



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

Comportamiento de las colas de la “Empresa Comandante Ernesto Che Guevara” ante la intensidad de un campo magnético

Trabajo de Diploma

Tesis en opción al Título de Ingeniero Metalúrgico

Abel Ramón Palmero Pupo

*Moa, 2011
“Año 53 de la Revolución”*



Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa

“Dr. Antonio Núñez Jiménez”

Facultad de Metalurgia y Electromecánica

Comportamiento de las colas de la “Empresa Comandante Ernesto Che Guevara” ante la intensidad de un campo magnético

Trabajo de Diploma

Tesis en opción al Título de Ingeniero Metalúrgico

Autor: Abel Ramón Palmero Pupo

Tutores: Prof. Inst., Orleidy Loyola Breffe, Ing.

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

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

Moa, 2011

“Año 53 de la Revolución”



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

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD:

Yo; Abel Ramón Palmero Pupo, autor de este trabajo de diploma certifico su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, el cual podrá hacer uso del mismo para fines docentes, educativos e investigativos.

Firma del Diplomante

Julio, 2011

Pensamientos

No existe nada en la vida inalcanzable, como tampoco hay barreras que te limiten el paso hacia tus objetivos; solo se necesita para lograrlo el amor y la comprensión de aquellos que te rodean.”

José Ángel Guevara Chávez.

“En nombre de los que cayeron por un país digno y respetable, de los ideales que ellos defendieron y de la patria que ellos soñaron estamos obligados a ser mejores”.

Fidel Castro

Dedicatoria

Dedico este trabajo de diploma:

*A mis **padres** Maide Pupo Batista y Hernán Vargas Hernández como recompensa por su esfuerzo, dedicación y confianza en todo el momento en que lo necesité.*

*A **mi hija** Lauren Palmero Benítez por ser lo que más amo y convertirse en el motor impulsor de mi vida en estos últimos años.*

A Yissel Benítez la madre de mi hija por ser la persona que en todo momento me ayudó en todos los sentidos y confió ciegamente en mí.

*A **toda la familia** y en especial a mis hermanos, Albeys Y. y Alejandro, a mi abuela Aida Naranjo, a mis tías Ester, Virginia, Adelta y mi tío Leonardo por su apoyo de confianza y seguridad.*

Agradecimientos

- *A mis tutores Orleidy Loyola Breffe, Amaury Palacio y Pedro Beyris por su ayuda y colaboración en la realización de este trabajo.*
- *A toda mi familia por apoyarme y ayudarme para que este sueño se hiciera realidad.*
- *A mis amigos de estudios y amistades en Moa que siempre me ayudaron cuando más lo necesité.*
- *A todas las personas que de una forma u otra me alentaron para seguir adelante.*

RESUMEN

En la actualidad existen grandes volúmenes de desechos sólidos industriales (Colas) generados por la “Empresa Comandante Ernesto Che Guevara”, las que afectan el entorno, razón por la cual, el presente trabajo tiene como objetivo analizar el comportamiento de las mismas a partir de la variación del campo magnético para el posible aprovechamiento de este recurso no renovable.

Para el desarrollo de la investigación se realizó una caracterización química a la muestra inicial y a los productos a través de las técnicas analíticas de: fluorescencia de rayos X, fotometría por absorción atómica y espectrofotometría de emisión por plasma (ICP). Se determinó la susceptibilidad magnética con un Kappameter digital y se realizó la separación magnética por vía seca en un separador ЭБС 138 T.

Se determinó que las colas presentan un contenido de 0,36 % de níquel, 0,091 % de cobalto y 43,93 % de hierro. Los principales resultados se obtuvieron con una intensidad de corriente de 0,1 A , en las clases de tamaño +2; $-0,150 \pm 0,075$; $-0,038$ mm , para el Ni, Co, Mn, Mg, Cr y SiO₂ con valores de 0,47; 0,10; 0,91; 4,21; 3,46 y 19,25 % respectivamente.

Palabras clave:

Separación magnética, Susceptibilidad magnética, Colas del proceso CARON

ABSTRACT

At the present time great volumes of industrial solid waste exist (Limes) generated by the Company Commander Ernesto Che Guevara, this limes affect the environment, reason for this reason, the present work is aimed at analysing the behaviour of the same ones starting from the variation of the magnetic field for the possible use of this nonrenewable resource.

For the development of the research it was carried out a chemical characterization to the initial sample and the products through the analytic techniques of: rays X fluorescence, photometry for atomic absorption and plasma emission spectrometry (ICP). It was determined the magnetic susceptibility by means of digital Kappameter it was analyzed the by magnetic separation using a separator ЭБС 138 T.

It was determined that the limes present a content of 0,36 nickel % , 0,091 cobalt % and 43,93 iron % .The most important results were obtained at magnetic field intensity of 0,1 A , for classes of size +2; -0,150 + 0,075; -0,038 mm, for Ni, Co, Mn, Mg, Cr and SiO₂ with value of 0,47, 0,10, 0,91, 4,21, 3,46 and 19,25% respectively.

Key words:

Separation magnetic, Susceptibility magnetic, Limes of the process CARON

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	9
CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES Y ACTUALIDAD DEL TEMA	12
1.1. Antecedentes	12
1.1.1. Procesos pirometalúrgicos	12
1.1.2. Procesos hidrometalúrgicos	14
1.1.3. Beneficio de minerales	16
1.2. Caracterización de las colas de la “Empresa Ernesto Che Guevara”	19
1.2.1. Composición granulométrica	19
1.2.2. Composición química	20
1.2.3. Composición mineralógica	21
1.2.4. Porosidad	23
1.2.5. Gravedad específica y peso volumétrico	23
1.3. Fundamentos teóricos del método de separación magnética	23
1.3.1. Esencia del método de separación magnética	23
1.3.2. Separación a baja intensidad del campo magnético	25
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS	26
2.1. Diseño experimental	26
2.2. Toma y preparación de la muestra	28
2.3. Caracterización granulométrica	28
2.4. Susceptibilidad magnética de las colas	29

2.5. Separación magnética de las colas del proceso Carbonato Amoniacal	30
2.5.1. Descripción de la instalación para la separación magnética	31
2.5.2. Separación magnética por clases de tamaño	32
2.6. Caracterización química	33
2.6.1. Análisis químico por el método Fotométrico (Absorción atómica)	33
2.6.2. Análisis químico por el método de Fluorescencia de rayos X	33
2.6.3. Espectrofotometría de emisión por plasma (ICP)	34
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	35
3.1. Características iniciales de las colas	35
3.1.1. Resultado del análisis químico de la muestra inicial	35
3.1.2. Resultados del análisis de susceptibilidad magnética	36
3.2. Análisis preliminar del comportamiento magnético de las colas	37
3.2.1. Análisis de la separación magnética	37
3.2.2. Comportamiento de la salida de los productos según la intensidad del campo magnético	38
3.3. Resultados del análisis granulométrico	40
3.3.1. Análisis fraccional de contenido según el tamaño de las partículas	41
3.3.1.1. Comportamiento de los diferentes elementos químicos en las diferentes fracciones granulométricas	41
3.4. Comportamiento magnético por clases de tamaño	43
3.5. Análisis preliminar del impacto ambiental generado	46
CONCLUSIONES	48
RECOMENDACIONES	49
BIBLIOGRAFÍA	50
ANEXO	

INTRODUCCIÓN

Cuba ocupa un lugar cimero en las reservas mundiales de minerales lateríticos de níquel. Estos minerales están caracterizados por una distribución desigual de los valores metálicos en las distintas capas que componen el perfil ferruginoso. De esto último se deriva, que las tecnologías diseñadas para el procesamiento de estas menas no logren un aprovechamiento racional de las mismas, generando grandes volúmenes de residuales de los procesos mineros y tecnológicos.

Los yacimientos lateríticos cubanos se encuentran ubicados fundamentalmente en el noroeste de la provincia de Holguín, donde se encuentran actualmente las tres industrias metalúrgicas que procesan estos minerales, una con la tecnología ácida a presión y las dos restantes con la tecnología carbonato amoniacal, (proceso CARON). Además existe un proyecto en ejecución para la producción de Ferro-Níquel (FeNi). La tecnología Carbonato Amoniacal, logra extracciones de níquel de un 86 % y de cobalto de hasta un 20–30 % , pasando gran parte de estos metales a los sólidos no lixiviados de este proceso.

Debido a esto la obtención de concentrados de níquel a partir de menas lateríticas en nuestro país lleva aparejado la deposición de un volumen considerable de sólidos no lixiviados del proceso extractivo de la industria del níquel, llamado colas; las cuales son almacenadas en presas para su futuro aprovechamiento.

Para el Grupo Empresarial Cuba-Níquel, la producción de colas por las industrias de níquel cubanas con alto contenido de hierro y metales pesados por más de 50 años, constituye uno de los problemas de mayor impacto ambiental, transformándose en una fuente de contaminación que afecta la flora, la fauna terrestre y marina aledañas a la zona de los depósitos, y 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 las épocas de sequía.

Algunos especialistas dedicados al desarrollo económico futuro de la región Moa–Nícaro, consideran que el proceso minero futuro de la región estará indisolublemente ligado a la explotación de los minerales almacenados en las presas de cola, ya que la actual explotación de los minerales lateríticos de níquel y cobalto tiene un tiempo de vida limitado y constituyen recursos no renovables. De ahí la importancia de desarrollar investigaciones que posibiliten dicha transformación futura y una mayor eficiencia en el aprovechamiento de los recursos en la actualidad con el objetivo de lograr una sustentabilidad económica en la región.

La demanda creciente de los minerales de hierro en el mercado abre una posible alternativa para la solución de este residual; ya que este representa aproximadamente el 45 % de la masa total de colas almacenadas en sus respectivas presas.

Después de los ajustes necesarios en los contenidos de hierro, níquel, cobalto y cromo, este residual sólido pudiera ser comercializado como un nuevo producto con alto valor agregado para los consumidores de minerales de hierro, pudiendo convertirse en un producto codiciado por los clientes aceristas.

La creatividad de los científicos y tecnólogos cubanos en función de desarrollar una alternativa tecnológica que permita convertirlos en productores y suministradores de materias primas de minerales de hierro, pudiera ser la solución más viable para la disposición y uso de los residuales sólidos no lixiviados de la industria de níquel cubana.

Hasta ahora se han desarrollado varias investigaciones encaminadas a obtener metodologías para el tratamiento de este residual, destacándose autores como: (Presilla, 1969); (Ponce, 1979); (Zamora *et al.*, 1981); (Turro, 2002); (Mavrommatis *et al.*, 2002); (Hernández, 2003-2004); (Puron & Turro, 2003.); (Palacios & Toro, 2003); (Ariza *et al.*, 2003); (Rodríguez, 2004); (Baldoquín, 2004); (Peña, 2010); (Hernández, 2011), entre otros. Estas investigaciones fundamentalmente están realizadas con las colas amoniacaes obtenidas como resultado del Proceso CARON, debido a que de las tres empresas niquelíferas de la región, dos emplean esta tecnología y por consiguiente los volúmenes almacenados de residuales sólidos son mayores.

Según lo antes expuesto se declara como **situación problemática**, la existencia de grandes volúmenes de desechos industriales generados por la “Empresa Comandante Ernesto Che Guevara”.

Relacionado con lo anterior se define como **problema científico**, el insuficiente conocimiento del comportamiento de las colas de la “Empresa Ernesto Che Guevara” frente a la variación de la intensidad de un campo magnético.

El **objeto de investigación** recae sobre los residuos sólidos (colas) del proceso de la “Empresa Ernesto Che Guevara”.

El **objetivo del trabajo** es evaluar el comportamiento de las colas de la “Empresa Ernesto Che Guevara” en dependencia de la variación del campo magnético.

El **campo de acción** consiste en las regularidades del comportamiento de las colas al variar la intensidad del campo magnético.

Se enuncia como **hipótesis**:

La variación de la intensidad del campo magnético permitirá conocer el comportamiento de las colas de la “Empresa Ernesto Che Guevara”.

Para cumplir con el objetivo trazado se realizan las siguientes **tareas**:

1. Búsqueda bibliográfica.
2. Determinación de la susceptibilidad magnética de los residuos sólidos estudiados.
3. Caracterización magnética y granulométrica de las colas de la “Empresa Ernesto Che Guevara”.

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES Y

ACTUALIDADES DEL TEMA

CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES Y ACTUALIDAD DEL TEMA

En la búsqueda de soluciones para darle un uso racional a las colas del proceso CARON y eliminar el impacto ambiental negativo que éstas producen en el territorio de Moa y Nicaro donde se encuentran ubicadas las Empresas Metalúrgicas “Comandante Ernesto Che Guevara y Comandante René Ramos Latour” generadoras de estas colas, numerosos investigadores han realizado trabajos encaminados a darle una utilización industrial a este residual.

1.1. Antecedentes

En el ámbito mundial una de las posibles soluciones encontradas para la disminución de los volúmenes de este residual sólido 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 y 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).

Dentro de la metalurgia el procesamiento de los residuos de la tecnología carbonato amoniacal, han estado dirigidas en tres ramas diferentes, como son, procesos pirometalúrgicos, procesos hidrometalúrgicos y beneficio de minerales.

