



Caracterización físico química de las colas de la tecnología CARON en
Moa, para su posible uso siderúrgico

AUTOR(S): Daila Dayenys

Durán Pérez

TUTOR(ES): Ing. Oscar de

Jesús Romero Ramírez

Dr.C. José Alberto

Pons Herrera. Profesor

Titular.



Caracterización físico química de las colas de la tecnología CARON en
Moa, para su posible uso siderúrgico.

AUTOR(S): Daila Dayenys
Durán Pérez

TUTOR(ES): Ing. Oscar de
Jesús Romero Ramírez
Dr.C. José Alberto
Pons Herrera. Profesor
Titular.

Moa, 2023

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi familia que estuvo ahí para mi en el transcurso de estos cinco años; mi hermana Dalia Dayanis Durán Pérez que no solo es mi hermana sino mi amiga y consejera en cada uno de los pasos que doy; mis sobrinos Brenda Fornaris Durán y Dairon Fornaris Durán que son mi inspiración de seguir adelante y ser una mejor persona para ser un buen ejemplo para ellos; mi papá Eliecer Durán Matos que a pesar de los buenos y malos momentos que hemos tenido sé que siempre va a estar ahí para lo que necesite, a mi suegra Adelskis Pérez Wilson que me está apoyando a la distancia para cumplir esta meta, y principalmente a mi guerrera, mi reina, mi inspiración, mi todo, **MI MAMÁ NORBELIS PÉREZ SOSA**, que gracias a ella estoy donde estoy, dándome todo su apoyo y energía para llegar a este momento que tanto esperaba.

Agradezco también a mi novio Jorge Dervis Limonta Pérez por aparecer en mi vida en el momento que más lo necesitaba, y sin darme cuenta ocupó un lugar importante estando ahí en mis momentos buenos para celebrarlo juntos pero principalmente en los malos no sólo para secarme las lágrimas sino para evitar derramarlas, además de lo insistente que se me puso para que hiciera la tesis y dejara la dormidera jjj.

A mis tías (todas) y primas, que han sabido ayudarme en cada una de las cosas que he necesitado en el transcurso de la Universidad y todos mis años de estudio.

A mi compañera de cuarto desde 1er año, mi compañera de proyectos cada vez que era en dúos (ella los hacía obvio jjj), mi compañera de fiestas y también de estudio Norma Yanela Rodríguez Pupo; a ti Yane, gracias por escuchar todos mis problemas y soportar mis lloriqueos sin motivos.

A mi grupo "La Funeraria", a los que están y los que tuvieron que dejarnos, a todos gracias por ese apoyo que nos dimos siempre.

A mis tutores agradecer todo el tiempo que dedicaron en mi a pesar de ser profesores muuuuy ocupados, gracias.

DEDICATORIA

Dedico estos cinco años de sacrificio y esfuerzo a dos personas importantísimas en mi vida; a mi mamá Norbelis Pérez Sosa y mi abuela Dalia Rosa Matos Díaz.

Mi mamá por ser la persona que nunca tuvo un no puedo para mí en ningún momento, por no dejarme sola, por darme su amor incondicional siempre y apoyo para cumplir esta meta. A ti que te debo no solo la vida mi amor, te debo todo mi Reina.

A mi abuela, por ser de los cuatro abuelos la única que me vio entrar a la Universidad y a pesar de ver su cara de felicidad y orgullo no me pudo ver terminarla.

RESUMEN

Las presas de cola constituyen depósitos antrópicos de residuales sólidos de las industrias metalúrgicas, el presente trabajo tiene como propósito evaluar las características de las colas de la tecnología CARON en Moa con el objetivo de tomar decisiones futuras sobre su posible utilización en la industria siderúrgica en nuestro país, para el desarrollo de esta investigación se realizó un proceso de caracterización químico y mineralógico en laboratorios de Cuba y el extranjero, además de análisis granulométrico. Se analizaron, mediante SEM-EDX (microscopia electrónica de barrido con detector de energía dispersante) muestras de las colas viejas y nuevas, con el objetivo de determinar la composición mineralógica de las mismas. Se encontró que no existen diferencias sustanciales en la composición de ambas colas, se observó la magnetita como fase principal. Los resultados de los análisis granulométrico demuestran que más del 50 % de las colas poseen una granulometría menor de 2 mm, estos resultados para ambas colas son muy similares, los confirman el carácter fino de las colas del proceso CARON en Moa, con predominio de la fracción menor de 0,063 mm, y la posibilidad de procesar para la obtención de productos siderúrgicos, empleando una tecnología que permita tratarlas utilizando la tecnología de fusión reductora en hornos de arco eléctrico de corriente directa.

Palabras Claves: Colas, Tecnología CARON

SUMMARY

Tailings dams constitute anthropic deposits of solid waste from metallurgical industries. The purpose of this work is to evaluate the characteristics of the tailings of the CARON technology in Moa with the objective of making future decisions about its possible use in the steel industry in our country, for the development of this research, a chemical and mineralogical characterization process was carried out in laboratories in Cuba and abroad, in addition to granulometric analysis. Samples of the old and new tailings were analyzed using SEM-EDX (scanning electron microscopy with dispersive energy detector) with the aim of determining their mineralogical composition. It was found that there are no substantial differences in the composition of both tails, magnetite was observed as the main phase. The results of the granulometric analyzes demonstrate that more than 50% of the tails have a granulometry of less than 2 mm, these results for both tails are very similar, confirmed by the fine nature of the tails from the CARON process in Moa, with a predominance of the fraction smaller than 0.063 mm, and the possibility of processing to obtain steel products, using a technology that allows them to be treated using fusion technology reduction in direct current electric arc furnaces.

Keywords: Queues, CARON Technology

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN.....	V
SUMMARY	VI
ÍNDICE DE TABLAS	IX
ÍNDICE DE FIGURAS.....	X
ÍNDICE DE GRÁFICOS	XI
ÍNDICE DE ANEXOS.....	XII
ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS	XIII
INTRODUCCIÓN	1
Situación problemática.....	4
Planteamiento del problema	4
Objeto	4
Campo de acción	4
Objetivo general	4
Objetivos específicos.....	4
Hipótesis.....	5
CAPÍTULO I. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN.....	6
1.1 Trabajos procedentes	6
1.1.1 Análisis bibliográfico	6
1.1.2 Procesos pirometalúrgicos.....	9
1.1.3 Procesos hidrometalúrgicos.....	10
1.1.4 Beneficio de minerales	11
1.2 Caracterización de las colas de la “Empresa Ernesto Che Guevara”	11
1.2.1 Composición granulométrica	12
1.2.2 Composición química.....	12
1.2.3 Composición mineralógica.....	13

1.2.4	Porosidad.....	15
1.2.5	Gravedad específica y peso volumétrico de las colas	15
CONCLUSIONES CAPÍTULO I		16
CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN		17
2.1	Materias primas utilizadas	17
2.2	Preparación de las muestras de investigación.....	18
2.3	Descripción de los métodos de análisis de la muestra.....	19
2.3.1	Análisis de la composición granulométrica	19
2.3.2	Análisis químico y mineralógico.....	21
CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO II		23
CAPÍTULO III. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS		24
3.1	Análisis de los resultados de la caracterización química de las colas viejas y nuevas	24
3.2	Características mineralógicas de las colas viejas y nuevas de Che Guevara.....	26
3.3	Características granulométricas de las colas viejas y nuevas de la tecnología CARON.....	29
CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO III.....		32
CONCLUSIONES GENERALES		33
RECOMENDACIONES		34
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		35
ANEXOS.....		37

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Composición granulométrica de las colas.....	12
Tabla 2 Composición química promedio de las colas del proceso carbonato amoniacal.	13
Tabla 3 Minerales encontrados por DR-X y su composición mineralógica.	14
Tabla 4 Composición química semicuantitativa de las colas viejas y nuevas de la tecnología CARON en Moa.....	24
Tabla 5 Análisis químico promedio desarrollado en el laboratorio de Santiago de Cuba	25
Tabla 6 Composición mineralógica de las principales fases presentes en las colas viejas	26
Tabla 7 Composición mineralógica de las principales fases presentes en las colas nuevas	27
Tabla 8 Resultados de la separación granulométrica	29

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.a y Figura 1.b: Proceso de selección y toma de muestras experimentales de las colas viejas y nuevas respectivamente de la Empresa (ECG)	17
Figura 2 Ubicación geográfica de la presa de colas negras Punta Gorda.	18
Figura 3. Esquema de trabajo empleado para la conformación de la muestra de investigación.	18
Figura 4: Tamices usados en el análisis granulométrico.	20
Figura 5: Cribado por el método seco.	21
Figura 6. Equipo de (microscopia electrónica de barrido con detector de energía dispersante (SEM-EDX).	21

