determinar las especies metálicas existentes en ellos, así como la cantidad en porcentaje de los mismos en cada combinación escogida.

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 2.6. 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 para recibir las partículas finas provenientes del Reboso. En la parte inferior posee un cono con un ángulo de salida de 45°.

2.6. Determinación de la densidad media de las colas

La técnica a emplear para determinar la densidad media de las colas a la muestra inicial es la picnometría, donde 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 (MII).

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

$$M_0 = MI - MII \quad (2.5)$$

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;

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

Una vez cuantificada el valor del agua desalojada, se escoge la densidad de ella para realizar los cálculos, para ello se tiene en cuenta la temperatura a la cual se realiza el proceso, la misma es 28 °C, pues los experimentos se realizan a

temperatura ambiente, a través de la tabla la densidad del agua es de $996,4 \text{ kg} / \text{m}^3$ (Pavlov 1981).

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

$$\rho = \frac{M \cdot \rho_{H_2O}}{M_0}; \text{ kg} / \text{m}^3 \quad (2.6)$$

donde:

ρ : densidad media de las colas, kg / m^3 ;

ρ_{H_2O} : densidad del agua, kg / m^3 .

Los picnómetros que se emplean para la realización de los experimentos se encuentran ubicados en el laboratorio de Procesos Metalúrgicos del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, los que se muestran en la figura 2.7. Los experimentos se realizan en tres picnómetros de diferentes volúmenes, 25; 50 y 100 mL. Las pruebas se realizan tres veces en cada recipiente para verificar la veracidad de los resultados.



Figura 2.7. Picnómetros que se utilizan para determinar la densidad.

En la tabla 2.3 se muestra la densidad de cada uno de los elementos metálicos a determinar en el análisis químico, donde se tienen en cuenta a la hora de interpretar los resultados.

Tabla 2.3. Densidad de los principales elementos a determinar en el análisis químico.

Elementos	Ni	Co	Fe	Mn	Mg	Cr	SiO ₂	Zn	Cu	Al
Densidad, kg/m ³	8900	8900	7870	7470	1740	7140	2330	7140	8960	2700

En la tabla se observa que los elementos níquel, cobalto, hierro, manganeso, cromo, cinc y cobre tienen una densidad elevada, mientras que el aluminio, silicio y magnesio poseen una densidad relativamente baja.

2.7. Análisis químico utilizado

El comportamiento químico resulta ser de gran importancia, ya que permite determinar la distribución de cada elemento al combinar las dos propiedades físicas (granulometría y densidad). Los análisis químicos se realizan a una muestra inicial y a cada resultado de la combinación escogida de densidad y granulometría. Para ello se emplea el método de Espectroscopía de Fluorescencia de Rayos X (FRX).

2.7.1. Fundamentos del método Espectroscopía de Fluorescencia de rayos X

Consiste en hacer incidir un haz de rayos X con energía suficiente para excitar los diferentes elementos que componen la muestra. Los átomos que se excitan al pasar al estado normal emiten radiaciones X, cuya longitud de onda va a ser característica de cada elemento y la intensidad de la 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 en relación a una serie de muestras patrones con las cuales inicialmente se calibró el equipo.

Las mediciones fueron realizadas en un difractor de rayos X marca *PHILLIPS PW*, ubicada en el laboratorio analítico de la empresa “Comandante Pedro Soto Alba”.

Conclusiones parciales

- ✓ La muestra de colas de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” seleccionada para el estudio se considera representativa con respecto a su volumen total.
- ✓ El procedimiento a utilizar complementado con las tecnologías, base experimental y software garantizan la precisión y confiabilidad de los resultados.
- ✓ El método de separación de las colas para el estudio denso-granulométrico es el elutriador.

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En el estudio de las colas del proceso Carbonato Amoniacal de Moa, reviste gran importancia la aplicación de las técnicas de beneficio, debido a que aportan la información necesaria sobre el comportamiento de los diferentes elementos que la componen. En el presente capítulo se aplica uno de los métodos gravimétricos más económicos (elutriación), en el que se combinan dos propiedades físicas con el fin de un futuro aprovechamiento de las especies metálicas contenidas en ellas.

3.1. Características de las colas

Las características de las colas se analizan a través de tres de sus propiedades fundamentales: la densidad, granulometría y composición química; las que permiten valorar los procedimientos y alternativas tecnológicas para su tratamiento futuro. A continuación se puntualizan los resultados obtenidos experimentalmente.

3.1.1. Análisis químico

En las investigaciones metalúrgicas es imprescindible tener conocimiento de las características químicas del material que es estudiado para valorar cualitativa y cuantitativamente su comportamiento ante un proceso determinado, por tanto, se realiza análisis químico a las colas ensayadas; donde los principales resultados se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Composición química inicial de las colas.

Elementos	Ni	Co	Fe	Mg	Mn	Al	Cr	Zn	Cu	SiO₂
Contenido, %	0,37	0,06	43,67	3,77	0,69	5,41	2,72	0,03	0,02	9,89

En la tabla se observan los elementos metálicos que aparecen en mayores cantidades: hierro, silicio, aluminio, magnesio, cromo y en menor cuantía manganeso, níquel, cobalto, cinc y cobre; resultados similares fueron obtenidos en las investigaciones de Rojas & Turro (2003); Hernández (2011); García (2011) y Loyola (2012). En tal sentido se puede considerar las colas como un mineral de hierro que contiene más del 40 % del elemento; por tanto, es una reserva potencial para los productores de acero a nivel mundial. De igual manera 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.

3.2. Resultados de la técnica de Picnometría

Los resultados emitidos por la aplicación de la técnica de picnometría se muestran en la tabla 3.2. La masa mineral escogida en todos los casos recomendada por la metodología descrita en el epígrafe 2.6 es de 0,98 g, donde a partir de la misma se obtienen una serie de resultados.

Tabla 3.2. Resultados de la técnica de picnometría.

Parámetros	Picnómetro 25 mL	Picnómetro 50 mL	Picnómetro 100 mL
Masa de la suma del picnómetro lleno de agua y de las colas (M_I); g	44,8750	81,1959	139,3576
Masa del picnómetro con la mezcla de agua y colas (M_{II}); g	44,5699	80,8909	139,0525
Masa del agua desalojada (M_0); g	0,3051	0,3050	0,3051
Densidad media; kg/m ³	3200,4981	3201,5475	3200,4981

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. 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 valoración de la técnica se tienen en cuenta los elementos que no se evidencian en el resultado del análisis químico.

3.3. Resultados de la elutriación

El parámetro que tiene mayor influencia en los experimentos es la granulometría, ya que el diámetro de las partículas en la ecuación 2.4 para el cálculo del flujo que las arrastra, se encuentra elevado al cuadrado y cualquier pequeño incremento, aumenta considerablemente el flujo volumétrico; otro factor importante lo constituye la forma de la partícula, o sea, si es de configuración abultada no ofrece mucha resistencia al flujo y se obtienen en el Reboso. En contraparte al aumentar la densidad el flujo crece en pequeños rangos.

En la figura 3.1 se expresa el comportamiento del gasto volumétrico y la velocidad de sedimentación de las colas. En la fracción 0,02 mm, combinada con los tres rangos de densidades, la velocidad de sedimentación es muy pequeña (0,00047; 0,00057 y 0,00067 m/s), con un crecimiento de 0,00020 m/s (entre el primero y último experimento), debido a su fina granulometría, aquí están presentes las llamadas lamas, las cuales son pequeñas partículas que demoran mucho en sedimentar, el gasto volumétrico en la fracción es también bastante pequeño (46,47; 56,78 y 67,08 mL/min), con un incremento de 20,61 mL/min entre el primero y último experimento.

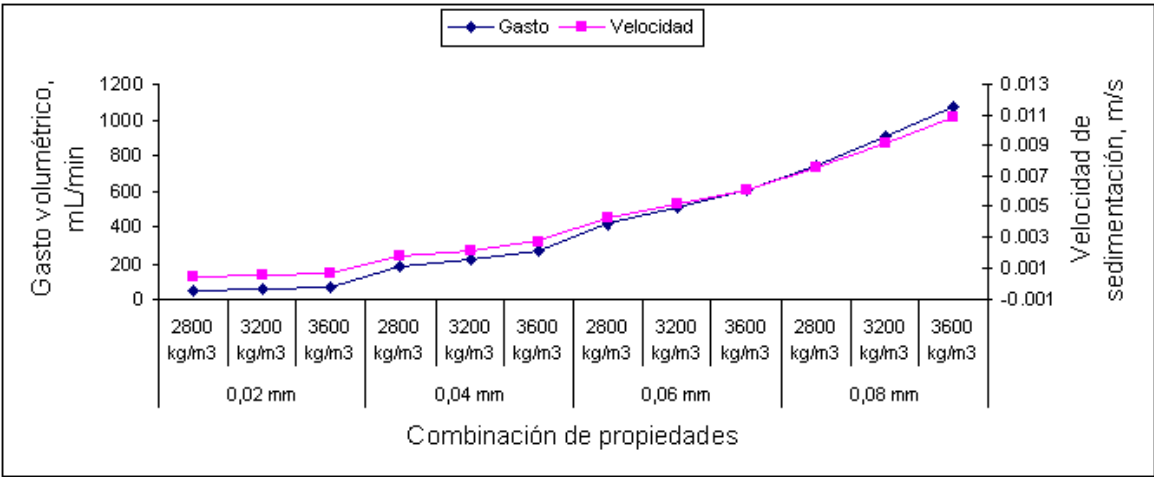


Figura 3.1. Comportamiento del gasto volumétrico y velocidad de sedimentación de las partículas.

