



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

**Caracterización físico-química y
térmica de los escombros lateríticos para
su posible uso industrial**

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

Silvia Catalina Huaraca Taype

Moa, 2018





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

**Caracterización físico-química y
térmica de los escombros lateríticos
para su posible uso industrial**

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

Autora: Silvia Catalina Huaraca Taype

Firma.....

Tutores: Dr.C. María Caridad Ramírez Pérez

Firma.....

Dr.C. José Alberto Pons Herrera

Firma.....

Moa, 2018



Declaración de autoridad

Yo: Silvia Catalina Huaraca Taype, autora del trabajo titulado caracterización físico-química y térmica de los escombros lateríticos para su posible uso industrial, declaro la propiedad intelectual al servicio del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, para que disponga de su uso cuando considere conveniente.

Silvia Catalina Huaraca Taype

Dr.C María Caridad Ramírez Pérez

Dr.C José Alberto Pons Herrera

DEDICATORIA

A Dios, por permitirme el haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional. A mi madre Isabel Taype Franco, por ser el pilar más importante y por demostrarme siempre su cariño y apoyo incondicional sin importar la distancia. A mi padre Victor Huaraca Vega, a pesar de nuestra distancia física, siento que estás conmigo siempre y aunque nos faltaron muchas cosas por vivir juntos, sé que este momento hubiera sido tan especial para ti como lo es para mí, a mis hermanos Marcial H.T, Julio H.T, Alex H.T, para mis hermanas Luisa H.T, Hermelinda H.T y para mis cinco sobrinos, todos ellos son mis seres más queridos y que fueron mi motor impulsor para alcanzar esta meta, con su apoyo moral e incondicional. A mi querido novio Yoel Atao Ccorisapra por su amor, comprensión y apoyo. A mis profesores, gracias por su tiempo, por su apoyo, así como por la sabiduría que me transmitieron en el desarrollo de mi formación profesional.

Agradecimientos:

A todos mis profesores por los conocimientos transmitidos durante el desempeño de mi carrera.

A mi tutores, la Dr. C. María Caridad Ramírez Pérez y el Dr. C. José Alberto Pons Herrera por confiar en mí en la realización de este trabajo.

A mi mamá Isabel Taype Franco, mi papá Victor Huaraca Vega, por su apoyo económico, moral y por la educación que me dieron en el transcurso de mi vida.

A mis hermanos Marcial H.T, Julio H.T, Alex H.T, y a mis hermanas Luisa Rosalvina H.T y Hermelinda H.T, que todos ellos me apoyaron económicamente, moralmente o de otra manera y a mis sobrinos.

A todos mis familiares que me apoyaron en los momentos de mi vida en que más lo necesitaba a pesar de estar lejos.

A mi novio Yoel Atao Ccorisapra, por su aliento, consejos en los momentos más difíciles de mi formación profesional.

A todos mis profesores que apoyaron en mis cinco años de carrera.

A mis amigos e amigas que siempre creyeron en mi, y que estuvieron conmigo cuanto mas los necesitaba..

A los que de una forma u otra me apoyaron y ayudaron en la elaboración de este trabajo.

A la Revolución cubana, por darme la oportunidad de convertirme en profesional .

A Programa Nacional de Becas (PRONABEC) del gobierno Peruano que me dio la oportunidad de estudiar en el extranjero(Cuba).

A todos

Muchas Gracias.

PENSAMIENTO

“LA BELLEZA DEL ALMA BRILLA CUANDO UN HOMBRE
SOPORTA CON COMPOSTURA UN RETO TRAS OTRO, Y NO
PORQUE NO LOS SIENTA, SINO PORQUE ES UN HOMBRE DE
TEMPERAMENTO ALTO Y HEROICO.”