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Distribución mineralógica de las principales fases presentes en las colas viejas de Che Guevara.	26
Gráfico 2. Difractograma de las muestras de colas viejas estudiadas.	27
Gráfico 3. Distribución mineralógica de las principales fases presentes en las colas nuevas ECG.....	27
Gráfico 4. Difractograma de las muestras de colas nuevas.	28
Grafico 5. Composición mineralógica promedio de las muestras globales de las colas.....	28
Gráfico 6. Composición granulométrica promedio de las colas viejas de la ECG.	30
Grafico 7. Composición granulométrica promedio de las colas nuevas de la ECG.....	30

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1 Proyecto geológico para la toma de una muestra tecnológica en la presa de colas viejas de la empresa Che Guevara.....	37
ANEXO 2 Composición granulométrica de las réplicas realizadas de las colas viejas de ECG	38
ANEXO 3 Composición granulométrica de las réplicas realizadas de las colas en la etapa de lixiviación.....	38

ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

CARON: Carbonato Amoniacal

ECG: Empresa Ernesto Che Guevara

TA: Turbo - aireadores

MR: Mineral reducido

TC: Tanques de contacto

DR-X: Difracción de rayos-X

ALS: Laboratorio Aval Scandinavian

CV: Colas viejas

INTRODUCCIÓN

La generación de las colas de la Empresa Ernesto Che Guevara de Moa comenzó en el año 1986. Sin embargo, en el año 2000 la industria del Níquel constituyó la primera fuente de exportación del país y se encuentra enfrascada en el proceso de ampliación de las capacidades instaladas y modernización de su tecnología, lo que le permitiría ir incrementando su papel en la economía nacional. Dentro del complejo tecnológico de la industria niquelífera cubana, las empresas comandante René Ramos Latour de Nicaro y Ernesto Che Guevara de Moa, realizan la producción de Níquel más Cobalto por el proceso Carbonato Amoniacal (CARON). En el costo de la extracción del Níquel y en la eficiencia de su proceso tecnológico incide significativamente el tratamiento de las colas, residuales que son depositados en las presas de colas, conteniendo aún una importante reserva de elementos valiosos.

En la industria química se manipulan muchas mezclas de distintas sustancias o compuestos que requieren ser separados en otros subproductos con concentraciones diferentes a las de la mezcla primaria. Algunos especialistas dedicados al desarrollo económico futuro de la región de Moa consideran que el proceso minero estará indisolublemente ligado a la explotación de los minerales almacenados en las presas de colas, ya que la explotación de las lateritas, al igual que todos los recursos naturales, tiene un tiempo de vida limitado, y constituyen recursos no renovables. De ahí la importancia de desarrollar investigaciones encaminadas a su procesamiento para lograr una mayor eficiencia en el aprovechamiento de los recursos, con el objetivo de mantener una sustentabilidad económica en la región.

Las presas de colas, han sido objeto de investigación a través de los años, por diferentes investigadores cubanos y extranjeros, 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.

En Cuba y el mundo generalmente se han destacado varios artículos, tesis, talleres y documentos que por su significativa importancia no podemos dejar de mencionar, como lo son

- El taller de las colas del níquel, de la Oficina Nacional de Recursos Minerales, en marzo 2005, que hizo una presentación en un evento científico donde se realiza un resumen con la cantidad

de recursos, sus características químicas, granulométricas y mineralógicas por depósitos de Cola. En el caso de las colas de ECG, no refieren composición mineralógica, no obstante, para las colas de Nicaro mencionan que el mineral principal de estas colas es la Magnetita y los otros que aparecen: cromo espinela y el Carbonato en muy pocas cantidades. El promedio general de la Magnetita es 74,94%.

- Se realizó una caracterización de una muestra tecnológica de residuos sólidos de la empresa “Rene Ramos Latour” correspondiente al proyecto em remet en el año 2012. Como Autores: Ileana Cabrera, José A. Alonso, Asor Martínez, Abdel Casanova, Lucía Canel, Roxana Trueba, Antonio Águila. Este estudio mineralógico fue realizado para las colas de la empresa de Nicaro, por el CIPIMM, se aplicaron ensayos granulométricos, análisis de fases a través de difracción de rayos X y análisis químico con microsonda electrónica de barrido MEB-EDAX. Además permitieron caracterizar a las colas de Nicaro como un material muy fino, por debajo del tamiz 0.075 mm se acumula el 89.5 % del total del peso de la muestra. Entre las fases mineralógicas se encuentra como principal la magnetita (65 %) con estructura de espinela, acompañada por minerales del grupo del olivino (forsterita-fayalita) con un 19% y cromita (6%). Se encontraron además cantidades menores de cuarzo.
- Loyola-Brefe O, Beyris-Mazar PE, 2014, analizaron el Comportamiento de las colas del proceso Caron (Moa) ante la intensidad de un campo magnético. Revista Minería Geología, v.30 n.3 /julio-septiembre / 2014 / Loyola-Brefe, 2014, aplicó un beneficio granulométrico, seguido por una separación magnética con una intensidad de campo de 40,33 kA/m en las colas de Moa. Según los resultados del ensayo granulométrico el 84.7 % del material se encuentra por debajo del tamiz 0.15 mm y el 51.08 %, se encuentra por debajo del tamiz 0.038 mm. En el beneficio magnético obtuvieron un enriquecimiento del contenido de Fe en la clase granulométrica más finas, en el resto de las fracciones el comportamiento en ambos grupos (magnético y no magnético) obtuvieron resultados similares.
- La estudiante Elizabeth Pérez Matos abordó su tesis para optar al título de ingeniera geóloga sobre la caracterización integral de los depósitos de cola de la tecnología CARON en Moa, donde se tomaron como caso de estudio las colas viejas, con vista a su utilización en la industria siderúrgica cubana y desde el punto de vista siderúrgico. Los resultados de la investigación arrojaron que las colas presentan un alto contenido de hierro(42,23%) y contenidos apreciables de silicio (5,74%), aluminio (4,2%), magnesio (2,17%), cromo (1,36%) y níquel (0,32%), que la convierte en una excelente materia prima para la producción de productos metalizados altamente demandados por la industria siderúrgica de Cuba, la

evaluación de las características mineralógicas demuestran como fases principales magnetita, maghemita, espinelas cromíferas y olivino que se corresponden con el quimismo de estos depósitos, y como resultado de la caracterización geoquímica de este material es posible proponer decisiones sobre el posible uso de esta materia prima en la industria siderúrgica cubana teniendo en cuenta los elementos significativos e importantes que tiene ella para la producción de acero en Cuba.

- La Geominera de Oriente en el presente año 2023 realizó un reporte técnico de estudio mineralógico, en el cual se abordan los resultados de las investigaciones mineralógicas ejecutadas en las colas de la planta ECG. El depósito posee un origen antropogénico, formado a partir de la acumulación de los residuos industriales del proceso tecnológico aplicados a las menas ferroniquelíferas concesionadas a la empresa ECG. El complejo de métodos de campo, mineralógicos y de laboratorio aplicados permitieron evaluar la composición sustancial del mismo. El objetivo principal fue la determinación de las fases minerales que componen la materia prima económicamente útil, además de determinar las características físico - química de las menas y minerales que las integran; lo que incrementará el conocimiento con respecto a su calidad y de la incidencia que pudieran tener durante el proceso de extracción de los metales útiles.

Las colas amoniacaes, conocidas como colas negras, son desechos sólidos del proceso tecnológico del níquel, los volúmenes de este residual se incrementan anualmente y provocan desequilibrios en el ecosistema, contaminando ríos y mares por arrastre. Han sido tratadas por diferentes vías para extraer de ellas elementos de gran importancia económica y con un alto contenido en las colas.

Las presas de colas constituyen pasivos ambientales Mineros Metalúrgicos sin una utilidad definida hasta el momento. Entre las características más importantes están su relativamente alto contenido de hierro, que presentan una alternativa de materia prima para la producción de aceros aleados.

La empresa de materias primas suministra la chatarra a las acerías a un precio inferior al del mercado internacional, la quinta parte aproximadamente, de continuar los ritmos de producción actuales la paulatina disminución de la chatarra de acero puede provocar un debastecimiento en el sector siderúrgico, y su alto coste de adquisición en el mercado internacional influirían negativamente en los costos de producción del acero en este sector.

La falta de materia prima no nos impide utilizar otros reductores como carbón vegetal y el carbón activado, que se obtienen a partir del carbón antracita para la producción de aceros. Por otra parte, el país realiza importantes esfuerzos para garantizar las fuentes de materias primas principales.