A partir de las combinaciones en la fracción 0,04 mm existe un comportamiento más progresivo en los dos parámetros operacionales, las velocidades de sedimentación son 0,0018; 0,0022 y 0,0027 m/s con aumento de 0,00133 m/s entre la primera combinación de la fracción 0,02 mm y la primera de la fracción 0,04 mm. Los gastos volumétricos son 185,89; 227,12 y 268,34 mL/min, con incremento de 139,42 mL/min entre la primera combinación de la fracción 0,02 mm y la primera de la fracción 0,04 mm. Para las combinaciones en la fracción 0,08 mm, la velocidad de sedimentación experimenta una mayor rapidez con valores de 0,0075; 0,0091 y 0,0108 m/s respectivamente, con un aumento de 0,00703 m/s entre la primera combinación de la fracción 0,02 mm y la primera de la fracción 0,08 mm, donde las partículas sedimentan con una mayor velocidad, el gasto volumétrico para las combinaciones en la fracción es grande con valores de 743,57; 908,48 y 1073,38 mL/min, con un incremento de 697,1 mL/min entre la primera combinación de la fracción 0,02 mm y la primera de la fracción 0,08 mm.

Comparando los resultados de los parámetros de las fracciones 0,02 y 0,08 mm se demuestra que en la mayor fracción el gasto volumétrico es superior en 697,1 mL/min respecto al de la fracción más pequeña, se debe a que las partículas son de mayor tamaño y se necesita mayor caudal para arrastrarlas, la velocidad de sedimentación es superior en 0,007 m/s.

3.3.1. Análisis estadístico de los experimentos

La modelación estadística matemática se emplea para la elaboración de la ecuación del modelo de regresión ajustada a los datos del elemento en el producto de mayor concentración.

En la figura 3.2 se muestran los efectos principales para el níquel en el Reboso. Se observa que al aumentar la granulometría desde 0,02 hasta 0,08 mm, existe un aumento en el contenido de níquel de 0,35 hasta 0,98 %, con un crecimiento de 0,63 %. La densidad describe un comportamiento prácticamente lineal, aunque existe

una disminución en la concentración del elemento desde 0,64 hasta 0,59 % al aumentar la densidad de 2800 hasta 3600 kg/m³. En la figura 3.3 se muestra la superficie de respuesta estimada a partir de la ecuación de regresión, donde se observa un comportamiento prácticamente planar de la composición níquel con relación a la densidad y granulometría. A partir del grafico se puede estimar de ante mano la concentración del elemento, por ejemplo, para una granulometría de 0,045 mm y densidad de 3000 kg/m³ la concentración del elemento es de 0,63 %.

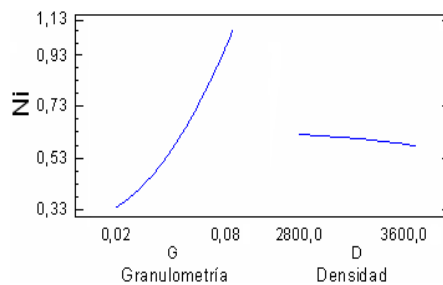


Figura 3.2. Efectos principales

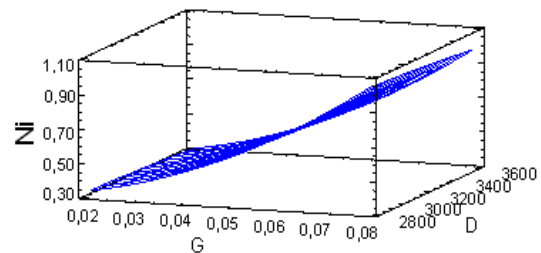


Figura 3.3. Superficie de respuesta

En el anexo 2 se muestran los resultados de estimación para el níquel, hierro, cobalto, magnesio y silicio, así como los límites de valores ajustados para la modelación.

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

$$Ni = 0,07 + 1,3 \cdot G + 0,00016875 \cdot D + 116,667 \cdot G^2 - 0,0005 \cdot G \cdot D - 3,125E - 8 \cdot D^2 \quad (3.1)$$

En la figura 3.4 se muestran los efectos principales para el hierro en el Rebozo. En el mismo al aumentar la granulometría desde 0,02 hasta 0,08 mm, existe un decrecimiento en el contenido del elemento desde 49,8 hasta 38,2 %, con una disminución de 11,6 %. La densidad describe un comportamiento lineal, aunque existe un ligero aumento en la concentración del elemento desde 44,50 hasta 44,97 % al aumentar la densidad de 2800 hasta 3600 kg/m³. En la figura 3.5 se muestra la superficie de respuesta estimada, donde se observa un comportamiento prácticamente planar de la composición hierro con relación a la densidad y granulometría. Según el grafico la concentración del elemento para una granulometría de 0,045 mm y densidad de 3000 kg/m³ es de 47,05 %.

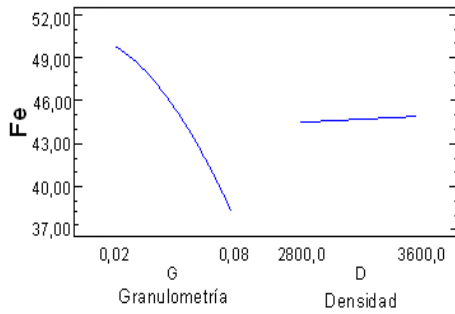


Figura 3.4. Efectos principales

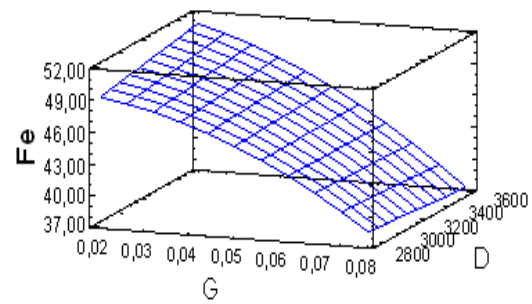


Figura 3.5. Superficie de respuesta

La ecuación del modelo de regresión ajustada para el hierro es:

$$Fe = 39,725 + 166,0 \cdot G + 0,0038125 \cdot D - 1916,67 \cdot G^2 - 0,055625 \cdot G \cdot D - 7,8125E - 8 \cdot D^2 \quad (3.2)$$

En la figura 3.6 se muestran los efectos principales para en cobalto en las Arenas. Al aumentar la granulometría desde 0,02 hasta 0,04 mm, crece el contenido del elemento de 0,052 a 0,069 %, con un aumento de 0,017 %; a partir de esta última granulometría y hasta la fracción 0,08 mm existe una disminución en el contenido del mismo de 0,069 a 0,060 %. En la densidad existe un aumento en la concentración del elemento desde 0,059 hasta 0,063 % al aumentar la densidad de 2800 hasta 3600 kg/m³. En la figura 3.7 se muestra la superficie de respuesta estimada donde se observa un comportamiento parabólico de la composición cobalto con relación a la densidad y granulometría. La concentración del elemento para una granulometría de 0,045 mm y densidad de 3000 kg/m³ es de 0,065 %.

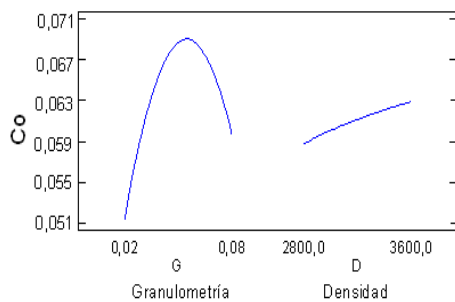


Figura 3.6. Efectos principales

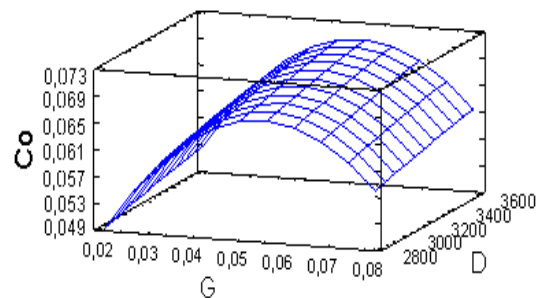


Figura 3.7. Superficie de respuesta

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

$$Co = -0,00666667 + 1,59833 \cdot G + 0,000015 \cdot D - 14,5833 \cdot G^2 + 0,0 \cdot G \cdot D - 1,5625E - 9 \cdot D^2 \quad (3.3)$$

El magnesio según el gráfico de efectos principales, al aumentar la granulometría desde 0,02 hasta 0,08 mm, aumenta su contenido de 1,03 hasta 4,70 %, con un crecimiento de 3,67 %. La densidad describe un comportamiento bastante lineal, aunque existe una pequeña disminución en la concentración del elemento desde 3,25 hasta 2,96 % al aumentar la densidad de 2800 hasta 3600 kg/m³. En la figura 3.9 se muestra la superficie de respuesta estimada, donde se observa un comportamiento prácticamente planar de la composición de magnesio con relación a la densidad y granulometría. La concentración del elemento para una granulometría de 0,045 mm y densidad de 3000 kg/m³ es de 3,07 %.