ARISTÓTELES

Resumen

Las empresas Minero Metalúrgicas, generan una gran cantidad de desechos sólidos, los cuales se les puede considerar como Pasivos Ambientales. El objetivo del presente trabajo de investigación es determinar las características físico-químicas, mineralógicas y térmicas del Pasivo Ambiental Escombros Lateríticos del Yacimiento Moa Occidental, pertenecientes a la Empresa Ferroníquel Minera S.A, para proponer variantes de uso industrial. Las muestras fueron preparadas por el método del cono y el anillo y la caracterización se realizó con la combinación de las técnicas de Espectrofotometría de Absorción Atómica, Volumetría, Difracción de Rayos X y Análisis Termogravimétrico. Se demostró que este Pasivo Ambiental está constituido por partículas mayores de 0,1 mm que representan el 96 % de las totales. Químicamente está representado por óxidos de hierro y óxido de aluminio como los mayoritarios, lo que justifica que las fases mineralógicas principales sean maghemita y gibssita y que los cambios de masa reportados por el análisis Termogravimétrico estén relacionados con las transformaciones de estos óxidos. Al comparar los resultados en esta investigación con los obtenidos por otros autores en el tratamiento de otros Pasivos Ambientales de la región de Moa y Nicaro, es posible proponer la utilización de los escombros lateríticos del yacimiento Moa Occidental pertenecientes a la Empresa Ferroníquel Minera S.A en la industria siderúrgica, especialmente como material oxidante en la elaboración de aceros y en la producción de arrabio con níquel (Nickel Pig Iron).

Abstract

Metallurgical mining companies generate a large amount of solid waste, which can be considered as environmental liabilities. The objective of this research is to determine the physical-chemical, mineralogical and thermal characteristics of the Lateritic Debris Environmental liabilities of the western Moa occidental deposit, belonging to Ferroníquel Minera S.A Company, to propose variants for industrial use. The samples were prepared by the cone and ring methods and the characterization was made with the combination of Atomic Absorption Spectrophotometry, Volumetric, X-ray Diffraction and Thermogravimetric Analysis techniques. It was demonstrated that this Environmental liabilities constituted by particles greater than 0.1 mm that represent 96% of the total. Chemically it is represented by oxides of iron and aluminum oxide as the majority, which justifies that the main mineralogical phases are maghemite and gibbsite and that the mass changes reported by the thermogravimetric analysis are related to the transformations of these oxides. When comparing the results in this research with those obtained by other authors in the treatment of other Environmental Liabilities of the Moa and Nicaro region, it is possible to propose the utilization of the lateritic debris from the western Moa Occidental deposit belonging to Ferroníquel Minera SA Company in the steel industry, especially as an oxidising material in the production of steel and in the production of nickel pig iron (Nickel Pig Iron).

ÍNDICE DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO	7
1.1 Consideraciones generales sobre los Pasivos Ambientales Mineros Metalúrgicos	7
1.1.1 Conceptualización de los Pasivos Ambientales Minero –Metalúrgicos	9
1.2 Características de los escombros lateríticos.....	12
1.3 Experiencias en el mundo y en Cuba sobre el tratamiento de los escombros lateríticos	15
Conclusiones del capítulo I.....	19
CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS	20
2.1 Selección y preparación de las muestras.....	20
2.1.1 Caracterización granulométrica	22
2.2 Equipos y técnicas utilizados para la caracterización química, mineralógica y térmica.....	24
2.2.1 Caracterización química.....	25
2.2.2 Caracterización mineralógica.....	26
2.2.3 Caracterización térmica.....	26
2.2.4 Otros equipos empleados durante la investigación.....	27
Conclusiones de capítulo II	29
CAPÍTULO III. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	30
3.1 Análisis de la caracterización de los escombros del yacimiento Moa Occidental pertenecientes a la Empresa Ferroníquel Minera S.A	30
3.1.1 Resultados de la caracterización física y química.....	30
3.1.1.1 Resultados de los análisis granulométricos	30
3.1.1.2 Resultados de la caracterización química.....	32
3.1.2 Resultados de la caracterización mineralógica y térmica de los escombros del yacimiento de Moa Occidental pertenecientes a la Empresa Ferroníquel Minera S.A	33