1.1.1. Procesos pirometalúrgicos

Entre las compañías e investigadores principales que han empleado los procesos pirometalúrgicos para el procesamiento de estas colas se encuentran:

La Nacional Lead Company al ser la primera referencia de trabajos realizados con el objetivo de aprovechar las colas en forma de un concentrado de hierro en 1952; en las investigaciones se nodulizaron las colas y se calcinaron a 900 °C , estos nódulos se mezclaron con cisco de coque y carbonato de calcio y se calentaron hasta 1150 °C,

se enfriaron, trituraron y se le realizó separación magnética seca, en la que se obtuvo un producto magnético con 71,20 % de Fe_{total} y recuperación del 83,40 % , similar procedimiento se realizó con mezcla 1:1 de colas y mineral de hierro de baja ley para obtener un producto magnético con 91,10 % de Fe_{total} y recuperación del 73,90 % , (Informe, 1952).

Presilla (1969), presentó un plan para realizar investigaciones a escala de laboratorio para obtener hierro esponja a partir de las colas de Nicaro.

Luego en el Instituto Mejanoobr, se realizaron pruebas de sinterización y peletización al concentrado de Fe, y al comparar los resultados, se concluyó que el método de peletización es poco efectivo en comparación con la sinterización, debido a su baja productividad específica (0,30 t/h), (Informe, 1971 -1972).

Zamora *et al.* (1981), exponen los resultados de su investigación en la que se efectúa el enriquecimiento en hierro mediante la tostación magnetizante (conversión del óxido no magnético (Fe_2O_3) en óxido magnético (Fe_3O_4)), y la separación magnética húmeda de las colas del proceso CARON de Nicaro con el uso de carbón vegetal como agente reductor, en la misma se obtuvieron los parámetros tecnológicos más convenientes para continuar la investigación en curso a escala de planta piloto, donde se estudia en específico la variante de efectuar la tostación con carbón vegetal cubano como agente reductor, con el uso de los finos de coque, finos de antracita, la lignita, la turba, y otros de origen vegetal, como el bagazo y el carbón, el cual se obtiene a partir de los recursos forestales propios y presenta la ventaja de no aportar azufre.

Entre las conclusiones del trabajo está la posibilidad de obtener un concentrado con 62 % de hierro, 75 % de rendimiento en peso, 92 % de recuperación de hierro y 59 % de desulfuración primaria, cuya utilización para la producción de pelets calcinados puede constituir una nueva vía más económica de utilización de los recursos minerales.

Los investigadores Mavrommatis *et al.* (2002), demuestran que el níquel y el cobalto de las colas producto de la producción metalúrgica en Cuba (Nicaro), pueden ser reciclados en la producción de acero en alto grado, sobre el 90 % . Las condiciones de equilibrio usadas, así como los cálculos termodinámicos llevados a cabo, indican que la inyección de colas en hornos de arco eléctrico es posible, si un concepto de inyección pudiera ser desarrollado. Esto traería beneficios para ambos países (Cuba y Alemania),

principalmente en la aproximación al desarrollo sostenible en el reciclado de colas en la producción de aceros

1.1.2. Procesos hidrometalúrgicos

Al realizar un análisis crítico de las diferentes bibliografías estudiadas que abordan el tema, se llegó a la conclusión de que los procesos hidrometalúrgicos han sido los más empleados por investigadores e instituciones en trabajos relacionados con el tratamiento de las colas, ya que estos procesos resultan ser más económicos que los demás. Por lo que a continuación se mencionan una serie de resultados obtenidos a partir del tratamiento hidrometalúrgico.

Turro (2002), realizó un estudio del hidrotransporte de las colas del proceso CARON de la “Empresa Comandante Ernesto Che Guevara”. En el trabajo realizan una caracterización granulométrica, química, mineralógica y magnética de la fase sólida, donde plantean que las fases principales presentes son la maghemita, la magnetita y el cuarzo. Obtienen una caracterización reológica de sedimentación y de estabilidad de sus hidromezclas en medio amoniacal. Se determinó que las partículas inferiores a los 43 μm , con una composición química muy uniforme están conformadas por varias fases mineralógicas, en la que sobresale principalmente la magnetita (Fe_3O_4) y la maghemita (Fe_2O_3).

Palacios & Toro (2003), realizan una revisión teórica y experimental sobre el posible desarrollo de un método o proceso para un factible tratamiento de las colas de la Tecnología Carbonato Amoniacal, almacenadas en las presas dispuestas para esto en las fábricas Comandante Ernesto Che Guevara y René Ramos Latour, de Moa y Nicaro respectivamente; el objetivo fundamental de la investigación, es recuperar el cobalto presente en este desecho industrial, en el cual el contenido de este metal se encuentra en el orden de 0,08 – 0,12 % .

Esta investigación fue sólo un paso para el tratamiento de las colas amoniacales, no sólo con el objetivo de recuperar el cobalto existente en ella, sino también el manganeso, aluminio, cobre entre otros.

En estudios realizados por Ariza *et al.* (2003), se llevó a cabo una lixiviación química de las colas de la “Empresa Comandante Ernesto Che Guevara”, el trabajo contempla los resultados del estudio realizado a escala de laboratorio, mediante el uso de cuatro ácidos

orgánicos para lixiviar colas desechadas. Los ácidos utilizados fueron el tartárico, oxálico, acético y cítrico. El objetivo fundamental consistió en seleccionar entre diferentes ácidos orgánicos el de mayor capacidad para extraer el níquel y cobalto contenido en las colas. El desarrollo de la investigación fue concebido a través de la aplicación de las técnicas de diseño de experimentos factoriales, para estudiar el comportamiento de variables tiempo, concentración de ácidos y relación líquido - sólido. Los mejores resultados se obtuvieron con el ácido cítrico con el que se lograron extracciones máximas de Ni de 77,40 y 82,20 % ; para el cobalto, además de los elementos antes mencionados se extrajeron en grados apreciables las impurezas de manganeso, magnesio y hierro con valores 77,50, 75,30 y 65,70 % respectivamente.

Rodríguez (2004), a partir de la lixiviación ácida reductora (con dióxido de azufre y ácido sulfúrico) de las colas de la planta niquelífera de Punta Gorda (Cuba), se trazó como objetivo principal determinar los parámetros que permiten obtener, con buenos índices de extracción, un licor de sulfato ferroso y de otros metales (níquel y cobalto), para ser utilizado posteriormente en el procesamiento de los nódulos marinos polimetálicos.

Como resultado del trabajo realizado se obtuvo, que al lixiviar las colas “amoniacales” en un medio ácido reductor y condiciones atmosféricas, es posible lograr altas extracciones del níquel, cobalto y hierro, y obtener un licor de sulfato ferroso con una concentración relativamente alta de hierro 2^+ (agente reductor de posible uso en la lixiviación de los nódulos marinos).

Baldoquín (2004), estudió la posibilidad de recuperar el cobalto contenido en los residuales sólidos de las colas de la “Empresa Ernesto Che Guevara”, obteniendo extracciones elevadas. Para ello realizó varias pruebas para determinar los parámetros que más influyen en las extracciones de este metal.

Determinó el modelo estadístico y cinético que rige el proceso de lixiviación con mezclas de ácidos orgánicos. También realizó un estudio de prefactibilidad económica y medio ambiental.

Peña (2010), determinó la influencia de los principales parámetros que intervienen en el proceso de lixiviación ácida a presión atmosférica de los residuales sólidos de la tecnología carbonato amoniacal, empleando un agente reductor. Estudió como variables independientes: la temperatura, la concentración inicial de sulfato de hierro (II), el contenido inicial de sólido y la concentración inicial de ácido sulfúrico, cuya realización fue

a escala de laboratorio en un reactor de 4,5 L de capacidad. Se obtuvo un modelo estadístico–matemático, el que permitió analizar la influencia de los principales parámetros, determinándose que los mismos influyen positivamente en la extracción de cobalto.

Hernández (2011), caracterizó el tratamiento de los productos de la lixiviación en medio orgánico de los residuos sólidos de la “Empresa Ernesto Che Guevara”.

Dentro de su investigación empleó mezclas de ácido oxálico y ácido tartárico como agente lixivante, se lograron extracciones de cobalto, níquel e hierro de 78, 60 y 35 % , respectivamente. La posterior precipitación y calcinación de las sales metálicas obtenidas a partir del licor de lixiviación, condujo a un producto con contenidos de 1,22 % de níquel, 0,33 % de cobalto y 65,50 % de hierro.

Las pruebas de separación magnética húmeda con las colas residuales de la lixiviación muestran una tendencia a enriquecer el hierro en la fracción magnética, alcanzándose valores de 50 % . Al considerar los costos por concepto de consumo de reactivo, sugiere que esta variante puede ser una alternativa viable para el tratamiento de las colas.

1.1.3. Beneficio de minerales

En las investigaciones realizadas por la vía del beneficio para el estudio de estas colas se han propuesto varios métodos, en los cuales se pueden destacar: la flotación, la separación gravimétrica y la magnética, lo que ha resultado este último ser el método más empleado para la obtención de concentrados de hierro y cromo, con el empleo de la vía húmeda a baja intensidad del campo magnético.

Entre las instituciones e investigadores que más han utilizado estos métodos de beneficio se encuentran los que se nombran a continuación:

Se realizaron investigaciones muy amplias en el Instituto Mejanobr utilizando las colas de Nicaro con el objetivo de caracterizar las muestras de colas y luego determinar un flujo de beneficio adecuado con vistas a la proyección de una planta de beneficio a escala de una planta piloto (Informe, 1961). Se determinó que la vía idónea para el beneficio de las colas es la separación magnética húmeda a baja intensidad del campo magnético. Además, se obtuvo un concentrado con 58,10 % de Fe, que según su composición química es apto para la utilización siderúrgica. Se recomendó un esquema de beneficio de las colas para una prueba de concentración semi-industrial.

El principio del esquema de beneficio propuesto es una separación magnética básica, seguida por operaciones de limpieza del concentrado y control del rechazo para la recuperación de las pérdidas de hierro que se arrastra junto con este último.

También se realizaron pruebas de obtención de pelets. Se afirmó que a partir del concentrado de las colas se pueden obtener pelets con características satisfactorias. Sin embargo, hubo problemas en el secado de los pelets, debido a la porosidad interna de las partículas de las colas, que provocan una absorción de agua muy grande.

En base a los resultados obtenidos en esta investigación se realizó en 1963 y 1964 un estudio técnico-económico sobre la construcción de una acería integrada en Cuba.

Ashinkov (1962) estudió resultados de investigaciones de separación magnética y clasificación de las colas de Nicaro, en el que hace un resumen de los siguientes aspectos: composición de las colas tamizadas, características mineralógicas de las colas, análisis químicos racionales de las colas, composición química de las colas y el mineral inicial, experimentos de clasificación de las colas con magnetización preliminar, experimentos de separación magnética con un tubo separador y experimentos de separación magnética en una banda separadora. En el trabajo se concluye que:

- Mediante el beneficio magnético de las colas de Nicaro (tanto las frescas como las viejas) pueden obtenerse concentrados con contenidos de hierro de 58 – 59 % y relación Cr/100 partes de Fe = 1,60 – 1,80.
- El concentrado de mayor calidad no puede obtenerse por beneficio mecánico debido a las particularidades mineralógicas de las colas.
- Los resultados confirman los índices obtenidos por el Instituto Mejanoobr. en el beneficio magnético de las colas.

Informe (1963), se presentan resultados del análisis químico realizado a colas de Nicaro previamente desmagnetizadas y sin desmagnetizar. Se concluye que la mejor separación del Fe en la fracción magnética se obtiene a una intensidad de campo magnético de 800 gauss tanto para las colas desmagnetizadas como para las colas sin desmagnetizar.

En el Informe (1979 – 1981), realizan un análisis mineralógico a mezcla de colas tomada del dique de la empresa “René Ramos Latour y la producción corriente de la misma y pruebas de separación magnética a ambas muestras, con el objetivo de determinar los

índices de beneficio y luego producir concentrado para las pruebas de sinterización. Se aplicó la separación magnética, filtración y sinterización de los concentrados según esquemas de beneficio previstos para la siderúrgica integrada. Los resultados arrojaron un 55,9 – 57,00 % de Fe y 1,80 – 2,00 % de Cr_2O_3 apto para las pruebas de sinterización, se encontró que la presencia de hidrocarburos en la cola de cabeza ejerce influencia negativa en la estabilidad de los procesos de separación, filtración así como en los índices tecnológicos correspondientes.

Jones (1988), concentró la cromita a partir de rechazos industrial de Nicaro, para ello utilizó la metodología del buró de investigación de California pero a escala de laboratorio. Se definen las particularidades principales de la tecnología a estudiar, la que contempló como clasificación previa, separación magnética, clasificación preparatoria y concentración gravitacional, a la luz de los resultados obtenidos se mostró la posibilidad de obtener concentrado de cromita con no menos del 36,00 % de Cr_2O_3 .

Peña (1986), analizó diferentes métodos de estudio para la aplicación de los esquemas para la obtención de un concentrado más rico en hierro a partir de las colas de Nicaro. Se realiza a través de:

- Variación en el esquema de separación magnética.
- Utilización de la Flotación.