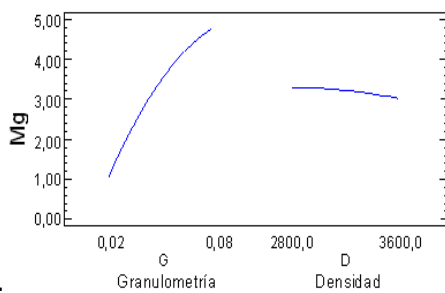


Figura 3.8. Efectos principales

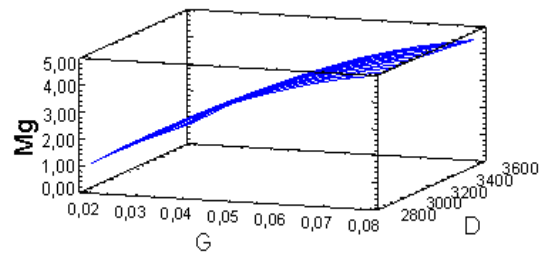


Figura 3.9. Superficie de respuesta

La ecuación del modelo de regresión ajustada para el magnesio es:

$$Mg = -4,74375 + 140,212 \cdot G + 0,0023125 \cdot D - 655,208 \cdot G^2 - 0,003875 \cdot G \cdot D - 3,9625 \cdot 10^{-7} \cdot D^2 \quad (3.4)$$

En la figura 3.10 se muestran los efectos principales para el silicio en el Reboso. Al aumentar la granulometría desde 0,02 hasta 0,08 mm, crece el contenido de 3,42 hasta 9,88 %, con un aumento de 6,46 %. La densidad describe un comportamiento decreciente, con una disminución en la concentración del elemento desde 6,39 hasta 5,90 % al aumentar la densidad de 2800 hasta 3600 kg/m³. En la figura 3.11 se muestra la superficie de respuesta estimada, donde se observa un comportamiento prácticamente planar de la composición de silicio con relación a la densidad y granulometría. La concentración del elemento para una granulometría de 0,045 mm y densidad de 3000 kg/m³ es de 4,83 %.

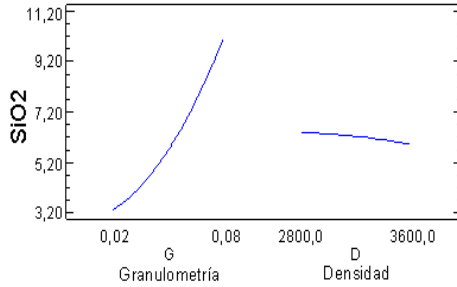


Figura 3.10. Efectos principales

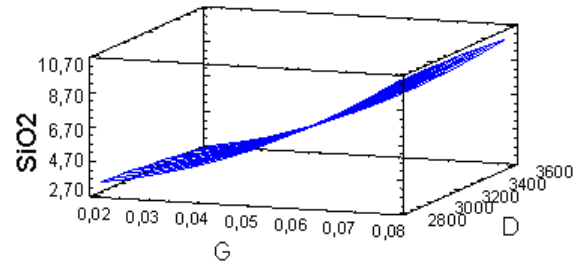


Figura 3.11. Superficie de respuesta

La ecuación del modelo de regresión ajustada para el silicio es:

$$SiO_2 = 0,8635 - 31,165 \cdot G + 0,00228 \cdot D + 1183 \cdot G^2 + 0,0089 \cdot G \cdot D - 5,21875E - 7 \cdot D^2 \quad (3.5)$$

3.4. Comportamiento denso-granulométrico de las colas

El comportamiento denso-granulométrico de las colas en estudio reviste gran importancia en la presente investigación, por tal motivo en el siguiente epígrafe se exponen sus principales resultados. Se tiene en cuenta además la masa mineral sometida a cada análisis químico.

Los resultados del análisis se expresan en la tabla 3.3, donde se aprecia que las partículas menores de 0,04 mm representan más del 50 % de la masa total del sólido, ya que fueron separadas cuando la velocidad del flujo ascendente las arrastra, teniendo en consideración la densidad; corroborando lo planteado por Turro (2002) y Loyola (2012), cuando en la separación por tamices obtuvieron valores semejantes.

Tabla 3.3. Composición denso-granulométrica de las colas.

Tamaño de partícula, mm	Densidad, kg/m ³	Masa de análisis, g	Masa Reboso, g	Masa Arenas, g	Masa análisis químico, g	Salida acumulativa, %
0,02	2800	250	29,4	220,6	4	27,64
	3200	216,6	20,4	196,2	4	
	3600	192,2	19,3	172,9	4	
0,04	2800	168,9	27,2	141,7	4	51,64
	3200	137,7	16,9	120,8	4	
	3600	116,8	15,9	100,9	4	
0,06	2800	96,9	16,6	80,3	4	64,60
	3200	76,3	8,2	68,1	4	
	3600	64,1	7,6	56,5	4	
0,08	2800	52,5	10,3	42,2	4	73,20
	3200	38,2	6,2	32	4	
	3600	28	5	23	4	

Como se observa en la tabla, la masa de análisis es la que se somete a cada experimento de forma escalonada. La salida acumulativa del Reboso de las partículas menores de 0,08 mm representan el 73,20 % de todo el material, lo que evidencia también una distribución de las partículas finas en todo el espectro granulométrico de las colas estudiadas; tal aspecto corrobora los resultados alcanzados por Turro (2002); Hernández (2011); García (2011) y Loyola (2012). Los restantes 26,80 % corresponden a la fracción mayor de 0,08 mm.

De gran importancia resulta el conocimiento denso-granulométrico y químico de las colas estudiadas, ya que nos proporciona el lugar de mayor concentración de un elemento determinado, por ejemplo, para la concentración de níquel se puede partir directamente de la fracción 0,08 mm y 2800 kg/m³, de esta forma se obtiene una buena eficiencia del proceso así como ahorro de energía eléctrica e hidráulica.

El comportamiento de la distribución de tamaño fino, se debe a que el mineral que es procesado en la planta de extracción de níquel y cobalto, es molido hasta garantizar que el 80 % sea menor que 0,074 mm, para facilitar las reacciones químicas que se llevan a cabo en el proceso de tostación reductora, además dicho mineral es dosificado en tres partes de limonita por uno de serpentina (3:1), siendo la limonita la

que aporta mayor masa y como es un mineral de buena molibilidad se muele completamente a la granulometría deseada.

En la figura 3.12 se describe el comportamiento de la salida acumulativa del Reboso obtenida en los experimentos, donde se evidencia un crecimiento exponencial a medida que aumenta la combinación de densidad y granulometría.

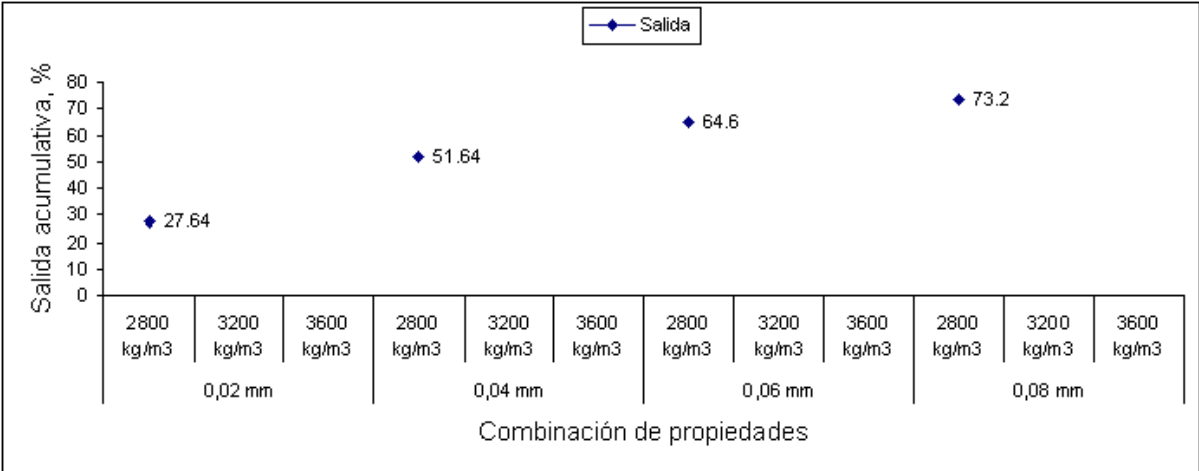


Figura 3.12. Comportamiento en la salida acumulativa de las partículas.