3.1.2.1	Resultados de la caracterización mineralógica.....	33
3.1.2.2	Resultados de la caracterización térmica.....	34
3.2	Análisis comparativo de las características de los escombros lateríticos	36
3.2.1	Comparación de las características químicas de los escombros lateríticos.....	36
3.2.2	Comparación de las características mineralógicas de los escombros lateríticos...	38
3.2.3	Comparación de las características térmicas de los escombros lateríticos	39
3.3	Propuestas de usos a partir del análisis comparación con otros escombros.....	42
	Conclusiones del capítulo III.....	44
	CONCLUSIONES GENERALES	46
	RECOMENDACIONES	47
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Masa de las muestras utilizadas para el análisis granulométrico	22
Tabla 2. Características del equipo de análisis térmico empleado en la investigación. .	27
Tabla 3. Resultados del análisis granulométrico promedio del Pasivo Ambiental, escombros lateríticos del yacimiento Moa Occidental, pertenecientes a la Empresa Ferroníquel Minera S.A.....	31
Tabla 4. Composición química de los escombros lateríticos del yacimiento Moa Occidental pertenecientes a la Empresa Ferroníquel Minera S.A.	32
Tabla 5. Composición mineralógica cuantitativa del escombros estudiado, determinada con High Score Plus, versión 3.0B	34
Tabla 6. Resumen de los análisis térmicos	36
Tabla 7: Composición química (en %), de diferentes tipos de escombros lateríticos de las regiones de Nicaro y Moa.....	37
Tabla 8. Comparación de fases mineralógicas de los escombros lateríticos de las regiones de Moa y Nicaro.	39
Tabla 9. Comparación de las características térmicas de los escombros lateríticos de yacimientos de la región de Moa y Nicaro.	40
Tabla 10: Composición química (en %) y las fases mineralógicas de diferentes tipos de escombros lateríticos de las regiones de Nicaro y Moa.....	42

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Área donde se enmarca el objeto de estudio de la investigación.	7
Figura 2. Procedimiento para la homogeneización y cuarteo de la muestra inicial a) muestra inicial, b) muestra homogeneizada y c) muestra cuarteada.	20
Figura 3. Procedimiento del cuarteo manual realizado a los escombros lateríticos del yacimiento Moa Occidental.	21
Figura 4. Esquema empleado para la selección de las muestras de la investigación	22
Figura 5. Juego de tamices utilizados en el análisis granulométrico.	23
Figura 6. Esquema utilizado en el análisis granulométrico de las muestras	24
Figura 7. Equipo de Espectroscopia de Absorción Atómica empleado en la caracterización química.	25
Figura 8. Equipo de análisis térmico del CIPIMM, empleado en esta investigación.	26
Figura 9. Balanza utilizada para el pesaje de las muestras.	28
Figura 10. Características de tamaño promedio parcial de los escombros lateríticos del yacimiento Moa Occidental.	31
Figura 11. Difractograma de los escombros lateríticos del yacimiento Moa Occidental, pertenecientes a la Empresa Ferroníquel Minera S.A. Mh: maghemita; G: goethita; Gb: gibbsita; H: hematita.	34
Figura 12. Termograma de escombros lateríticos del yacimiento Moa Occidental.	35
Figura 13. Comparación de los termogramas de los yacimientos de la región Moa y mina Martí en Nicaro.	41

INTRODUCCIÓN

En el mundo se desarrollan actividades minero metalúrgicas que generan Pasivos Ambientales para lo cual cada país tiene su ley de evaluación del impacto ambiental que estos y otros desechos provocan. Como Pasivo Ambiental “se conocen a aquellas instalaciones efluentes, emisiones, depósitos de residuos producidos por las operaciones mineras, abandonadas o activas que actualmente constituyen un riesgo para la salud de la población y del ecosistema”, (Ministerio de Energía y Minas de Perú, 2015, pág. 2).

En el informe del Ministerio de Energía y Minas de Perú citado anteriormente se considera que las actividades minero metalúrgicas se realizan a nivel mundial, y generan grandes cantidades de Pasivos Ambientales, pero cada país tiene su ley, decretos reglamentarios establecidos para someter el proceso de evaluación de impacto ambiental de acuerdo al tipo de residuos o escombros, que son perjudiciales para la población y el ecosistema que les rodea.

Cedrón Lassús,(2013) menciona que las operaciones mineras tanto superficiales como subterráneas, producen gran cantidad de material de desecho rocoso conocido como escombros o desmontes 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 depositar este desmonte en áreas superficiales, en rumas que constituyen las llamadas escombreras, (pág. 35).

Como se menciona anteriormente, las actividades mineras subterráneas y a cielo abierto, que están en operación o inactivas, generan grandes cantidades de desechos rocosos y escombros, que tienen menor contenido de mineral y valor económico. Es importante tener en cuenta que los escombros producidos en las minas se depositen en las escombreras para luego ser tratados y utilizados en diferentes usos.