Se obtiene como resultado que la separación magnética es el método más apropiado para el beneficio de las colas.

Kriboi (1991 – 1992), realizó una amplia investigación que incluye la determinación de las propiedades físicas, químicas y mineralógicas de las muestras iniciales de colas, utilizando a escala de laboratorio los procesos de enriquecimientos de separación magnética a baja, media y alta intensidad, concentración gravitacional, deslamación y la combinación de estos métodos.

La separación magnética húmeda a baja intensidad de las colas de Nicaro a escala de laboratorio, mostró índices de beneficio similares a los obtenidos a nivel de planta en el Centro de Investigación Siderúrgica (CIS) e inferiores a los logrados a escala de laboratorio en el Instituto Mejanobr de Leningrado aún cuando en este último se utiliza un esquema menos complicado. Los resultados obtenidos en la concentración de la cromoespinela igualmente son inferiores a los obtenidos por el CIS.

Purón & Turro (2003), realizaron análisis mediante técnicas de difracción de rayos-X, espectroscopia de absorción atómica y fluorescencia de rayos-X, a diez muestras de colas de dos etapas del proceso lixiviación y recuperación de amoníaco, con el objetivo de determinar la composición mineralógica de las mismas. Se encontró que no existen diferencias sustanciales en la composición de las colas y se llega a inferir la formación de maghemita en lugar de o conjuntamente con la magnetita.

A nivel internacional el mayor uso que se le da a las colas es en la industria de la construcción. Se utiliza para la realización de carreteras, caminos, terraplenes y ferrocarriles, así como para rellenar terrenos.

Del análisis antes realizado se ha llegado a las siguientes conclusiones

1– El método de flotación no es recomendado por los bajos contenidos que se obtienen en el concentrado final con su aplicación.

2 – Con la utilización de los procesos Pirometalúrgicos para el tratamiento de las colas, el consumo de energía eléctrica, combustible y otros aditivos necesarios en estos procesos es muy elevado, lo que encarece notablemente el proceso.

3 – No existe un estudio que relacione la beneficiabilidad y el comportamiento de las colas de la “Empresa Ernesto Che Guevara” por el método de separación magnética.

1.2. Caracterización de las colas de la “Empresa Ernesto Che Guevara”

Los óxidos de hierro maghemita y/o magnetita constituyen las fases minerales principales que componen las colas derivadas del proceso de lixiviación y recuperación de amoníaco en la planta niquelera "Ernesto Che Guevara "(Web, 2006).

Las colas están constituidas fundamentalmente por Fe, Si, Al, Mg, Cr, Mn, en menor cantidad existe Ni y pequeñas cantidades de Bi, Co, Cd, Ti, Mo, y P, según (Ponce, 1986), encontraron otros elementos como el K, Na, S, y C; en el orden de las centésimas el K y en el de las décimas los restantes.

1.2.1. Composición granulométrica

La tabla 1 ofrece la composición granulométrica de una muestra de colas, el contenido y la distribución por clases de tamaño según estudios realizados por (Turro, 2003).

Tabla 1. Composición granulométrica de las colas.

Clases, mm	Peso, kg	Peso, %	Acumulativa, %
+0,175	0,208	10,40	10,4,0
-0,175+0,147	0,052	2,60	13,00
-0,147+0,074	0,30	15,00	28,00
-0,074+0,043	0,24	12,00	40,00
-0,044+0	1,20	60,00	100
Total	2,00	100	-

Como se muestra en la tabla 1 se obtuvieron las fracciones granulométricas siguientes: $f_1(+0,175 \text{ mm})$; $f_2(-0,075+0,147 \text{ mm})$; $f_3(-0,147+0,074 \text{ mm})$; $f_4(-0,074+0,044 \text{ mm})$ y $f_5(-0,0044 \text{ mm})$.

Atendiendo al contenido en por ciento en peso de la muestra se obtuvieron para las colas de la planta de recuperación de amoníaco (después de la destilación) tres grupos granulométricos principales:

- el primero formado por la fracción granulométrica más fina (f_5), menor de 0,04 mm , que representa alrededor del 66 % en peso de la muestra;
- el segundo, agrupa las clases granulométricas f_1 , f_3 y f_4 que constituye alrededor de un 33 % en peso;
- y el tercer grupo lo integra la clase granulométrica f_2 , algo gruesa, con cerca del 2,70 % en peso de la muestra.

Para las colas de lixiviación (antes de la destilación) se obtuvieron los mismos grupos granulométricos, diferenciándose solamente en el contenido de las fracciones f_2 y f_5 , las cuales resultaron ser ligeramente más abundantes. Estos resultados permiten concluir que las colas emanadas del proceso CARON son de granulometría esencialmente fina, lo cual se relaciona con lo obtenido por (Ponce, 1979), para las colas de Nicaro.

1.2.2. Composición química

Según Hernández (2011), las comparaciones en cuanto a la composición química realizada a muestras tomadas de diferentes puntos de la presa de cola y entre colas

frescas y viejas, muestran que es posible homogenizarlas para conformar una sola muestra representativa, debido a que los rangos de variabilidad no muestran diferencias sustanciales, solo se notan determinadas fluctuaciones de forma puntual en los valores de SiO₂, Fe, Mg, Mn, Al y Cr.

Como resultado del análisis espectral cualitativo se determinó que están constituidas por Fe, Si, Al, Mg, Cr, Mn, Ni, Co, Zn, Na, V, Cu, Cd, Ti, Mo, P, Bi, K, Os, Ir, Pd y Sb.

A partir de la literatura consultada se ha podido determinar que los contenidos de sus principales elementos constitutivos varían entre los valores que se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Composición química promedio de las colas del proceso carbonato amoniacal.

Elementos	Contenidos, %
Ni	0,34 – 0,41
Co	0,07 – 0,09
Fe	40,00 – 47,00
Mg	3,57 – 7,55
Mn	0,56 – 1,50
Al	2,32 – 5,30
Cr	0,83 – 3,40
Cu	0,01
Zn	0,03
SiO₂	5,35 – 19,49
Na	0,02
Ca	0,10- 0,35
V	0,02
N (NH₃)	< 0,02 _{lavadas} – 0,44
C	0,84

La composición química cuantitativa de las colas, varía en dependencia de las características del mineral alimentado a la planta de extracción de níquel y de su eficiencia, se ha podido determinar que ésta oscila en un amplio rango como se muestra en la tabla anterior.

1.2.3. Composición mineralógica

Turro (2002-2003), Peña (2010), Hernández (2011) y otros, estudiaron mineralógicamente las colas producidas por la tecnología carbonato amoniacal de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, y confirmaron cuales fases mineralógicas están presentes en la

materia prima. El análisis realizado en el 2010 por difracción de rayos X (DR-X) a las colas para cada fase se relaciona en la tabla 3.

Tabla 3. Minerales encontrados por DR-X y su composición mineralógica.

Fase mineralógica	Fórmula	Contenido, %
Magnetita	$\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	51,20
Cromita	$(\text{Fe}, \text{Mg})\text{O} \cdot (\text{Cr}, \text{Al})_2 \cdot \text{O}_3$	8,20
Forsterita	$2(\text{Mg}_{0,96}\text{Fe}_{0,04})\text{O} \cdot \text{SiO}_2$	25,10
Andalucita	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$	4,80
Fase Desconocida	Fe – Si Mineral	8,00

La maghemita es la fase mineral principal que compone estas colas, con un cuadro difractométrico bien definido, es la predominante en todas las muestras analizadas.

La cola constituye un material de color negro muy magnético, brillo semimetálico y se caracteriza por una granulometría fina, menor de 325 mesh, lo que concuerda con los resultados de (Ponce, 1979), donde expone que casi toda la fracción menor de 63 micrones representa el 74,28 % en peso, predominando el material magnético.

Ya Sobol en 1968 la había detectado al realizar un estudio sobre la pulpa laterítica en el proceso de lixiviación ácida a presión, registrándola como una fase metaestable, colectora de algunos metales como el níquel 2^+ y cobalto 2^+ para alcanzar mayor estabilidad cristalina, es una fase isoestructural con magnetita y cromoespinelas pero más propia para los ambientes oxidantes, ph próximo a 7 y a 298 K , como lo exponen (Taylor y Schwertmann, 1974 a y b), en suelos lateríticos.

La maghemita es una fase más propicia en los horizontes superiores de los perfiles lateríticos que la magnetita, pues constituye una de las formas mineralógicas del hierro (Taylor & Schwertmann, 1974), en su proceso de formación a fases de oxihidróxidos de hierro, como la goethita (FeOOH) y ferrihidrita para estos ambientes tropicales húmedos de la región de Moa, a partir de un substrato de rocas ultrabásicas y básicas.

Por la maghemita ser la fase predominante en todas las muestras analizadas y tener la propiedad de ser muy magnética es conveniente realizar la separación magnética debido a la gran cantidad de hierro presente en la misma. Por otra parte, se debe ser cuidadoso en la separación de estas colas, ya que junto con esta fase mineralógica se van otras

fases como la trevorita, forsterita, donathita, entre otras que presentan hierro en su estructura. Además parte del níquel y cobalto que están en la red cristalina de estas fases pasarían a la fracción magnética, influyendo en el producto final a obtenerse.

1.2.4. Porosidad

El análisis pignométrico de las colas refleja que esta posee un 42,50 % de poros, la misma posee una humedad molecular de 42,40 % . Esto debe ser a que en los hornos de la planta de níquel la hematita (fase ferrosa fundamental) se reduce a magnetita, producto de esta reducción escapa del mineral parte del oxígeno contenido, produciendo pequeños poros en los granos de magnetita, lo que provoca una configuración esponjosa en los granos (Peña, 2010).

1.2.5. Gravedad específica y peso volumétrico

La gravedad específica se encuentra en el rango de 3,60 a 3,85 t/m³ y su peso volumétrico entre 1,30 y 1,46 t/m³ según datos aportados por (Fernández, 1979).

1.3. Fundamentos teóricos del método de separación magnética

El método magnético de enriquecimiento de los minerales está basado en la utilización de la variedad de las propiedades magnéticas de los componentes del mineral o material que se someten a la separación. El enriquecimiento magnético se realiza en separadores magnéticos, la particularidad característica de los cuales es la existencia de un campo magnético en su zona de trabajo. Al moverse el mineral o material a través del campo magnético del separador, bajo la influencia de la atracción magnética, las partículas con distintas propiedades magnéticas se desplazan por diferentes trayectorias, lo que permite separar las partículas magnética en un producto magnético separado, y las partículas amagnéticas en un producto amagnético separado.

1.3.1. Esencia del método de separación magnética

Para la separación de las partículas magnéticas y amagnéticas en el campo magnético del separador, la fuerza magnética de atracción f_{mag} (figura 1), que actúa sobre las partículas magnéticas debe superar a la resultante de todas las fuerzas mecánicas Σf_{mec} (incluyendo también las fuerzas de cohesión y resistencia del medio), y la fuerza magnética f'_{mag} , que actúa sobre las partículas menos magnéticas o amagnéticas,

debe ser menor que $\sum f''_{mec}$ que obran sobre estas partículas, es decir en el campo magnético del separador se deben mantener las condiciones:

$$f'_{mag} > \sum f'_{mec}$$

$$f''_{mag} < \sum f''_{mec}$$

Dentro de la fuerza mecánica, también se puede mencionar: el peso de las partículas, la fuerza higroscópica del agua (en caso de que se realice el proceso por vía húmeda), la densidad de las partículas, el tamaño, etc. La desigualdad de estas fuerzas y la magnética es la que nos permiten la separación de las partículas. Conociendo que la fuerza magnética viene dada por la susceptibilidad magnética (X) la intensidad del campo magnético (H) la fuerza magnética será;

$$F_{mag} = X \cdot H \text{ grad} \cdot H \quad 10^5 \text{ dyn}$$

Por la ecuación se deduce que ambos parámetros X y H son proporcionales a la fuerza magnética por lo que al aumentar la susceptibilidad magnética hay mayor fuerza magnética y al aumentar la intensidad del campo magnético también hay mayor fuerza magnética.

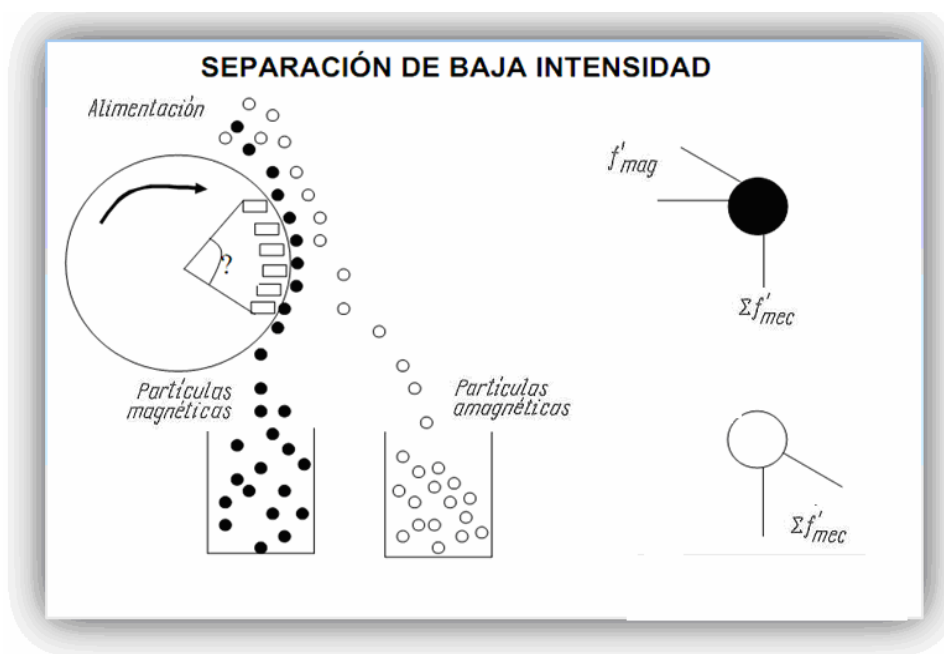


Figura 1. Separación magnética a baja intensidad del campo magnético.