En la figura 3.13 se describe el comportamiento de la masa de análisis alimentada al proceso de elutriación. Evidentemente la masa inicial disminuye paulatinamente a medida que se llevan a cabo los experimentos, al comenzar el último solo quedan 28 g, es decir, se corrobora la hipótesis del predominio de partículas finas en las colas, pues más del 70 % fueron separadas por el flujo ascendente.

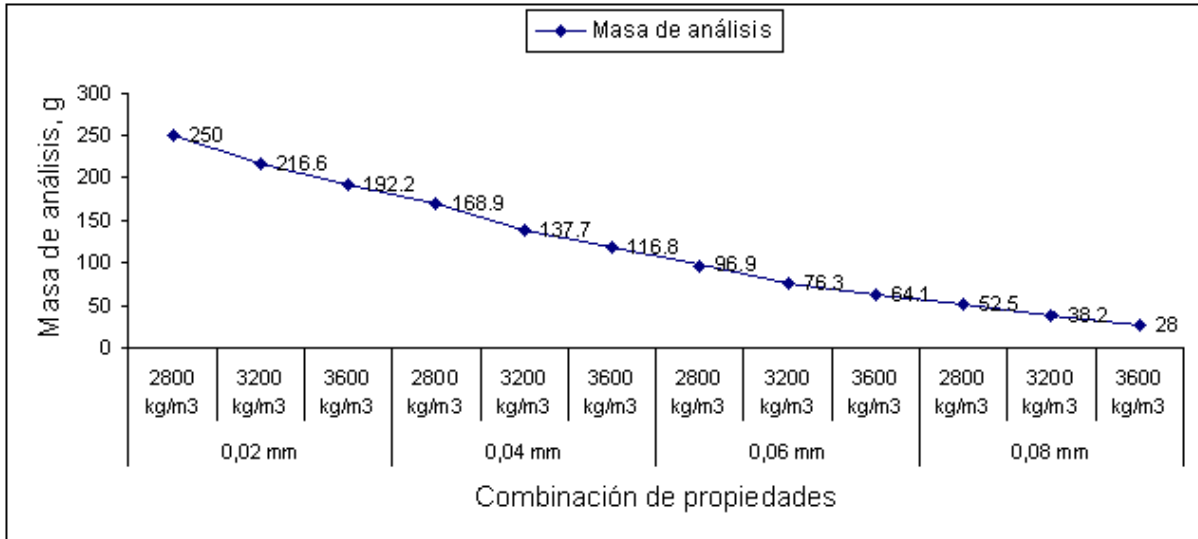


Figura. 3.13. Comportamiento de la masa de análisis alimentada al elutriador.

En el comportamiento hay que tener en cuenta la existencia de algunas partículas que no cumplen con las exigencias de la combinación empleada en el experimento, ya que existen altas concentraciones de metales pesados y diferentes formas de las partículas, y son arrastradas por el flujo de agua fijado a la combinación.

En la figura 3.14 se refleja el comportamiento de salida de las partículas en el Reboso y Arenas (%), donde se tiene en cuenta la masa que entra y sale del elutriador. El porcentaje de salida en el Reboso oscila entre el 9,4 y 19,6 y en las Arenas entre 80,4 y 90,6.

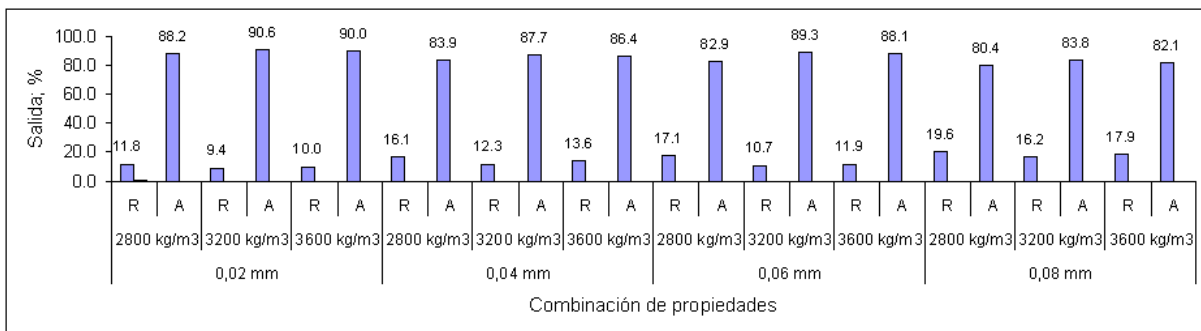


Figura 3.14. Comportamiento de salida Reboso y Arenas.

3.5. Comportamiento químico de los elementos en la concentración denso-granulométrica

El comportamiento químico de los elementos se analiza a través de la composición química obtenida en cada uno de los resultados, dicha composición se muestran en el anexo 1.

En la figura 3.15 se observa el comportamiento del níquel, magnesio y silicio en los productos del Reboso y Arenas. El resultado que se obtiene refleja que los tres metales tienen una tendencia a concentrarse en el producto del Reboso en las fracciones 0,06 y 0,08 mm; se debe a que el silicio y magnesio son elementos asociados a minerales de baja densidad y por esa condición son arrastrados por el flujo ascendente, o sea, ofrecen poca resistencia.

A medida que se incrementa el tamaño de las partículas aumentan sus concentraciones, se debe a que los tres elementos están presentes en la serpentina y el mineral es de poca movilidad, por tanto, su concentración es en las fracciones más gruesa, así se corrobora lo planteado por Coello (2008) y Loyola (2012); además, estos metales disminuyen su concentración a medida que aumenta la densidad en cada fracción, debido a lo explicado anteriormente respecto a la asociación con minerales de baja densidad. Por el contrario en las Arenas los tres elementos mantienen un comportamiento muy semejante, y se debe a que en el producto gracias a la baja densidad del silicio y magnesio y a la asociación del níquel con ellos prácticamente no hay concentración de los metales.

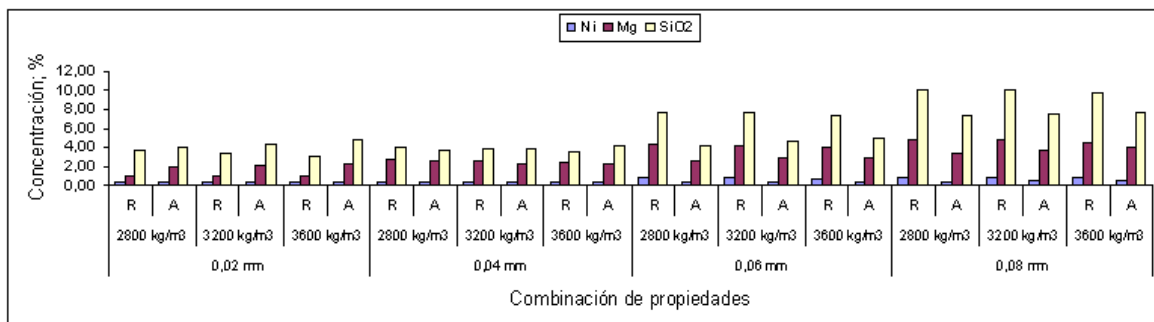


Figura 3.15. Comportamiento del níquel, magnesio y silicio.

A partir del tamaño de partícula 0,06 mm del producto de Rebozo se observa una notable tendencia a la concentración de los metales, lo que se muestra más intenso para la clase más gruesa. Esta afirmación se debe a que a partir de ese tamaño de partícula es donde básicamente hay un mayor predominio de la serpentina.

El níquel llega a concentrarse hasta 0,80 % en el producto del Rebozo de la fracción 0,06 mm a la densidad de 2800 kg/m³, con una insignificante influencia en la variación de la misma, pues hace que disminuya un poco la concentración del elemento hasta 0,72 % cuando se incrementa la densidad hasta su valor máximo. Combinada la fracción 0,08 mm con la densidad de 2800 kg/m³ su concentración es mayor y se obtiene valor de 1,00 %, en la que tampoco hay influencia considerable de la densidad ya que aquí también disminuye muy poco la concentración del elemento hasta alcanzar el valor de 0,96 % a medida que se incrementa la densidad hasta 3600 kg/m³. En las fracciones 0,06 y 0,08 mm correspondientes a las Arenas a medida que aumenta la densidad crece ligeramente la concentración del níquel y se debe a la alta densidad que posee el elemento, así como a su asociación con las fases mineralógicas del hierro, fundamentalmente con la goethita (Rojas 2001).