Señala Sotomayor, (2015) que los Pasivos Ambientales Mineros (PAM) vienen a ser los daños no compensados producidos por una determinada empresa al medio ambiente a lo largo de su ciclo de vida (exploración, construcción, operación y cierre); es decir, se trata de una deuda a la comunidad, donde la operación minera se ha realizado o se encuentra activa en el presente y con proyecciones futuras; los PAM son daños que generan lesiones en los factores ambientales, incluidos los seres humanos, cuyo pago de reparación o compensación del daño ocasionado por la empresa no ha sido asumido y en muchas

ocasiones la responsabilidad recae en la sociedad en su conjunto. De modo, frente a la existencia de Pasivos Ambientales es necesario recurrir no solo a una remediación o mitigación de los impactos ocasionados, sino también a la exigencia del resarcimiento o indemnización de los daños provocados, cuya valoración debe ser incluido en los costos del proyecto minero (pág. 1).

Como ya se ha mencionado los Pasivos Ambientales son perjudiciales desde el inicio hasta el cierre de las operaciones mineras, ya que estos daños ocasionan serios problemas de contaminación para el medio ambiente y los seres vivos. Las empresas mineras no han asumido la responsabilidad de remediar el área dañada y la indemnización de los daños provocados, para las reparaciones ambientales cuyos costos deben ser incluidos en el proyecto minero para la recuperación ambiental.

En algunas ocasiones puede existir cierto consenso en considerar el riesgo como un factor definitorio, “tan solo se consideran Pasivos Ambientales Mineros (PAM) a aquellos elementos asociados a actividades mineras abandonadas que representen un riesgo potencial permanente sobre la salud de las personas, la biodiversidad y el medio ambiente”, (Alberruche Arranz & Rodriguez, 2014).

Estos autores señalan, que los Pasivos Ambientales Mineros Metalúrgicos (PAMM), son actividades mineras que no están en proceso de funcionamiento y dejan desechos mineros o escombreras que tienen menor contenido de minerales, sin hacer ningún tipo de tratamiento, esto pueden presentar un riesgo para los seres vivos que se encuentran alrededor de dichas actividades.

Las empresas generadoras de estos residuos deben realizar a cabo un estudio específico de sus características físicas, químicas, térmicas y mineralógicas para establecer sus usos de acuerdo a sus características ya mencionadas y así poder aprovecharlos en su totalidad eliminando la polución al medio ambiente.

El reaprovechamiento de Pasivos Ambientales Mineros es un mecanismo favorable para la recuperación ambiental; “aún se desconoce cuál es su verdadero potencial en Perú, por ejemplo se desconoce cuál es su verdadero potencial y evidentemente, su ámbito de aplicación es limitado, ya que la extracción minera sólo podrá llevarse a cabo en algunos de ellos: aquellos que contengan minerales cuya recuperación sea económicamente viable”, (Gutiérrez Sianiegas, 2004, pág. 55).

Según los autores Ferreiro Guerrero, Leyva González, & Sánchez Cruz,(2010) en Cuba los depósitos de lateritas, constituyen unas de las mayores reservas de níquel en el mundo y expresan lo siguiente “actualmente se encuentran en explotación los yacimientos Atlantic en Moa; Mina Martí de Nicaro y Pinares de Mayarí; todos pertenecientes a la Provincia de Holguín”,(...) En nuestro país las complicaciones de estas reservas exigen de nuestros ingenieros y técnicos experiencias y conocimientos que permitan su explotación para poder recuperar todas las riquezas que hasta ahora no se aprovechan, y de esta forma darle a ellas una utilización, (págs. 1,2).

Los minerales de níquel en Cuba son lateritas típicas altamente lixiviadas, terrenos rojos hasta amarillosos, con un alto contenido de hierro. Son ellos concentrados residuales de intemperismo químico. Consisten esencialmente en minerales de hierro colocados en una capa sobre las serpentinas descompuestas. La relación entre el mineral de hierro (por encima del 35% de hierro) y el mineral de serpentina (por debajo del 35 % de hierro).

En la actualidad se desarrollan diversas investigaciones relacionadas con la explotación de los yacimientos que se encuentran en la provincia de Holguín, para recuperar los escombros lateríticos ricos en metales como hierro y aluminio, y darles un adecuado uso a estos Pasivos Ambientales Minero-Metalúrgicos sólidos (PAMMs), a partir del estudio de sus características físicas, químicas y mineralógicas.