1.3.2. Separación a baja intensidad del campo magnético

El campo magnético es un estado especial de la materia y se revela alrededor de los conductores con corriente eléctrica o alrededor de los imanes permanentes. En este último caso el campo magnético está condicionado por las corrientes eléctricas elementales que existen en el imán que puede ser regulada según la intensidad del campo requerida.

La separación magnética a baja intensidad del campo, es el proceso que se utiliza para separar fundamentalmente especies ferromagnéticas o paramagnéticas, de las especies diamagnéticas.

Conclusiones parciales

1. Existen grandes reservas de colas en Cuba y en el mundo producida por la tecnología carbonato amoniacal.
2. Las colas están constituidas por un mineral de fina granulometría, debido a las operaciones previas tecnológicas de trituración y molienda, la cual se realiza hasta 80 % de las partículas menores de 0,074 mm .
3. Existe un insuficiente conocimiento de la separación magnética para las colas de la “Empresa Comandante Ernesto Che Guevara”.

CAPÍTULO 2

MATERIALES Y MÉTODOS

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

El desarrollo de toda investigación necesita de herramientas para poder arribar a buenos resultados. La correcta selección de los métodos y materiales empleados validan los resultados obtenidos (Ramírez, 2002), es por eso que en el presente capítulo se describen los métodos y las técnicas empleadas para la caracterización de las colas y las investigaciones realizadas con el propósito de aprovechar este importante recurso.

2.1. Diseño experimental

El propósito fundamental de esta investigación es analizar el comportamiento de las colas de la Empresa Ernesto Che Guevara ante la intensidad del campo magnético, partiendo de las posibilidades que brinda el método de separación en correspondencia con las propiedades de los materiales a los cuales se les realizó la separación magnética, en función de lograr un tratamiento de este residual para su aprovechamiento más integral.

Los esquemas de los estudios experimentales se observan en las figuras 2 y 2.1.

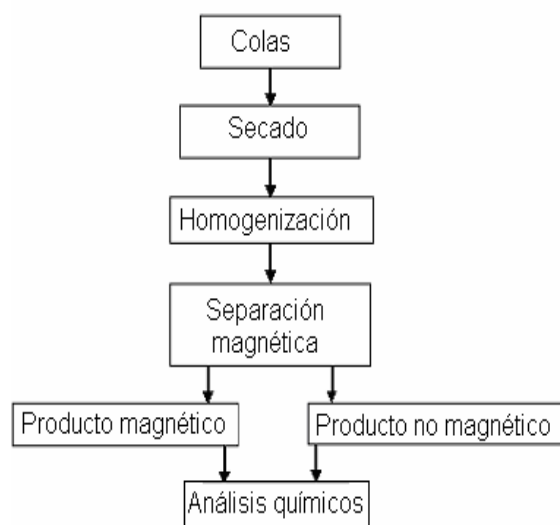


Figura 2. Esquema de flujo para el tratamiento por separación magnética.

Debido al insuficiente conocimiento del comportamiento de las colas de la “Empresa Comandante Ernesto Che Guevara” frente a la variación de la intensidad de un campo magnético, en la figura 2 se observa que las colas (tomadas directamente de la presa) fueron sometidas a un secado preliminar, una rigurosa homogenización según los métodos que se mencionan en el epígrafe 2.2 y una separación magnética preliminar variando la intensidad del campo, con el objetivo de obtener información sobre el residual estudiado.

Además del procedimiento anterior se realizaron otros estudios, como se muestra en la figura 2.1. En este caso es similar al de la figura 2, pero en esta última se realiza la separación granulométrica antes de la separación magnética, para de esta forma realizar una valoración fraccional más amplia de los resultados.

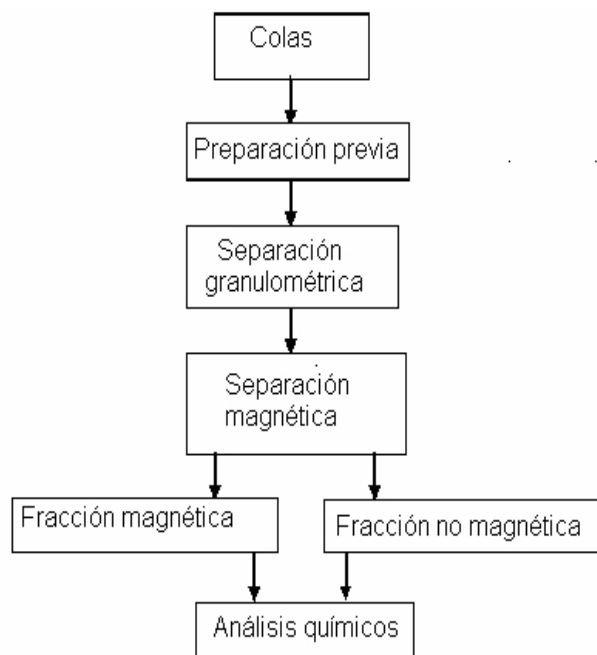


Figura 2.1. Esquema de flujo para el tratamiento de las colas por separación granulométrica y separación magnética.

El estudio granulométrico y las técnicas analíticas aplicadas para la caracterización de las colas fueron realizados en el Centro de Desarrollo e Investigación del Níquel (CEDINIQ) en Moa, Cuba. La separación magnética del residuo sólido a baja intensidad del campo magnético, así como la preparación de la muestra fue procesada en el laboratorio de beneficio de Materiales del Instituto Superior Mineros Metalúrgico de Moa.

2.2. Toma y preparación de la muestra

Para realizar el estudio se tomó una muestra representativa de las colas de la tecnología carbonato amoniacal de la Empresa Ernesto Che Guevara. Para la selección de las muestras se utilizó el método de puntos, aplicando el mismo a todas las partes de la presa de cola. Estas muestras fueron sometidas a una etapa de secado preliminar en una estufa a una temperatura de 80 °C , para evitar que la humedad provoque el aumento de la fuerza de adhesión mutua de las partículas finas, ya que estas influyen negativamente en el proceso de separación magnética. La masa de muestra seleccionada se sometió a una rigurosa homogenización por el Método del Anillo y el Cono. El peso de cada muestra utilizada es de 240 g , la balanza para el pesaje (en todo el trabajo) se muestra en el anexo 1.

2.3. Caracterización granulométrica

El análisis granulométrico constituye el elemento básico para la caracterización granulométrica de las colas objeto de estudio, este análisis se realizó por vía húmeda, para evitar la aglomeración de las partículas más finas, seleccionando el siguiente juego de tamices según la serie de Taylor, (0,20; 0,150; 0,075; 0,053; 0,038) mm . En la figura 3 se muestra el esquema de trabajo utilizado.

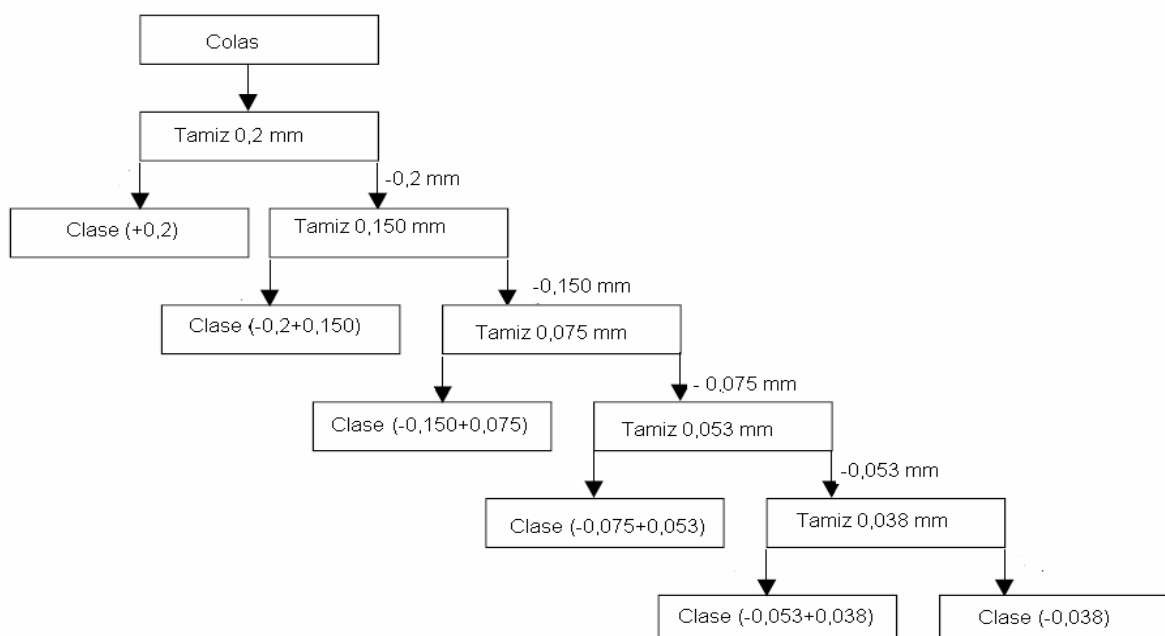


Figura 3. Esquema de flujo para el análisis granulométrico.

El análisis granulométrico por vía fue realizado en el cuarto de preparación de muestras del CEDINIQ, utilizando una tamizadora de laboratorio como se muestra en la figura 3.1.



Figura 3.1. Tamizadora digital adaptada, modelo R.X.-29.

2.4. Susceptibilidad magnética de las colas

La determinación de la susceptibilidad magnética por unidad de volumen, es un método sensitivo para detectar la presencia de cantidades traza de material magnético en las rocas y minerales. La susceptibilidad tiene relación con la abundancia de minerales ferromagnéticos (magnetita o pirrotina monoclinica), (Clark 1999).

Para el estudio de la susceptibilidad (χ) se utilizó la clasificación magnética dada por Dercach, (1981) en unidades del SI ($\times 10^{-5}$), la cual se expresa de las siguientes formas:

1. $\chi > 3,8 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{kg}$; (con una intensidad del campo magnético hasta $H = 120 \text{ kA/m}$) Minerales fuertemente magnéticos ó ferromagnéticos.
2. Entre los límites de $7,5 \times 10^{-6} \text{ a } \chi \geq 1,26 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$; (con una intensidad del campo magnético de 800 a 1600 kA/m) Minerales débilmente magnética ó paramagnética.
3. $\chi < 1.26 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$; Minerales amagnéticos.

El ensayo de la susceptibilidad magnética de las colas fue realizado con un equipo que se muestra en la figura 4, el cual posee las siguientes características:

Nombre: KT-9 Kappameter;

Modelo: SAIC® Exploranium

Este equipo está destinado para la medición de la susceptibilidad magnética real para rocas y minerales en estado sólido. Sus características son:

Rango de Medición: de $-0,99 \cdot 10^{-3}$ a $999 \cdot 10^{-3}$ SI unidades;

Sensibilidad: $1 \cdot 10^{-5}$ SI unidades;

Fuente de Alimentación: Batería única de 9 Volt alcalina, IEC Standard, tipo 6F22;

Frecuencia de operación: 10 kHz ;

Temperatura de operación: -10°C a $+55^{\circ}\text{C}$;

Permite la conexión a PC con software de instalación para su operación remota;

La unidad de medida se denomina (m^3/kg);

Dimensiones:

Longitud: 187 mm (without PIN);

Diámetro: 65 mm ;

Peso: 0,35 kg (incluyendo la batería).



Figura 4. Equipo del análisis de susceptibilidad magnética.

2.5. Separación magnética de las colas del proceso Carbonato Amoniacal

El proceso de separación magnética permite separar fases minerales fuertemente magnéticas de minerales débilmente magnéticos cuando existe una notable diferencia de

la susceptibilidad entre ellas, según (Dercach, 1981). Este método da la oportunidad de analizar el comportamiento las colas de la tecnología carbonato amoniacal variando la intensidad de corriente desde 0,05 hasta 0,20 A (campo magnético desde 21,03 hasta 77,34 kA/m), con aumento en una escala de 0,05 A como se muestra en la figura 5. Las muestras empleadas para las prueba fueron de 240 g cada una.