Lo anterior se debe a que desde el punto de vista mineralógico, la mayor cantidad de níquel que se reporta está presente en la serpentina, la que en el proceso de molienda queda con mayor tamaño (Coello 2008) y por tanto, no logra su transformación físico-química total en la reducción, debido además a las condiciones tecnológicas de operaciones, el empeoramiento del proceso de difusión del reactivo y el tiempo de retención insuficiente para que ocurra la descomposición total del mineral en el rango de temperaturas del horno (Chang 1999), por lo que ocasiona pérdidas que a la postre se depositan como colas. En la descomposición térmica de la serpentina se forman compuestos amorfos [Mg₂(Si₂O₆)], en cuyo interior queda atrapado el níquel y no es posible su recuperación (Chang 1999).

En el caso del magnesio también comienza en la fracción 0,06 mm su tendencia a la concentración y llega hasta 4,35 % con la combinación de la más baja densidad en el producto del Rebozo, siendo de poca significancia la influencia de la variación de esta última, ya que disminuye la concentración del elemento con el aumento de la

densidad hasta 3,94 % con la combinación de 3600 kg/m³. Para la fracción 0,08 mm y a 2800 kg/m³ su concentración es mayor y se obtienen valores de 4,80 %, en la que tampoco hay influencia considerable de la densidad ya que aquí también disminuye un poco la concentración del elemento hasta alcanzar el valor de 4,56 % a medida que se incrementa la densidad hasta 3600 kg/m³.

En las fracciones 0,06 y 0,08 mm correspondientes al producto Arenas, a medida que crece la densidad aumenta ligeramente su concentración, se debe fundamentalmente a la gruesa granulometría que presenta el elemento, así como a la asociación del magnesio con las fases mineralógicas del hierro, esencialmente con las cromoespinelas (Rojas 2003) a pesar de no ser significativa.

Para el silicio la tendencia a concentrarse comienza en el producto del Reboso, en la fracción 0,06 mm con la combinación de 2800 kg/m³, siendo su valor 7,80 %, y disminuye a 7,30 % con el aumento de la densidad a 3600 kg/m³. En la fracción 0,08 mm a 2800 kg/m³ su valor se incrementa a 9,98 % y disminuye a 9,70 % al combinar la granulometría con la densidad de 3600 kg/m³. Para el silicio sucede similar al níquel y magnesio, en las fracciones mayores correspondientes al producto de las Arenas a medida que aumenta la densidad crece ligeramente su concentración, esto se debe a la formación de compuestos amorfos (Chang 1999).

El hierro manifiesta un comportamiento contrario al níquel, magnesio y silicio. En la figura 3.16 se observa como existe un mayor predominio en los productos de las fracciones 0,02 y 0,04 mm; ya que la influencia del elemento es en las partículas finas.

Al combinar la granulometría menor con las tres densidades en forma ascendente, el hierro incrementa su concentración en el producto del Reboso y llega hasta 50,40 %; se confirma lo planteado por Turro (2002); Loyola (2012) y otros investigadores que afirman que el hierro está mayormente distribuido en las fracciones más finas, se atribuye también a lo planteado por Coello (2008), que el elemento está presente en la limonita, la cual es un mineral de buena molibilidad.

La elevada concentración del elemento en las colas se puede atribuir a que en los minerales que dan origen a las colas, el hierro está en su mayor concentración en las

limonitas (grupo de mena fundamental), principalmente como fase de goethita que puede llegar hasta un 69 % (Laverov 1985; Ostroumov *et al.* 1987; Rojas 2001).

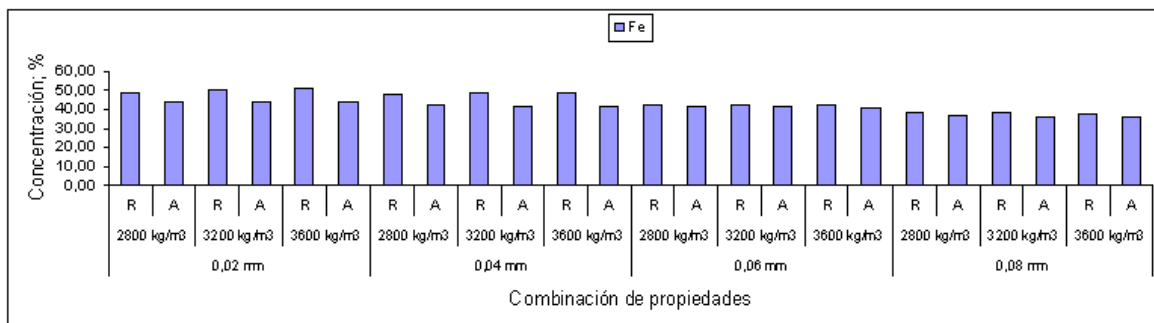


Figura 3.16. Comportamiento del hierro.

En el Reboso al aumentar la densidad de 2800 hasta 3600 kg/m³ también lo hace el contenido de hierro, se debe a que el elemento es bastante denso, sin embargo, en la fracción 0,08 mm al aumentar la densidad en los rangos de estudio la concentración del hierro tiende a disminuir.

El producto obtenido en el fondo del elutriador, disminuye su concentración de 44,00 hasta 35,70 % a medidas que aumenta el tamaño de partículas de 0,02 hasta 0,08 mm y decrece paulatinamente a medidas que aumenta la densidad de 2800 hasta 3600 kg/m³. Se debe a que en las fracciones más gruesas prácticamente hay poco hierro comparado con las fracciones menores y a que gran parte de las partículas más densas fueron separadas en el Reboso.

El cobalto y manganeso (Figura 3.17) tienden a concentrarse en la fracción 0,04 mm, en las Arenas; el primero aumenta su contenido con el crecimiento de la densidad hasta 3600 kg/m³ y alcanza su mayor concentración de 0,071 %. El segundo disminuye su contenido con el crecimiento de la densidad y alcanza su mayor concentración de 0,83 % con la combinación de 2800 kg/m³. En la fracción 0,04 mm los elementos mantienen un comportamiento bastante lineal, o sea, aumentan o disminuyen muy poco y se debe fundamentalmente a que las asbolanas (fase principal de manganeso) es la principal portadora de cobalto (Barros de Oliveira *et al.* 2001).

Ambos elementos se concentran en el producto de las Arenas ya que son muy densos.

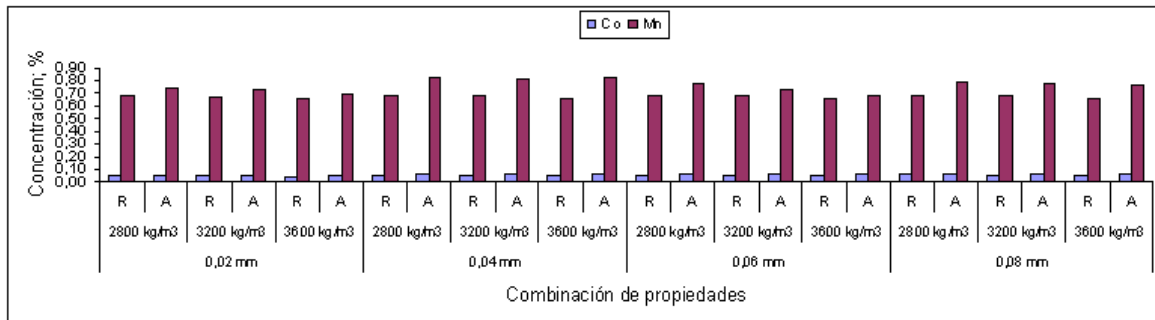


Figura 3.17. Comportamiento del cobalto y manganeso.

En la tecnología CARON los valores de extracción del cobalto son bajos (menores de 40 %) debido a su pobre contenido en el mineral alimentado, a su presencia en forma trivalente, a las altas temperaturas que requiere su óxido bivalente para ser reducido completamente 900-1000 °C (Chang 1999), además, gran parte de este queda atrapado en la red cristalina de la fase de manganeso y pasa a formar parte de las colas, así como parte del cobalto presente en las colas está asociado a la goethita (Barros de Oliveira *et al.* 2001).

El cromo (figura 3.18) disminuye en el Reboso al aumentar la densidad, ya que logra su mayor concentración en las Arenas de la fracción 0,04 mm al aumentar la densidad al máximo nivel, llega a valores de 2,83 %, debido a que el metal es de elevada densidad. Además Rojas (2003) plantea la asociación del cromo con las fases mineralógicas de hierro, específicamente con las cromo espinelas.

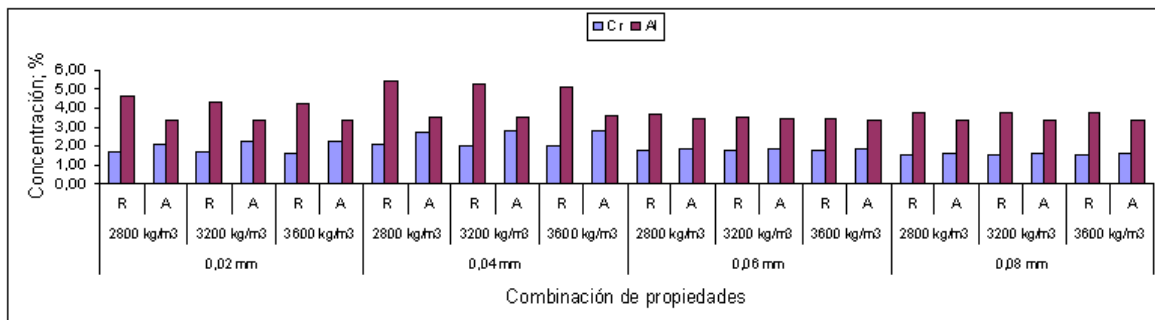


Figura 3.18. Comportamiento del cromo y aluminio.