Ortíz Bárcenas, (2015), realiza la caracterización física, química, mineralógica y térmicas de los escombros lateríticos del yacimiento Mina Martí en la región de Nicaro, con vistas a la obtención de Nickel Pig Iron (NPI) para su uso siderúrgico y en " sentido plantea lo siguiente: la caracterización física y química de este mineral garantiza sus usos siderúrgicos, su composición química es compleja y posee apreciables contenidos de níquel para la obtención de productos siderúrgicos. Por su composición granulométrica y química es una materia prima, que necesita de un análisis particular y pormenorizado con respecto a otros minerales de hierro para usos siderúrgicos, (...) se demuestra que los mismos cumplen con los requisitos para ser estudiados en la obtención de un producto prerreducido con hierro y níquel, (págs. 15-29).

Un trabajo de especial interés para esta investigación es el realizado por (Ramírez Pérez, 2010), quien demuestra la factibilidad del uso de los escombros Lateríticos de zona A como oxidantes en la descarburación del acero ACI HK-40, basado en una rigurosa

caracterización físico- química y del estudio de descomposición térmica de estos PAMMs.

Se evidencia que se desarrollan investigaciones con escombros lateríticos de diferentes yacimientos de la región Mayarí – Moa, sin embargo, en estos trabajos no se han incluido los del yacimiento Moa Occidental que pertenecen actualmente a la Empresa Ferroníquel minera S.A y que están depositados en sus escombreras. Por tanto, no existen informaciones básicas que indiquen las características físicas, químicas, mineralógicas y térmicas de estos escombros, lo cual motiva a considerar la necesidad de caracterizar estos residuos ampliando así su conocimiento, lo que permitirá proponer variantes de utilización.

Problema de la investigación

El insuficiente conocimiento de las características físico – químicas, mineralógicas y térmicas del Pasivo Ambiental escombros lateríticos del yacimiento Moa Occidental, pertenecientes a la Empresa Ferroníquel Minera S.A, limitan la toma de decisiones para las propuestas de usos.

Objeto de la investigación

Pasivo Ambiental, escombros lateríticos del yacimiento Moa Occidental, pertenecientes a la Empresa Ferroníquel Minera S.A

El **campo de acción** lo constituyen las características físico – químicas, mineralógicas y térmicas de los escombros lateríticos del yacimiento Moa Occidental, pertenecientes a la Empresa Ferroníquel Minera S.A

Hipótesis:

Con la determinación de las características físico - químicas, mineralógicas y térmicas del Pasivo Ambiental escombros lateríticos del yacimiento Moa Occidental, pertenecientes a la Empresa Ferroníquel Minera S.A, será posible proponer variantes de utilización industrial de este residuo minero.

Objetivo general

Determinar las características físico-químicas, mineralógicas y térmicas del Pasivo Ambiental escombros lateríticos del yacimiento Moa Occidental pertenecientes a la Empresa Ferroníquel Minera S.A, para proponer variantes de uso industrial.

Objetivos específicos

- Determinar las características físico-químicas, mineralógicas y térmicas de Pasivo Ambiental escombros lateríticos del yacimiento Moa Occidental.
- Comparar las características físico-químicas, mineralógicas y térmicas del Pasivo Ambiental escombros laterítico del yacimiento Moa Occidental con otros pasivos ambientales existentes en la región de Moa y Nicaro.
- Identificar y proponer posibles usos en la industria, del Pasivo Ambiental estudiado, a partir de sus características.

Justificación de la investigación

Los minerales lateríticos cubanos se caracterizan por tener un grupo de minerales con diferentes características que constituyen residuos de los procesos mineros y metalúrgicos, porque son abandonados en las zonas minadas por la baja ley de los principales elementos que los componen. En este caso se destacan, los escombros lateríticos, presas de cola y serpentinas duras o peridotitas, rechazos de las plantas de preparación de mineral, entre otros, que aunque no son utilizados actualmente en los procesos tecnológicos, ya sea por falta de tecnología o por desconocimiento de sus características físicas, químicas, mineralógicas y térmicas, poseen elementos químicos valiosos, que pueden ser utilizados luego de su caracterización integral, lo cual es una de las principales motivaciones para el desarrollo de esta investigación.

Pasivos Ambientales Mineros es una terminología empleada a nivel mundial para identificar los residuos mineros que, como resultado de la explotación de determinados minerales, no cumplen las condiciones técnico - económicas para su procesamiento y han quedado acumulados formando parte de escombreras, presas o en el propio yacimiento.

