



Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa

“Dr. Antonio Núñez Jiménez”

Facultad de Metalurgia y Electromecánica

Departamento de Ingeniería Metalúrgica

Evaluación de las principales características físico-químicas del pasivo ambiental “escombros lateríticos” para su posible uso industrial

*Tesis presentada en opción al título de
Ingeniería en Metalurgia y Materiales*

Yadileydis Roché González

Moa, 2017



Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa

“Dr. Antonio Núñez Jiménez”

Facultad de Metalurgia y Electromecánica

Departamento de Ingeniería Metalúrgica

Evaluación de las principales características físico-químicas del pasivo ambiental “escombros lateríticos” para su posible uso industrial

*Tesis presentada en opción al título de
Ingeniería en Metalurgia y Materiales*

Autora: Yadileydis Roché González

Firma.....

Tutora: Dra.C María Caridad Ramírez Pérez

Firma.....

Dr.C José Alberto Pons Herrera

Firma.....

Declaración de autoridad

Yo: Yadileydis Roché González

Autora del Trabajo de Diploma Evaluación de las principales características físico-químicas del pasivo ambiental “escombros lateríticos” para su posible uso industrial declaro la propiedad intelectual al servicio del Instituto Minero Metalúrgico de Moa para que disponga de su uso cuando considere conveniente.

Yadileydis Roché González

Dra.C María Caridad Ramírez Pérez

Dr.C José Alberto Pons Herrera

Dedicatoria

Este trabajo va dedicado primeramente a mi mamá Elsa González Guilarte, y a mi papá Alfonso Roché Lara que son mis seres más queridos y que fueron mi motor impulsor para alcanzar esta meta, las cuales dedicaron todos estos años a mi cuidado y formación como profesional y a mi esposo Omar Bartelemi Marin por su comprensión todos estos años.

A toda mi familia...

Agradecimientos

Agradezco de forma sincera la colaboración de todos aquellos que han contribuido a la realización de este trabajo, en especial:

- ❖ A mis tutores María Caridad Ramírez Pérez, Beatriz Ramírez Serrano y José Alberto Pons Herrera por su ayuda incondicional.*
- ❖ A mi mamá Elsa González Guilarte y mi papá, Alfonso Roché Lara y mi esposo Omar Bartelemi Marin.*
- ❖ A mi tía Noemi y sus hijas Yuselis y Yurisleydis.*
- ❖ A todos mis compañeros de aula, Yaimaris, Dianiselis y a todos en general que de una u otra forma me ayudaron en mi formación como profesional y como persona. Agradezco*

Pensamiento

Tenemos que dar nuestros pasos de avance en sentido tecnológico, crear nuestra técnica, la técnica que son nuestros propios técnicos, suministrar la base para que avancemos nosotros por nuestra propia cuenta, para que no tengamos que recibir siempre técnicos de países amigos que vengan a enseñarnos cada cosa como hay que hacerla, para que después caminemos con nuestros propios pies.

Ernesto "Ché" Guevara

Resumen

Las actividades Minero Metalúrgicas que tiene lugar en la planta productora de Níquel “Comandante Pedro Soto Alba Moanickel S.A”, generan una gran cantidad de desechos sólidos, considerados muchos de ellos como pasivos ambientales (PAM), entre los que se encuentran los escombros lateríticos del yacimiento Camarioca Norte, Área 1. En el presente trabajo de investigación se realizó la caracterización físico - química y mineralógica del pasivo ambiental antes mencionado con el propósito de proponer usos a nivel industrial. Se emplearon los métodos de Espectrofotometría de Absorción Atómica, Volumetría, Gravimetría y Difracción de Rayos X, obteniéndose como resultados que: en estos escombros lateríticos, las partículas mayores de 0,4 mm son mayoritarias, con predominio de la fracción entre 0,4 y 1,4 mm. Las principales fases mineralógicas son la maghemita y la hematita, en correspondencia con el elevado contenido de óxido de hierro en el material que junto con el aluminio son los de mayores contenidos. En la comparación de los PAM estudiados con otros existentes en la región Mayarí-Moa, se establecieron regularidades física, química y mineralógica semejantes, que justifican que los escombros de Camarioca Norte, Área 1, puedan ser utilizados como materia prima importante para la siderurgia, especialmente en la descarburización de los aceros, para la producción de arrabio con níquel (NPI) y otros productos de uso industrial.

Palabras clave: Pasivos Ambientales Mineros, Escombros lateríticos, Maghemita, Hematita.

Abstract

The Metallurgical Mining activities that take place in the nickel production plant "Comandante Pedro Soto Alba Moanickel SA", generate a large amount of solid waste, considered many of them as environmental liabilities (PAM), among which are the lateritic debris of the Field of Camarioca Norte, Area 1. In the present research the physical - chemical and mineralogical characterization of the above - mentioned environmental liabilities was carried out with the purpose of proposing uses at industrial level. The methods of Atomic Absorption Spectrophotometry, Volumetry, Gravimetry and X-Ray Diffraction were employed, obtaining as results that: in these lateritic debris, particles larger than 0,4 mm are the majority, with a predominance of the fraction between 0,4 and 1,4 mm. The main mineralogical phases are maghemite and hematite, in correspondence with the high content of iron oxide in the material that together with the aluminum are those of greater contents. Similar physical, chemical and mineralogical regularities were established in the comparison of the MAPs studied with others in the Mayarí-Moa region, which justify that the debris of Camarioca Norte, Area 1, can be used as an important raw material for the steel industry, Especially in the decarburization of steels, for the production of nickel pig iron (NPI) and other industrial products.

Key words: Environmental liabilities Miners, Lateritic debris, Maghemite, Hematita.

Índice de Contenido

| | |
|---|----|
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO..... | 7 |
| 1.1 Antecedentes y estado actual de los escombros lateríticos en Cuba | 8 |
| 1.1.1 Pasivos Ambientales Mineros, su conceptualización..... | 8 |
| 1.1.2 Tratamiento a los escombros lateríticos cubanos..... | 11 |
| 1.2 Características generales del pasivo ambiental “escombros lateríticos” generados por la industria del níquel | 16 |
| 1.2.1 Escombros del Yacimiento Moa Occidental, Zona A | 16 |
| 1.2.1 Escombros del Yacimiento Atlantic..... | 18 |
| 1.2.2 Escombros del Yacimiento Punta Gorda..... | 18 |
| 1.2.3 Escombros de la Empresa Ferroníquel Minera S.A..... | 19 |
| 1.2.4 Escombros de Mina Martí, Nicaro..... | 19 |
| 1.2.5 Características generales de los escombros del Yacimiento Camarioca Norte, Áreas 1 y 2..... | 20 |
| 1.3 Conclusiones del Capítulo I..... | 22 |
| CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS | 23 |
| 2.1 Selección y preparación de las muestras..... | 23 |
| 2.1.1. Caracterización granulométrica | 25 |
| 2.2. Equipos y técnicas utilizados para la caracterización química y mineralógica. | 28 |
| 2.2.1 Caracterización química | 28 |
| 2.2.2 Caracterización mineralógica..... | 29 |

| | |
|---|----|
| Conclusiones del Capítulo II | 31 |
| CAPÍTULO III. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS..... | 32 |
| 3.1 Análisis de la caracterización de los escombros Yacimiento Camarioca Norte, Área 1..... | 32 |
| 3.1.1 Resultados de la caracterización granulométrica de dos muestras del Yacimiento Camarioca Norte, Áreas 1 y 2 | 32 |
| 3.1.2 Resultados de la caracterización química de los escombros del Área 1 del Yacimiento estudiado..... | 35 |
| 3.1.3 Resultados de la caracterización mineralógica de los escombros del Área 1 | 38 |
| 3.2 Comparación química entre los escombros lateríticos de diferentes yacimientos de la región Mayarí - Moa | 40 |
| Conclusiones del Capítulo III | 45 |
| CONCLUSIONES..... | 46 |
| RECOMENDACIONES | 48 |
| BIBLIOGRAFIA | 49 |
| ANEXOS | 52 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1.2 Composición química de las Áreas 1 y 2 del Yacimiento Camarioca Norte | 21 |
| Tabla 3.1. Resultado promedio del análisis granulométrico de la muestra de escombros del Área 1 utilizada en la investigación. | 32 |
| Tabla 3.2 Resultado promedio del análisis granulométrico de la muestra de escombros del Área 2 utilizada en la investigación. | 33 |
| Tabla 3.3 Principales fases mineralógicas en el escombros de Camarioca Norte, Área 1..... | 39 |
| Tabla 3.4 Composición química promedio (%) de los escombros lateríticos de diferentes yacimientos de la región Mayarí - Moa. | 41 |

Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1: Área donde se enmarca el objeto de estudio de la investigación. Tomado de (Ganesh Persaud, 2014)..... | 7 |
| Figura 2.1 Procedimiento para la homogeneización y cuarteo de la muestra inicial. | 23 |
| Figura 2.2 Procedimiento del cuarteo manual realizado a los escombros a) del área 1 b) del área 2, muestra que tratada granulométricamente a modo de comparación con la muestra del área 1. | 24 |
| Figura 2.3 Esquema para la selección de las muestras utilizado en la investigación..... | 25 |
| Figura 2.4. Juego de tamices utilizados en el análisis granulométrico. | 26 |
| Figura 2.5 Esquema utilizado en el análisis granulométrico de las muestras..... | 27 |
| Figura 2.6 Equipo de Espectroscopia de Absorción Atómica. Tomado de (Araque Tineo, 2012) | 29 |
| Figura 2.7 Balanza utilizada para el pesaje de las muestras..... | 30 |
| Figura 3.1. Característica granulométrica de los escombros del Yacimiento Camarioca Norte, Área 1..... | 34 |
| Figura 3.2. Característica granulométrica de los escombros del Yacimiento Camarioca Norte, Área 2..... | 34 |
| Figura 3.3. Contenido de los elementos mayoritarios en las fracciones granulométricas..... | 36 |
| Figura 3.4. Contenido de los elementos minoritarios en las fracciones granulométricas..... | 37 |
| Figura 3.5 Difractograma representativo de una muestra de escombros del yacimiento Camarioca Norte, Área 1. M: maghemita, H: hematita, MgCr: magnesiocromita, Cr: cromita..... | 40 |

| | |
|--|----|
| Figura 3.5. Composición química promedio de los óxidos (Fe_2O_3 y Al_2O_3) en los diferentes yacimientos de la región Mayarí – Moa. | 42 |
| Figura 3.6. Composición química promedio de los óxidos (SiO_2 , NiO , y Cr_2O_3) en los diferentes yacimientos de la región Mayarí – Moa..... | 43 |
| Figura 3.7. Composición química promedio de los óxidos (MnO , CoO y MgO) en los diferentes yacimientos de la región Mayarí - Moa | 44 |

INTRODUCCIÓN

Cuba es hoy uno de los diez principales productores mundiales de níquel y cobalto; las mayores reservas se encuentran localizadas fundamentalmente en la región de Mayarí – Moa perteneciente a la provincia de Holguín, ubicada en la parte oriental de la Isla. Al noroeste de esta provincia están situadas actualmente las dos industrias metalúrgicas que procesan los minerales lateríticos, una de ellas con la tecnología carbonato amoniacal Empresa “Comandante Ernesto Ché Guevara” y la otra Empresa, “Comandante Pedro Soto Alba Moanickel S.A” con la tecnología ácida a presión, que recupera el 95 % de níquel y algo más del 90 % de cobalto.

La Empresa “Comandante Pedro Soto Alba” logró la primera producción de concentrado de sulfuro de níquel más cobalto el 8 de noviembre de 1959; fue construida por la compañía Moa Bay Mining, subsidiaria de Freeport Sulfur, y en 1960 pasó a manos del gobierno cubano. En 1994 tuvo lugar la formación de una empresa mixta con Canadá, con una tecnología considerada a nivel internacional como la más eficiente en la recuperación de níquel. Fue diseñada para recuperar anualmente 22 mil toneladas de níquel y 2 mil de cobalto, en forma de sulfuro concentrado que serían procesadas en una refinería especialmente construida en Port Nickel, Louisiana, para la extracción del níquel y el cobalto en forma metálica, con la limitante de solo procesar la capa limonítica del depósito minero, que contiene porcentajes de magnesio inferior al 1 %; valor exigido para evitar el sobre consumo del agente lixivante (ácido sulfúrico). Existen otras capas minerales no explotadas por su alto contenido de magnesio (capa serpentínica) o por su baja ley de níquel (laterita fuera de balance).

Según ((Palacios Rodríguez & García Peña, 2013)) la minería en las empresas cubanas productoras de níquel se realiza para garantizar un contenido mínimo de 0,9 % de níquel en la mena alimentada, sin tomar en consideración los valores de cobalto. Las menas con valores de níquel inferiores al contenido mínimo prefijado no se emplean en la producción de este metal por no cumplir los requisitos en

cuanto a contenido, para ser incorporados a las plantas metalúrgicas. Estas, desde el punto de vista industrial, constituyen las lateritas fuera de balance, capas superiores de los yacimientos inmediatamente por debajo de la capa vegetal, a las que se les denomina comúnmente “escombros lateríticos” que por no ser utilizados por las industrias son considerados materiales de desechos.