En la figura 3.18, el aluminio en el Reboso a la densidad de 2800 kg/m^3 , obtiene sus mayores concentraciones, llega a valores de 5,37 % con la combinación de 0,04 mm, se debe a que el elemento posee una densidad ligeramente baja. El alto contenido se puede atribuir a la sustitución del hierro por el aluminio en la red cristalina de la goethita, fenómeno muy común entre los óxidos de hierro en un ambiente oxidante y en presencia de silicatos e hidróxidos de aluminio (Schwertmann *et al.* 2000). Por su parte en las Arenas existe un comportamiento homogéneo al aumentar la densidad y las concentraciones se debe a la asociación con la cromo espinela la cual es fase mineralógica de hierro

El cinc (figura 3.19) tiene un comportamiento estable en los dos productos, para el Reboso existe un ligero crecimiento de la concentración a medidas que aumenta la densidad, para las Arenas en las fracciones 0,02 y 0,04 mm crece ligeramente con el aumento de la densidad y obtiene su mayor concentración de 0,041 % en la fracción 0,04 mm y 3600 kg/m^3 , se corresponde con la elevada densidad que posee el elemento, sin embargo, en las fracciones gruesas disminuye ligeramente con la disminución de la densidad.

Por su parte el comportamiento del cobre, como se muestra en la figura 3.19, disminuye su concentración en el Reboso con el aumento de la densidad y en las Arenas crece su concentración con el aumento de la granulometría. En la fracción 0,08 mm a la densidad de 2800 kg/m^3 se obtiene la mejor concentración, con un valor de 0,058 %, sin embargo, al aumentar la densidad en la fracción disminuye la concentración del elemento hasta 0,054 %.

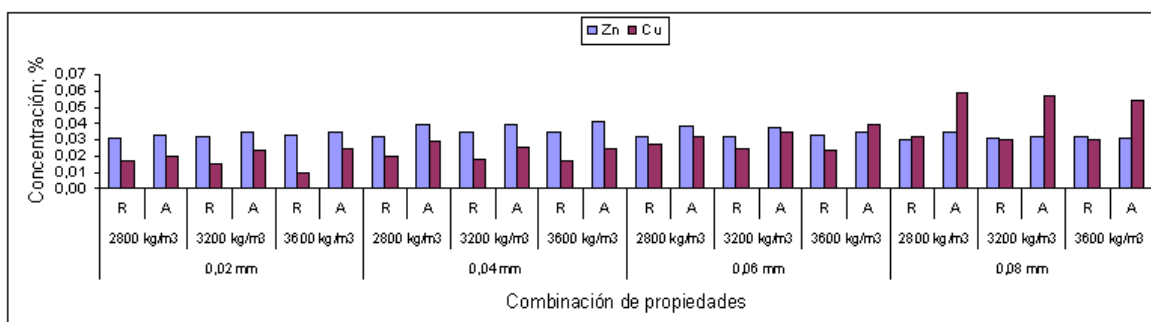


Figura 3.19. Comportamiento del cinc y el cobre.

3.6. Análisis del impacto ambiental

La planta de níquel “Comandante Ernesto Che Guevara”, durante más de dos décadas de explotación ha ocasionado gran impacto sobre el medio ambiente. Desde su inicio 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 estos residuales 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.

En el recién concluido 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 el Reboso en la fracción 0,08 mm a la densidad de 2800 kg/m^3 , el hierro en la combinación 0,02 mm y 3600 kg/m^3 en el Reboso, 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

- ✓ Existe un predominio de las partículas finas en la fracción menor de 0,08 mm y está representada por el 73,20 %.
- ✓ En la fracción 0,02 mm se concentra el hierro a 50,40 % en el producto del Reboso a 3600 kg/m³. En 0,04 mm correspondiente a las Arenas se concentra el manganeso con la combinación de 2800 kg/m³; cobalto, cinc y cromo a 3600 kg/m³; en el Reboso se concentra el aluminio a la densidad de 2800 kg/m³. En la fracción 0,08 mm a 2800 kg/m³ el níquel, magnesio y silicio alcanzan sus mayores concentraciones en el Reboso y el cobre en las Arenas a 2800 kg/m³.
- ✓ Se obtiene el modelo estadístico matemático para diferentes productos de los elementos que poseen mayor influencia:

$$Ni = 0,07 + 1,3 \cdot G + 0,00016875 \cdot D + 116,667 \cdot G^2 - 0,0005 \cdot G \cdot D - 3,125E - 8 \cdot D^2$$

$$Fe = 39,725 + 166,0 \cdot G + 0,0038125 \cdot D - 1916,67 \cdot G^2 - 0,055625 \cdot G \cdot D - 7,8125E - 8 \cdot D^2$$

$$Co = -0,00666667 + 1,59833 \cdot G + 0,000015 \cdot D - 14,5833 \cdot G^2 + 0,0 \cdot G \cdot D - 1,5625E - 9 \cdot D^2$$

$$Mg = -4,74375 + 140,212 \cdot G + 0,0023125 \cdot D - 655,208 \cdot G^2 - 0,003875 \cdot G \cdot D - 3,9625E - 7 \cdot D^2$$

$$SiO_2 = 0,8635 - 31,165 \cdot G + 0,00228 \cdot D + 1183 \cdot G^2 + 0,0089 \cdot G \cdot D - 5,21875E - 7 \cdot D^2$$

- ✓ 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 el comportamiento denso-granulométrico las partículas menores de 0,04 mm representan más del 50 % de la masa total del sólido, ya que fueron separadas cuando la velocidad del flujo ascendente arrastra tales partículas, teniendo en consideración la densidad. La salida acumulativa del Reboso de las partículas menores de 0,08 mm representan el 73,20 % de todo el material, lo que evidencia también una distribución de las partículas finas en todo el espectro granulométrico de las colas estudiadas.
- ✓ El comportamiento químico es similar en todos los elementos para cualquier variación de la densidad en la fracción 0,02 mm, tanto en Reboso como en las Arenas. En la fracción 0,02 mm, a la densidad de 3600 kg/m³, el hierro alcanza su mayor concentración de 50,40 % en el Reboso. En la fracción 0,04 mm se concentran el cobalto, manganeso, cromo, cinc y aluminio, este último se concentra en el Reboso a la densidad 2800 kg/m³ y llega a valores de 5,37 %; los otros elementos se concentran en las Arenas, el manganeso alcanza su mayor concentración de 0,83 % con la combinación de 2800 kg/m³; el cobalto, cromo y cinc alcanzan sus mayores concentraciones a 3600 kg/m³, con valores de 0,071, 2,83 y 0,041 % respectivamente. En la fracción 0,08 mm a 2800 kg/m³ el níquel, magnesio y silicio alcanzan sus mayores concentraciones en el Reboso, con 1,00; 4,8 y 9,98 % respectivamente. El cobre en las Arenas a 3200 kg/m³, se concentra a 0,057 %.

RECOMENDACIONES

- ✓ Realizar el análisis mineralógico de la muestra de cabeza y a los resultados obtenidos en el proceso de elutriación, que permita comprender mejor la distribución de los contenidos en los elementos.
- ✓ Aplicar la separación denso-granulométrica a la pulpa de colas que se obtiene directamente de la planta de Lixiviación y Lavado.

BIBLIOGRAFÍA

1. ÁLVAREZ, E. 1996: Investigación tecnológica para la extracción de la cromo espinela contenida en las colas frescas de la planta René Ramos latour de Nicaro. Trabajo de diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 48 p.
2. ARIZA, S.; SALAZAR, Y.; CAPOTE, N. & BREFFE, J. 2004: Lixiviación química de colas producto del proceso carbonato amoniaco con ácidos orgánicos. Revista Tecnología Química 24(3): 24-36.
3. BARROS DE OLIVEIRA, S. M.; MOYA, C. S. & ENZWEILER, J. 2001: Ochereous laterite: a nickel ore from Punta Gorda, Cuba. Journal of South American Earth Sciences 14(3): 307–317.
4. BROWN, G. G. 1980: Operaciones básicas de la ingeniería química. Traducción al español. 629 p.
5. CASTRO, D. 1980: Evaluación técnico económico del cambio de un hidrociclón por un clasificador espiral en el circuito Nro1 planta El cobre. Trabajo de diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 47 p.
6. COELLO, A.; MENÉNDEZ, J. M. & LABORDE, R. 2008: Grindability of lateritic nickel ore in Cuba. Powder Technology 182: 113-115.
7. COL, L. & GARCÍA, L. 1984: Investigaciones complementarias sobre el beneficio de las colas de Nicaro a escala de laboratorio y de planta piloto. En: Informe técnico. Nicaro, Cuba, 47p.
8. CORBITT, R. 1990: Standard Handbook of Environmental Engineering. New York, McGraw-Hill. 1216 p.
9. CHANG, A. 1999: “Una visión sobre las reservas estratégicas de eficiencia metalúrgica en la tecnología carbonato–amoniaco”. Minería & Geología 16(1): 76-82.