Con este trabajo de investigación se pretende caracterizar los escombros lateríticos del yacimiento Moa Occidental pertenecientes a la Empresa Ferroníquel Minera S.A , a partir del conocimiento de sus características físicas, químicas, mineralógicas y térmicas, lo que contribuirá a la rehabilitación de este Pasivo Ambiental generado como resultado de los procesos mineros de las plantas de procesamiento de minerales de níquel en Moa, de forma tal que la información sea actualizada para diseñar una estrategia con vista a su aprovechamiento sostenible.

Por tanto, la posibilidad de procesar los PAMMs, teniendo en cuenta sus características físico – químicas, mineralógicas y térmicas se convierte en una necesidad de la sociedad cubana y constituye una de las líneas priorizadas del país.

Resultados esperados

1. Caracterización física, química, mineralógica y térmica de los escombros lateríticos del yacimiento Moa Occidental pertenecientes a la Empresa Ferroníquel S.A
2. Realizar propuestas para su utilización industrial.

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se describen las características generales, así como las propiedades físicas, químicas, mineralógicas y térmicas del Pasivo Ambiental minero “escombros lateríticos” del yacimiento Moa Occidental, específicamente los pertenecientes al proyecto ferroníquel. Se analizan además los diversos criterios sobre la conceptualización de los Pasivos Ambientales mineros metalúrgicos; aspectos que se describen a continuación.

La literatura recoge importantes resultados en el campo de la caracterización de los escombros lateríticos de Moa. El área de estudio de esta investigación comprende las escombreras de la Empresa Ferroníquel Minera S.A como se muestra en la figura 1.

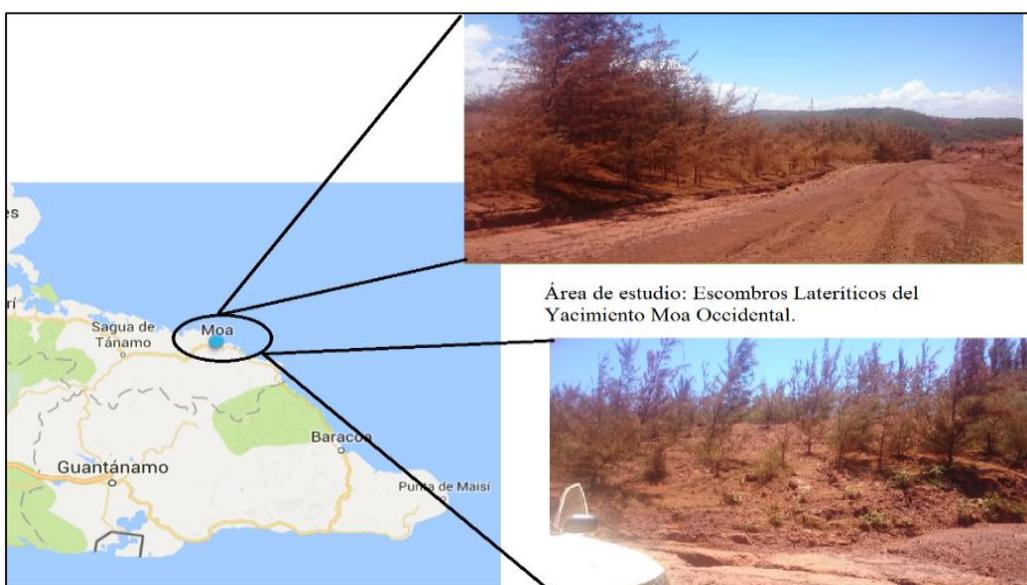


Figura 1. Área donde se enmarca el objeto de estudio de la investigación.

Elaborado por: Silvia Catalina Huaraca Taype

A continuación, se establece el estado del arte en el tratamiento de los escombros lateríticos generados por la industria del Níquel en la región Mayarí - Moa y las perspectivas para su utilización. Esto permite fundamentar la hipótesis planteada.

1.1 Consideraciones generales sobre los Pasivos Ambientales Mineros Metalúrgicos

Existen varios tipos de pasivos ambientales que se conceptualizan a cada una de ellas a continuación.

Los PAMMs son desechos generados por las industrias, como consecuencia del desarrollo de las actividades mineras y metalúrgicas pero que poseen valor económico y social y

representan un riesgo e impacto para el medio ambiente y la calidad de vida de las personas.