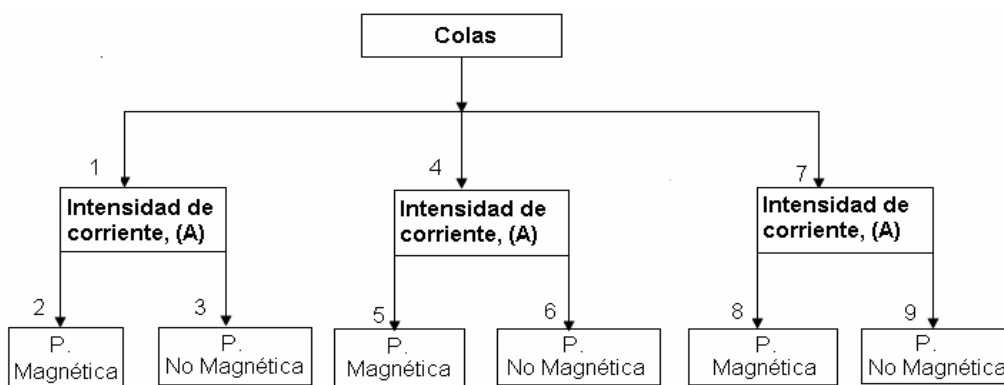


Figura 5. Esquema de flujo para el análisis magnético.

2.5.1. Descripción de la instalación para la separación magnética

Para el estudio del comportamiento de las colas ante el efecto de un campo magnético, se utilizó al igual que en investigaciones precedentes un equipo localizado en el Laboratorio de Beneficio del Instituto Superior Minero Metalúrgico (ISMM), modelo ЭБС 138 Т, figura 5.1. La fuente de corriente utilizada se muestra en el anexo 2.

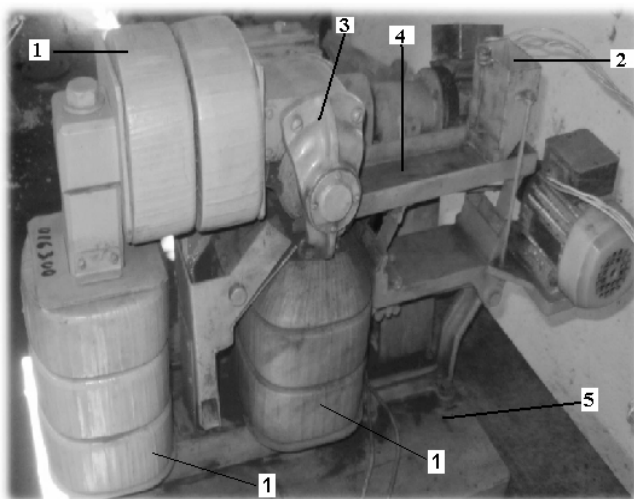


Figura 5.1. Separador magnético ЭБС 138 Т.

La descripción técnica del equipo se basa en las especificaciones y forma del diseño.

Forma del diseño

El separador ЭБС 138Т cuenta con un sistema electromagnético (1), un alimentador (2), un receptor (3), una banda transportadora (4) y una base (5) como se muestra en la figura anterior.

Objetivo y especificaciones.

El separador está destinado a la separación magnética en seco minerales con componentes magnéticos y no magnéticos.

PARÁMETROS PRINCIPALES	VALORES ESPECÍFICOS
Tamaño del mineral separado, (no excede) mm ,	2,0
Diámetro del rodillo, mm , no excede	100
Longitud del rodillo en operación, mm ,	88
Velocidad del rodillo, r.p.m., (no excede)	60
Valor de la energía para el motor:	
Para el rodillo, kw ;	0,18
Para el alimentador, kw ;	0,06
Dimensiones, mm , (no excede)	
Longitud;	1000
Ancho;	480
Alto;	570
Masa kg ;	190

2.5.2. Separación magnética por clases de tamaño

Para el análisis de la combinación de las dos propiedades de separación estudiadas; tamaño de partícula e intensidad de corriente se realizó el análisis magnético descrito en el epígrafe anterior para 3 clases de tamaño seleccionadas, según el comportamiento de éstas obtenidas durante el análisis granulométrico de la muestra inicial. La intensidad de corriente empleada estará en función de los resultados obtenidos en los análisis magnéticos preliminares. Ver figura 5.2.

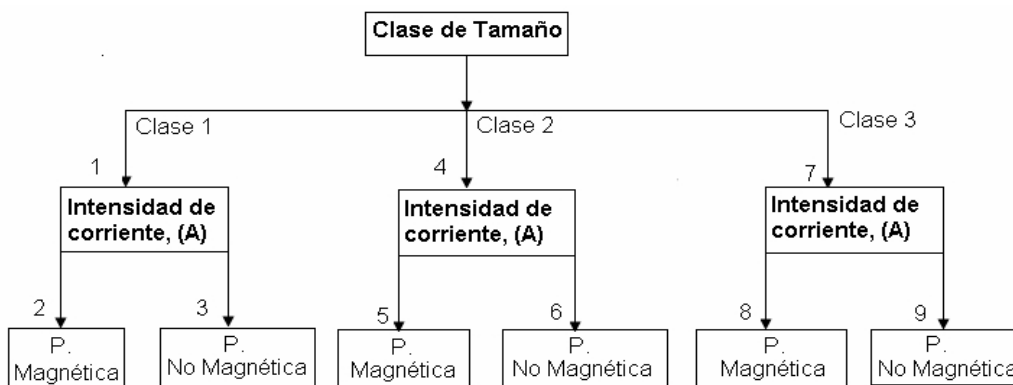


Figura 5.2. Esquema de flujo para el análisis magnético por clase de tamaño.

2.6. Caracterización química

Se realizaron análisis químicos a las muestras iniciales, a las fracciones de tamaño producto del análisis granulométrico y a las fracciones obtenidas en la separación magnética, empleando la técnica de absorción atómica, el método de fluorescencia de rayos X y espectrofotometría de emisión por plasma (ICP).

2.6.1. Análisis químico por el método Fotométrico (Absorción atómica)

Se basa en la absorción selectiva de radiaciones electromagnéticas de diversas regiones del espectro por el sistema homogéneo. Como resultado de la absorción de radiación el cambio de energía del sistema es tan despreciable que generalmente no conduce a la alteración de la integridad de las moléculas de la sustancia absorbente, cuando la fuente de radiación es específica de un elemento y utiliza la excitación por llamas donde se descompone la sustancia en átomos es denominado método espectrofotométrico de absorción atómica (el más empleado en los análisis), se utilizó en la determinación de la composición química de los sólidos investigados.

2.6.2. Análisis químico por el método 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 excitados 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 de la muestra. El espectrómetro es capaz de separar las diferentes longitudes de onda y determinar su intensidad, y mediante la resolución de un sistema de

ecuaciones se calculan las concentraciones de los diferentes elementos relacionándolos con una serie de muestras patrones con que se calibró el equipo. Las mediciones se realizaron en un difractómetro de rayos X Phillips PW.

2.6.3. Espectrofotometría de emisión por plasma (ICP)

El plasma de acoplamiento inductivo ICP (*inductively coupled plasma*) se obtiene por la acción de una corriente de alta frecuencia que genera un campo magnético oscilante hasta el que se lleva el gas que va a sustentar el plasma. Estos campos magnéticos provocan la aparición de iones y electrones que se mueven siguiendo trayectorias anulares acelerados por efecto de alternancia de los campos magnéticos, produciéndose por efecto Joule una liberación de energía calorífica que permite alcanzar temperaturas de hasta 10 000 K en el interior de las zonas de máxima corriente circular. De esta forma se consigue una configuración toroidal del plasma confinado en el campo magnético con una fuerte intensidad luminosa radiante que se denomina, por semejanza, «llama». Ver anexo 6.

Conclusiones parciales

1. La muestra de cola tomada de la “Empresa Ernesto Che Guevara” seleccionada para ser caracterizadas se considera representativa con respecto al volumen total de colas.
2. Las técnicas analíticas empleadas para la caracterización físico-química, fueron aplicadas en instalaciones y equipos certificados, lo que permite la confiabilidad de los resultados.

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

El estudio de los métodos de beneficio, constituyen una etapa imprescindible del conocimiento en la caracterización de las colas del proceso Carbonato Amoniacal en Moa, debido a que ello aportaría la información necesaria sobre el comportamiento de las mismas ante la intensidad del campo magnético. Es por ello que en el presente capítulo se realiza un análisis de los resultados sobre el comportamiento de las colas de la “Empresa Ernesto Che Guevara” variando la intensidad del campo magnético.

3.1. Características iniciales de las colas

La caracterización de los residuos sólidos de la Empresa “Ernesto Che Guevara”, se realizó de acuerdo a dos aspectos fundamentales, composición química y susceptibilidad magnética, que permiten valorar los procedimientos y alternativas tecnológicas para el tratamiento de estos. Los resultados obtenidos se presentan en los siguientes acápite.

3.1.1. Resultado del análisis químico de la muestra inicial

Como en toda investigación, se debe tener conocimiento de las características químicas del material objeto de estudio, para evaluar cuantitativamente su comportamiento ante un proceso determinado. Es por ellos que es necesario realizar esta operación a las colas estudiadas, que luego reflejará como se ha comportado cada uno de los elementos contenidos en ella ante la incidencia de un campo magnético. El análisis químico de este material fue realizado en el CEDINIQ, cuyos resultados se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Composición química cuantitativa de las colas empleadas en la investigación.

Elementos	Ni	Co	Fe	Mg	Mn	Al	Cr	Zn	Cu	SiO ₂
Contenido, %	0,36	0,09	43,09	4,06	0,64	8,00	3,04	0,03	0,01	15,81

En la tabla se puede observar que los elementos metálicos que aparecen como constituyentes son: en mayores cantidades Fe, SiO₂, Al, Mg, y en menor cuantía Cr, Mn,

Ni, Co, Zn, y el Cu. Las investigaciones de (Peña, 2010; Hernández, 2011; Turro, 2003); confirman estos resultados.

3.1.2. Resultados del análisis de susceptibilidad magnética

Se le realizó el ensayo de susceptibilidad magnética a tres muestras de 240 g de peso, a las cuales se les tomaron cinco mediciones por cada muestra en diferentes posiciones (II, ID, C, SD y SI), cuyos resultados se observan en la tabla 5.

Tabla 5. Ensayos de susceptibilidad magnética de las colas.

Posición					Promedio
II	ID	C	SD	SI	
SM X 10 ⁻³					
MUESTRA 1					
65	55	60	62	57	59,8
MUESTRA 2					
56	56	63	56	57	57,6
MUESTRA 3					
56	56	67	59	55	58,6
Promedio		-	-	-	58,67

donde:

II: miembro inferior izquierdo;

ID: miembro inferior derecho;

C: centro;

SD: miembro superior derecho;

SI: miembro superior izquierdo.

Como resultado del ensayo, se puede observar que las colas de la “Empresa Comandante Ernesto Che Guevara” posee una susceptibilidad magnética de $58,67 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$, cuyo valor, significa que se encuentran dentro de los materiales “ferromagnéticos” según Dercach, (1981), por lo que se concluye que la separación magnética debe realizarse a baja intensidad del campo magnético, hasta 120 kA/m .

3.2. Análisis preliminar del comportamiento magnético de las colas

Al analizar la composición química de las colas, se puede considerar este residuo como un mineral de hierro que necesita beneficiarse con vista a ser utilizado. Debido a esto, como una de las tareas a desarrollar, se realizó una separación magnética a las colas con vista a conocer el comportamiento de los elementos metálicos contenidos en ella. (Ver anexo 4).

3.2.1. Análisis de la separación magnética

Una vez determinada la susceptibilidad magnética de las colas se definió la intensidad de corriente y el rango de variación, con el objetivo de evaluar en que condiciones del campo magnético ocurre una mayor variación de los elementos metálicos. Para ellos se pasaron por el separador tres muestras de 240 g por cada intensidad del campo, según el esquema de la figura 5. Como resultado se obtuvieron dos productos, el magnético y el no magnético; a los cuales se les realizaron análisis químicos, cuyos valores se muestran en la figura 6 y 6.1.

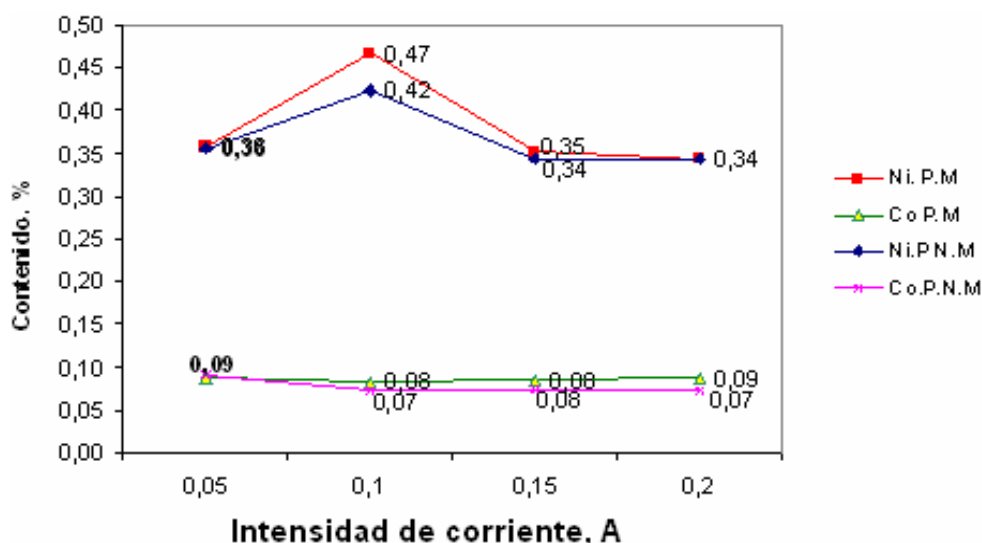


Figura 6. Comportamiento del Ni y el Co en la separación magnética.