En las últimas décadas, muchas son las investigaciones encaminadas a dar solución a las grandes acumulaciones de desechos sólidos, líquidos y gaseosos que generaron, y aun generan, las grandes industrias de metales y materiales. En este sentido, los países de Iberoamérica son líderes e inician sus trabajos intentando dar una definición acertada a los desechos acumulados por las minas cerradas o abandonadas, a los que se ha decidido agrupar como pasivos ambientales mineros (PAM). Entre los investigadores que trabajan el tema se pueden citar a; (Arranz González & Alberruche del Campo, 2008) (Moreno & Chaparro, 2008); (ASGMI, 2010); (Alberruche, Arranz, Rodríguez, Vadillo, & Fernández, 2014); (SNMP, 2004); (García, 2013). Todos coinciden en que, el término pasivos ambientales mineros, empleado comúnmente para referirse a la minería abandonada en Iberoamérica, hace referencia a los impactos ambientales generados por las operaciones mineras abandonadas, con o sin dueño u operador identificables, y en donde no se haya realizado un cierre de minas reglamentado y certificado por la autoridad competente (Moreno & Chaparro, 2008). Aunque cada vez más comienza a existir cierto consenso en considerar el riesgo como un factor definitorio, de tal forma que sólo se consideran pasivos ambientales mineros (PAM) a aquellos elementos asociados a actividades mineras abandonadas que representen un riesgo potencial permanente sobre la salud y seguridad de las personas, la biodiversidad y el medio ambiente.

En Moa, Cuba, se ha decidido ampliar este concepto, e incluir como pasivos ambientales mineros, a los desechos (escombros lateríticos) de la minería de aquellos yacimientos que ya no se encuentran en explotación; esto en el marco del Proyecto de Rehabilitación de Pasivos Ambientales Minero Metalúrgicos

sólidos (PAMMs), que se desarrolla hasta el 2018 y del cual la autora de este trabajo es miembro.

Como resultado de la actividad minera desarrollada, en la Empresa “Comandante Pedro Soto Alba Moanickel S.A” se genera una gran cantidad de estos materiales de desechos (PAM) debido a que solo se utiliza la capa limonítica, por sus contenidos de níquel y cobalto y el bajo porcentaje de magnesio, este último, alto consumidor de ácido sulfúrico durante la etapa de lixiviación. Las lateritas fuera de balance, por el bajo contenido de estos metales no es procesada, generándose un problema de almacenamiento en condiciones no adecuadas de estabilidad, seguridad e integración en el entorno, además provoca la contaminación de los ríos y el mar por el arrastre de estos materiales (sedimentos finos) aumentando la turbiedad del agua y con ello evita la entrada de la luz.

Según (Palacios Rodríguez & García Peña, 2013), estos desechos son almacenados en depósitos llamados escombreras, que son grandes acumulaciones de esta materia prima y que actualmente alcanzan volúmenes de más de 90×10^6 toneladas. Un caso particular lo constituyen los escombros de Empresa “Comandante Pedro Soto Alba Moanickel S.A” considerados una mena de hierro con apreciables contenidos de níquel, cobalto y cromo que la hacen una importante fuente de materia prima para la recuperación de los principales componentes en ella concentrados.

Por las grandes acumulaciones de estos pasivos y los problemas que ocasionan al hombre y al medio ambiente, estos han sido objeto de varias investigaciones dirigidas por autores como: (Palacios Rodríguez, 2001), (Reyes González, 2014), (Ramírez Pérez, 2010), (Ganesh Persaud, 2014), (Ortiz Bárcenas, 2015), en los que, a partir de una caracterización física, química, mineralógica y térmica, definen sus posibles usos. (Palacios Rodríguez, 2001) demostró la posibilidad de extracción de cobalto de los escombros lateríticos a partir de la lixiviación con ácido sulfúrico con 98 % de pureza y utilizando como agente reductor azufre elemental. Mientras que (Reyes González, 2014) empleó el mismo método para recuperar el cobalto pero utilizó como agente reductor, el sulfato de hierro (II).

Por otra parte, (Ramírez Pérez, 2010) demostró la efectividad de utilizar los escombros lateríticos de Zona A, yacimiento Moa Occidental, perteneciente a la Empresa “Comandante Pedro Soto Alba Moanickel S.A”, en la descarburización del acero ACI HK-40.

(Ortiz Bárcenas, 2015), a partir de la caracterización química, física, mineralógica y térmica de los escombros lateríticos del yacimiento Mina Martí, de Nicaro, determina el mecanismo, el modelo y los parámetros cinéticos del proceso de reducción no isotérmico con carbón, de los escombros lateríticos del mencionado yacimiento, en la obtención de un producto prerreducido para la producción de arrabio con níquel (Nickel Pig Iron).

Con el objetivo de establecer una metodología que permita inventariar, clasificar y definir los posibles usos de estos recursos minerales, (Ganesh Persaud, 2014) realizó un inventario de los PAMs generados por las industrias del níquel en Moa. Los resultados constituyen un precedente a considerar en trabajos futuros para la toma de decisiones y las propuestas de usos de estos recursos no utilizados.

Aunque se han desarrollado múltiples investigaciones sobre los escombros lateríticos, no se ha profundizado en las características físico – químicas y mineralógicas de todos los yacimientos de la región de Moa, como una forma de ampliación del conocimiento de los mismos para proponer usos a nivel industrial. Un ejemplo lo constituyen los escombros del yacimiento Camarioca Norte, Área 1, perteneciente a la empresa “Comandante Pedro Soto Alba Moanickel S.A”.

Por lo antes expuesto, se define como el **Problema** de esta investigación: El insuficiente conocimiento de las características físico- químicas y mineralógicas de los escombros del Yacimiento Camarioca Norte, Área 1, de la Empresa “Comandante Pedro Soto Alba Moanickel S.A”, impide definir sus posibles usos industriales.

El **objeto de la investigación** lo constituyen los escombros del Yacimiento Camarioca Norte, Área 1, de la Empresa “Comandante Pedro Soto Alba Moanickel S.A”.

Mientras que el **campo de acción**, las características físico - químicas y mineralógicas de los escombros del Yacimiento Camarioca Norte, Área 1, de la Empresa “Comandante Pedro Soto Alba Moanickel S.A”

Como **Hipótesis** se plantea: Con la determinación de las características físico - químicas y mineralógicas de los escombros del Yacimiento Camarioca Norte, Área 1, de la Empresa “Comandante Pedro Soto Alba Moanickel S.A”, se podrán definir sus posibles usos.

El **Objetivo general**: Determinar las características físico - químicas y mineralógicas de los escombros del Yacimiento Camarioca Norte, Área 1, de la Empresa “Comandante Pedro Soto Alba Moanickel S.A”.

Objetivos específicos:

1. Determinar las características granulométricas de los escombros del yacimiento Camarioca Norte, Área 1, de la Empresa “Comandante Pedro Soto Alba” Moanickel SA”.
2. Determinar las características químicas y mineralógicas de los escombros del mencionado yacimiento.
3. Comparar las características físico – químicas y mineralógicas de los escombros Camarioca Norte, Área 1, de la Empresa “Comandante Pedro Soto Alba Moanickel SA” con otros pertenecientes a las industrias del níquel de la región Mayarí - Moa.
4. Proponer los posibles usos de los escombros estudiados a partir de sus características físico – químicas y mineralógicas.

Como **Tareas de investigación** las siguientes:

1. Búsqueda y análisis de la bibliografía sobre los escombros lateríticos, y en particular, los de la Empresa “Comandante Pedro Soto Alba Moanickel SA”.
2. Análisis de los antecedentes y estado actual sobre los pasivos ambientales mineros (PAM).
3. Selección y preparación de la muestra representativa del objeto de la investigación.
4. Caracterizar, desde el punto de vista granulométrico, químico y mineralógico, el objeto de la investigación a partir de la selección de diferentes técnicas analíticas y experimentales.

Métodos empleados en la investigación

1. Análisis y síntesis: este método fue de gran importancia para la realización del capítulo 1 marco teórico, la determinación de los aspectos fundamentales relacionados con el objetivo de la investigación y elaboración de conclusiones y recomendaciones.
2. Hipotético-deductivo: para la formulación del problema e hipótesis de investigación.
3. Análisis histórico y lógico: para elaborar el marco teórico y diagnosticar la situación actual del objeto de estudio.
4. Método dialéctico- materialista: empleado como método general, que se concreta en los demás métodos empleados, para la solución de la contradicción identificada en la investigación.

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO

La búsqueda de alternativas que posibiliten la utilización de los residuos de la minería y de los procesos tecnológicos del níquel, sin afectar el medio ambiente, debe significar un reto a los investigadores, para lo cual es necesario fundamentar los problemas científicos existentes, a partir de las contribuciones de la bibliografía existente, (Ganesh Persaud, 2014).

La literatura recoge importantes resultados en el campo de la caracterización de los escombros lateríticos. El área de estudio de esta investigación comprende el yacimiento Camarioca Norte, Área 1 perteneciente a la Empresa “Comandante Pedro Soto Alba Moanickel S.A”, en Moa (figura 1)

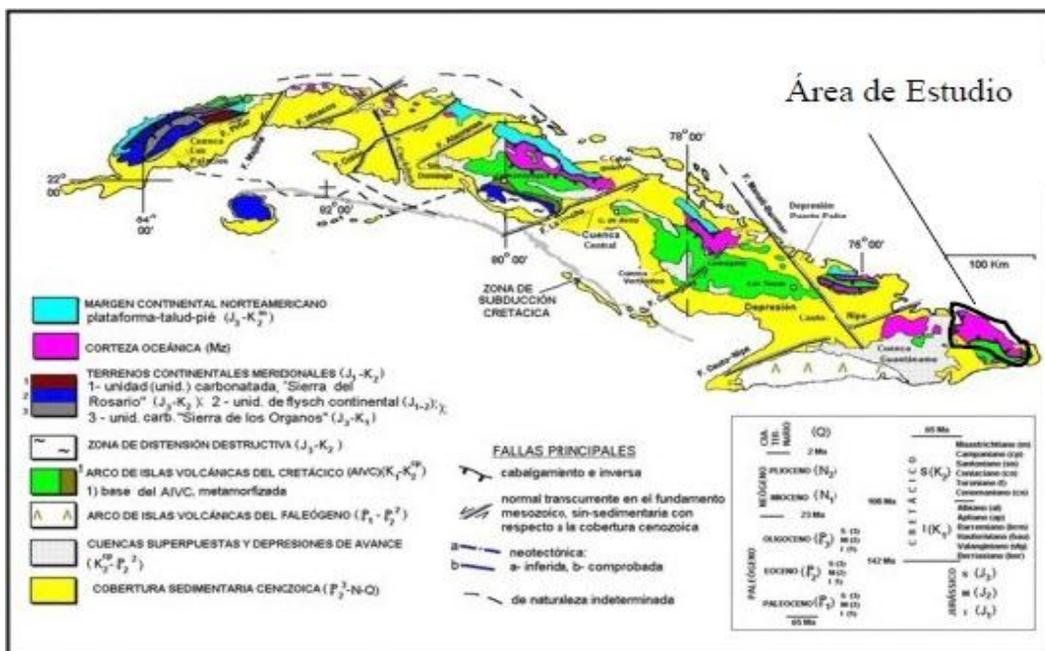


Figura 1: Área donde se enmarca el objeto de estudio de la investigación. Tomado de (Ganesh Persaud, 2014).

A continuación se establece el estado del arte en el tratamiento de los pasivos ambientales minero- metalúrgicos sólidos, generados por la industria del Níquel en Moa y las perspectivas para su utilización.

1.1 Antecedentes y estado actual de los escombros lateríticos en Cuba

La mayoría de las industrias o empresas de países de tercer mundo no tienen en cuenta el nivel de destrucción que infligen los rechazos y/o residuales industriales hacia el medio ambiente, debido a su enfoque constante del rendimiento de la planta y/o la mina. Estos desechos, si no son tratados se convierten en pasivos ambientales.

Las capas superiores de los yacimientos, inmediatamente por debajo de la capa vegetal, se les denomina comúnmente “escombros lateríticos”, que por no ser utilizados por las industrias metalúrgicas, son considerados materiales de desechos (Palacios Rodríguez, 2001), (Ramírez Pérez 2010). Los escombros lateríticos pertenecientes a Yacimientos que ya no están en explotación pueden ser considerados como pasivos ambientales, a partir de las definiciones que al respecto dan muchos países en el mundo, principalmente países de América Latina, España y Cuba. Por ello resulta de interés ampliar el conocimiento sobre los pasivos ambientales, conocer cómo se conceptualizan y la forma de tratarlos.

1.1.1 Pasivos Ambientales Mineros, su conceptualización

Muchas son las investigaciones encaminadas a dar solución a las grandes acumulaciones de desechos sólidos, líquidos y gaseosos que generaron, y aun generan, las grandes industrias de metales y materiales. En este sentido, los países de Iberoamérica son líderes e inician sus trabajos intentando dar una definición acertada a los desechos acumulados por las minas cerradas o abandonadas, a los que se decidió denominar pasivos ambientales mineros (PAM) (Arranz González & Alberruche del Campo, 2008); (Moreno & Chaparro, 2008); (ASGMI, 2010); (Alberruche, Arranz, Rodríguez, Vadillo & Fernández ,2014); (SNMP, 2004); (García, 2013), entre otros.

La Sociedad Nacional de Minería Petróleo y Energía de Perú (SNMP, 2004) considera que un pasivo ambiental podría definirse como aquella situación ambiental que, generada por el hombre en el pasado y con deterioro progresivo en

el tiempo, representa actualmente un riesgo al ambiente y la calidad de vida de las personas. Un pasivo ambiental puede afectar la calidad del agua, el suelo, el aire, y los ecosistemas deteriorándolos. Estos han sido generalmente producidos por las actividades del hombre, ya sea por desconocimiento, negligencia, o por accidentes, a lo largo de su historia.

Considera además, que los pasivos ambientales son complejos y complicados para su recuperación, debido a las características físico - químicas, los elevados costos para su control y rehabilitación, la falta de identificación de responsables y en otros casos por el incipiente desarrollo tecnológico para su recuperación.