10. CHANG, A. & BOBKOVSKI, Y. G. 1993: "Estudio experimental sobre la hidrólisis de los iones de hierro durante la lixiviación carbonato amoniaca de los minerales oxidados de níquel previamente reducidos". *Minería & Geología* 15(2): 75-79.
11. CHANONA, J. 2005: Desarrollo de un sistema de control basado en lógica difusa para la producción de ácidos grasos volátiles en un proceso de fermentación-elutriación de fango primario. Tesis Doctoral. España. 157 p.
12. DEL TORO, A. 2003: Consideraciones sobre la posible recuperación del cobalto contenido en las colas de la tecnología carbonato amoniaca. Trabajo de Diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 56 p.
13. EPA. 1982: "Control Techniques for Particulate Emissions from Stationary Sources". En: Research Triangle Park. New York, Office of Air Quality Planning and Standards. United State of America, September.
14. EPA. 1998: "Stationary Source Control Techniques Document for Fine Particulate Matter". En: Research Triangle Park, New York, Office of Air Quality Planning and Standards. United State of America, October.
15. FALCÓN, J.; HECHAVARRIA, T.; QUINTANA, J. & VÁZQUEZ, Y. 2000: Estudio de la clasificación de partículas en condiciones trifásicas. *Tecnología Química* 20(2): 17.
16. FERNÁNDEZ, J. A. 1979: Datos aportados sobre las colas de la empresa "René Ramos Latour". En: Informe técnico. Nicaro, Cuba, 45.
17. FOMENKO, T. G. 1980: Procesos de enriquecimiento de minerales por gravitación. Moscú. MIR. 422 p.
18. FLORES, S.; ROMERO, A. & MARTÍNEZ, D. 2009: Tecnología de clasificación fina de mineral metálico y no metálico. *Revista de la Facultad de Ingeniería Industrial* 12(1): 27-31.
19. FRÍAS, M.; SÁNCHEZ, R.; LUJÁN M. P. & GARCÍA, N. 1990: Granulometría láser: Estudio comparativo con las técnicas de tamizado y elutriación aplicado a materiales puzolánicos. *Revista Materiales de la Construcción* 40(217): 16.

20. GARBEY A. 2005: Lixiviación orgánica de las colas de la Empresa Ernesto Che Guevara para la recuperación de cobalto (2da parte). Trabajo de Diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 70 p.
21. GARCÍA, D. 1988: Estudio preliminar de la obtención del concentrado de cromo a partir de las colas de Nicaro. Trabajo de Diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 71 p.
22. GARCÍA, E. 2011: Extracción de cobalto por lixiviación ácida de los residuales sólidos de la tecnología carbonato amoniacal. Tesis de Maestría. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 72 p.
23. GOODELL, T. 1980: Un dispositivo de elutriación de partículas, más particularmente para separar coque de desecho de descarga, junto con un método correspondiente. EEUU. [Patente de Invención].
24. 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. 65 p.
25. HERRERA V. 1961: Comentarios sobre el informe del Instituto Mejanoobr sobre el proyecto para la utilización de las colas de Nicaro como mineral de hierro. Biblioteca D´SIT, 2 p.
26. KOWALSKI T. 1953: Proposed flow sheet for metals recovery from Nicaro tailings. Project 112. Biblioteca D´SIT, 26p.
27. KRIBOI, R. 1992: Elaboración de una tecnología de enriquecimiento de los residuos que contienen hierro de los complejos minero-metalúrgicos de Nicaro y Moa. En: Informe Técnico. Nicaro, Cuba, 43.
28. LAVEROV, N. P. 1985: Yacimientos de minerales metálicos de Cuba. Moscú, MIR. 245 p.
29. LOYOLA, O. 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. 61 p.

30. LOYOLA, O.; BEYRIS, P.; PALACIOS, A. & PALMERO, A. 2011: Comportamiento de las colas de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” ante la intensidad de un campo magnético. “1ra Conferencia Científica Internacional de la UNISS”, YAYABOCIENCIAS´ 2011. Memorias [CD-ROOM], Santi Spíritus, Cuba, 28-30 de noviembre.
31. MAVROMMATIS, K.; HERNÁNDEZ, A.; ZARAGOZA, R. & LEYVA, E. 2002: Aproximación sostenible al reciclado de colas de la producción metalúrgica en Cuba en el ciclo de producción de acero en horno de arco eléctrico. En: Metánica. Memorias. La Habana, Cuba, 15–20 noviembre, 234.
32. MEDRANO, A. 2007: Lixiviación Ácida de los Residuales Sólidos de la tecnología Carbonato amoniacal. Trabajo de Diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 64 p.
33. MINERAL PROCESSING WASTES. 2006: Material Description. <<http://www.tfhrc.gov/hnr20/recycle/waste/mwst1.htm>>. [Consulta: 4 de febrero 2011].
34. MITROFANOV, S. I. 1982: Investigación de la capacidad de enriquecimiento de los minerales. Moscú, MIR. 440 p.
35. MONTERO, F. 2012: Separación de la Montmorillonita de las tobas vítreas. Tesis de Diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 42 p.
36. OSTROUMOV, M. N.; BLANCO, J. & ROJAS, A. 1987: Caracterización mineralógica de las lateritas del sector Atlantic de la mina Moa. Minería & Geología 5(1): 3-20.
37. OTERO, X; FERREIRA, T; HUERTADIAZ, M; PARTITI, C; SOUZA JR, V; VIDALTORRADO, P. & MACIAS, F: 2009. Geochemistry of iron and manganese in soils and sediments of a mangrove system, Island of Pai Matos (Cananeia SP, Brazil). Geoderma 19(148): 318-335.
38. PALMERO, A. 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. 45 p.

39. PAVLOV, K. F. 1981: Problemas y ejemplos para el curso de operaciones básicas y aparatos en tecnología química. Moscú, MIR. 340 p.
40. PELÁEZ, R. 2002: Evaluación experimental de la recuperación de cobalto mediante la lixiviación orgánica a partir de las colas de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”. Trabajo de Diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 60 p.
41. PEÑA, E. 1982: Estudio de sedimentación fraccional. Trabajo de Diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa 46 p.
42. PEÑA, J. G. 1986: Estudio del esquema de beneficio de las colas de Nicaro. Trabajo de Diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 40 p.
43. PERRY. 1984: “Perry’s Chemical Engineers’ Handbook”. New York, McGraw-Hill. 6th Ed.
44. PONCE, N. 1979: Mineralogía y composición sustancial del yacimiento artificial Colas de Nicaro. La Minería en Cuba. 7p.
45. PONCE, N.; ALTARRIBA, I. & CARRILLO, D. 1986: Composición sustancial del yacimiento artificial Colas de Moa. Revista Tecnológica-Serie Geológica 16(2): 66-75.
46. PRIESTER, M. HENTSCHEL, T. & BENTHIN, B. 1991: Pequeña Minería-Técnicas y Procesos GTZ. <www.gama-peru.org/libromedmin/bibliografia/lit-074.htm>. [Consulta: 30 enero 2009]
47. REID, J.G. 1984: “Algunas observaciones sobre las características de la tostación, lixiviación y lavado del mineral laterítico de Greenvale”, Boletín Técnico-Serie Níquel (1): 29-40.
48. RESUMEN DEL TALLER DE COLAS. 2005: Análisis de información científico técnica sobre el procesamiento de las colas de mineral. Moa, Biblioteca CEDINIQ, 35 p.

49. ROJAS, A. 2001: Evidencias a favor de que la goethita es la principal portadora de níquel en los horizontes lateríticos de las cortezas ferroniquelíferas. *Minería & Geología* 18(3 – 4): 21-31.
50. ROJAS A. 2003: Características mineralógicas de los residuales no lixiviados del proceso Caron, en Moa, Holguín, Cuba. *Minería & Geología*. 19(3-4). 23-34.
51. ROJAS, A. & TURRO, A. 2003: Composición mineralógica de las colas del proceso CARON en Moa, Holguín, Cuba. *Minería & Geología* 18(3 - 4): 21-28.
52. ROSALES, I. & RISCO, L. 1981: Propuesta de un flujo tecnológico para el beneficio de los minerales de manganeso en el yacimiento Los Chivos. Trabajo de Diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 44 p.
53. 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.
54. SANTANA, D. J. 1999: Simulación y experimentación de un generador de partículas usando un lecho fluidizado. Resumen Tesis Doctoral. España.
55. SCHWERTMANN, U.; FRIEDL, J.; STANJEK, H. & SCHULZE, D. 2000: "The effect of Al on Fe oxides; XIX, Formation of Al - substituted hematite from ferrihydrite at 25 degrees C and pH 4 to 7. G". *Clays and Clay Minerals* 159-172.
56. TAPIA, J. M. 2004: Separación Neumática de Finos desde Corrientes de Mineral Chancado. Tesis Doctoral. Universidad de Chile.
57. TAYLOR, S. & BOGDAN, R. 1984: Introducción a los métodos cualitativos de la investigación. Nueva York, McGraw-Hill. 332 p.
58. TORRES, M. & GORDÍN, R. 1980: Propuesta de un esquema tecnológico de beneficio hidrogravimétrico para el procesamiento de minerales de manganeso del yacimiento Los Chivos. Trabajo de Diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 45 p.