En la figura anterior se pueden observar los contenidos de níquel y cobalto en el producto magnético y no magnético. El resultado obtenido muestra una tendencia a enriquecer el níquel en la fracción magnética a una intensidad de corriente de 0,10 A (40,30 kA/m), donde se alcanzan resultados significativos de 0,47 % ; mientras que el cobalto se mantiene estable en ambos productos (magnético y no magnético).

La figura 6.1, muestra que a una intensidad de corriente de 0,1 A , el hierro alcanza valores de hasta 46 % , proporcionando un beneficio de 1,05 % respecto al contenido de hierro inicial. Esta variabilidad en el comportamiento de este elemento, desde el punto de vista mineralógico, demuestra una vez más, la influencia de la fase predominante en las colas, que según (Turro, 2002 y 2003; Baldoquín, 2004; Peña, 2010; Hernández, 2011), son la magnetita y la maghemita, las cuales presentan alta propiedades magnéticas.

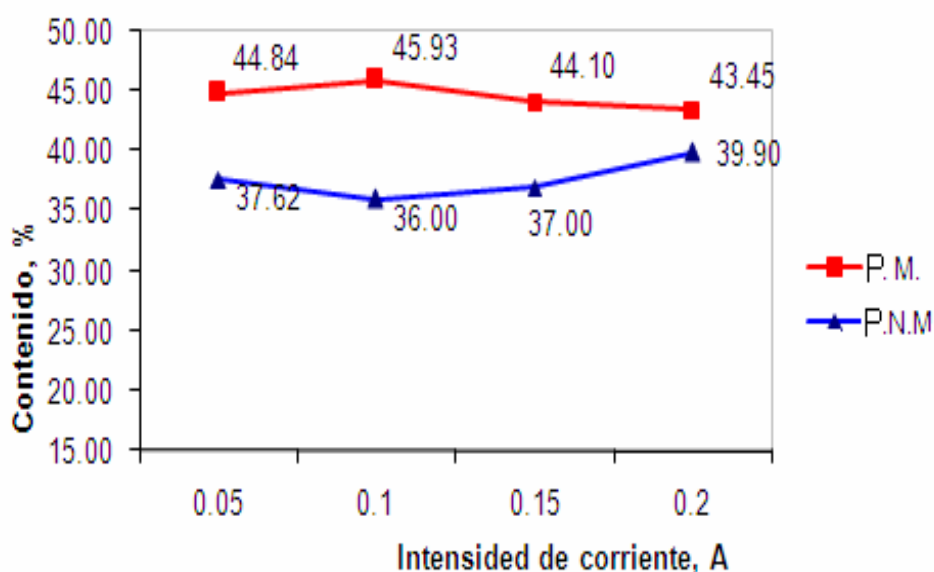


Figura 6.1. Comportamiento del Fe en la separación magnética.

Al observar el comportamiento de las colas ante la variación del campo magnético, se puede concluir que la intensidad de 0,10 A logra los mejores resultados, donde se alcanzó un beneficio en mayor proporción del hierro y el níquel con respecto al cobalto, pero el contenido de hierro obtenido resulta ser muy bajo al compararlo con los resultados realizados por (Hernández, 2011) para estas colas, en el que se obtuvo una concentración de hierro de 50 % .

3.2.2. Comportamiento de la salida de los productos según la intensidad del campo magnético

Como era de esperar, en la figura 6.2 se observa una tendencia a aumentar y disminuir la masa de los productos magnéticos y no magnéticos respectivamente en la medida que se incrementa la intensidad del campo magnético.

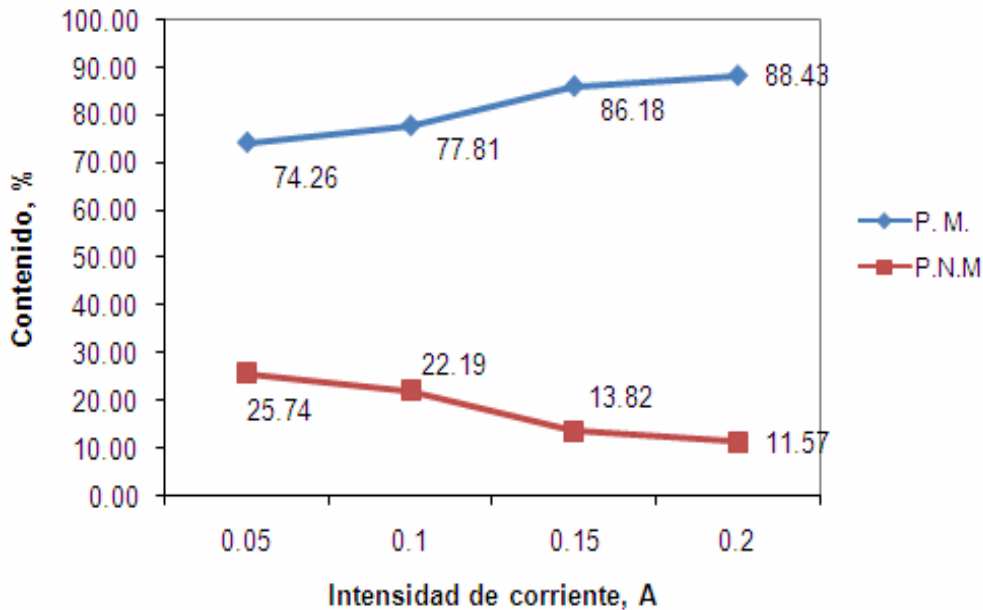


Figura 6.2. Variación de la masa en función de la intensidad de corriente.

Como se observa en la figura existe un predominio del la producto magnética, la cual constituye un alto porciento con respecto a la masa inicial, de la misma manera la fracción no magnética constituye un bajo porciento.

Por otra parte, a partir de una intensidad de corriente de 0,15 A , las fracciones no magnéticas son considerablemente bajas, obteniendo valores hasta de 11,57 % , resultado que invalida la posibilidad de un aumento de la intensidad del campo magnético para continuar el estudio, lo cual confirma que las colas son un material con alto contenido magnético, y se corroboran los resultados analizados en el acápite 3.1.2.

Al realizar un análisis de la la figura 6.1 y 6.2, se puede concluir que a medida que aumenta la intensidad del campo magnético aumenta la masa en la fracción magnética, pero disminuye el contenido de hierro en esta, debido a que también para esa fracción pasan elementos con bajas propiedades magnéticas.

Si se tiene en cuenta el campo magnético producido a 0,1 A , en el cual se concentra en mayor proporción el hierro y el níquel, la variación de la masa respecto a la inicial se comporta de la siguiente manera, la fracción magnética representa el 78,28 % y la no magnética 21,72 % .

3.3. Resultados del análisis granulométrico

La composición granulométrica se realizó con el objetivo de verificar la tendencia que tiene el material en cuanto al tamaño de las partículas y determinar cuáles son las clases predominantes, para el cual se utilizan como criterios principales: el contenido de Fe, Ni, Co, Cr, Al, Mg, Mn, Cu, Zn y SiO₂ en cada una de las fracciones.

Los resultados del análisis granulométrico se presentan en la tabla 6, donde se puede apreciar el comportamiento de las colas por clase de tamaño.

Tabla 6. Composición granulométrica de las colas por vía húmeda.

Clases, mm	Masa, g	Salida, %	Retenido, %	Cernido, %
+0,20	47,3	11	11	100
-0,20 +0,150	67,0	15	26	89
-0,150+0,075	95,2	22	48	74
-0,075+0,053	36,0	8	56	52
-0,053+0,038	39,3	9	65	44
-0,038	155	35	100	39

Como se puede apreciar, en el análisis granulométrico por vía húmeda (ver tabla 6), la salida de la clase -0,038 mm representa el 35 % de todo el material, lo que evidencia una distribución de las partículas finas en todo el espectro granulométrico de las colas estudiadas, aspecto que corrobora los resultados obtenidos por diferentes autores al estudiar los residuos sólidos de la Empresa Ernesto Che Guevara. (Turro, 2002; Hernández, 2011; Peña, 2010).

Las muestras de las fracciones granulométricas según el tamaño de las partículas se presentan el anexo 3.

En correspondencia con las salidas acumulativas de la tabla 6, en la figura 6.1 se puede apreciar que el D₈₀ coincide con el tamaño de las partículas -0,170 mm, es decir, el 80 % del material se encuentra por debajo de esta clase de tamaño.

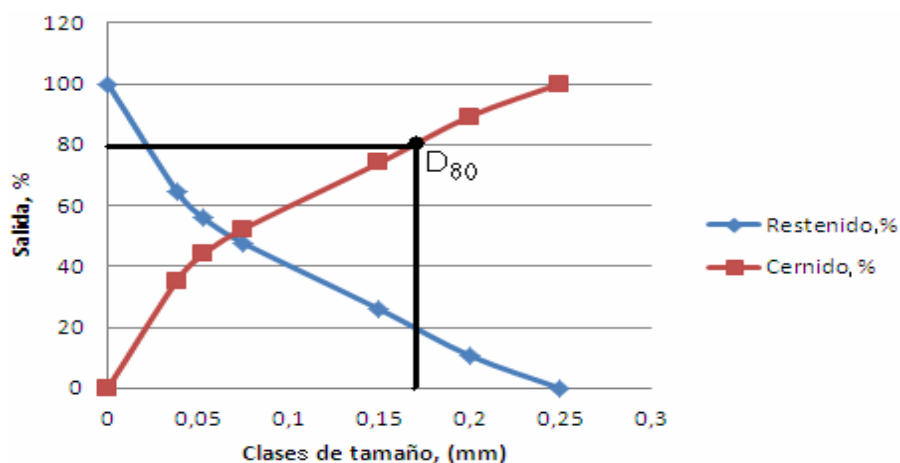


Figura 7. Comportamiento de las colas por clases de tamaño.

3.3.1. Análisis fraccional de contenido según el tamaño de las partículas

En la tabla 9 aparece la función de distribución de contenido de los elementos objeto de estudio, teniendo el tamaño como propiedad de separación.

Tabla 9. Contenido de los elementos de las colas por clase de tamaño.

Clases de Tamaño, mm	Fe	Ni	Co	Mn	Mg	Cu	SiO ₂	Zn	Cr	Al
	Contenido, %									
-0,038	49,86	0,35	0,07	0,01	2,68	0,02	8,64	0,03	2,03	5,38
-0,053+0,038	45,70	0,24	0,07	0,72	2,75	0,01	9,01	0,04	3,55	6,04
-0,075+0,053	44,69	0,22	0,08	0,75	2,75	0,01	9,08	0,04	2,35	5,88
-0,15+0,075	40,21	0,22	0,08	0,70	3,88	0,01	10,93	0,23	3,42	5,57
-0,2+0,15	35,94	0,20	0,08	0,79	5,07	0,02	13,23	0,22	2,92	5,35
+0,2	35,94	0,15	0,09	0,82	3,97	0,02	15,74	0,07	1,90	5,12

El comportamiento de los principales elementos analizados en las diferentes fracciones granulométrica se exponen a continuación teniendo en cuenta el diámetro medio de las partículas.

3.3.1.1. Comportamiento de los diferentes elementos químicos en las diferentes fracciones granulométricas

La presencia mayoritaria del hierro y su amplia distribución en el perfil granulométrico estudiado justifican la presencia de magnetita y maghemita en el material. La figura 7.1 muestra el comportamiento del contenido de hierro en las diferentes fracciones granulométricas.

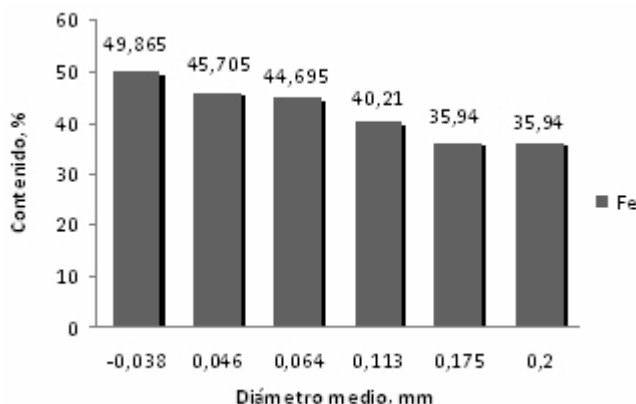


Figura 7.1. Contenido de Fe por fracción granulométrica.

El mayor contenido de este elemento (49,86 %) se encuentran principalmente en la fracción fina -0,038 mm disminuyendo hacia las fracciones más gruesas, hasta alcanzar valores de 35,94 % .