La explotación de yacimientos mineros en Iberoamérica es una actividad que data de hace varios siglos, siendo milenaria en la Península Ibérica (ASGMI, 2010). En su origen se utilizaban métodos rudimentarios para extraer los minerales desde ricas vetas de oro, plata y cobre. Con el desarrollo industrial los procesos se fueron tecnificando hasta llegar a los sofisticados procedimientos que se aplican hoy en día.

Como consecuencia de esta actividad minera, y también minero-industrial, en la mayoría de los países quedaron numerosas minas e instalaciones en estado de abandono sin que se hayan sometido a un proceso adecuado de cierre, lo que ha significado que en la actualidad haya numerosos lugares en los que se presentan escenarios de riesgo para la seguridad y salud de las personas y para el medio ambiente.

La Asociación de Servicios de Geología y Minería Iberoamericanos (ASGMI, 2010) considera necesario, o cuando menos aconsejable, que se tomen medidas para enfrentar esta amenaza para la salud y el medio ambiente, dando pasos para la solución o mitigación del riesgo, desde el inventariado y caracterización de los sitios mineros abandonados, pasando por la evaluación del riesgo que entrañan, hasta la propuesta de medidas de remediación o, al menos, mitigación de tales amenazas.

Esta Asociación conceptualiza a los PAM como aquellos elementos, tales como instalaciones, edificaciones, superficies afectadas por vertidos, depósitos de residuos mineros, tramos de cauces perturbados, áreas de talleres, parques de maquinaria o parques de mineral que, estando en la actualidad en entornos de minas abandonadas o paralizadas, constituyen un riesgo potencial permanente para la salud y seguridad de la población, para la biodiversidad y para el medio ambiente.

Asimismo (Moreno & Chaparro 2008),(Arranz González y Alberruche del Campo 2008), (Alberruche, Arranz, Rodríguez, Vadillo & Fernández ,2014) coinciden en que, el término pasivos ambientales mineros, empleado comúnmente para referirse a la minería abandonada en Iberoamérica, hace referencia a los impactos ambientales generados por las operaciones mineras abandonadas, con o sin dueño u operador identificables, y en donde no se hayan realizado un cierre de minas reglamentado y certificado por la autoridad competente. Aunque cada vez más comienza a existir cierto consenso en considerar el riesgo como un factor definitorio, de tal forma que sólo se consideran PAM a aquellos elementos asociados a actividades mineras abandonadas que representen un riesgo potencial permanente sobre la salud y seguridad de las personas, la biodiversidad y el medio ambiente.

A lo largo de la historia de la minería en Cuba, la actividad extractiva de yacimientos no metálicos y metálicos ha sido y es intensa, fundamentalmente las referidas al níquel. Los yacimientos que ya no se encuentran activos por razones técnicas, económicas o sociales, agrupan los PAM y constituyen huellas dejadas en el entorno que reclaman la toma de medidas para su rehabilitación.

En el IV Congreso Cubano de Minería (Ponce Seoane & Díaz Comesañas, 2011) plantearon que los PAM son obligaciones financieras para la reparación de los daños causados al entorno por la actividad minera e impactos ambientales provocados por ella, así como por el incumplimiento de la legislación minera y ambiental al respecto existente en Cuba.

A los PAM se le debe prestar gran atención pues ellos no se restringen a lo que sucede dentro de los límites de la propiedad o concesión minera activa en cuestión, sino que los sobrepasa y mientras más pronto se identifiquen es mejor ya que muchos pasivos son procesos activos. Así por ejemplo, la emisión de polvo o partículas, propia de la minería, o la contaminación de aguas superficiales y/o subterráneas, podría estar dañando la salud de comunidades vecinas y zonas aledañas.

Los PAM pueden afectar la calidad del agua, el suelo y los ecosistemas deteriorándolos. Estos pueden ser producidos por las actividades del hombre, ya sea por desconocimiento, negligencia, o por accidentes, a lo largo de su historia.

(Cedrón, 2013) refiere que las operaciones mineras tanto superficiales como subterráneas, producen gran cantidad de material de desecho rocoso conocido como escombros o desmonte, a partir de las rocas estériles sin valor económico que hay que extraer para permitir el minado de la mena o mineral con valor económico. Si bien la minería subterránea suele producir cantidades menores pero apreciables, en ambos casos es común el depositar este desmonte en áreas superficiales en rumas que constituyen las llamadas escombreras.

Estas rocas de desmonte poseen características físicas y químicas que hay que tomar en consideración al diseñar su lugar de emplazamiento y la gestión posterior de la escombrera.

De muchos pasivos ambientales minero - metalúrgicos sólidos (PAMMs), generados por la industria del níquel en Cuba, se conocen sus principales características físicas y químicas y posibles usos, como resultado de un gran número de investigaciones desarrolladas con diversos propósitos. A continuación se muestra un análisis del tratamiento dado a los escombros lateríticos de la región Mayarí – Moa.

1.1.2 Tratamiento a los escombros lateríticos cubanos

La caracterización de los escombros lateríticos cubanos se ha realizado por varios investigadores, destacándose los trabajos de (Swardjo, 1969), sus investigaciones

estuvieron dirigidas, fundamentalmente, al estudio de los yacimientos níquelíferos de Pinares de Mayarí y Martí con vista a la obtención de concentrados de hierro para la producción de arrabio y aceros. En la composición mineralógica de los ocres predominan la goethita, la aluminogoethita, la maghemita, la hematita y la hidargirita coincidiendo estos con los trabajos desarrollados por (Rojas, 1995) donde ellos demostraron que los principales minerales portadores de níquel y de cobalto en el corte laterítico del yacimiento Moa son la goethita y hidargirita. Todos estos autores caracterizan a los escombros como una mena de hierro con contenidos altos de níquel, cobalto y cromo.

Los trabajos de (Palacios Rodríguez, 2001), (Palacios Rodríguez & García Peña, 2013), demostraron las posibilidades de extracción de cobalto de los escombros lateríticos a partir de la lixiviación ácida. Esta investigación tuvo como propósito determinar el efecto de los principales parámetros tecnológicos y el modelo cinético del proceso de lixiviación ácida para la extracción de cobalto. (Palacios Rodríguez & García Peña, 2013) realizaron la experimentación a escala de laboratorio con una muestra tomada en el yacimiento Yamanigüey perteneciente a la mina de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”. La composición química promedio (en %) de la muestra de escombro es de 0,64 de Ni; 0,09 de Co; 0,77 de Mn; 45,5 de Fe; 7,6 de Al; 1,93 de Cr; 0,55 de Mg; 0,02 de Zn; 0,06 de Cu y 3,31 de SiO₂. Se utilizó como agente lixivante ácido sulfúrico con 98 % de pureza y como agente reductor azufre elemental con alta calidad industrial, obteniéndose como resultado que, con el aumento del valor de temperatura, reactivo lixivante, relación líquido - sólido, contenido de agente reductor, granulometría, Reynold y con la disminución del tamaño de partículas existe incremento en la extracción de cobalto. Las extracciones de cobalto a temperatura de 180 °C promedia valores de 90 % mientras que a temperatura de 220 °C es superior con un valor promedio de 93 % durante los primeros 30 minutos.

(Reyes González, 2014) demostró la efectividad que tiene la extracción de cobalto por lixiviación de los escombros lateríticos de los yacimientos pertenecientes a la Empresa “Comandante Pedro Soto Alba Moanickel S.A” en tinas de percolación. A

diferencia de (Palacios Rodríguez & García Peña, 2013) utilizó como agente reductor el sulfato de hierro (II). Para lograr este objetivo se utilizó un diseño de experimentación del tipo factorial completo, donde se estudiaron como variables independientes: la concentración inicial de ácido sulfúrico y la concentración inicial de sulfato de hierro (II). Esta última tiene gran efecto en el proceso de lixiviación porque medida que aumenta la concentración de sulfato de hierro (II) aumenta la extracción de cobalto en el transcurso del tiempo, mediante los experimentos realizados se observó que a los 180 min se obtiene la mayor recuperación de cobalto de 0,101 g/L, esto demuestra que la presencia del sulfato de hierro (II) como agente reductor tiene una influencia directa sobre el cobalto, mientras mayor es la concentración inicial del agente reductor mayor es la extracción de cobalto lograda, lo mismo ocurre con la concentración de ácido sulfúrico al aumentar esta se obtiene una mayor extracción de cobalto.

(Ramírez Pérez, 2010) en su tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas, demostró la efectividad del uso de los escombros lateríticos de Zona A, yacimiento Moa Occidental perteneciente a la fábrica Comandante Pedro Sotto Alba, en el proceso de descarburización del acero ACI HK-40, fundamentado en la caracterización química, física, mineralógica y térmica de esos escombros. Obtuvo como resultado, que estos están compuesto fundamentalmente por óxido de hierro coincidiendo con Swardjo, W, (1969) y Ostroumov et al, 1985 que caracterizaron los residuos como menas de hierro con alto contenido de níquel, cobalto y cromo. El análisis granulométrico realizado demostró que el contenido de óxido de hierro no varía bruscamente con el tamaño de las partículas, en las mayores de dos milímetros este se incrementa entre 73,16 y 77,18 %, el aluminio es el segundo de los elementos mayoritarios en el escombros, con un contenido que se incrementa en la medida que disminuye el diámetro de las partículas y llega a alcanzar el 10 %. El estudio termodinámico indicó que el óxido de hierro (II), producto de la reducción del óxido de hierro (III) contenido en el escombros, es el compuesto que garantiza la oxidación del carbono y otras impurezas en el baño metálico la cual fundamenta su utilización en la descarburización del acero ACI HK-40 y establece el procedimiento a escala industrial para partículas mayores de

dos milímetros. Con la utilización de estos residuos se aprovechará más del 35 % de los escombros depositados en las escombreras de Zona A.

(Ortiz Bárcenas, 2015) en su Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas, al igual que (Ramírez Pérez, 2010), realizó la caracterización química, física, mineralógica y térmica de los escombros lateríticos pero del yacimiento Mina Martí de Nicaro, demostrando que los escombros lateríticos de Mina Martí están compuestos por aglomerados hematíticos, goethitas, serpentinas, espinelas cromíferas y óxidos de hierro (68,50 %), que lo define como un mena de hierro, de compleja composición, lo que fundamenta su utilización como materia prima para la obtención de un arrabio con níquel, utilizable en la industria siderúrgica. A través de esta investigación, Ortiz confirmó las predicciones termodinámicas del mecanismo del proceso de reducción de los óxidos de hierro contenido en los escombros lateríticos de Mina Martí, utilizando carbón como reductor en condiciones no isotérmicas.

(Ganesh Persaud, 2014) realizó un inventario de los pasivos ambientales minero-metalúrgicos sólidos (PAMMs), generados por las industrias del níquel en Moa, estas son la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, la Empresa “Pedro Soto Alba Moanickel S.A” y la Empresa Ferroníquel Minera S.A. (FEMSA). Como resultado de esta investigación se diseñó y estableció una metodología que permite inventariar, clasificar y definir los posibles usos de estos recursos minerales, se logró la elaboración de una ficha técnica de cada uno de los pasivos ambientales sólidos de las diferentes empresas, lo que contribuye al incremento del conocimiento de los PAMMs.

(Durán Suárez, 2015) realiza un inventario de las escombreras existentes en los yacimientos Punta Gorda, Yagrumaje Sur y Yagrumaje Norte, pertenecientes a la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” de Moa, que permite definir el volumen y los posibles usos industriales. Con la investigación realizada se estima una representatividad total de escombros de 47 millones de toneladas, equivalente a 32 millones de m³ con tonelaje promedio de hierro igual a 20 millones de

toneladas, níquel igual a 263 000 toneladas y cobalto igual a 23 000 toneladas. Considerando los altos contenidos de hierro presentes en estas escombreras se pudo concluir que los mismos pueden ser utilizables en la obtención de productos siderúrgicos.

(Ferreiro Guerrero & Santiesteban Domínguez, 2006) a partir de la composición química y mineralógica de los escombros del yacimiento Atlantic de Moa, realizó un estudio de molienda para determinar en qué tiempo se obtiene el 80 % de la clase $-74 \mu\text{m}$, el contenido de níquel varía entre 0,6 y 0,9 %, los cobalto 0,05 y 0,07 %, óxido de hierro de 60 %, de óxido de aluminio de 10 %, de óxido de cromo de 2,3 %, óxido de silicio de 3 % y óxido de magnesio 0,5 %. En la composición mineralógica de las lateritas y los ocreos presentes en las escombreras predominan la goethita, la alumogoethita, magnetita e hidrargilita. La clase $-74 \mu\text{m}$ se considera óptima ya que la superficie de contacto entre las partículas y el agente lixivante es grande, sin embargo, no es recomendable continuar moliendo para obtener clases de tamaño más pequeñas, debido a que entonces se hace muy difícil cementar las partículas sólidas posteriormente; esto es muy importante para evitar una sobremolienda que trae consigo efectos negativos en la economía, si tenemos en cuenta que los procesos de moliendas son muy caros debido al alto consumo de energía eléctrica. Los resultados que arroja este trabajo es que al aumentar el tiempo de molienda con carga de bolas y mineral constante, así como la relación líquido sólido, aumenta la molibilidad de las partículas minerales, demostrándose experimentalmente que para 20 min de molienda se obtiene un 81,25 % de la clase menor de $74 \mu\text{m}$. Basado en estos resultados y en la inferencia estadística realizada con las ecuaciones matemáticas, se fijó el tiempo óptimo, 17 min, de molienda (80 % de la clase $-74 \mu\text{m}$) de los escombros lateríticos para el posterior proceso de lixiviación bacteriana o biolixiviación, donde se aprovecha la actividad metabólica de diferentes microorganismos para la degradación de los minerales y la recuperación de valores metálicos.