Situación problemática

- Existencia de un déficit de materiales de carga para la producción de aceros en el sector siderúrgico nacional, unido al no aprovechamiento del hierro y demás metales existentes en los residuos sólidos industriales de la empresa Ernesto Che Guevara.
- Insuficiente estudio y caracterización de las colas que imposibilita la toma de decisiones sobre su posible uso interno.

Planteamiento del problema

¿Las características físico química de las colas de la tecnología CARON en Moa son de posible uso siderúrgico?

Objeto

- Colas del proceso CARON de Moa.

Campo de acción

- Caracterizar las colas para la obtención de productos metalizados base hierro.

Objetivo general

- Caracterizar las colas de la tecnología CARON en Moa, para la futura utilización en la industria siderúrgica cubana.

Objetivos específicos

- Caracterizar química, mineralógica, física y térmicamente las colas del proceso CARON.
- Determinar el comportamiento de los elementos Fe, C, Si, Mn, Cr, Ni, Co, V, Cu, S y P en las colas de ECG.
- Búsqueda bibliográfica relativa al níquel y sus principales usos.

Hipótesis

Al caracterizar las colas viejas y nuevas del proceso CARON de la empresa Ernesto Che Guevara será posible definir qué proceso metalúrgico vamos a emplear para la obtención de productos metalizados base hierro para una futura producción de aceros en Cuba.

CAPÍTULO I. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN

Este capítulo tiene como objetivo demostrar ecológicamente las características de las colas viejas de la Empresa Productora de Níquel y Cobalto “Ernesto Che Guevara” (ECG) y describir las características generales del trabajo a realizar.

1.1 Trabajos procedentes

Para la realización de este trabajo se desarrolló un estudio bibliográfico, con el objetivo de conocer los principales trabajos relacionados con el tema en cuestión.

1.1.1 Análisis bibliográfico

Miranda, Jorge, (1998), realiza un estudio químico, mineralógico y tecnológico de los minerales procesados por la fábrica Ernesto Che Guevara caracterizando mineralógicamente las menas procesadas en su estado natural (menas ferroniquelíferas), así como las transformaciones mineralógicas de estas a su paso por las diferentes plantas de la industria. Entre los minerales neoformados a partir de las variaciones físico-químicas, menciona especies del grupo de las espinelas, olivino y serpentina. Algunos de los minerales identificados existen en los yacimientos actuales, aunque en diferentes proporciones y composición (magnetita, cromita). En los ensayos realizados es la magnetita la fase principal.

Rojas (2003) realizó una caracterización mineralógica de las colas de la tecnología CARON donde encuentra la existencia de las fases cromoespinelas: Mg cromita (Mg,Fe) (Cr₂O₃), donathita ((Fe,Mg) (Cr,Fe)₂O₄) y trevorita (Ni,Fe₂O₄) y como fases mineralógicas secundarias cuarzo (SiO₂) y silicatos de hierro y magnesio de la serie del Olivino, Forsterita-Fe (Mg,Fe)₂(SiO₄).

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 % .

Rojas & Turro (2003) analizaron la composición mineralógica, química y granulométrica de las colas del proceso CARON de Moa, se tomó muestras de las plantas de lixiviación y recuperación de amoníaco, llegando a la conclusión que las colas obtenidas presentaron 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 gruesa (0,175+0,147 mm). Los óxidos de hierro maghemita y/o magnetita constituyeron las fases mineralógicas principales y, además, no existió diferencia significativa en la composición química de las colas en ambas plantas; pero no aportaron una tecnología para el tratamiento de las colas.

Rojas y Turro (2003), exponen a partir de un análisis químico realizado a las colas de la Empresa Che Guevara, que estas son esencialmente ferrosas, y alcanzan alrededor de un 68 % de Fe_2O_3 , siendo este el compuesto de mayor representatividad en las mismas. Presentan, contenidos significativos de sílice (alrededor del 12 %), mientras que los óxidos de Mg, Cr y Al alcanzan, como promedio 7,11 %; 5,03 % y 3,45 %, respectivamente.

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.

En el lavado de las colas para eliminar amoníaco, Ariza y Salazar (2004), obtuvieron contenidos de hierro del 44 % de composición de las colas. En estudios reológicos con variación de la concentración de sólido en suspensión, que incluía tres réplicas de las muestras para disminuir margen de error (Turro *et-all*, 2010) se registró una participación del 47,7 % de hierro contenido en las colas de la Empresa Ernesto Che Guevara.

Medrano (2007) efectuó un estudio físico y químico a las colas de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”. En el análisis químico se obtuvo resultados muy parecidos a los realizados por Col & García (1984) a las colas de Nicaro. El análisis picnométrico reflejó que la cola posee 42,5% de poros y humedad molecular capilar de 42,4 %. El contenido del hierro aumentó con la disminución del tamaño de las partículas; mientras que, para el cromo el mayor contenido estuvo entre 0,125 y 0,030

mm, el contenido de óxido de aluminio presentó una regularidad bien definida alrededor del 3%. A pesar de los buenos resultados se considera que se debe realizar análisis mineralógico de los elementos para analizar su comportamiento.

Castillo y Leyva,(2008), presentación de un compendio realizado en el marco de un evento que no está definido en la misma. Refiere que según las características granulométricas las colas son un material predominantemente fino, (Granulometría: $-0.044 = 69.2\%$, $+0.044 = 13.8$, $+ 0.074 = 4.1$), con una composición mineralógica promedio de Magnetita=74 %, Serp y Oliv =18.8, Cromoespinel=4.2, además reporta las fases de hematita, andalucita y otros silicatos en menor cuantía.

Según la investigación sobre la lixiviación industrial asociada al Proceso CARON que emplea la (ECG) en Punta Gorda, ubicada en el municipio de Moa, Cuba, esta tiene la particularidad de desarrollarse en cuatro series con dos miniserias de cuatro turbo-aireadores (TA) por serie. En correspondencia con la última modificación realizada, esta se efectúa en una sola etapa de lixiviación, para así igualarse con las dos restantes plantas homólogas del mundo: la australiana Yabulu-QNi y la brasileña Tocantins-Niquelandia (Chang-Cardona y Rojas-Vargas 2009a). El planteamiento de la lixiviación en miniserias presenta algunos riesgos de tupiciones, distribución desigual de pulpa no controlada con la consecuente errónea aireación por miniserie, las cuales han sido demostradas en otros estudios (Chang-Cardona, Merencio-Guevara y Guerra-González 2015). Por tales razones se propone implementar nuevas herramientas para monitorear la densidad de la pulpa y su distribución por serie, sobre cuya base se calcula el volumen de aire por tonelada de mineral reducido (MR) - V_a , en m^3/t - para cada miniserie. Por otra parte, la (ECG) no cuenta con el parámetro de aireación velocidad específica de aire - Q_a , en $m^3/(t \cdot min)$ - que le permita gobernar la velocidad de cristalización de los óxidos e hidróxidos de hierro (OHH) en los dos primeros TA, en dependencia de la calidad del MR que se alimenta a los tanques de contacto (TC), en correspondencia con los resultados publicados (Chang-Cardona y Rojas - Vargas 2009a, 2013).

Hernández (2011) y Loyola (2012) a través de estudios mineralógicos y químicos también han obtenido resultados semejantes a los anteriores: supremacía del hierro frente al resto de los elementos contenidos en las colas objeto de estudio. En otro análisis de las colas en forma de pulpa para dejar sedimentar, secar y luego aplicar la técnica de Espectroscopia de Fluorescencia de Rayos X para determinar especies metálicas existentes en ella, Correa (2013) comprobó una composición del 43,7 % del total de los residuos examinados. Por su parte García (2013), publicó una investigación del

proceso de lixiviación ácida para recuperar elementos metálicos contenidos en las colas del proceso carbonato-amoniaco, que arrojó un 43 % de concentración de hierro y cifras ínfimas del resto de los elementos detectados.

Loyola-Brefe, y otros, (2014), aplicó un beneficio granulométrico, seguido por una separación magnética con una intensidad de campo de 40,33 kA/m en las colas de Moa. Según los resultados del ensayo granulométrico el 84.7 % del material se encuentra por debajo del tamiz 0.15 mm y el 51.08 %, se encuentra por debajo del tamiz 0.038 mm. En el beneficio magnético obtuvieron un enriquecimiento del contenido de Fe en la clase granulométrica más finas, en el resto de las fracciones el comportamiento en ambos grupos (magnético y no magnético) obtuvieron resultados similares.