El níquel presenta un comportamiento similar al del hierro, aumentando el contenido a medida que disminuye la clase de tamaño como se muestra en la figura 7.2.

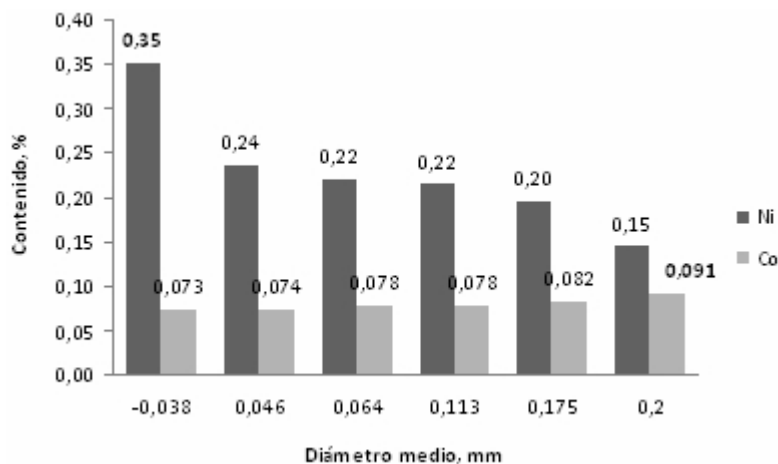


Figura 7.2. Contenido de Ni y Co por fracción granulométrica.

En la figura se observa que el níquel en la fracción más fina alcanza un contenido de 0,35 % , mientras que en las demás fracciones granulométricas posee un comportamiento estable por debajo de 0,25 % .

El cobalto a diferencia del níquel y el hierro refleja una mayor concentración en la fracción más gruesa (+0,2), en la cual obtiene valores de 0,094 % , siendo este favorable respecto al contenido inicial del material. En las fracciones de tamaño restantes el cobalto se mantiene estable.

El comportamiento del Mn, Mg, y el SiO₂ es similar al del Cobalto, adquiriendo sus valores máximos 0,82, 3,97, y 15,74 % respectivamente en la clase de tamaño +0,2 mm , reduciendo su contenido en la medida que disminuye el tamaño de la clase granulométrica como se muestra en la figura 7.3.

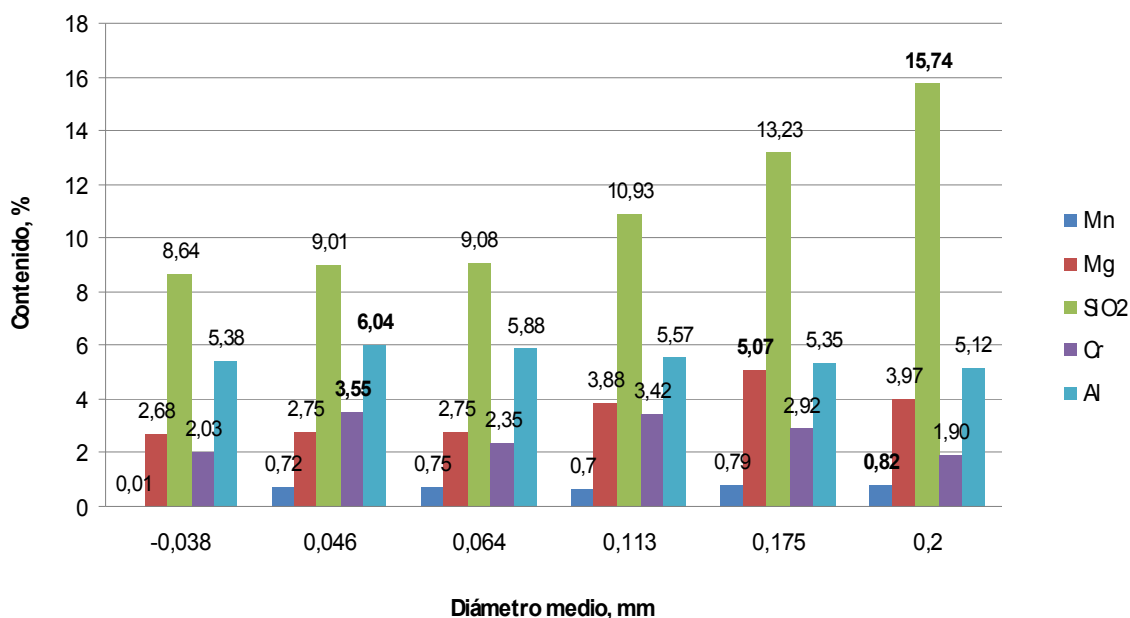


Figura 7.3. Contenido de Mn, Mg SiO₂, Cr y Al por fracción granulométrica.

El aluminio y el cromo se comportan de forma homogénea en todo el espectro granulométrico como se observa en la figura, aunque concentra su mayor proporción en la clase (-0,053 +0,038) mm , donde se manifiesta una ligera tendencia a disminuir su contenido en las fracciones más finas, lo cual corrobora los resultados obtenidos por (Peña, 2010).

A modo de resumen en los análisis realizados, el hierro, cromo y el magnesio presentan valores significativos en comparación a su contenido inicial dentro de las colas, beneficiándose 6,78, 0,51 y 1,01 % respectivamente.

3.4. Comportamiento magnético por clases de tamaño

A continuación se exponen los resultados de la separación magnética por fracciones granulométricas, la combinación de estos dos procesos posibilita obtener el contenido de los agregados metálicos en las fracciones magnética y no magnética por clase de tamaño.

La separación magnética se realizó a tres clases de tamaño de acuerdo con los resultados obtenidos en el acápite anterior, donde se obtuvieron valores más significativos de los diferentes metales. Estas fracciones granulométricas son (+0,200; -0,150 +0,075; -0,038) mm . La intensidad del campo a la cual fueron sometidas las clases de tamaño mencionadas, es de 0,1 A , debido a que a esta intensidad de corriente fueron alcanzados los resultados más relevantes para el hierro y el níquel como elementos de mayor interés, como se muestra en el acápite 3.2.

En la figura 8 se encuentra reflejado el comportamiento del hierro al aplicarle la intensidad de corriente de 0,1 A por clases de tamaño, cuyos valores se muestran además en la tabla del anexo 5.

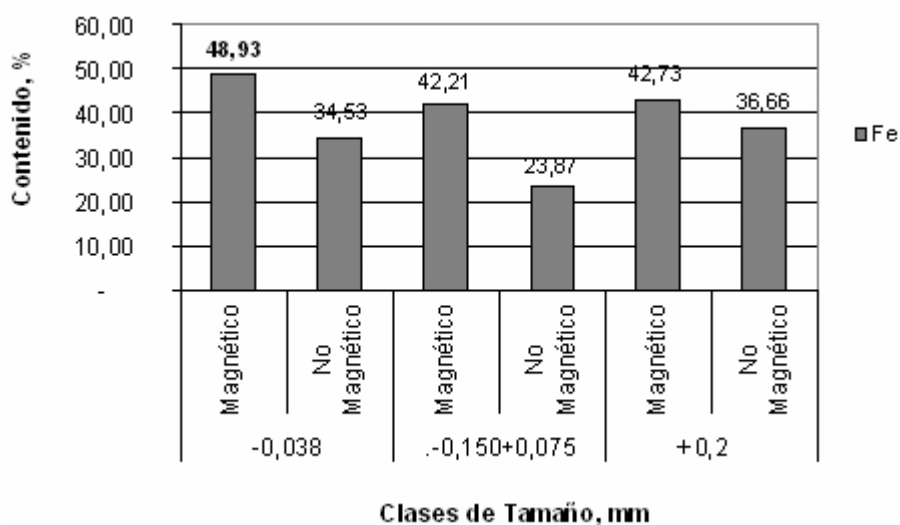


Figura 8. Contenido de Fe por clases de tamaño a una intensidad de corriente de 0,1 A .

La figura anterior refleja el predominio del hierro en la fracción magnética de la clase de tamaño -0,038 mm , logrando resultados de hasta 48,93 % , valor que asume un comportamiento inferior al contenido de hierro del análisis granulométrico en el acápite 3.3.1. De acuerdo con los resultados obtenidos no es necesario realizar una separación magnética a esta clase de tamaño, ya que a través de la separación granulométrica se alcanza una mayor concentración del elemento químico.

El comportamiento del níquel y el cobalto se encuentran reflejados en la figura 9. En la cual se observa que en la fracción no magnética de la clase de tamaño +0,20 mm se

concentra el níquel en mayor proporción (0,47 %), donde a medida que disminuye la fracción granulométrica disminuye la concentración del mismo.

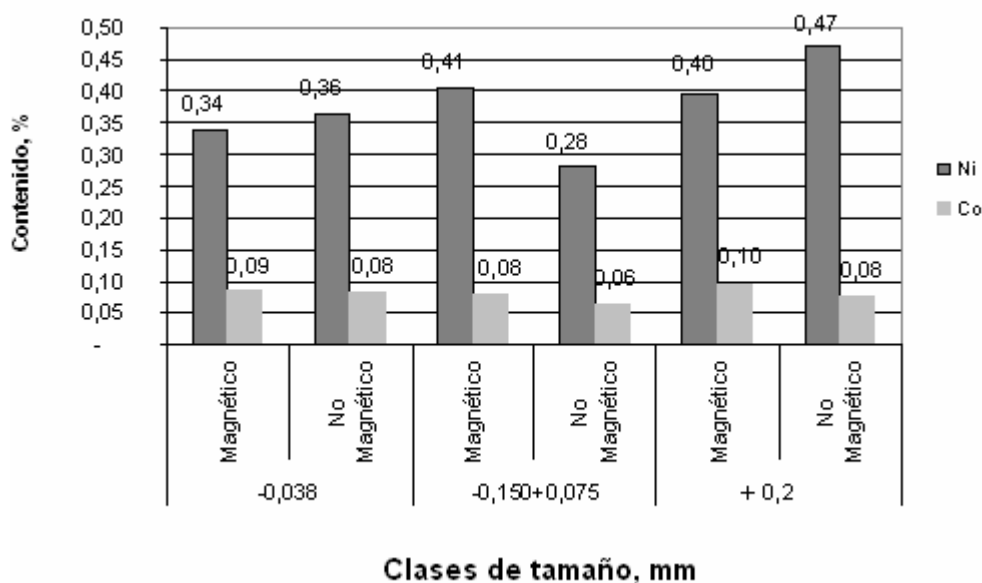


Figura 8.1. Contenido de Ni y Co por clases de tamaño a una intensidad de corriente de 0,1 A .

Por otra parte, el cobalto manifiesta un comportamiento más irregular en todo el espectro granulométrico ante la intensidad del campo magnético dada. La clase de tamaño que muestra un mayor beneficio de este elemento químico es la -0,2 mm con un 0,1 % , mientras que en las fracciones granulométricas restantes se mantiene estable en todo el producto magnético y no magnético.

El Manganeseo y la sílice, presentan un comportamiento magnético por fracciones granulométricas similar, alcanzando un aumento del contenido a media que aumenta la clase de tamaño, obteniendo los resultados más significativos para la clase de tamaño +0,2 en la fracción magnética el manganeseo con un 0,91 % y la sílice en la fracción no magnética con un 19,25 (ver figura 8.2).

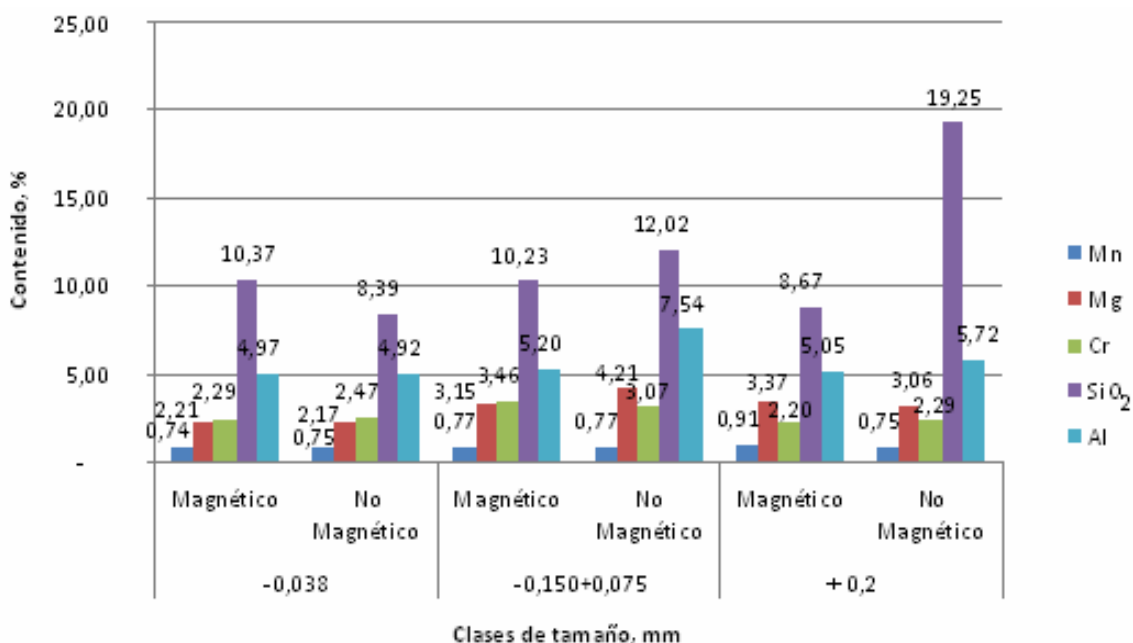


Figura 8.2. Contenido de Mn, Mg, Cr, SiO₂ y Al por clases de tamaño a una intensidad de corriente de 0,1 A .