En resumen:

- ✓ Es posible recuperar el cobalto presente en los escombros lateríticos si se utiliza la lixiviación con ácido sulfúrico y se emplea como reductores el azufre o el sulfato de hierro (II).
- ✓ Está demostrada la posibilidad de utilizarlos como oxidantes del carbono y otros elementos, durante la descarburización de los aceros en horno de arco eléctrico y aprovechar más del 35 % de las partículas mayores de dos milímetros.
- ✓ Por sus características físicas y térmicas y el contenido de hierro como elemento mayoritario, coincidentes con los escombros lateríticos de Mina Martí, en Nicaro, los escombros lateríticos de Moa pueden constituir materia prima importante para la siderurgia, especialmente para la producción de arrabio con níquel.
- ✓ Por los contenidos de hierro y volúmenes acumulados, pueden ser utilizables en la obtención de productos siderúrgicos.
- ✓ Los estudios de molienda realizados indican que, considerando constantes la carga de bolas y mineral, así como la relación líquido – sólido, el tiempo óptimo de molienda para obtener el 80 % de la clase menor de 74 μm es 17 minutos, previo a la biolixiviación como una propuesta para recuperar valores metálicos de las lateritas.

1.2 Características generales del pasivo ambiental “escombros lateríticos” generados por la industria del níquel

Se resumen las principales características de los escombros de diferentes yacimientos pertenecientes a las empresas metalúrgicas de Moa y de los de Mina Martí en Nicaro, Mayarí.

1.2.1 Escombros del Yacimiento Moa Occidental, Zona A

La empresa “Comandante Pedro Sotto Alba” procesa anualmente alrededor de 4,0 MM toneladas de mineral, de diferentes frentes de explotación conformando mezclas de los yacimientos Moa Oriental y Moa Occidental. Su producción final

promedia las 28 000 toneladas al año, utilizando para el procesamiento de sus minerales la tecnología de lixiviación ácida a presión. Los pasivos ambientales de la minería fueron identificados como: concreciones ferruginosas o escombros lateríticos cuyas características se muestran a continuación.

Los escombros de Moa Occidental, Zona A, de la Empresa “Comandante Pedro Soto Alba Moanickel S.A” están compuestos fundamentalmente por óxidos de hierro, y aunque su contenido no varía bruscamente con el tamaño de las partículas, en las mayores de dos milímetros este se incrementa entre 73,16 y 77,18 % (Ramírez Pérez, 2010). En lo referente al aluminio, es el segundo de los elementos mayoritarios en el escombros, con un contenido que se incrementa en la medida que disminuye el diámetro de las partículas y llega a alcanzar el 10 % (19 % como óxido) en las menores de 0,83 mm. Los valores más bajos de este elemento, en el orden de 5 %, se reportan en las partículas mayores de 4 mm.

Los estudios mineralógicos, por su parte, confirman que las fases principales en las concreciones ferruginosas son los óxidos de hierro, representados fundamentalmente, por maghemita ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) y goethita ($\alpha\text{-FeO.OH}$). El predominio de esas fases está en correspondencia con la presencia mayoritaria del hierro y su amplia distribución en el perfil laterítico de esta zona. Las principales fases reportadas en las fracciones granulométricas se reflejan en la tabla 1.1.

Tabla 1.1 Fases mineralógicas en las fracciones granulométricas de los escombros del Yacimiento Moa Occidental, Zona A.

| Fracciones | Contenido de las fases mineralógicas (%) | | | | | |
|-----------------|--|-----------|----------|--------|-----------|----------|
| Granulométricas | | | | | | |
| (mm) | Goethita | Maghemita | Gibbsita | Cuarzo | Magnetita | Hematita |
| +10 | 17,80 | 69,40 | 9,30 | 3,49 | - | - |
| -10+8 | 12,54 | 77,60 | 8,42 | - | - | 1,40 |
| -8+6 | 13,90 | 74,50 | 9,60 | - | - | 2,06 |
| -6+4 | 12,54 | 71,50 | 9,51 | - | - | 1,48 |
| -4+2 | 20,60 | 67,40 | 10,10 | - | - | 1,87 |
| -2+0,83 | 27,90 | 10,80 | 16,57 | - | 37,00 | 7,71 |
| -0,83 | 31,60 | 43,13 | 16,37 | - | - | 8,86 |

Fuente: (Ramírez Pérez, 2010).

1.2.1 Escombros del Yacimiento Atlantic

En este yacimiento, el contenido de níquel varía entre 0,6 y 0,9 %, el cobalto entre 0,05 y 0,07 %, el óxido de hierro como promedio tiene un contenido de 60 %, el óxido de aluminio de un 10 %, el óxido de cromo 2,3 %, el óxido de silicio de 3 % y de óxido de magnesio el contenido alrededor de 0,5 %. Desde el punto de vista mineralógico, en la composición de las lateritas y los ocre presentes en las escombreras predominan la goethita, la alumogoethita, magnetita e hidrargilita. En cuanto a la granulometría, el 50 % de estos escombros lo constituyen las partículas mayores de 1,25 mm, es decir, una materia prima con predominio de partículas gruesas (Ferreiro Guerrero & Santiesteban Domínguez, 2006).

1.2.2 Escombros del Yacimiento Punta Gorda

El escombro vertido en las escombreras de este yacimiento se caracteriza por ser un material arcilloso-granuloso representado por concreciones ferruginosas en forma de guisantes, (Durán Suárez 2015), el contenido de hierro

está representado por un 43,67 %, mientras que el contenido de óxido de silicio es de 2,638 %; el contenido de óxido de magnesio de 0,971 %, el contenido de cobalto de 0,053 % y el de níquel 0,578 %. Las características mineralógicas de estos pasivos están representadas por la presencia de goethita, como fase principal y de gibbsita, espinelas y asbolanas como fases secundarias.

1.2.3 Escombros de la Empresa Ferroníquel Minera S.A

Una característica fundamental de la Empresa Ferroníquel Minera S.A es que, su concesión minera es sobre los minerales que no utilizó la Empresa “Comandante Pedro Soto Alba”, como son la coraza feruginosa, (Ganesh Persaud 2014), la composición química de estos escombros destaca el alto contenido de hierro hasta un 72 % de este óxido, el óxido de silicio de 3,2 %, el contenido de cromo de 3 % y el óxido de magnesio de 1%.

1.2.4 Escombros de Mina Martí, Nicaro

En la caracterización química realizada a los escombros lateríticos de Mina Martí, en Nicaro, se evidencia que el níquel posee un valor promedio de 0,80 %, que lo identifica como un mineral atractivo para su procesamiento como materia prima para la producción de arrabio con níquel Ortiz (2015). El contenido de hierro se incrementa a partir de las fracciones desde + 0,83 mm hasta + 6,30 mm; esta característica es positiva para su posterior utilización en el proceso de aglomeración debido a que contribuye a la formación de granos primarios que disminuyen la formación de polvos. Los contenidos de los óxidos de aluminio y silicio son de 14,0 %, por tanto se trata de una ganga ácida, lo que indica que para su posterior tratamiento metalúrgico es necesaria la adición de fundente (cal) para su aglomeración y posterior fusión. El contenido de cromo es uniforme en todas las fracciones, esto es favorable debido a que se puede recuperar en el proceso de fusión.

La presencia mayoritaria de hierro y aluminio constituye una regularidad en los escombros lateríticos de la región, que justifica que estos residuos se consideren óxidos de hierro con diferentes grados de contaminación con aluminio.

1.2.5 Características generales de los escombros del Yacimiento Camarioca Norte, Áreas 1 y 2

Según Informe de la dirección de Minas de la Empresa “Comandante Pedro Soto Alba Moanickel S.A” 2017, el Área 1 pertenece al dominio 3 de Camarioca Norte, ubicado al noroeste de la concesión minera, es el más contrastante con respecto al resto de los dominios, distinguiéndose por la ausencia del horizonte saprolítico, descansando el horizonte limonítico directamente sobre las rocas del basamento, al parecer con un predominio de redeposición de este último.

Morfológicamente posee las menores pendientes, con alturas entre los 300 y 460 metros para la superficie y entre 280 y 440 metros para el basamento. Por la correlación entre estos valores y la topografía del basamento, obtenida a partir de perfiles de geo radar, este dominio corresponde a un bloque en descenso relativo respecto al ubicado más al sur, con el cual contacta a través de una falla de dirección noreste que marca un escalón tectónico. Ello justifica que en este dominio se encuentren los mayores espesores de corteza redepositada desde los niveles más altos, lo que se hace evidente por los mayores espesores de corteza total en los que abundan restos fósiles, texturas estratificadas e intercalaciones de ocre estructurales e inestructurales.

Mientras que el Área 2 pertenece al dominio 2, emplazado en la parte occidental de la concesión, constituye una morfoestructura alargada del sureste hacia el norte correspondiente al parteagua principal entre río Arroyón que lo limita al oeste y un tributario de Revuelta de los Chinos al este, con alturas en ascenso gradual hacia el sur desde los 350 a 700 metros. Conjuntamente con el ascenso gradual de la topografía y del substrato rocoso, aumentan también los valores de la pendiente desde 0-12 grados hasta los 25 grados en su parte más meridional.

Los límites morfológicos del dominio están representados por fallas que controlan los barrancos de los tributarios ya mencionados, cortados al mismo tiempo por varias estructuras sublatitudinales que desplazan el cuerpo mineral. Las rocas sobre las que se desarrollan las cortezas ferroniquelíferas son las peridotitas serpentinizadas y las harzburgitas serpentinizadas y en algunos sectores las rocas recrystalizadas de composición antigorítica.

Estas áreas se caracterizan por su discontinuidad, tanto en potencia como en contenido de níquel en las menas lateríticas, dado por las estructuras disyuntivas que las desplazan, las diferentes tipologías litológicas del substrato y el carácter redepositado no homogéneo de los depósitos.

Dentro de los ocreos aparecen frecuentemente inclusiones y fragmentos serpentiniticos ocretizados así como texturas estratiformes. En los cuerpos minerales que conforman este dominio, los mayores valores de potencia mineral útil y mayores contenidos, así como los menores valores del número mineral, se encuentran en la parte más septentrional. Es típica la repetición de horizontes rocosos de diferentes litologías, en ocasiones nontronitizados, así como la inclusión de bloques, también de diferentes litologías, entre los ocreos estructurales, predominando en ambos casos los bajos contenidos de níquel.

La Composición química promedio de ambas áreas del Yacimiento es la siguiente:

Tabla 1.2 Composición química de las Áreas 1 y 2 del Yacimiento Camarioca Norte

| Depósito | Área | % Ni | % Co | % Fe | % SiO ₂ | % Mg | % Al | % Mn |
|-----------------|------|------|------|-------|--------------------|------|------|------|
| Camarioca Norte | 1 | 0,59 | 0,09 | 46,34 | 2,81 | 0,52 | 5,6 | 0,65 |
| Camarioca Norte | 2 | 0,62 | 0,07 | 42,45 | 4,09 | 0,91 | 7,5 | 0,55 |

Fuente: (Ganesh Persaud, 2014)

Como es apreciable, es insuficiente el conocimiento existente sobre las características físicas – químicas y mineralógicas de los escombros del Yacimiento Camarioca Norte, por fracciones de tamaño, lo que dificulta la selección de los requisitos de calidad para hacer propuesta de usos del PAM.

1.3 Conclusiones del Capítulo I

A partir de las fuentes bibliográficas consultadas se puede concluir lo siguiente:

1. La presencia mayoritaria de hierro y aluminio en los escombros lateríticos constituye una regularidad de este PAM, que justifica que sean considerados como óxidos de hierro con diferentes grados de contaminación con aluminio. Mineralógicamente están constituidos por maghemita, goethita, alumogoethita, hidrargilita y en menor medida por magnetita.
2. Existen antecedentes en el uso de los escombros lateríticos como material oxidante, que indican la posibilidad de utilizarlos como descarburizantes en la producción de aceros en hornos de arco eléctrico y aprovechar más del 35 % de las partículas mayores de dos milímetros.
3. Es posible recuperar el cobalto presente en los escombros lateríticos si se utiliza la lixiviación con ácido sulfúrico y se emplea como reductores el azufre o el sulfato de hierro (II).
4. Por sus características físicas y térmicas y el contenido de hierro como elemento mayoritario, los escombros lateríticos de la región Mayarí - Moa pueden constituir materia prima importante para la siderurgia, especialmente para la producción de arrabio con níquel y otros productos siderúrgicos.
5. No se ha profundizado en las características mineralógicas y físico – químicas por fracciones de tamaño, de los escombros del yacimiento Camarioca Norte, Área 1, de la Empresa “Comandante Pedro Soto Alba Moanickel S.A”, con el objetivo de elegir los requisitos de calidad para sus posibles usos.

CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS

Este capítulo tiene como objetivo establecer la metodología para la caracterización físico-química y mineralógica de los escombros lateríticos del yacimiento Camarioca Norte del Área 1 de la Empresa “Comandante Pedro Soto Alba Moanickel SA “.

2.1 Selección y preparación de las muestras

El grupo de Geología – Minería de la Empresa “Comandante Pedro Soto Alba” fue la encargada de la toma de muestra, esta fue tomada de la zona menífera del yacimiento Camarioca Norte, Área 1. Se conformó una muestra compósito representativa de los escombros lateríticos con una masa de 9,6 kg; luego trasladada a la Planta de Beneficio del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, donde fue homogeneizada y cuarteada a través del método del cono y el anillo (figura 2.1). El aspecto físico de la muestra, con una coloración parda rojiza, delata al alto contenido de hierro en estos escombros, como es de espera en horizontes de concreciones ferruginosas.