Las actividades minera metalúrgicas, a través del tiempo, dieron origen a la formación de los pasivos mineros; entre esas actividades se encuentran: “las labores subterráneas de la mina, labores de tajo abierto, depósitos de desmontes, depósitos de relaves, generación de aguas ácidas, descarga de sedimentos, residuos metalúrgicos, instalaciones de talleres de mantenimiento, estaciones de combustible, alteración del paisaje y deforestación”, (Sotomayor, 2015, pág. 6).

En este sentido, Ponce Seoane & Días Comesañas, (2011), consideran que los PAM son obligaciones financieras para la reparación de daños causados al entorno y el incumplimiento de la legislación minera y ambiental existente. Su análisis es casi nulo en Cuba entre autoridades, especialistas y dirigentes empresariales, debiéndose tratar si concierne a la creación de empresas mixtas con entidades extranjeras. Deben ser analizados si se trata de fusiones o traspasos de bienes raíces entre las ramas de nuestra economía.

Los autores consideran, además, que los PAM ocasionan daños alrededor de la población en que se encuentran; al incumplir la legislación minera y ambiental, pero a pesar de que las empresas existentes tienen la obligación de realizar investigaciones para caracterizar los Pasivos Ambientales y definir sus respectivos usos.

Por otra parte Gutiérrez Sianiegas, (2004), conforme al Fondo Nacional del Ambiente (FONAM), entre los Pasivos Ambientales mineros se encuentran chimeneas, depósitos de desmontes, depósitos de relaves o relaveras, socavones, tajos, edificaciones e instalaciones. Evidentemente, por su naturaleza, no todos estos pasivos contienen residuos minerales y, en consecuencia, sólo una parte de ellos podrán ser materia de reaprovechamiento. Probablemente, los lugares más aparentes para el reaprovechamiento serán los depósitos de desmontes, las relaveras y los socavones, tajos y rajos, (...) Los depósitos de desmontes, también conocidos como “botaderos”, y las relaveras contienen residuos minerales derivados de las actividades de extracción y de procesamiento, respectivamente. Los socavones, tajos y rajos están, más bien, vinculados a las áreas mineralizadas, (pág. 55).

Como se menciona anteriormente, consideramos que las escombreras o desmontes, ocupan un lugar del material extraído de una mina que contiene elementos valiosos o

tienen bajo contenido de estos elementos valiosos, que no tienen un valor económico, y de acuerdo a sus características físicas no se les da un uso adecuado.

En el pasado se comenzó a desarrollar la minería sin tomar ninguna medida de reestablecimiento del medio ambiente, por eso en la actualidad es un riesgo los Pasivos Ambientales porque afectan al ecosistema. La recuperación de los Pasivos Ambientales son complejos debido a sus características físicas y químicas para su rehabilitación, por lo que necesitan un desarrollo tecnológico adecuado.

En un artículo de la revista Desarrollo Ambiental y Social Sostenible,(2005), se plantea que: la inadecuada disposición de relaves y desmontes, así como los métodos inapropiados para la disposición de efluentes peligrosos y materiales contaminantes de las operaciones mineras, han causado filtraciones, drenaje ácido y contaminación de cuerpos acuíferos, así como otros efectos negativos en la biodiversidad y los ecosistemas. Por ejemplo, algunas de las actividades mineras y metalúrgicas desarrolladas a lo largo del río Rímac, en conjunción con otras fuentes incluyendo las de tipo agrícola, contaminan las fuentes de agua potable que abastecen la región de Lima Metropolitana donde habitan más de 7 millones de personas, o bien, aproximadamente un tercio de la población peruana. Otras cuencas fluviales afectadas por la contaminación de PAMs incluyen las del Mantaro, Pisco, Madre de Dios, Llaucano y Santa(págs. 4-5).

Los mineros responsables de Pasivos Ambientales “que no desarrollen operaciones mineras y mantienen el derecho a la titularidad de concesión a través de la vigencia minera, deberán presentar el Plan de Cierre, salvo que éstos soliciten se cancele sus derechos a la concesión minera”, (Pease García, 2004, pág. 2).

Los Pasivos Ambientales se definen de acuerdo al punto de vista de cada autor, en dependencia del contexto y del desarrollo del país que los genera. A continuación, se dan algunas definiciones en el mundo y en Cuba.