Loyola et al. (2014) evaluaron el comportamiento, ante la acción de la intensidad del campo magnético de colas del proceso CARON de Moa, con vistas a la recuperación de metales útiles contenidos en estos residuos industriales. La investigación se realizó a escala de laboratorio para tres clases granulométricas obtenidas por vía húmeda y, posteriormente, sometidas a separación en fracciones magnéticas y no magnéticas. Se encontró que el níquel y la sílice, mayormente, se concentran en la fracción no magnética de la clase de mayor tamaño. En la fracción gruesa magnética se obtuvo hasta 0,1% de cobalto, valor exigido por la tecnología CARON. El hierro, aunque se logró concentrar en un 50 % en la fracción fina magnética, no cumple con las expectativas tecnológicas para su uso en la obtención de aceros.

1.1.2 Procesos pirometalúrgicos

La pirometalurgia además de ser una rama de la metalurgia extractiva en la que se emplean procesos para obtención y refinado o refinación de metales utilizando calor, es también la técnica más antigua para extracción de metales. Permite obtener metales a partir de sus menas, directamente o después de ser concentradas. Se trata principalmente de obtener el metal a partir del mineral, mediante separación de la ganga y purificación de los metales. El rango de temperaturas suele superar los 950 °C.

Para mantener la temperatura a la que el proceso se lleva a cabo, la mayoría de los procesos pirometalúrgicos requiere aporte de energía. Esta energía la proporciona generalmente la reacción exotérmica de alguna variedad de carbón, como el coque, o la energía eléctrica. Según sea el proceso,

se añade un agente reductor, que puede ser el combustible. Cuando la reacción exotérmica del material de partida es suficiente para mantener la temperatura del proceso (es decir, sin adición de combustible o de electricidad), se dice que el proceso es autógeno.

La pirometalurgia se emplea mucho porque es más rápida y puede procesar grandes cantidades de mineral. Los demerita una desventaja ambiental: son altamente contaminantes, pues emiten SO_2 (anhídrido sulfuroso) y CO_2 (anhídrido carbónico)

La extracción de metales por pirometalurgia se lleva a cabo mediante operaciones por vía seca que se realizan a altas temperaturas entre productos en estado sólido, líquido o gaseoso.

Las principales operaciones de la pirometalurgia son el secado, la calcinación, la tostación, la fusión y el refino.

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 $900\text{ }^{\circ}\text{C}$, estos nódulos se mezclaron con cisco de coque y carbonato de calcio y se calentaron hasta $1150\text{ }^{\circ}\text{C}$, Tesis en opción al Título de Ingeniero Metalúrgico Abel R. Palmero Pupo 13 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)

1.1.3 Procesos hidrometalúrgicos

La hidrometalurgia es la rama de la Metalurgia Extractiva que estudia todos los procesos extractivos que ocurren en medios acuosos, que permiten la extracción y obtención de metales y/o compuestos desde sus minerales o materiales de reciclaje (chatarras, escorias, cementos metálicos, barros anódicos, etc).

Clasificación de la hidrometalurgia

La hidrometalurgia se subdivide en tres ramas importantes, las cuales son:

- ❖ Lixiviación
- ❖ Concentración

❖ Purificación

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, 2022), 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).

1.1.4 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.

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 (Palmero, 2011).

Tabla 1 Composición granulométrica de las colas.

Clases, mm	Peso, kg	Peso, %	Acumulativa, %
+0,175	0,208	10,40	10,40
-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	-

Fuente: Palmero, 2011. Composición granulométrica de las colas.

Como se muestra en la tabla 1 se obtuvieron las fracciones granulométricas siguientes:

f1(+0,175 mm); f2(-0,175+0,147 mm); f3(-0,147+0,074 mm); f4(-0,074+0,044 mm) y f5(-0,0044 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:

1. Formado por la fracción granulométrica más fina (f5), menor de 0,04 mm, que representa alrededor del 66 % en peso de la muestra;
2. Agrupa las clases granulométricas f1, f3 y f4 que constituye alrededor de un 33 % en peso;
3. Lo integra la clase granulométrica f2, 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 f2 y f5, 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 según (Palmero, 2011) 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)	< 0,02lavadas –0,44
C	0,84

Fuente: Palmero, 2011. Composición química promedio de las colas del proceso carbonato amoniacal.

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

Fuente: Palmero, 2011. Minerales encontrados por DR-X y su composición mineralógica.

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 meta estable, 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 expone (Schwertmann, 1974), 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 (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 ultra básicas 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 de las colas

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).

CONCLUSIONES CAPÍTULO I

1. Los Pasivos Ambientales Minero Metalúrgicos constituyen materias primas siderúrgicas, en dependencia de sus características físico-químicas, por lo que las colas de los procesos de producción de Níquel en Cuba, representan una de los posibles materiales capaces de ser utilizados como carga metalizada base hierro para la producción de aceros en Cuba.
2. Como resultado de las investigaciones analizadas se pudo comprobar que las colas se caracterizan por tener contenidos significativos de hierro, níquel, cobalto, cromo, manganeso, silicio, lo cual está asociado al tipo de mineral y a la tecnología que se utilizó para su procesamiento.

CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN

El desarrollo de toda investigación necesita de herramientas para poder arribar a buenos resultados. Según (Ramírez, 2009), la correcta selección de los métodos y materiales empleados validan los resultados obtenidos, por tal razón es 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.

Este capítulo tiene como objetivo demostrar la realización de esta investigación teniendo en cuenta la toma de muestras que fue como resultado de un proyecto de la Che Guevara con la Geominera de Oriente.

2.1 Materias primas utilizadas

Colas de la Empresa (ECG)

Fueron seleccionadas y tomadas muestras de colas viejas y nuevas de las presas de la Empresa (ECG), como se muestran en las figuras 1.a y 1.b.



a



b

Figura 1.a y Figura 1.b: Proceso de selección y toma de muestras experimentales de las colas viejas y nuevas respectivamente de la Empresa (ECG)

Fuente: Empresa Geominera Oriente

Las colas negras generadas por Empresa (ECG), identificadas como las colas viejas (CV), son resultantes de 65 años de explotación de la planta, localizadas en la localidad de Punta Gorda en el municipio de Moa, mientras que las colas nuevas (CN), comenzaron en marzo del 2017 y constituyen las generadas por la propia empresa durante 6 años de producción de esta entidad.



Figura 2 Ubicación geográfica de la presa de colas negras Punta Gorda.

Fuente: Empresa Geominera Oriente.

2.2 Preparación de las muestras de investigación

Para los análisis de la investigación se tomaron 4 kg de cada una de las colas. Obtenido las muestras se tomaron para análisis granulométrico 3 kg y para análisis químico y mineralógico 1 kg.

En la figura 3, se muestra el esquema de trabajo que se utilizó, para la toma y preparación de muestras para cada cola, a partir de las cuales se seleccionaron las sometidas a los procesos experimentales.



Figura 3. Esquema de trabajo empleado para la conformación de la muestra de investigación.

Las muestras fueron tomadas en distintas áreas de la presa de Colas Viejas y las Colas Nuevas se tomaron a la salida del proceso de lixiviación de la Empresa ECG. El mineral fue extraído y trasladado hasta la planta de beneficio de la Universidad de Moa, donde se homogenizó y por el método del cono y el anillo el cual es una técnica utilizada en la planificación y gestión de proyectos para estimar la duración de actividades o el trabajo necesario para completar una tarea el cual consiste en dos pasos:

1. Cono de incertidumbre: En esta etapa, se solicita a los miembros del equipo que proporcionen tres estimaciones para la duración de una tarea: la estimación optimista (es decir, el tiempo mínimo que tomaría), la estimación pesimista (el máximo tiempo que podría tomar) y la estimación más probable (el tiempo más probable que tomaría).

2. Anillo de confianza: Con base en estas estimaciones, se calcula una estimación ponderada o promedio que se utiliza para la planificación del proyecto. Luego, se establece un "anillo de confianza" alrededor de esta estimación promedio para mostrar la incertidumbre asociada con la duración de la tarea. El anillo de confianza representa el rango dentro del cual hay cierta confianza en que la duración real de la tarea estará.

Este enfoque reconoce la naturaleza impredecible y variable de los proyectos, al tiempo que proporciona una manera de cuantificar y comunicar la incertidumbre asociada con las estimaciones de tiempo.

2.3 Descripción de los métodos de análisis de la muestra

2.3.1 Análisis de la composición granulométrica

A veces los materiales (minerales) que se trituran, desmenuzan o criban son mezclas mullidas de granos; desde trozos grandes, cuyo grosor supone centenaes de milímetros, hasta partículas diminutas con unas cuantas décimas de milímetros de grosor.

Estos trozos, generalmente, tienen forma irregular y su magnitud puede ser caracterizada solamente por varias dimensiones.

La composición granulométrica de los materiales de control en los procesos de cribado, trituración y desmenuzamiento, realizados en empresas de enriquecimiento, con mayor frecuencia se determina mediante el análisis de criba.