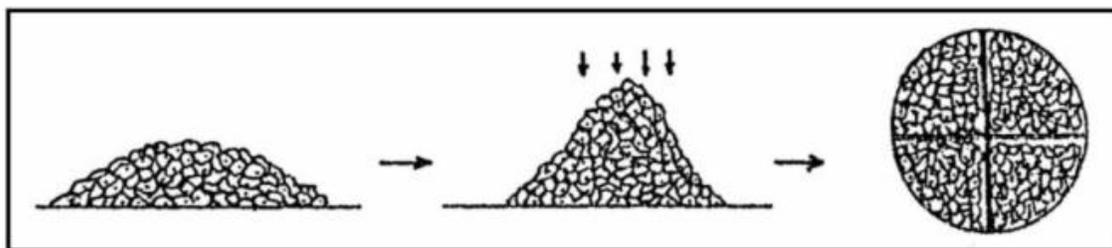


Figura 2.1 Procedimiento para la homogeneización y cuarteo de la muestra inicial.

Cuarteo manual, cono y anillo

Herramientas:

- ✓ Una pala
- ✓ Una cuchara de albañil

El procedimiento utilizado para el cuarteo manual es el siguiente:

1. Se coloca la muestra de campo sobre una superficie plana, dura y limpia, donde no pueda haber pérdida de material ni contaminación con materias extrañas.
2. Se homogeniza el material haciendo un cono depositando cada paleada sobre la anterior y luego haciendo un anillo, seguidamente se forma nuevamente el cono.
3. Por medio de la pala, se ejerce presión sobre el vértice, aplanando con cuidado la pila hasta obtener un espesor y un diámetro uniformes. El diámetro obtenido deberá ser aproximadamente de cuatro a ocho veces el espesor del material.
4. Seguidamente se divide la pila aplanada en cuatro partes iguales con la pala o la cuchara de albañil. (Ver figura 2.2)

Se separan, unen y guardan como reserva dos de las partes diagonalmente opuestas, incluyendo todo el material fino. Se puede utilizar una brocha o cepillo para incorporar el material fino a la muestra respectiva, otra de las partes queda de reserva para la realización del análisis por vía húmeda y la otra para dicho análisis por vía seca, luego de realizar el procedimiento de homogeneización y cuarteo.



Figura 2.2 Procedimiento del cuarteo manual realizado a los escombros a) del área 1 b) del área 2, muestra que tratada granulométricamente a modo de comparación con la muestra del área 1.

La figura 2.3 muestra el esquema de trabajo utilizado, que incluye la toma de muestras para la investigación, la caracterización química y granulométrica.

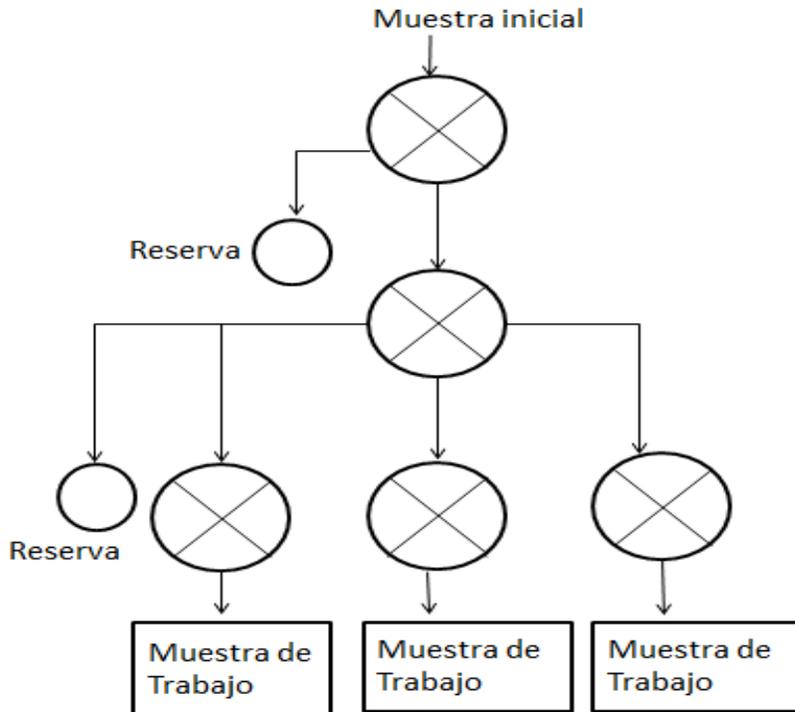


Figura 2.3 Esquema para la selección de las muestras utilizado en la investigación.

La masa de muestra utilizada es de 2,2 kg en el caso del área 1 y 3 kg del área 2, las cuales fueron pesadas en una balanza analítica ubicada en la planta de Beneficio del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa para realizar el análisis de tamiz se realizaron tres réplica de cada una de las áreas a partir de unas masas iniciales de 0,4 kg y 0,6 kg respectivamente.

2.1.1. Caracterización granulométrica

El tamizado es un método de separación de partículas que se basa solamente en la diferencia de tamaño. Un tamiz puede efectuar solamente una separación en dos fracciones. Es el método más sencillo para la clasificación granulométrica en el laboratorio y consiste en pasar el material sucesivamente

por una serie de tamices que posean orificios o mallas progresivamente decrecientes. El material que pasó a través de un tamiz y ha sido retenido en el siguiente porque sus orificios son de tamaño menor que el anterior, suele considerarse como de tamaño igual a la media aritmética de la abertura de ambos tamices, éste valor representa el "tamaño medio" o diámetro medio". El material que no atraviesa los orificios del tamiz se designan como rechazo o fracción positiva, y el que lo pasa se llama tamizado o fracción negativa.



Figura 2.4. Juego de tamices utilizados en el análisis granulométrico.

Elaborado por: Yadileydis Roché González

El análisis granulométrico constituye el elemento básico para la caracterización granulométrica de los escombros objeto de estudio, este se realizó por vía seca, seleccionando el juego de tamices según la serie de Taylor (Adreiev, 1987) y por la experiencia en el tratamiento de los escombros lateríticos:

+10 mm, -10+8 mm, -8+6 mm, -6+4 mm, -4+1,4 mm (correspondería utilizar en lugar de 1,4 mm, 2 mm pero el tamiz está defectuoso), -1,4+0,4 mm, -0,4+0,2 mm, -0,2+0,147 mm, -0,147+0,07 mm, -0,074+0,044 mm, y -0,044 mm

Estas fracciones granulométricas se utilizaron en la etapa caracterización química y mineralógica. En la figura 2.4 se muestra el esquema de trabajo utilizado.

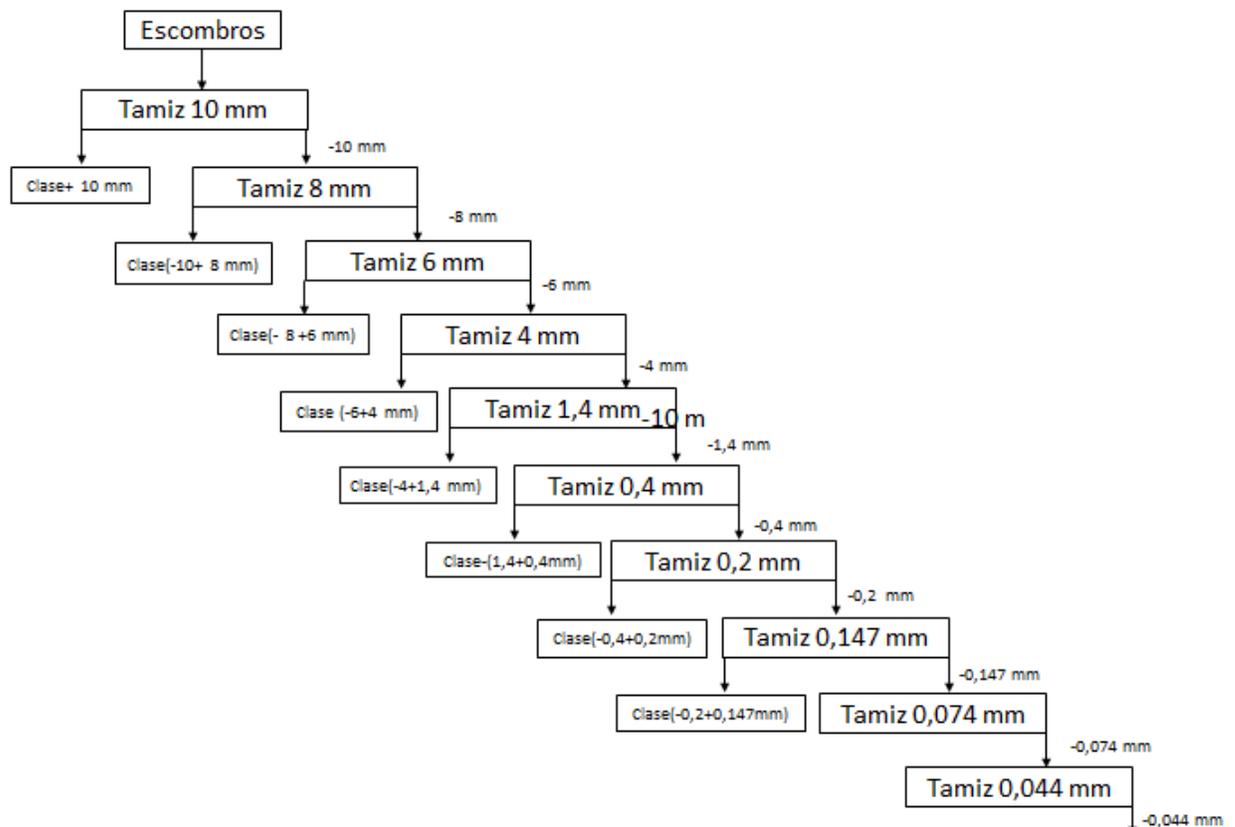


Figura 2.5 Esquema utilizado en el análisis granulométrico de las muestras.

El análisis granulométrico fue realizado de forma manual en la planta de Beneficio del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.

2.2. Equipos y técnicas utilizados para la caracterización química y mineralógica.

La caracterización química y mineralógica se realizó con el financiamiento del Proyecto “Rehabilitación de PAMMs generados por la industria del Níquel en Moa” PAP 1501.

Se tomaron muestras representativas de las once fracciones granulométricas y la muestra sin tamizar o cabeza. Las muestras se pulverizaron y se enviaron al laboratorio de análisis químico ubicado en el Centro de Investigación del Níquel en Moa (CEDINIQ).

A continuación se detallan las características de los equipos empleados, las técnicas utilizadas y las condiciones de trabajo en cada caso.

2.2.1 Caracterización química

Para la determinación de la composición química de cada una de las muestras tomadas en esta investigación, se utilizaron los métodos de Espectrofotometría de Absorción Atómica, Volumetría y Gravimetría.

2.2.1.1 Fundamentos del método de Absorción Atómica

La base de este método consiste en pasar el elemento a analizar a su forma atómica en estado libre por medio de la llama a través de la cual hace incidir una radiación continua, que es característica para cada elemento. A través de un dispositivo adecuado se realiza la selección de la radiación y medida de la variación de la intensidad de la misma relacionada directamente con la concentración del elemento.

Las mediciones se realizaron en un Espectrofotómetro de Absorción Atómica ATI UNICAM SOLAR 929 (SIMPLE RAYO DE LUZ). En la figura 2.3 se muestra el equipo empleado en la caracterización.



Figura 2.6 Equipo de Espectroscopia de Absorción Atómica. Tomado de (Araque Tineo, 2012)

El procedimiento técnico de ensayo empleado en la determinación de Si, Al, Mg, Ni, Co, Mn, Cr, Fe, Cu y Zn, es el siguiente: UPL - PT – A-26 Emitido: 28-Marzo- 2017.

Para la determinación de hierro (II) se empleó el método Volumétrico con el siguiente procedimiento técnico de ensayo: UPL-PT-V-03 Emitido: 1/8/2015

Las pérdidas por ignición (PPI) se determinaron por el método gravimétrico. El procedimiento empleado para la determinación es el siguiente: UPL-PT-G-01 Emitido: 1/8/2015

2.2.2 Caracterización mineralógica

Para la determinación de las fases presentes en las muestras se empleó el método de Difracción de Rayos X. El equipo utilizado tiene las siguientes características: Difractómetro X'PERT³ de PANalytical con las siguientes condiciones: Barrido tipo Gonio en $[\theta]$ registro angular desde 4.0042 hasta

79.9962 con distancia de paso en $^{\circ}2\theta$ de 0.0080 con radiación de Cu y filtro de níquel. La diferencia de potencial es de 40 kV y corriente de 30 mA. La calibración del equipo se chequea con patrón externo de silicio.

2.2.2.1 Fundamento del método de Difracción de Rayos X

Esta técnica se emplea para la identificación de forma cualitativa de las distintas fases que componen las muestras objeto de estudio. La esencia del análisis es que a partir de la radiación emitida por un tubo de rayos X, la misma se difracta en la muestra, a partir de la cual se emiten haces con diferentes longitudes de onda, según la ley $n \lambda = 2 d \cdot \sin \alpha$.

Otros equipos utilizados en la investigación

Balanza

Como técnica para contabilizar la cantidad de material inicial y los productos obtenidos, se utilizó una balanza digital modelo Sartorius BS 124S, con una capacidad máxima de 120 g y una desviación de 1 mg.



Figura 2.7 Balanza utilizada para el pesaje de las muestras.

Conclusiones del Capítulo II

1. La muestra de escombros de yacimiento Camarioca Norte, Área 1 perteneciente a la Empresa “Comandante Pedro Soto Alba Moanickel S.A” seleccionada para su caracterización, se considera representativa con respecto a su volumen total.
2. Los métodos y técnicas analíticas empleados garantizan la confiabilidad de los resultados de la caracterización físico – química y mineralógica.