59. TURRO, A. 2002: Estudio del Hidrotransporte de las Colas en el Proceso Carbonato Amoniacal. Tesis Doctoral. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 154 p.
60. VALDIVIESO, A. 1999: Concentración gravimétrica centrífuga de oro y plata. Su implementación en el circuito de molienda de minera El Pílon. México. Instituto de Metalurgia, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
61. WARK, K.; WARNER, C. 1981: "Air Pollution: Its Origin and Control." New York, HarperCollins. 657p.
62. ZAMORA, J. & VÉLIZ, J. & GILM, J. 1981: Tostación magnetizante de colas de Moa con carbón vegetal como agente reductor. En: Centro de Investigaciones Metalúrgicas (CIME). Ciudad de la Habana, Cuba, 16.
63. <<http://www.gama-peru.org/libromedmin/capitulo/5/5-4-2.htm>>. [consulta: 04 Febrero 2013].
64. <<http://www.gama-peru.org/libromedmin/capitulo/5/5-4-2-1-6.htm>>. [consulta: 04 Febrero 2013].

ANEXOS

Anexo 1: Composición química de los productos de la separación denso-granulométrica.

Fracción granulométrica, mm	Densidad, kg/m ³	Productos	Composición química, %									
			Ni	Co	Fe	Mn	Mg	Cr	SiO ₂	Zn	Cu	Al
0,02	2800	R	0,37	0,04	49,00	0,68	1,05	1,70	3,80	0,03	0,01	4,60
		A	0,39	0,04	44,00	0,74	2,05	2,10	4,01	0,03	0,02	3,32
	3200	R	0,35	0,04	50,00	0,67	1,03	1,66	3,45	0,03	0,01	4,35
		A	0,40	0,05	43,80	0,73	2,10	2,25	4,37	0,03	0,02	3,33
	3600	R	0,34	0,04	50,40	0,66	1,02	1,60	3,01	0,03	0,01	4,30
		A	0,41	0,05	43,70	0,69	2,24	2,28	4,75	0,03	0,02	3,34
0,04	2800	R	0,40	0,04	48,00	0,68	2,80	2,10	4,00	0,03	0,02	5,37
		A	0,45	0,06	42,00	0,83	2,56	2,75	3,70	0,03	0,02	3,55
	3200	R	0,38	0,04	48,50	0,67	2,65	2,00	3,87	0,03	0,01	5,30
		A	0,45	0,07	41,65	0,81	2,30	2,80	3,86	0,04	0,02	3,56
	3600	R	0,37	0,04	49,00	0,66	2,35	1,99	3,60	0,03	0,01	5,10
		A	0,46	0,07	41,20	0,82	2,25	2,83	4,23	0,04	0,02	3,57
0,06	2800	R	0,80	0,05	42,20	0,68	4,35	1,79	7,80	0,03	0,02	3,65
		A	0,39	0,06	41,40	0,78	2,73	1,87	4,30	0,03	0,03	3,45
	3200	R	0,78	0,05	42,50	0,67	4,26	1,78	7,65	0,03	0,02	3,54
		A	0,39	0,06	41,30	0,73	2,89	1,88	4,70	0,03	0,03	3,44
	3600	R	0,72	0,05	43,00	0,66	3,94	1,77	7,30	0,03	0,02	3,50
		A	0,40	0,06	40,50	0,68	3,00	1,88	4,94	0,03	0,03	3,42
0,08	2800	R	1,00	0,05	39,00	0,68	4,80	1,55	9,90	0,03	0,03	3,73
		A	0,45	0,05	36,50	0,79	3,50	1,60	7,30	0,03	0,05	3,41
	3200	R	0,99	0,05	38,10	0,67	4,74	1,54	9,96	0,03	0,03	3,72
		A	0,47	0,06	36,00	0,78	3,68	1,58	7,50	0,03	0,05	3,39
	3600	R	0,96	0,05	37,50	0,66	4,56	1,51	9,70	0,03	0,03	3,72
		A	0,49	0,06	35,70	0,77	3,98	1,57	7,65	0,03	0,05	3,38

Anexo 2. Resultados de la estimación para el níquel, hierro, cobalto, magnesio, silicio.

Níquel				
Fila	Valor observado	Valor ajustado	Nivel de confianza valor ajustado; Inferior 95,0 %.	Nivel de confianza valor ajustado; Superior 95,0 %.
1	0,37	0,342167	0,170791	0,513542
2	0,4	0,480167	0,355473	0,604861
3	0,8	0,7115	0,586806	0,836194
4	1,0	1,03617	0,864791	1,20754
5	0,35	0,330667	0,189103	0,472231
6	0,38	0,464667	0,344201	0,585132
7	0,78	0,692	0,571534	0,812466
8	0,99	1,01267	0,871103	1,15423
9	0,34	0,309167	0,137791	0,480542
10	0,37	0,439167	0,314473	0,563861
11	0,72	0,6625	0,537806	0,787194
12	0,96	0,979167	0,807791	1,15054
Hierro				
Fila	Valor observado	Valor ajustado	Nivel de confianza valor ajustado; Inferior 95,0 %.	Nivel de confianza valor ajustado; Superior 95,0 %.
1	49,0	49,2258	47,0938	51,3579
2	48,0	47,1308	45,5796	48,6821
3	42,2	43,5025	41,9512	45,0538
4	39,0	38,3408	36,2088	40,4729
5	50,0	50,1183	48,3572	51,8795
6	48,5	47,5783	46,0797	49,077
7	42,5	43,5051	42,0063	45,0037
8	38,1	37,8983	36,1372	39,6595

9	50,4	50,9858	48,8538	53,1179
10	49,0	48,0008	46,4496	49,5521
11	43,0	43,4825	41,9312	45,0338
12	37,5	37,4308	35,2988	39,5629

Cobalto

Fila	Valor observado	Valor ajustado	Nivel de confianza valor ajustado; Inferior 95,0 %.	Nivel de confianza valor ajustado; Superior 95,0 %.
1	0,047	0,0492167	0,0405376	0,0578957
2	0,068	0,0636833	0,0573684	0,0699983
3	0,063	0,0664833	0,0601684	0,0727983
4	0,059	0,0576167	0,0489376	0,0662957
5	0,051	0,0514667	0,0442973	0,058636
6	0,07	0,0659333	0,0598325	0,0720342
7	0,065	0,0687333	0,0626325	0,0748342
8	0,06	0,0598667	0,0526973	0,067036
9	0,052	0,0532167	0,0445376	0,0618957
10	0,071	0,0676833	0,0613684	0,0739983
11	0,066	0,0704833	0,0641684	0,0767983
12	0,064	0,0616167	0,0529376	0,0702957

Magnesio

Fila	Valor observado	Valor ajustado	Nivel de confianza valor ajustado; Inferior 95,0 %.	Nivel de confianza valor ajustado; Superior 95,0 %.
1	1,05	1,05692	0,656024	1,45781
2	2,80	2,86842	2,57672	3,16011
3	4,35	4,15575	3,86406	4,44744
4	4,80	4,91892	4,51802	5,31981
5	1,03	1,02242	0,691261	1,35357
6	2,65	2,80442	2,52262	3,08622

7	4,26	4,06225	3,78045	4,34405
8	4,74	4,79592	4,46476	5,12707
9	1,02	0,86291	0,462024	1,26381
10	2,35	2,61542	2,32372	2,90711
11	3,94	3,84375	3,55206	4,13544
12	4,56	4,54792	4,14702	4,94881

Silicio

Fila	Valor observado	Valor ajustado	Nivel de confianza valor ajustado; Inferior 95,0 %.	Nivel de confianza valor ajustado; Superior 95,0 %.
1	3,8	3,5046	1,92994	5,07926
2	4,0	4,8002	3,65447	5,94593
3	7,8	7,0428	5,89707	8,18853
4	9,98	10,2324	8,65774	11,8071
5	3,45	3,2353	1,93456	4,53604
6	3,87	4,6021	3,49522	5,70898
7	7,65	6,9159	5,80902	8,02278
8	9,96	10,1767	8,87596	11,4774
9	3,01	2,799	1,22434	4,37366
10	3,6	4,237	3,09127	5,38273
11	7,3	6,622	5,47627	7,76773
12	9,7	9,954	8,37934	11,5287