El cribado de materiales áridos, con el fin de determinar su composición granulométrica, lleva el nombre de análisis de criba. Los procedimientos para realizar este análisis están unificados.

A continuación, se da a conocer la metodología del análisis de criba utilizada en el enriquecimiento de minerales y de metales no ferrosos y raros. Para el cribado se utiliza un conjunto de cribas de alambres con agujeros cuadrados, que corresponden a la escala normalizada.

El cribado es un procedimiento de separación de minerales áridos por clases de grosor mediante el tamizado de los mismos en una o varias cribas, o de clasificación de minerales en las superficies de la criba. La composición granulométrica se determinó por vía seca, usando los tamices de: 10; 8.9; 6; 4.7; 3.33; 1.4; 0.8; 0.35; 0.2 y 0.1 mm.



Figura 4: Tamices usados en el análisis granulométrico.

Fuente: Daila Dayenys Durán Pérez

Los granos (trozos) de mineral, cuyo tamaño es superior a los orificios de la criba, después del cribado quedan en la criba, mientras que los granos de menor tamaño caen por los orificios. El material que ingresa en la criba se llama inicial, el que quede en ella, producto sobre la rejilla (superior) y el que cae por los orificios de la criba, producto bajo la rejilla (inferior). Cribando un material consecutivamente en n cribas se obtienen $n+1$ productos. En este caso uno de los productos del cribado anterior sirve como material inicial para el siguiente cribado.

Las muestras se criban por el método húmedo o seco en dependencia al grosor del material y a la exactitud necesaria de los resultados del análisis. (En este caso lo hicimos por el método seco), como se muestra en la siguiente figura.



Figura 5: Cribado por el método seco.

Fuente: Daila Dayenys Durán Pérez

Los resultados del análisis de criba se anotan en una tabla. Se calculan las salidas sumarias, equivalentes a la suma de salidas de todas las clases más gruesas (salida sumaria por más) y menos gruesas (salida sumaria por menos) que los orificios de dicha criba.

2.3.2 Análisis químico y mineralógico

Luego de preparadas las muestras fueron sometidas a análisis químicos y mineralógicos en ALS, un laboratorio ubicado en Danderyd Suecia, la cual ofrece análisis SEM-EDX (microscopía electrónica de barrido con detector de energía dispersante), como se puede apreciar en la figura siguiente

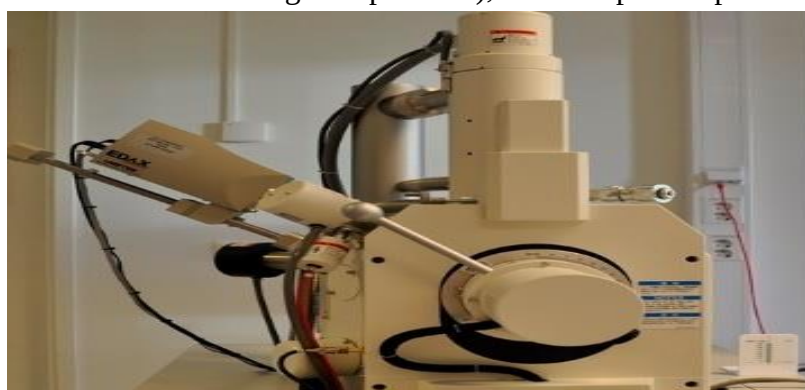


Figura 6. Equipo de (microscopía electrónica de barrido con detector de energía dispersante (SEM-EDX).

Fuente: Laboratorio de Danderyd Suecia

Adicionalmente fueron realizados análisis químicos en el laboratorio Elio Trincado de Geominera en Santiago de Cuba, empleando Espectroscopia de Emisión Atómica con Fusión Inductiva con plasma acoplado (ICP-AES) se realizó la determinación de Al_2O_3 , SiO_2 , MgO , Cr_2O_3 , MnO , NiO , CoO , CaO , Fe_2O_3 , PPI.

Determinación de componentes amorfos para Fe, Ni, Co, Si, Al y Mg mediante Espectroscopía de Absorción Atómica (EAA).

Determinación de Na_2O y K_2O : Por Fotometría de llamas, empleando un equipo CORNING-400, que trabaja con gas licuado, tiene filtros de colores que son complementarios con el color del elemento a determinar.

Determinación de FeO por volumetría.

Determinación de FeO- Cr_2O_3 y sílice residual mediante Colorimetría.

Procesamiento de la Información:

A partir de los resultados obtenidos en el laboratorio se procesó la información mediante empleo de diferentes softwares que permitieron cumplir el objetivo, por ejemplo: Microsoft Word, se utilizó para la confección y configuración del informe de la investigación. Se empleó el Microsoft Excel en la realización de las tablas que definen las características químicas y mineralógicas de las muestras obtenidas. Se expresaron los resultados de los análisis físico-químicos obtenidos en el laboratorio en % y la interpretación de los análisis se pudieron simplificar con el manejo de gráficas y diagramas.

CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO II

1. Los materiales y métodos empleados para el desarrollo de las pruebas experimentales, permitieron planificar y organizar el trabajo investigativo, de selección, toma y preparación de las muestras experimentales.

CAPÍTULO III. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a través de los análisis químicos, mineralógicos por microscopia electrónica de barrido con detector de energía dispersante y por Difracción de Rayos X (DRX) de los elementos de interés en nuestra investigación en el área de estudio, los cuales son de gran importancia para su posible uso en la industria siderúrgica, además de un análisis granulométrico.

3.1 Análisis de los resultados de la caracterización química de las colas viejas y nuevas

Los resultados de los análisis químicos permitieron comprobar el predominio del hierro (42,23%) en la presa de colas viejas y un (40,96%) en las colas nuevas de la tecnología CARON de Moa, como se aprecia en la tabla siguiente.

Tabla 4 Composición química semicuantitativa de las colas viejas y nuevas de la tecnología CARON en Moa.

Elementos	Contenidos (%)	
	Colas Viejas	Colas Nuevas
Al	4.202	4,38
Au	0.000001	0.000001
Ag	0.000002	0.000001
Co	0.071	0,100
Ca	0.137	0,042
Cr	1.36	1,28
Cu	0.009	0,009
Fe	42.23	40,96
K	0.02	0,009
Mg	2.17	2,41
Mn	0.68	0,70
Mo	0.0001	0.0001
Na	0.036	0,014
Ni	0.32	0,482
P	0.043	0,006
Pb	0.00022	0.00042
S	0.21	0,28
Sc	0.008	0,007
Si	5.74	6,287
Sm	0.00021	0.00017
Ti	0.12	0,079
V	0.03	0,029
W	0.0005	0.0003
C	2.5	2.9

Además del alto contenido de hierro este material posee contenidos apreciables de silicio, aluminio, magnesio, cromo y níquel, que la convierte en una excelente materia prima para la producción de productos metalizados altamente demandados por la industria siderúrgica de Cuba. Adicionalmente se aprecia el contenido de otros elementos valiosos como titanio, escandio, y cobalto que le aportan valor económico a esta materia prima.

Los resultados de los análisis químicos realizados a muestras de las colas viejas en los laboratorios Elio Trincado de Santiago de Cuba según el reporte técnico del estudio mineralógico en las colas viejas de la fábrica ECG realizado por la Geominera Oriente arrojo los resultados que se muestran en la tabla siguiente:

Tabla 5 Análisis químico promedio desarrollado en el laboratorio de Santiago de Cuba

Minerales	Contenido en %
Fe₂O₃	45.0
Al₂O₃	9.5
SiO₂	12.6
MgO	7.2
FeO	17
Cr₂O₃	3.2
PPI	4.0
Ni	0.42
Co	0.08
MnO	0.94
TiO₂	0.12
Na₂O	0.06
CaO	0.13
Sílice libre	0.41

Como se observa en la tabla anterior, en las colas el elemento mayoritario es el hierro, que se presenta en su estado férrico y ferroso, seguido en abundancia por la sílice y el aluminio. Los contenidos de MgO, superan como promedio ligeramente el 5 %. De los elementos menores determinados el manganeso y el FeO-Cr son los más abundantes. El contenido de cobalto, titanio, sodio y calcio no superan el 0.15 % en las muestras analizadas.

3.2 Características mineralógicas de las colas viejas y nuevas de Che Guevara

Las colas estudiadas se caracterizan mineralógicamente por predominio de los minerales de hierro principalmente magnetita, seguido de fayalita y minerales de cuarzo como se aprecia en la tabla y gráficos siguientes.