CAPÍTULO III. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se discuten los resultados de la caracterización granulométrica, química y mineralógica de los escombros del Yacimiento Camarioca Norte, Área 1, de la Empresa “Comandante Pedro Soto Alba Moanickel S.A” para establecer sus posibles usos.

3.1 Análisis de la caracterización de los escombros Yacimiento Camarioca Norte, Área 1

A continuación se analizan y discuten los resultados de la caracterización granulométrica, así como la composición química y mineralógica de las diferentes fracciones de tamaño.

3.1.1 Resultados de la caracterización granulométrica de dos muestras del Yacimiento Camarioca Norte, Áreas 1 y 2

En las tablas 3.1 y 3.2 se presenta la composición granulométrica de los escombros lateríticos del yacimiento Camarioca Norte.

Tabla 3.1. Resultado promedio del análisis granulométrico de la muestra de escombros del Área 1 utilizada en la investigación.

| Clases de tamaño (mm) | Masa (g) | Salidas, γ (%) | Retenido |
|-----------------------|----------|-----------------------|----------|
| >10 | 47,7169 | 12,5347 | 12,5347 |
| -10+8 | 10,8798 | 2,8580 | 15,3927 |
| -8+6 | 7,7894 | 2,0462 | 17,4389 |
| -6+4 | 26,2928 | 6,9068 | 24,3457 |
| -4+1,4 | 112,6476 | 29,5912 | 53,9369 |
| -1,4+0,4 | 126,902 | 33,3357 | 87,2726 |
| -0,4+0,2 | 20,7713 | 5,4564 | 92,7290 |
| -0,2+0,147 | 15,0667 | 3,9579 | 96,6869 |
| -0,147+0,074 | 3,7199 | 0,9772 | 97,6640 |
| -0,074+0,044 | 7,0289 | 1,8464 | 99,5105 |
| -0,044 | 1,8636 | 0,4895 | 100,0000 |
| Total | 380,6789 | 100 | |

Elaborado por: Yadileydis Roché González.

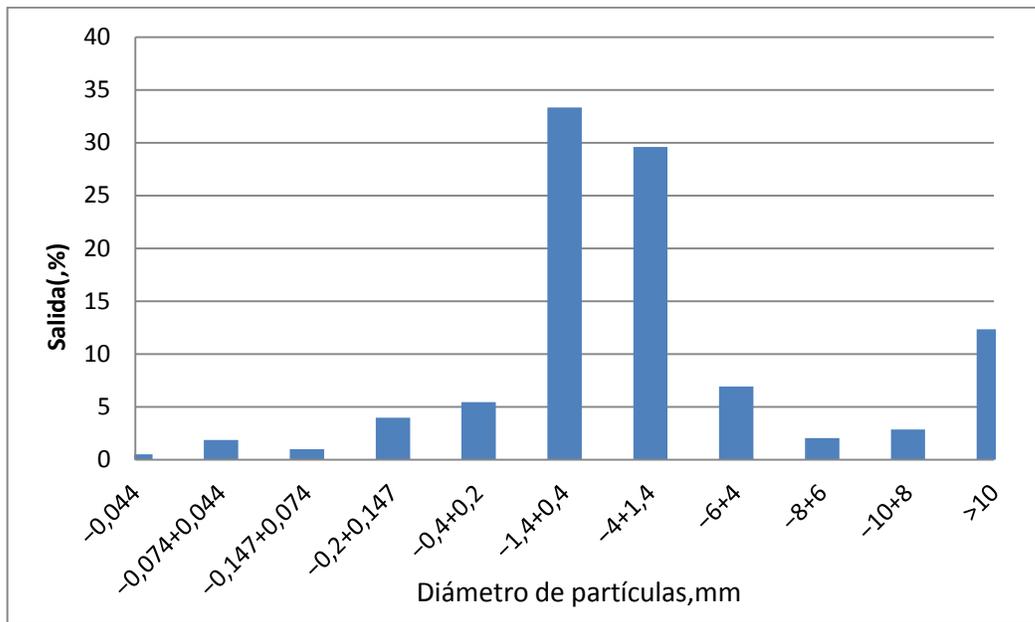
Tabla 3.2 Resultado promedio del análisis granulométrico de la muestra de escombros del Área 2 utilizada en la investigación.

| Clases de tamaño (mm) | Peso ,g | Salida, γ (%) | Retenido |
|------------------------------|----------------|----------------------|-----------------|
| >10 | 149,700 | 27,454 | 27,454 |
| -10+8 | 19,500 | 3,576 | 31,030 |
| -8+6 | 39,400 | 7,225 | 38,256 |
| -6+4 | 42,600 | 7,812 | 46,068 |
| -4+1,4 | 159,100 | 29,178 | 75,247 |
| -1,4+0,4 | 105,200 | 19,293 | 94,540 |
| -0,4+0,2 | 11,100 | 2,035 | 96,576 |
| -0,2+0,147 | 2,010 | 03686 | 96,944 |
| -0,147+0,074 | 11,060 | 2,028 | 98,973 |
| -0,074+0,044 | 2,200 | 0,403 | 99,376 |
| -0,044 | 3,400 | 0,623 | 100,000 |
| Total | 545,27 | 100,000 | |

Elaborado por: Yadileydis Roché González.

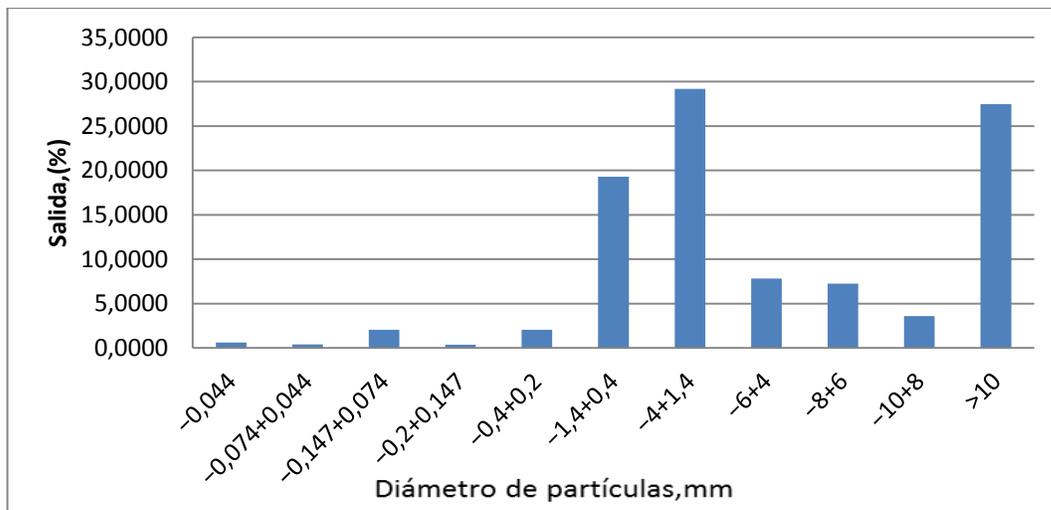
La composición granulométrica de las muestras, representada en las figuras 3.1 y 3.2 evidencian ambas un predominio de las partículas 1,4 y 0,4 mm. Estas partículas agrupan el 62,926 % del peso de la muestra para el área 1 y para el área 2 es de 48,471 %.

En el área 1 al analizar la composición por fracciones de tamaño, se distinguen tres grupos granulométricos: de una parte, una granulometría fina, menor de 0,147 mm que representa el 3,313 % en peso de la muestra; un segundo grupo granulométrico intermedio constituido por las fracciones mayores de 0,147 y menores de 6 mm, las que representan el 79,2 % y un tercer grupo de granulometría más gruesa, mayores de 6 mm, que representa el 17,251 % en peso de la muestra y en las cuales, las fracciones individuales no superan el 12,5347 %.



Elaborado por: Yadileidis Roché González

Figura 3.1. Característica granulométrica de los escombros del Yacimiento Camarioca Norte, Área 1.



Elaborado por: Yadileidis Roché González

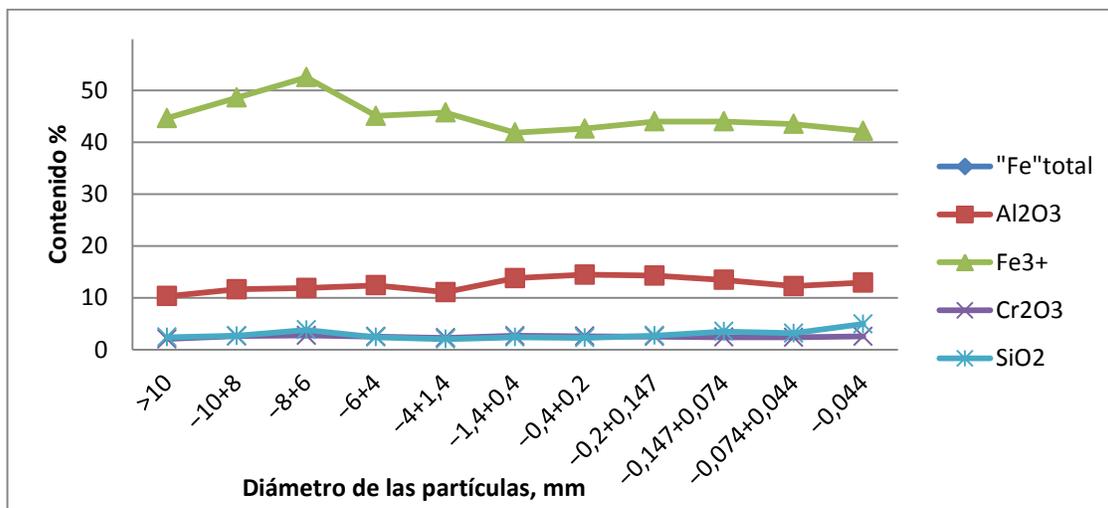
Figura 3.2. Característica granulométrica de los escombros del Yacimiento Camarioca Norte, Área 2.

En el área 2 se distinguen los mismos grupos granulométricos, menor de 0,147 mm que representa el 3,055 % en peso de la muestra, el segundo grupo granulométrico intermedio constituido por las fracciones mayores de 0,147 y menores de 6 mm representan el 58,688 % y la granulometría más gruesa representa 38,2563 %.

3.1.2 Resultados de la caracterización química de los escombros del Área 1 del Yacimiento estudiado

Químicamente, el escombros del yacimiento Camarioca Norte, área 1, está compuesto fundamentalmente por óxido de hierro y su contenido no varía bruscamente con el tamaño de las partículas, coincidiendo con (Ramírez Pérez 2010), y (Rojas 1995) al caracterizar a los escombros como menas de hierro, como se puede constatar en Anexo 1 y en las figuras 3.3 y 3.4.

El aluminio es el segundo de los elementos mayoritarios en el escombros, con un contenido que se incrementa en la medida que disminuye el diámetro de las partículas y llega a alcanzar el 10,431 % como óxido en las mayores de 0,2 mm (figura 3.3). Los valores más bajos de este elemento, en el orden de 7,469 %, se reportaron en las partículas mayores de 10 mm.



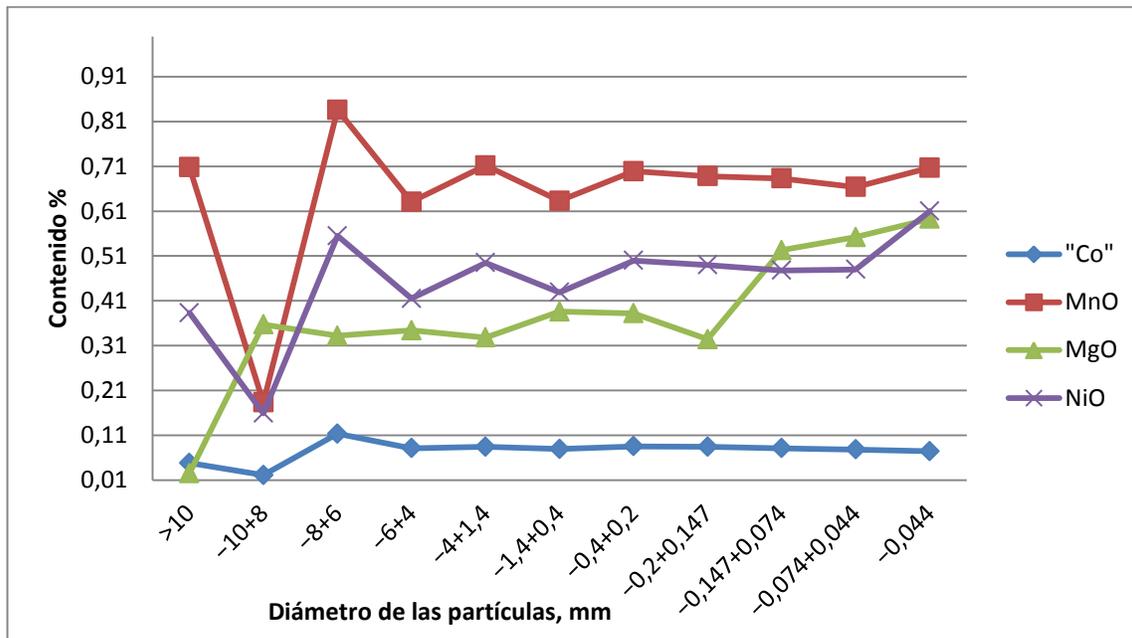
Elaborado por: Yadileydis Roché González

Figura 3.3. Contenido de los elementos mayoritarios en las fracciones granulométricas.

A través del análisis realizado se demuestra que, la presencia mayoritaria de hierro y aluminio en los escombros constituye la principal característica de los escombros lateríticos cubanos, estos constituyen menas de óxidos de hierro con diferentes grados de contaminación con el aluminio.