El aluminio, magnesio y el cromo se presenta de forma bastante homogénea en todo el espectro granulométrico, aunque alcanzan una mayor concentración en las clase (-0,053 +0,038) mm . El aluminio y el magnesio en la fracción no magnética arrojan valores de 7,53 y 4,21 respectivamente, mientras que el cromo obtiene un valor de 3,56 % en la fracción magnética como se observa en la figura 8.2. El magnesio recibe un beneficio de 0,27 % y el cromo de 0,42 % , mientras que el aluminio se mantiene por debajo del contenido inicial estudiado.

En el caso del Zn y Cu no presentan valores significativos, manteniendo un comportamiento estable en toda la fracción granulométrica y en ambos productos magnéticos según se muestra en el anexo 5.

3.5. Análisis preliminar del impacto ambiental generado

La planta de níquel de Punta Gorda “Comandante Ernesto Che Guevara”, durante más de 20 años de explotación ha producido un gran impacto negativo sobre el medio ambiente. Durante estos años el hombre en su actividad productiva no tuvo necesidad de pensar en las consecuencias que esto trae para el medio ambiente. Esto fue posible ya que la magnitud de su actividad y los recursos energéticos que se consumían eran insignificantes.

En la actualidad existen industrias que requieren de un elevado consumo de energía y de reactivos, que al final, o en el transcurso del proceso generan gases y residuos sólidos, los que afectan directamente a la atmósfera y al medio ambiente. Estos a su vez constituyen un permanente foco de contaminación de las aguas superficiales y subterráneas, aumentando la concentración de casi todos los elementos por encima de los valores admisibles para el agua potable, los suelos y el aire, siendo el hombre el mayor receptor del impacto provocado por dichas colas.

Estos residuos se agigantan cada día con el avance de la explotación de los yacimientos de níquel, constituyendo sectores descubiertos y desmembrados, los que intensifican el arrastre de los suelos con la concebida ruptura del equilibrio fluvial y la acumulación de sedimentos.

La necesidad y preocupación por preservar los recursos naturales y controlar la contaminación ambiental, son algunas de las motivaciones que han impulsado a esta y otras investigación, partiendo de que la industria metalúrgica es una de las ramas fundamentales para la economía mundial, pero al mismo tiempo es una de las más agresivas al entorno por la cantidad y tipos de residuales contaminantes que genera.

Por lo planteado nos vemos en la necesidad de encontrar una alternativa al tratamiento de estos residuos que permita mitigar su impacto ambiental y un aprovechamiento más racional a los recursos naturales no renovables.

Conclusiones parciales

- El valor promedio de la susceptibilidad magnética de las colas es de $58,67 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$, lo cual le otorga a las colas la propiedad de ser un material fuertemente magnético.
- Se comprobó que en las colas predomina las partículas finas menores que 0,074 mm .
- La separación magnética por clase de tamaño manifiesta un enriquecimiento hacia el Fe, Ni, Co, Mg, Mn, Cr, y SiO_2 en distintas fracciones granulométricas, con un beneficio respecto al contenido inicial de 5,00; 0,11; 0,009; 0,15; 0,27; 0,42 y 3,44 % respectivamente.
- El Zn y Cu no presentan valores significativos, manteniendo un comportamiento estable en toda la fracción granulométrica y en ambos productos magnéticos.

CONCLUSIONES

Después de haber realizado los estudios del comportamiento magnético de las colas de la “Empresa Comandante Ernesto Che Guevara” se pudo llegar a la siguiente conclusión:

- ✓ Como resultado de la separación magnética se pueden hacer las siguientes consideraciones:
 - La separación magnética preliminar realizada a las colas demostró que a la intensidad de corriente de 0,1 A (40,30 kA/m) se alcanzó mejores resultados en cuanto al hierro y el níquel, de 45,93 y 0,47 % respectivamente.
 - Se demostró que en la clase +0,20 mm , el níquel y la sílice se concentran en la fracción no magnética, el cobalto y manganeso en la magnética, con valores de 0,47; 19,25; 0,10 y 0,91 % respectivamente. En las demás fracciones magnéticas todos los elementos se comportan de forma estable.
- ✓ Se comprobó que en las colas predominan las partículas finas menores de 0,074 mm que comprenden el 52 % , entre las que resaltan las partículas menores de 0,038 mm , en las que se concentran el hierro y el níquel alcanzando valores de hasta 49,87 y 0,35 % respectivamente; mientras que el Co, Mn, Mg y el SiO₂ aumentan a medida que aumenta la fracción granulométrica. El aluminio y el cromo presentan un comportamiento bastante homogéneo, obteniendo los mejores resultados en la clase de tamaño -0,053 +0,038 mm con un 6,04 y 3,55 % respectivamente.

RECOMENDACIONES

1. Continuar el estudio de separación magnética combinando con otros métodos de beneficio que permitan obtener una solución para el aprovechamiento más racional del residuo sólido.
2. Realizar una separación magnética a las colas por vía húmeda.
3. Realizar el análisis mineralógico de la muestra de cabeza y las obtenidas durante el análisis fraccional, que permita el estudio de la distribución de las fases mineralógicas presentes.

BIBLIOGRAFÍA

1. ARIZA, S. M. *et al.* 2003. Lixiviación química de colas producto del proceso carbonato amoniaco con ácidos orgánicos. Informe técnico. 22 h.
2. ASHINKOV, R. 1962. Beneficio de las colas de Nicaro por separación magnética. 62 h.
3. BALDOQUÍN, Y. M. 2004. Lixiviación orgánica de las colas de la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” de Moa para la recuperación de cobalto. [Instituto Superior Mineros Metalúrgicos]. Moa 57 p.
4. Clark, D.A. 1999. Magnetic petrology of igneous intrusions: implications for exploration and magnetic interpretation. *Exploration Geophysics* Vol 30:5-26.
5. DERCACH, V. G. 1981. Métodos especiales de enriquecimiento de minerales. 419 p.
6. FERNÁNDEZ, J. A. 1979. Datos aportados sobre las colas Empresa Ernesto Che Guevara.
7. HERNÁNDEZ, A. 2003-2004. Níquel and cobalt recovery from the tailings of the níquel industry “Ernesto Che Guevara”, Cuba.
8. HERNÁNDEZ, C. M. F. 2011. Recuperación de Níquel, Cobalto y Hierro a partir del residuo sólido de la empresa Empresa Ernesto Che Guevara. [Instituto Superior Mineros Metalúrgicos]. Moa (Tesis de Maestría) 65 h.
9. INFORME, T. 1952. Aprovechamiento de las colas de Nicaro. Nacional Lead Company.
10. INFORME, T. 1963 Colas previamente desmagnetizadas. 2p.
11. INFORME, T. 1979 – 1981. Estudio sobre el beneficio de colas de la fábrica de Nicaro y la sinterización de concentrados férreos. Instituto Mejanobr, Leningrado.
12. INFORME, T. 1971 -1972. Investigación complementaria sobre la preparación premetalúrgica del concentrado para la fundición en alto horno. Instituto de Leningrado.

13. INFORME, T. 1961. Investigación sobre las características de concentración de una muestra de colas de la planta de Nicaro para la producción de concentrado de hierro de grado normal. Instituto Mejanoobr, Leningrado.
14. JONES, D. G. 1988. Estudio preliminar de la obtención del concentrado de cromo a partir de las colas de Nicaro. [Instituto superior Mineros Metalúrgicos]. Moa (Trabajo de Diploma) 71 p.
15. KRIBOI, R. 1991 – 1992. Elaboración de una tecnología de enriquecimiento de los residuos que contienen hierro de los complejos minero - metalúrgicos de Nicaro y Moa.
16. MAVROMMATIS, K. *et al.* 2002. Operación sostenible al reciclado de colas de la producción metalúrgica en Cuba en el ciclo de producción de acero en horno de arco eléctrico. Memoria del evento Metánica.
17. PALACIOS, A. & A. D. TORO. 2003. Consideraciones sobre la posible recuperación del cobalto contenido en las colas de la tecnología carbonato amoniacal. *Tecnología Química*.
18. PEÑA, E. G. 2010. Extracción de cobalto por lixiviación ácida de los residuales sólidos de la tecnología carbonato amoniacal. [Instituto Superior Minero Metalúrgico]. Moa (Tesis de maestría) 72 p.
19. PEÑA, J. G. 1986. Estudio del esquema de beneficio de las colas de Nícaro. [Instituto Superior Minero Metalúrgico]. Moa (Trabajo de Diploma) 40 p.
20. PONCE, N. 1979. Mineralogía y composición sustancial del yacimiento artificial Colas de Nicaro. *Revista "La Minería en Cuba"* (Biblioteca RRL): 7 p.
21. PONCE, N. 1986. Mineralogía y composición sustancial del yacimiento artificial Colas de Nicaro. *Revista "La minería en Cuba"* Vol 5:30-36.
22. PRESILLA, D. 1969. Producción de hierro esponja y arrabio en Cuba. Informe técnico 14 h.
23. PURON, A. R. & A. B. TURRO. 2003. Composición mineralógica de las colas del proceso CARON en Moa, Holguín, Cuba. *Minería y geología* Vol 18 No 3-4.
24. RAMÍREZ, B. S. 2002. Estudio de la distribución fraccional de las arenas del placer de Playa Mejías. [Instituto Superior Mineros Metalúrgicos]. Moa (Tesis de Maestría) 62 p.
25. RODRÍGUEZ, M. P. 2004. Lixiviación ácida reductora (con SO₂ y H₂SO₄) de las colas del la Planta niquelífera de Punta Gorda (Cuba). Informe Técnico. CEINIQ. 22 p.

26. SOBOL, S. L. 1968. Lixiviación ácida a presión de las colas de la tecnología carbonato amoniacal.
27. TAYLOR & SCHWERTMANN. 1974. Maghemite in soils and its origin I; Properties and observations on soil maghemites. *Clay Minerals* 10: pp 289-298.
28. TURRO, A. B. 2002. Estudio del Hidrotransporte de las Colas en el Proceso Carbonato Amoniacal. [Instituto Superior Mineros Metalúrgicos]. Moa (Tesis en Opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas.) 154 p.
29. WEB, P. 2006. Material Description, *MINERAL PROCESSING WASTES*. <http://www.tfrc.gov/hnr20/recycle/waste/mwst1.htm>.
30. ZAMORA, J.; J. VÉLIZ & J. GILM. 1981. Tostación magnetizante de colas de Moa con carbón vegetal como agente reductor. Centro de Investigaciones Metalúrgicas (CIME). 16h.

ANEXO

Anexo 1: Pesa electrónica marca Sartorius.



Anexo 2. Fuente alimentadora de corriente del separador magnético ЭБС 138 Т.



Anexo 3. Muestra de la separación granulométrica por clase de tamaño.



Anexo 4. Distribución de contenido según la intensidad de corriente.

Intensidad de Corriente, A	Análisis químico de los elementos, %					
	Fe		Ni		Co	
	Magnética	No Magnética	Magnética	No Magnética	Magnética	No Magnética
0,05	44,84	37,62	0,36	0,36	0,09	0,09
0,10	45,93	40,83	0,47	0,42	0,08	0,07
0,15	44,10	43,75	0,35	0,34	0,08	0,08
0,20	43,45	39,90	0,34	0,34	0,09	0,07

Anexo 5. Comportamiento de la las colas ante la intensidad del campo de 0,1 A por clase de tamaño.

Elementos	Intensidad de corriente, A	Fracción	Contenido por clases de tamaño, %		
			-0,038	-0,150+0,075	+0,2
Ni	0,10	Magnético	0,34	0,41	0,40
		No Magnético	0,36	0,28	0,47
Fe		Magnético	48,93	42,21	42,73
		No Magnético	34,53	23,87	36,66
Co		Magnético	0,09	0,08	0,10
		No Magnético	0,08	0,06	0,08
Mg		Magnético	2,21	3,15	3,37
		No Magnético	2,17	4,81	7,17
Mn		Magnético	0,74	0,77	0,91
		No Magnético	0,75	0,77	0,75
Cr		Magnético	2,29	3,46	2,20
		No Magnético	2,47	3,07	5,63
Al		Magnético	4,97	5,20	5,05
		No Magnético	4,92	7,54	5,72
Cu		Magnético	0,01	0,01	0,02
		No Magnético	0,01	0,01	0,03
Zn		Magnético	0,03	0,03	0,04
		No Magnético	0,03	0,05	0,04
SiO ₂		Magnético	10,37	10,23	8,67
		No Magnético	8,39	12,02	19,25

Anexo 6: Espectrofotómetro de Emisión Óptica de Plasma Inductivamente Acoplado (ICP), Modelo JY 124.