Tabla 6 Composición mineralógica de las principales fases presentes en las colas viejas

No.	Compound Name	Chemical Formula	SemiQuant (%)
1	Magnetite	Fe_3O_4	50
2	Fayalite	Fe_2SiO_4	45
3	Quartz	SiO_2	5

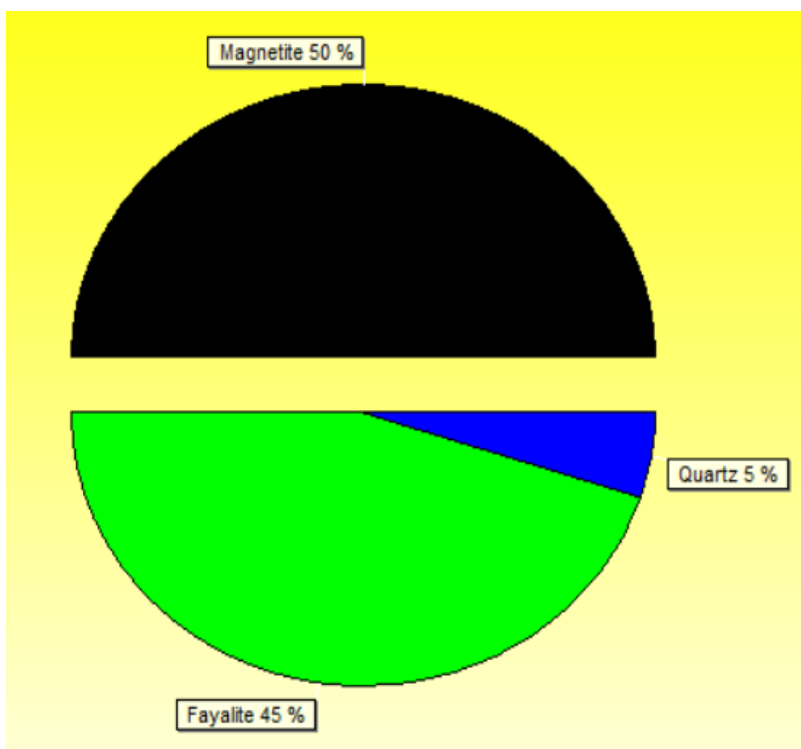


Gráfico 1. Distribución mineralógica de las principales fases presentes en las colas viejas de Che Guevara.

La presencia de estas fases mineralógicas está ilustrada también en el siguiente difractograma.

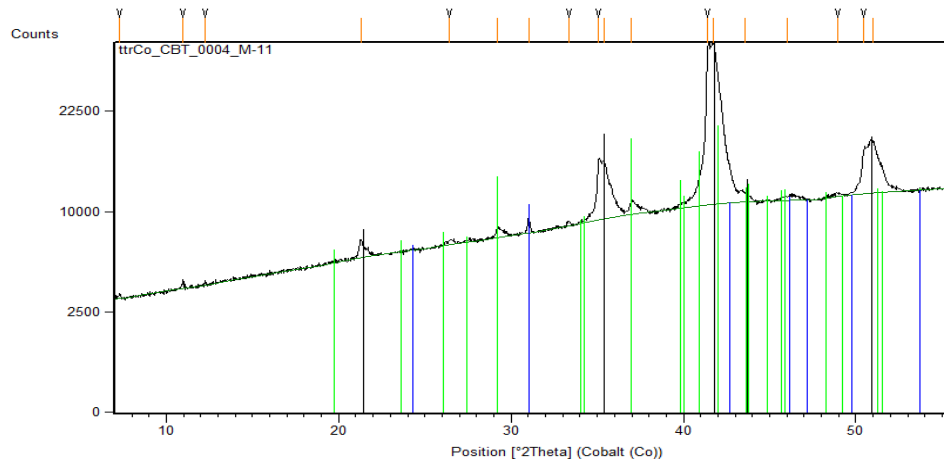


Gráfico 2. Difractograma de las muestras de colas viejas estudiadas.

Tabla 7 Composición mineralógica de las principales fases presentes en las colas nuevas

No.	Compound Name	Chemical Formula	SemiQuant (%)
1	Magnetite	Fe_3O_4	49.5
2	Quartz	SiO_2	5.9
3	Fayalite	Fe_2SiO_4	44.6

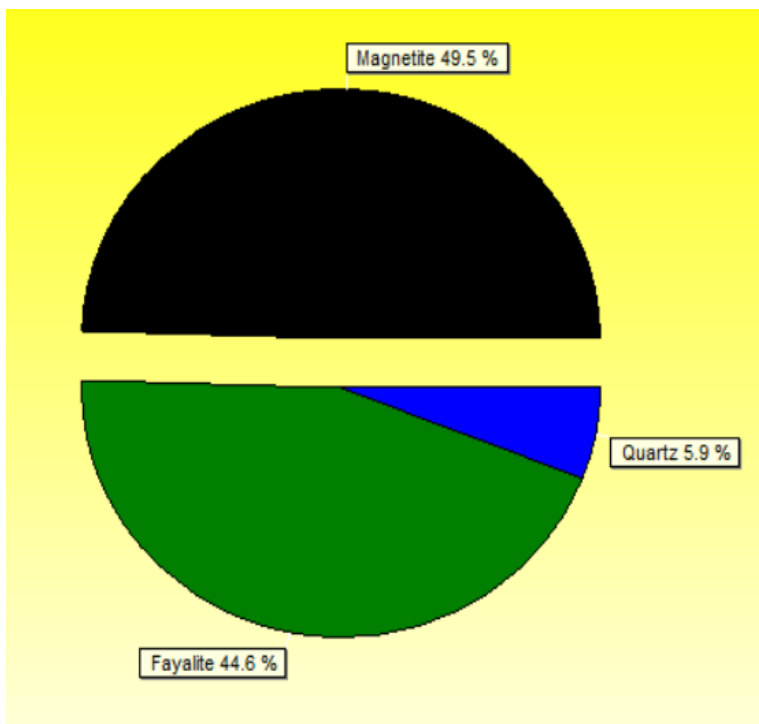


Gráfico 3. Distribución mineralógica de las principales fases presentes en las colas nuevas ECG.

Las fases mineralógicas presenciadas están ilustradas también en el difractograma siguiente.

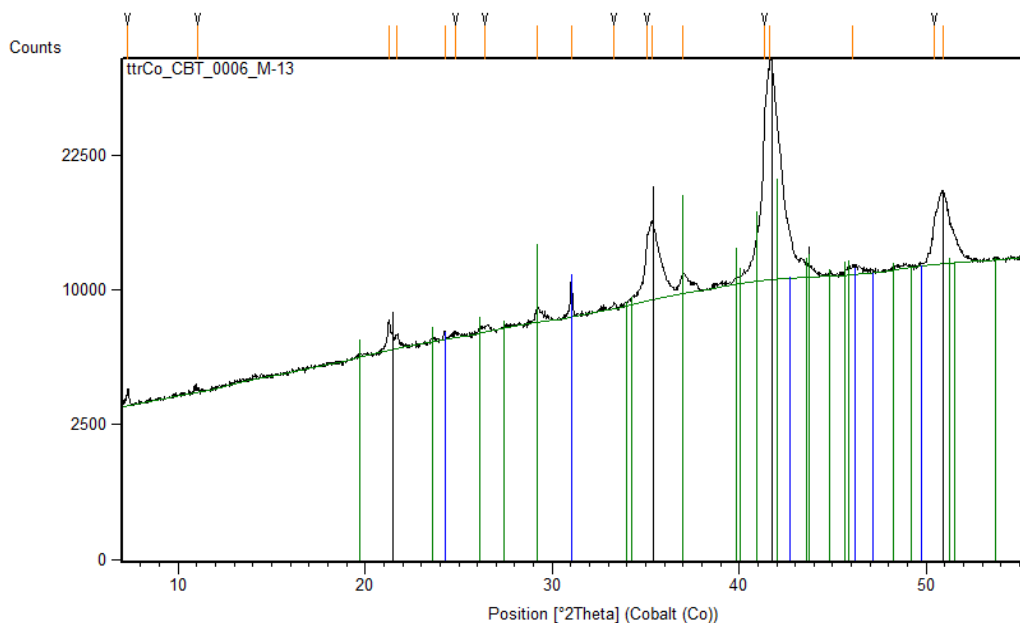


Gráfico 4. Difractograma de las muestras de colas nuevas.

Estas características químicas de las colas viejas de la tecnología CARON demuestran que los principales elementos presentes en esta materia prima están asociados al proceso de reducción que garantiza que el hierro contenido en este material que está en forma de magnetita (Fe_3O_4) y Óxido Ferroso (FeO). Adicionalmente incide, en la presencia de otros elementos químicos valiosos, la baja ineficiencia de esta planta por los años de explotación y la tecnología que utilizan, la cual data del siglo pasado.