El contenido de cromo varía muy poco en las fracciones estudiadas, el mayor contenido de óxido de cromo se encuentra en la fracción mayor de 6 mm. Como se puede observar en la figura 3.3 el contenido de este elemento tiene gran coincidencia con los de silicio.

Se observó que la distribución del níquel en las clases de tamaño, es irregular, pero existe un incremento hacia las partículas más finas, que llega alcanzar el 0,610 % como óxido en las menores de 0,044 mm, como se observa en la figura 3.4. Este comportamiento en la distribución del níquel, se atribuye a que los oxihidróxidos de hierro presentes, específicamente la goethita, son portadores de níquel, como lo reporta en sus trabajos (Rojas, 1995) y (Rojas 2001).



Elaborado por: Yadileydis Roché González

Figura 3.4. Contenido de los elementos minoritarios en las fracciones granulométricas.

El contenido de magnesio se incrementa hacia las partículas más finas, en las menores de 0,044 mm se registra el mayor contenido de óxido de magnesio que representa el 14,303 %, y forma parte de los minerales arcillosos junto al aluminio y al silicio.

Los mayores por cientos del silicio, magnesio y aluminio se encuentran en las partículas de menores diámetros, pero en las mayores de 0,044 mm los contenidos de estos elementos son considerables, por lo que se debe considerar los posibles usos para estos residuos, una aplicación puede ser en la industria del acero, ellos contribuyen a mejorar las propiedades de viscosidad y fluidez de las escorias.

El contenido de óxido de cobalto es el menor con respecto a los otros elementos analizados, su mayor contenido se encuentra en la fracción

granulométrica -8+6 mm con 0,113 %, estos valores de contenido son pequeños iguales que lo del manganeso esto se explica a través de que ambos están asociados en los óxidos e hidróxidos impuros de manganeso.

Los valores de PPI que oscilan entre 13 y 15 % demuestran que al no existir operación pirometalúrgicas en el tratamiento de estos pasivos, aun poseen tanto el agua higroscópica como estructura en su composición lo cual debe ser tomado en cuenta en su posible uso en la industria de la siderurgia. Ver Anexo1

En resumen, se demostró que los escombros lateríticos del Yacimiento Camarioca Norte del Área 1 están caracterizados por la presencia de hierro, cuyo contenido no varía bruscamente con el tamaño de las partículas. El aluminio es el segundo de los elementos mayoritarios en el escombro, con un contenido que se incrementa en la medida que disminuye el diámetro de las partículas, lo mismo ocurre con el magnesio y el silicio, el contenido de cromo varía muy poco en las fracciones estudiadas y el menor contenido en estos escombros lo registra el óxido de cobalto con un contenido de 0,021 % en las partículas mayores de 2 mm.

3.1.3 Resultados de la caracterización mineralógica de los escombros del Área 1

En la tabla 3.3 se presentan las principales fases mineralógicas reportadas en los análisis de Difracción de Rayos X. Como un elemento que concuerda con el quimismo de este pasivo ambiental en lo referente a los elevados contenidos de óxidos de hierro y su amplia distribución en el perfil granulométrico estudiado, las fases hematita y maghemita son predominantes en todas las fracciones granulométricas.

Tabla 3.3 Principales fases mineralógicas en el escombros de Camarioca Norte, Área 1.

| Fracciones Granulométricas (mm) | Contenido de las fases mineralógicas (%) | | | | |
|---------------------------------------|--|-----------|-----------------------|-------|-------------------------|
| | Hematita | Maghemita | Olivino (Fayalita) | Mg-Cr | Olivino (Forsterita) |
| +10 | 24 | 24 | 19 | 15 | - |
| -10+8 | 7,1 | 15 | 20 | - | - |
| -8+6 | 22 | 18 | 18 | - | - |
| -6+4 | 25,3 | 13,1 | - | - | - |
| -4+1,4 | 19 | 15 | 13 | - | - |
| -1,4+0,4 | - | 15,2 | 14 | - | - |
| -0,4+0,2 | 26,7 | 25,3 | 12 | - | - |
| -0,2+0,147 | 34 | 18 | - | - | - |
| -0,147+0,074 | 5 | 19 | - | - | 26 |
| -0,074+0,04 | 17,2 | 14,1 | - | 15,2 | 16 |

Mg-Cr: Magnesiocromita

Son reportadas también fayalita y forsterita, pertenecientes a los minerales de olivino. La primera en las partículas mayores de 0,2 mm y la segunda en las más finas, las menores de 0,147 mm, donde el contenido de magnesio incrementa. No es común encontrar minerales de olivino en las concreciones ferruginosas o escombros lateríticos, sin embargo, en el Informe ofrecido por la dirección de Minas de la Empresa “Comandante Pedro Soto Alba Moanickel S.A” 2017, se indica que dentro de los ocres aparecen frecuentemente inclusiones y fragmentos serpentiniticos, lo cual justifica la presencia de dichas fases en los escombros del área 1 del yacimiento Camarioca Norte.

Otras fases como la magnesiocromita cuyos contenidos no superan el 15 %, la periclasa, cromita y goethita, están presentes en el escombros estudiado.

Un difractograma representativo del escombro de Camarioca Norte, Área 1, se representa en la figura 3.5.

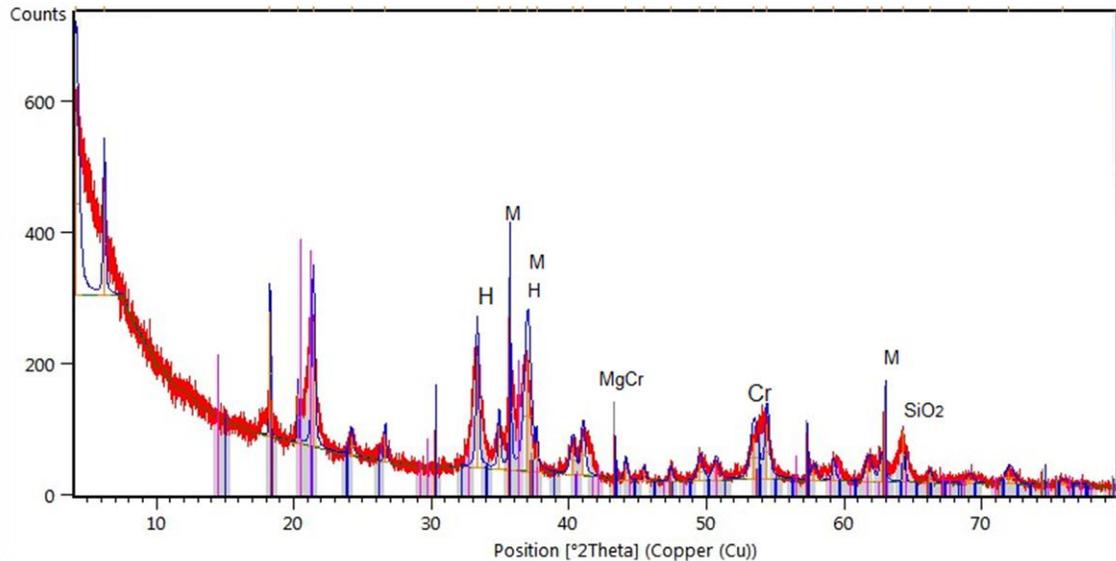


Figura 3.5 Difractograma representativo de una muestra de escombro del yacimiento Camarioca Norte, Área 1. M: maghemita, H: hematita, MgCr: magnesiocromita, Cr: cromita.

3.2 Comparación química entre los escombros lateríticos de diferentes yacimientos de la región Mayarí - Moa

Para hacer la comparación de los escombros lateríticos se parte de los resultados obtenidos en este trabajo, en cuanto a la composición química de los escombros del yacimiento Camarioca Norte, Área 1, y las investigaciones realizadas por varios autores que han tenido como objetivo en sus trabajos la caracterización química, física, mineralógica y térmica de estos pasivos ambientales para definir sus posibles usos y que ya han sido citados en el Capítulo I.

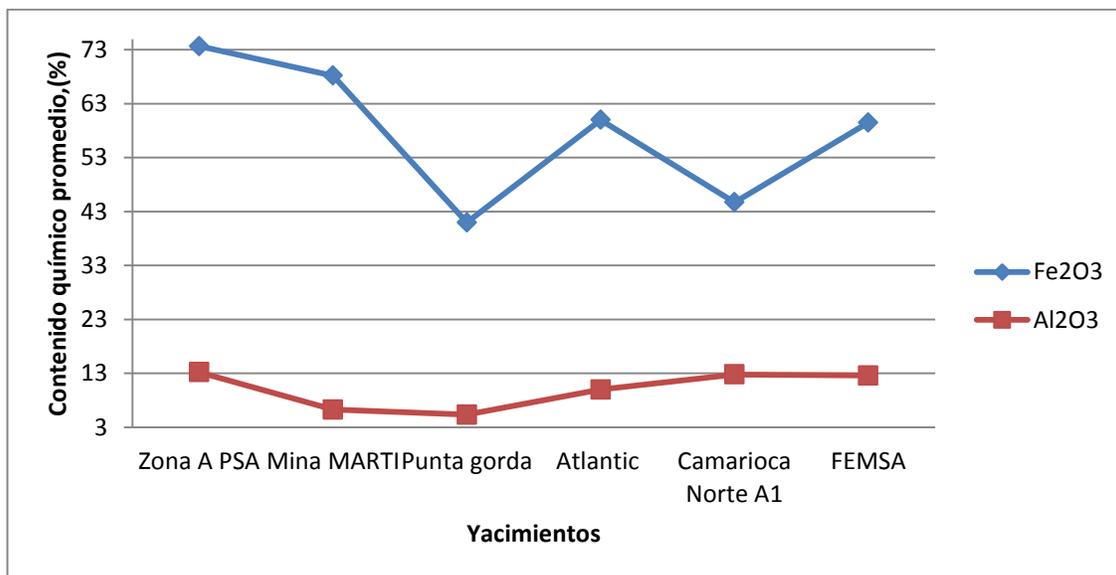
En la tabla 3.4 se muestran los resultados de diferentes investigaciones en cuanto a la caracterización química de distintos yacimientos, información tomada para construir los gráficos 3.5 ; 3.6 y 3.7 que facilitan la comprensión de la comparación que se realiza en lo adelante.

Tabla 3.4 Composición química promedio (%) de los escombros lateríticos de diferentes yacimientos de la región Mayarí - Moa.

| Pasivos | Contenido promedio de cada uno de los elementos, % | | | | | | | | Fuentes |
|-----------------|--|-------|-------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|---------------|
| | CoO | MnO | MgO | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Cr ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | NiO | |
| Zona A, PSA | 0,144 | 0,750 | 0,211 | 2,130 | 13,000 | 3,296 | 73,655 | 0,691 | Ramírez 2010 |
| Mina Martí | 0,221 | 0,346 | 6,004 | 8,261 | 6,271 | 2,150 | 68,193 | 0,800 | Ortiz 2015 |
| Punta Gorda | 0,053 | 0,671 | 0,971 | 2,638 | 5,324 | 1,614 | 43,670 | 0,578 | Ganesh 2014 |
| Atlantic | 0,070 | 0,650 | 0,500 | 3,000 | 10,000 | 2,500 | 60,000 | 0,700 | Ferreiro 2006 |
| FEMSA | 0,012 | 0,610 | 5,430 | 15,930 | 12,580 | 2,440 | 59,490 | 0,840 | Ganesh 2014 |
| Camarioca Norte | 0,752 | 0,645 | 0,366 | 3,051 | 12,809 | 2,601 | 44,771 | 0,451 | Roché 2017 |

Elaborado por: Yadileydis Roché González

Como se pueden observar en el gráfico 3.5, el elemento mayoritario de estos pasivos ambientales pertenecientes a las diferentes industrias de la región Mayarí - Moa (Empresa Comandante Pedro Sotto Alba de Moa, Empresa Comandante Ernesto Che Guevara, y Mina Martí de Nicaro) es el hierro, con un contenido del óxido superior al resto de los elementos en todos los escombros analizados, sin embargo, en los de Zona A y Mina Martí es elevado, con valores que oscilan entre 68 y 73 %, mientras que el menor contenido, 40,981 %, se reporta en los de Punta gorda correspondientes a la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.

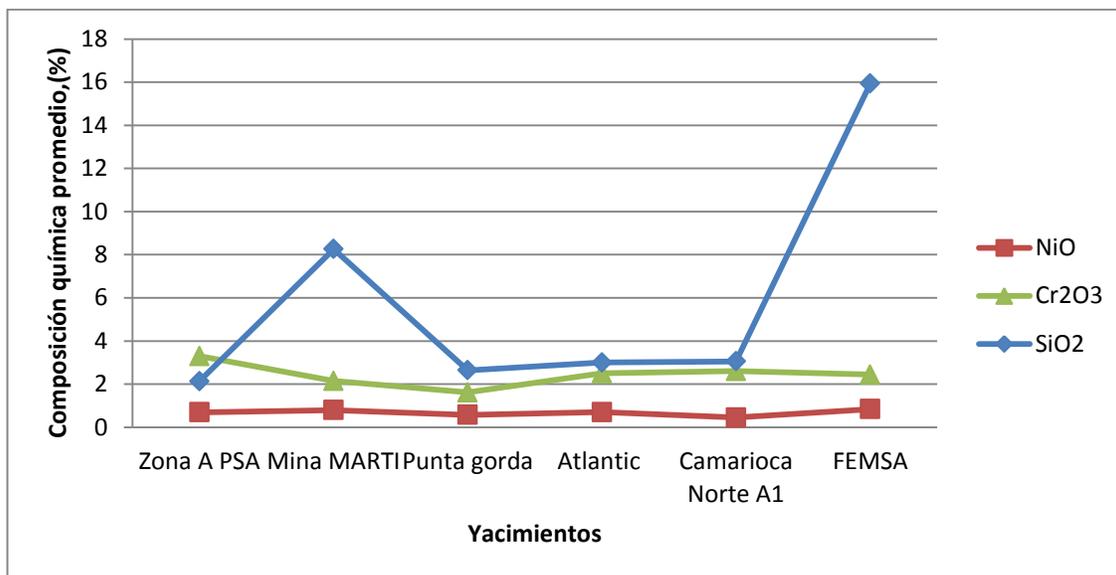


Elaborado por: Yadileydis Roché González

Figura 3.5. Composición química promedio de los óxidos (Fe_2O_3 y Al_2O_3) en los diferentes yacimientos de la región Mayarí – Moa.

El segundo elemento mayoritario es el óxido de aluminio, los contenidos del elemento en forma de óxido varían de un yacimiento a otro entre 5 y 13 %, observándose que en los del yacimiento Punta Gorda el contenido es el menor entre todos los escombros analizados.

Por otra parte, no existe una diferencia significativa en los contenidos de níquel y cromo en los escombros estudiados; los contenidos oscilan entre 0,4 y 1,0 % para el níquel y en el cromo entre 1,6 y 3,2 % (figura 3.6). El contenido de NiO igual a 1,068 % en los escombros de Punta Gorda, resulta de interés para la propuesta de usos de este desecho.

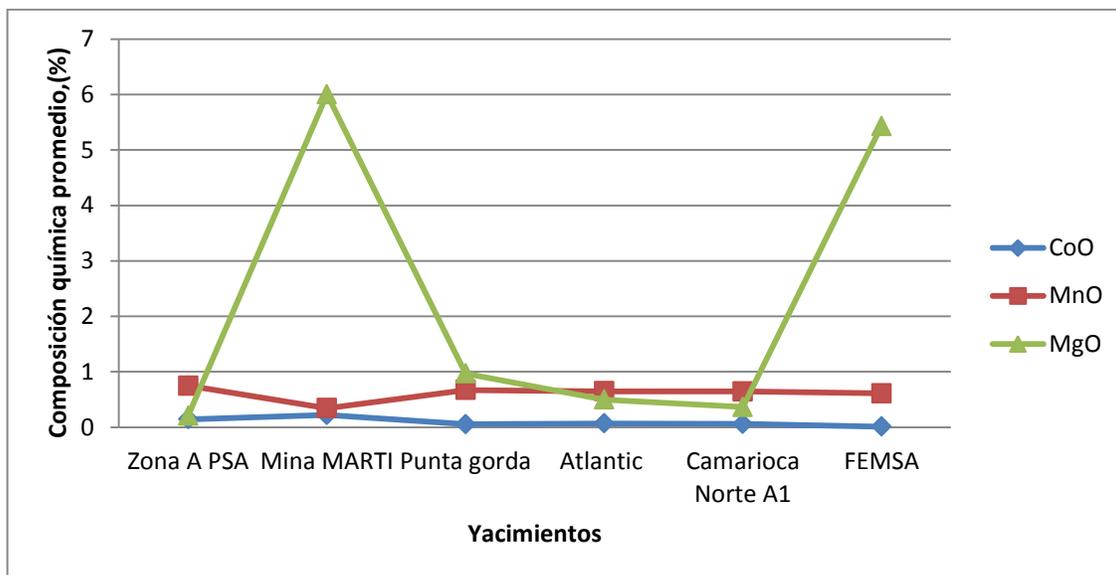


Elaborado por: Yadileidis Roché González

Figura 3.6. Composición química promedio de los óxidos (SiO₂, NiO, y Cr₂O₃) en los diferentes yacimientos de la región Mayarí – Moa

En lo referente al óxido de silicio, el contenido varía considerablemente, observándose que en el escombros de FEMSA es superior al resto de los escombros, con un valor promedio de 15,93 %. El contenido de óxido de magnesio (figura 3.7), es muy variable en los diferentes escombros, reportándose los mayores en los de Mina Martí y FEMSA. Este es un elemento que junto al silicio debe ser considerado en las propuestas de usos, especialmente para la siderurgia.

De los elementos analizados en la comparación entre diferentes escombros, el óxido de cobalto es el que tiene menores contenidos, que varían entre 0,012 y 0,22 %.



Elaborado por: Yadileydis Roché González

Figura 3.7. Composición química promedio de los óxidos (MnO, CoO y MgO) en los diferentes yacimientos de la región Mayarí - Moa

De la comparación se puede resumir como regularidad química, que los elementos mayoritarios en los escombros, en cuanto a contenidos, son el hierro y el aluminio; que el contenido de cobalto, de manganeso, de níquel y de cromo no varía significativamente de un yacimiento a otro, mientras que el magnesio y el silicio pueden variar considerablemente entre los escombros de diferentes yacimientos de la región.

De los resultados de la caracterización físico – química y mineralógica realizada a los escombros de Camarioca Norte, Área 1, y al compararlos con escombros de otros yacimientos de la región, se pueden proponer usos a este pasivo como los evaluados por otros investigadores: oxidantes en la elaboración de aceros, como carga acompañante en la producción de aleaciones ferrosas, extracción de cobalto por medio de tecnologías de lixiviación con ácidos, biolixiviación para la recuperación de elementos valiosos y el aprovechamiento del hierro y el níquel contenidos en estos desechos para la producción de Nickel Pig Iron (NPI).

Conclusiones del Capítulo III

1. Los escombros lateríticos del yacimiento Camarioca Norte, Área 1 y 2 de la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba evidencian un predominio de las partículas 1,4 y 0,4 mm. Estas partículas agrupan el 62,926 % del peso de la muestra para el Área 1 y para el Área 2 es de 48,471 % de la masa total.
2. Desde el punto de vista químico, en los escombros lateríticos de este yacimiento la presencia de hierro es mayoritaria y distribuido de manera uniforme en los diferentes tamaños de partículas. El aluminio es el segundo de los elementos mayoritarios y su contenido se incrementa en la medida que disminuye el diámetro de las partículas; comportamiento similar a este elemento se aprecia en el magnesio y el silicio, sin embargo, el contenido de cromo varía muy poco en las fracciones estudiadas. El contenido de óxido cobalto es el menor con respecto a los otros elementos analizados, su mayor contenido se encuentra en la fracción granulométrica $-0,2+0,147$ mm con 0,084 %, estos valores de contenido pequeños iguales que lo del manganeso explica que ambos están asociados en los óxidos e hidróxidos impuros de manganeso.
3. Mineralógicamente están constituidos por fases de hierro, hematita y maghemita, en correspondencia con la presencia mayoritaria de hierro, y en menor medida, por otras fases como la magnesiocromita cuyos contenidos no superan el 15 %, la periclasa, cromita y goethita.
4. De los resultados de la caracterización físico – química y mineralógica realizada a los escombros de Camarioca Norte, Área 1, y al compararlos con escombros de otros yacimientos de la región, se pueden proponer usos a este pasivo como oxidantes en la elaboración de aceros y otras aleaciones, extracción de cobalto por medio de lixiviación ácida y como materia prima para la producción de Nickel Pig Iron (NPI), entre otras.

CONCLUSIONES

1. Como resultado de la caracterización granulométrica, los escombros lateríticos del yacimiento Camarioca Norte, Área 1, de la Empresa “Comandante Pedro Soto Alba Moanickel S.A” están constituidos mayormente por partículas mayores de 0,4 mm que representan el 92,8 %, destacándose las fracciones entre 0,4 y 1,4 mm, con un 62,9 % del total de la muestra.
2. Químicamente, el escombros estudiado está compuesto fundamentalmente por óxidos de hierro y aluminio, cuyos contenidos oscilan entre 41 y 53 % para el primero y entre 10 y 15 % para el segundo. Presentes además y otros óxidos como los de cromo, cobalto, níquel, magnesio y silicio que hacen de este pasivo una materia prima importante para su uso industrial.
3. La caracterización mineralógica revela que los escombros de Camarioca Norte del área en estudio están constituidos principalmente por fases de hierro donde predominan la hematita y maghemita, en correspondencia con la presencia mayoritaria de hierro en todo el espectro granulométrico.
4. Al comparar los PAM estudiados con otros existentes en la región Mayarí-Moa, se puede establecer como regularidad química, que los elementos mayoritarios en éstos son el hierro y el aluminio; los contenidos de cobalto, manganeso, níquel y cromo no varían significativamente entre los yacimientos analizados, mientras que el magnesio y el silicio varían considerablemente entre los escombros de diferentes yacimientos de la región.
5. Por sus características físicas, mineralógicas y el contenido de hierro como elemento mayoritario, los escombros lateríticos del yacimiento Camarioca Norte, Área 1, pueden constituir materia prima importante para la siderurgia, especialmente en la descarburización de los aceros,

para la producción de arrabio con níquel (NPI) y otros productos siderúrgicos.

RECOMENDACIONES

1. Realizar la caracterización térmica del PAM yacimiento Camarioca Norte área 1, para argumentar las transformaciones químicas que tienen lugar al utilizarlo durante los procesos siderúrgicos.
2. Desarrollar pruebas experimentales con este pasivo ambiental que confirmen las predicciones de uso de esta investigación, con el objetivo de convertirlo en un activo industrial.
3. Continuar las investigaciones de otros pasivos, similares a los investigados, existentes en otras áreas de explotación de la industria cubana del Níquel.
4. Realizar el inventario de los PAM existentes en el yacimiento Moa Occidental, aplicando la metodología diseñada para estos fines.

BIBLIOGRAFIA

1. Adreiev, S Perov, V Zveríech. (1987). Trituración, desmenuzamiento y cribado. Habana: Pueblo y educación
2. Alberruche, E., Arranz, J. C., Rodríguez, R., Vadillo, L., Rodríguez, V., & Fernández, F. J. (2014). Manual para la evaluación de riesgos de instalaciones de residuos de industrias extractivas cerradas o abandonadas.
3. Araque Tineo, D. (2012). Caracterización química y física de las menas lateríticas de Yagrumaje Norte y Sur de la Empresa Ernesto Che Guevara. (Tesis de Diploma), ISMM, Moa.
4. Arranz González, J. C., & Alberruche del Campo, E. (2008). Minería, medio ambiente y gestión del territorio. Master Internacional "Aprovechamiento Sostenible de los Recursos Minerales". (Serie Postgrado), Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
5. ASGMI. (2010). Pasivos ambientales mineros. Manual para el inventario de minas abandonadas o paralizadas.
6. Cedrón, M. (2013). Elaboración de criterios para la transformación de pasivos mineros en activos socio – ambientales sostenibles. (Tesis de Máster), Lima, Perú.
7. Durán Suárez, Y. (2015). Caracterización y evaluación de las escombreras de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara para su posible uso industrial. (Tesis de Diploma), ISMM, Moa.
8. Ferreiro Guerrero, Y., & Santiesteban Domínguez, E. y o. a. (2006). Tratamiento previo de los escombros lateríticos del yacimiento "Atlantic" de Moa como paso inicial de una nueva tecnología en perspectivas.

9. Ganesh Persaud, A. (2014). Metodología para el inventario de los pasivos ambientales mineros- metalúrgicos, generados por las industrias del níquel en Moa. (tesis de diploma), Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Moa.
10. García, M. y. c. d. a. (2013). Premisas para la evaluación ambiental de áreas degradadas en minas abandonadas. Contribución a su recuperación para la sostenibilidad local. Sustentabilidad. . Rio de Janeiro. Brasil.
11. Moreno, C., & Chaparro, E. (2008). Conceptos básicos para entender la legislación aplicable a la industria minera en los países andinos. División de Recursos Naturales e Infraestructura, Santiago de Chile.
12. Ostroumov, N., A. Rojas, C. Sánchez: Estudio de la composición mineralógica de las lateritas de Moa por el método de difracción de rayos X. Revista Minería y Geología. Vol III (1), 23 – 30. 1985.
13. Ortiz Bárcenas, J. (2015). Obtención de un producto prerreducido para la producción de arrabio con níquel (nickel pig iron) a partir del tratamiento de los escombros lateríticos de Mina Martí de Nicaro (Tesis doctoral), ISMM, Moa.
14. Palacios Rodríguez, A. (2001). Recuperación de cobalto por medio de la lixiviación ácida de los escombros lateríticos. (Tesis doctoral), ISMM, Moa.
15. Palacios Rodríguez, A., & García Peña, E. (2013). Extracción de cobalto mediante lixiviación ácida de los escombros lateríticos. 11.
16. Ponce Seoane, N., & Díaz Comesañas, J. L. (2011). Pasivos ambientales mineros en Cuba. Bases metodológicas. 4.
17. Ramírez Pérez, M. C. (2010). Utilización de los escombros lateríticos de zona A, yacimiento Moa Occidental en el proceso de descarburización del acero ACI HK-40. (Tesis Doctoral), ISMM, Moa.
18. Reyes González, O. (2014). Extracción de cobalto por lixiviación de los escombros lateríticos en tinajas de percolación. (Tesis de Diploma), ISMM, Moa.

19. Rojas, A. (1995). Principales fases mineralógicas portadoras de níquel en los horizontes lateríticos del yacimiento Moa. (Tesis Doctoral), Moa, ISMM.
20. Rojas, A. (2001). Evidencias de que la goethita es la principal portadora de níquel en los horizontes lateríticos de las cortezas ferroniquelíferas. Revista de Minería y Geología, 31
21. SNMP. (2004). Informe quincenal 07. Pasivos ambientales. Perú.
22. Swardjo, W. (1969). Beneficio y posibilidades siderúrgicas de los escombros de minerales lateríticos. Revista Tecnológica, 25-30.

ANEXOS

Anexos 1 Composición química de los elementos mayoritarios en las fracciones granulométricas de los escombros del yacimiento Camarioca Norte Área 1

Anexo 2 Procedimientos realizados por el CEDINIQ