Los resultados mineralógicos de las muestras analizadas en el laboratorio Elio Trincado, coinciden con los resultados del laboratorio ALS Scandinavia, como se aprecia en el gráfico siguiente

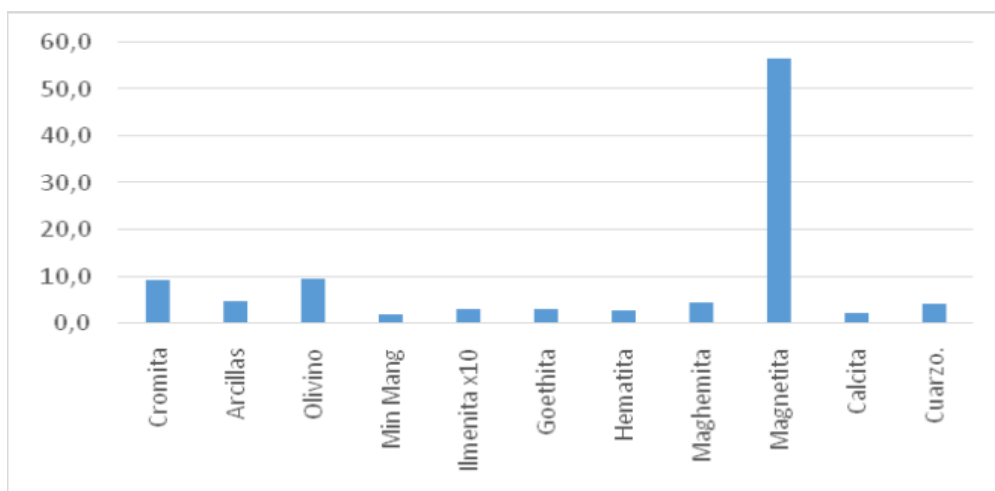


Gráfico 5. Composición mineralógica promedio de las muestras globales de las colas

En las muestras globales la clase mayoritaria es la magnetita, subordinada a ésta el olivino y la cromita. En el gráfico anterior se aprecia la composición mineralógica promedio de las colas, con presencia mayoritaria de la magnetita (56%). Por su parte, el olivino varía de 10 a 11 % con segundo orden de abundancia y la cromita de 6.5 a 7. Las fases minerales que se encuentran en muy pequeñas proporciones son la calcita, ilmenita y minerales de manganeso.

3.3 Características granulométricas de las colas viejas y nuevas de la tecnología CARON

Según el reporte técnico realizado por la Geominera Oriente la fracción más representada es la menor de 0,063 con 81 % promedio, como se aprecia en la tabla 8. Por lo que el material presente en las colas es clasificado como muy fino, con tamaño de partículas propias de arena fina, limo y/o arcilla, según clasificación de Attemberg. Esta característica es importante para su posible uso siderúrgico, requiriendo su pretratamiento metalúrgico a través de operaciones unitarias de aglomeración, para reducir las pérdidas por arrastre de finos, o la aplicación de la tecnología de fusión con hornos de corriente directa, donde se aprovecha la alta potencia para la fusión, sin necesidad de aplicar procesos de aglomeración, variante a aplicar con la continuidad de esta investigación.

Tabla 8 Resultados de la separación granulométrica

Separación Granulométrica						
	0.8 mm	0.3 mm	0.15 mm	0.074 mm	0.063 mm	<0.063
Peso (g)	32.8	136.1	108.7	148.7	105.3	2433.3
% del peso	1.1	4.5	3.6	0	3.5	81.1

Los resultados de este análisis demuestran que más del 50 % de las colas poseen una granulometría menor de 2 mm, como se muestra en el gráfico siguiente.

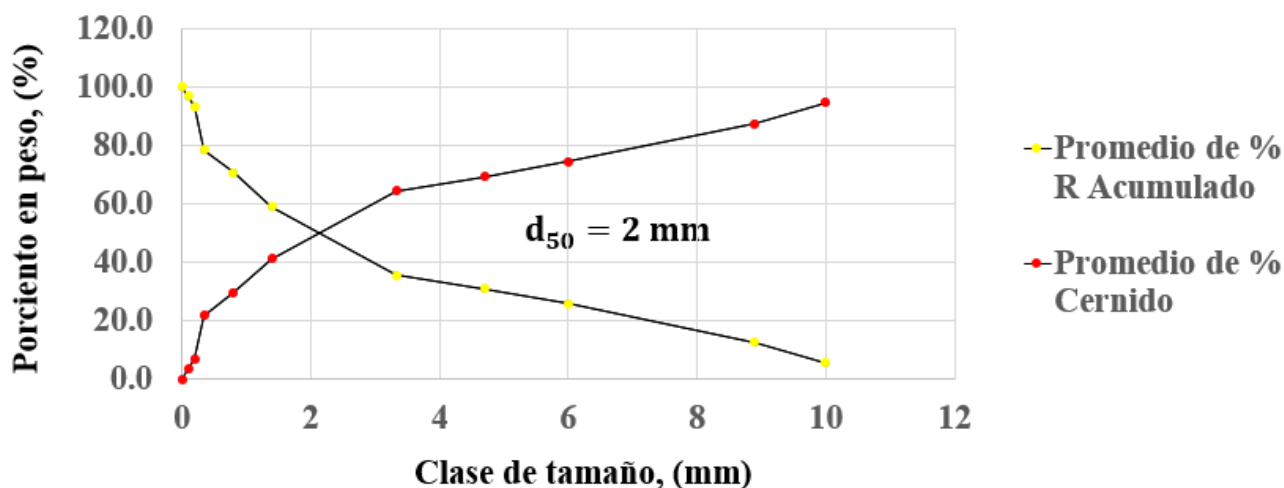


Gráfico 6. Composición granulométrica promedio de las colas viejas de la ECG.

En el caso de las colas nuevas de la tecnología CARON en Moa, los resultados son muy similares, como se aprecie en el grafico siguiente. Los valores de d_{50} , confirman que las colas resultantes del proceso de lixiviación son menores de 2 mm, coincidente con el resultado de las colas viejas. En los ANEXOS 2 y 3 donde se aprecian la composición granulométricos de las réplicas realizadas a las colas nuevas y viejas

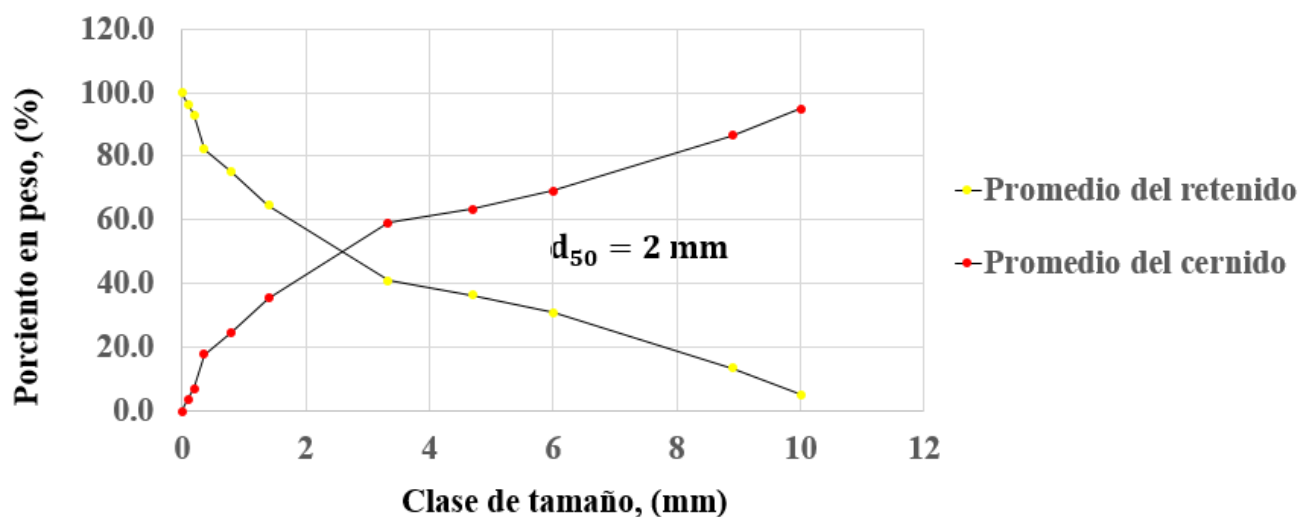


Gráfico 7. Composición granulométrica promedio de las colas nuevas de la ECG.

El resultado de los análisis granulométricos confirma el carácter fino de las colas del proceso CARON en Moa, con predominio de la fracción menor de 0,063 mm, y la posibilidad de procesar para la obtención de productos siderúrgicos, empleando una tecnología que permita tratarlas

utilizando la tecnología de fusión reductora en hornos de arco eléctrico de corriente directa, experimentos que se desarrollaran el próximo año como continuidad de esta investigación.

CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO III

- 1 Los elementos mayoritarios en las colas viejas y nuevas de la tecnología de producción de níquel CARON en Moa, son el hierro, sílice y aluminio, para las colas viejas alrededor de 42,23%, 5,74% y 4,202% para las colas nuevas respectivamente 40.96%, 6,287% y 4,38%.
- 2 Mineralógicamente, las colas estudiadas se caracterizan por un predominio de las fases mineralógicas, magnetita, maghemita, espinelas cromíferas y olivino las cuales coinciden químicamente, con la presencia de altos contenidos de minerales de hierro, silicio y magnesio.
- 3 Los resultados de los análisis granulométricos confirmaron la finura de esta materia prima, con predominio de la fracción menor de 0,063 mm, y donde más del 50 % de las colas es menor de 2,0 mm.

CONCLUSIONES GENERALES

1. Las colas nuevas y viejas de la tecnología CARON en Moa, se caracterizan por el predominio de elementos valiosos lo que las convierten en una materia prima perspectiva, para su utilización como materia prima de gran importancia económica y ambiental para la futura utilización en la industria siderúrgica cubana.
2. La determinación de las características químicas, mineralógicas, físicas y térmicas de las colas del proceso CARON en Moa, permitió comprobar la presencia significativa de minerales de hierro, cromo, níquel, manganeso y otros elementos que dieron lugar a la evaluación de este material para su posible uso como materia prima para la industria siderúrgica cubana.
3. El comportamiento de los elementos Fe, C, Si, Mn, Cr, Ni, Co, V, Cu, S y P en las colas de ECG, mostraron 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. Se ha podido determinar que los contenidos de sus principales elementos constitutivos varían entre los valores según la literatura consultada

RECOMENDACIONES

1. Continuar el estudio del uso de las colas de la producción de níquel en Cuba para la producción de un producto metalizado base hierro, capaz de sustituir a la chatarra para la producción de aceros aleados en Cuba.
2. Evaluar el uso de otras materias primas nacionales, contenedoras de hierro, níquel, cromo, silicio, manganeso, cromo y otros metales valiosos, con posibilidades de utilizar en la industria siderúrgica nacional y con posibilidades de convertirse en fuentes de ingresos de divisas para el país.
3. Evaluar la factibilidad económica del uso de las colas de la producción de níquel, como carga metalizada para la producción de aceros aleados en Cuba.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Miranda, Jorge, (1998). Estudio químico, mineralógico y tecnológico de los minerales procesados por la fábrica Ernesto Che Guevara
2. Palacios & Toro (2003). Revisión teórica y experimental de las colas de la Tecnología Carbonato Amoniacal de las fábricas Comandante Ernesto Che Guevara y René Ramos Latour, de Moa y Nicaro
3. Rojas & Turro (2003) Composición mineralógica, química y granulométrica de las colas del proceso CARON de Moa.
4. Baldoquín (2004). Estudio de la posibilidad de recuperar el cobalto contenido en los residuales sólidos de las colas de la “Empresa Ernesto Che Guevara”.
5. Medrano (2007). Estudio físico y químico a las colas de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”
6. Loyola-Breffe O, Beyris-Mazar PE, 2014, Comportamiento de las colas del proceso CARON (Moa) ante la intensidad de un campo magnético. Revista Minería Geología, v.30 n.3 /julio-septiembre / 2014 / Loyola-Breffe, 2014
7. El taller de las colas del níquel, de la Oficina Nacional de Recursos Minerales, en marzo 2005, Presentación en un evento científico sobre características químicas, granulométricas y mineralógicas de depósitos de Cola.
8. (Turro, 2022), Estudio del hidrotransporte de las colas del proceso CARON de la “Empresa Comandante Ernesto Che Guevara”.
9. Ayacucho, Y. (2006). Pasivos Ambientales Mineros. Definiciones y Características. Lima: Ministerio de Minería.
10. Azahares Ríos, Y. (2015). Evaluación Ambiental de los Pasivos Ambientales Mineros de la Mina de la Empresa Comanadante Ernesto Che Guevara. Moa: Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.
11. Breffe Navarro, Y. (2017). Evaluación de las Principales Características Físico - Químicas del Pasivo Ambiental ``colas viejas`` para su Posible Uso Industrial. Moa: Universidad de Moa.
12. CEDINIQ. (2022). SCT-Acinox -Tunas-1-07-2022. Moa: Centro de Investigación y Desarrollo del Níquel.
13. Guerrero, Y. F. (2014). Obtención de Lupias de Arrabio a partir del tratamiento metalúrgico de las las colas de Nicaro. Moa: Universidad de Moa.

14. Hernández Tirado, R. (2018). Estudio Pirometalúrgico del Pasivo Ambiental " Colas Viejas" de la Empresa Comandante Pedro Soto Alba, de Moa. Moa: Universidad de Moa.
15. La Llave del Acero. (2015). Materias Primas para la Producción de Aceros. Santiago de Chile: ILAFA.
16. Ortiz Barcena, J. (2016). Obtencion de Materiales Metalizadas para la Producción de Aceros a partir de Materias Primas Cubanas. Habana: SIME.
17. Perdomo González, L., & Quintana Puchol, R. (2004). Desarrollo de materiales abrasivos y refractarios a paratir de los productos obtenidos por el procesamiento de minerales cubanos y residuales industriales. Villa Clara: Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
18. Pons Herrera, J., & al, e. (2022). Obtencion de Productos Metalizados base Hierro a partir de las Colas de la Producción de Níquel en Moa. Moa: Universidad de Moa.
19. Pupo, A. R. (2011). Comportamiento de las colas de " Empresa Comandante Ernesto Che Guevara " ante la intensidad de un campo Magnetico. Moa: Universidad de Moa .
20. Turro Breffe, A., Izquierdo Pupo, R., & Garcell, L. (2008). Parámetros y regímenes del hidrotransporte de colas lateríticas en el proceso Caron. Mineralogía y Geología , 1-13.

ANEXOS

ANEXO 1 Proyecto geológico para la toma de una muestra tecnológica en la presa de colas viejas de la empresa Che Guevara.

1

MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS
EMPRESA GEOMINERA ORIENTE
UEB Servicios Geológicos

PROYECTO

**Toma de muestra tecnológica en la presa
de colas negras Punta Gorda**



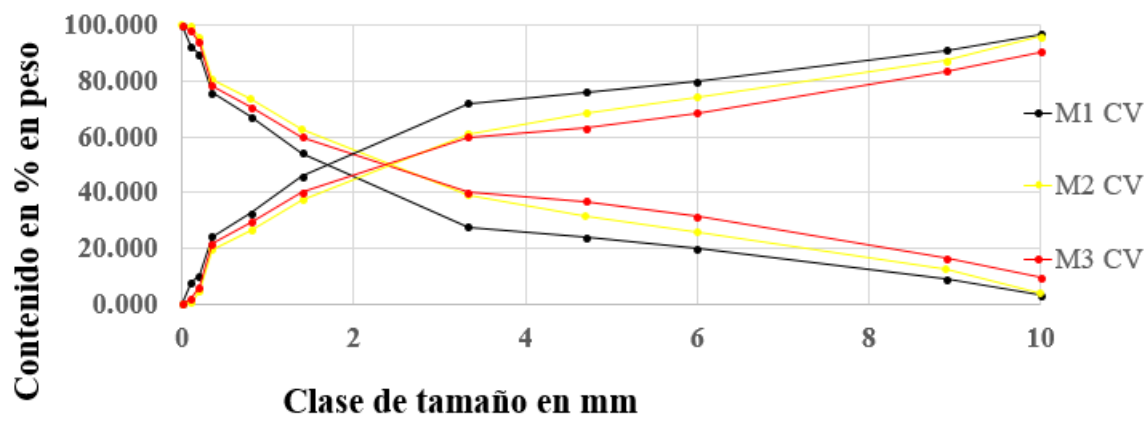
Entidad ejecutora: Empresa Geominera Oriente.

 Autor(s): M.Sc. Rubén Ruiz Sánchez
Ing. Jorge Luis Parra Alemán
Ing. Zulema Galán Aldana

Revisado por: M.Sc. José Luis Mourlot Serrano 

Año: 2023

ANEXO 2 Composición granulométrica de las réplicas realizadas de las colas viejas de ECG



ANEXO 3 Composición granulométrica de las réplicas realizadas de las colas en la etapa de lixiviación