1.1.1 Conceptualización de los Pasivos Ambientales Minero –Metalúrgicos

En la actualidad existen numerosas investigaciones dirigidas a dar solución a las grandes acumulaciones de desechos sólidos, líquidos y gaseosos que generan las operaciones mineras, abandonadas o activas y las grandes industrias de metales y materiales, que constituyen un riesgo permanente para la salud de la población y el ecosistema circundante. 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, (Moreno & Chaparro, 2008), (ASGMI (Asociación de Servicios Geología y Minería Iberoamericanos), 2010), (Chávez Quijada, 2015), (Ministerio de Energía y minas en Perú, 2015), entre otros.

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, en donde no se hayan realizado un cierre de minas reglamentados y certificados por la autoridad competente, (Moreno & Chaparro, 2008).

El Pasivo Ambiental Minero es el área donde se realizó una actividad, trabajos de exploración, explotación minera o metalúrgica en una fase anterior y fueron abandonados sin realizar ningún trabajo de rehabilitación ni ejecución de medidas restauradoras, con el fin de eliminar o minimizar los impactos ambientales producidos.

Los Pasivos Ambientales mineros pueden presentarse de la siguiente manera como los depósitos de desmonte, “constituyen el área ocupada por los materiales extraídos del interior de la mina, que no contiene valores extraíbles ya que su extracción no es económica, por lo que se amontonan en zonas donde no se realizan actividades de explotación” (Calzada Jiménez, 2014, pág. 35).

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, según los autores ((Arranz González & Alberruche del Campo, 2008); (Alberruche, y otros, 2014); (ASGMI (Asociación de Servicios Geología y Minería Iberoamericanos), 2010)).

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

Un Pasivo Ambiental es 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”, (Sociedad Nacional de Minería Petróleo y Energía, 2004).

Los autores Adasme Aguilera, Arranz González, *et. al.*, (2010) plantean que los Pasivos Ambientales afectan al medio ambiente y lo definen 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 medioambiente”, (pág. 2).

Como plantean los autores en el párrafo anterior, los Pasivos Ambientales Mineros son generados por las industrias mineras que producen desmontes o escombros lateríticos que deterioran el suelo en que están ubicados y pueden ser perjudiciales para el ecosistema, de modo que se deben buscar alternativas para restablecer el área afectada.

Roché González, (2017) en su informe hace referencia a la definición que sobre un Pasivo Ambiental da la sociedad Nacional de Minería del Petróleo y Energía de Perú: “es 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”, (pág. 8)

En su informe Ganesh Persaud,(2014) plantea que en Cuba no existe una definición específica para los PAMM, aunque prevalecen varios criterios sobre su denominación, ya que las leyes existentes no lo definen claramente. En las investigaciones más recientes (Ramírez Pérez, 2010), (Ganesh Persaud, 2014), (Roché González, 2017), dirigidas al inventario, la caracterización físico-química y al estudio de la descomposición térmica

de los escombros lateríticos cubanos, para proponer alternativas de utilización, se han clasificado estos residuos como PAMMs.

Si bien en la literatura consultada relaciona a los pasivos con actividad minera cerrada o abandonada, hay consenso de los investigadores cubanos que los residuos sólidos tales como: escombros y colas de la industria del Níquel en Cuba, se consideren como PAMMs, al estar depositados en presas y escombreras sin perspectiva inmediata de utilización, afectando el ecosistema de la región donde se encuentran los yacimientos y las industrias, lo cual resulta una motivación para el desarrollo de esta investigación.

1.2 Características de los escombros lateríticos

En el mundo, 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, (Sociedad Nacional de Minería Petróleo y Energía, 2004).

Independientemente de su importancia económica, el conocimiento sobre la distribución de níquel y cobalto en las distintas fases minerales presentes en estos depósitos es sólo conocida a un nivel muy genérico. En la actualidad existen importantes lagunas en el conocimiento de las diferentes fases portadoras de níquel y cobalto. Por ejemplo, en las fases establecidas como portadoras de níquel (principalmente goethita y silicatos hidratados de magnesio) y cobalto (fases de manganeso), se desconoce si estos elementos están como iones adsorbidos en la superficie cristalina. Estas limitaciones están dadas, en parte, por las particularidades de las fases minerales que componen a las lateritas, las cuales mayoritariamente tienen granos de tamaño muy pequeño, son amorfas, (Tauler Ferré & Proenza Fernández, 2008, pág. 4).

La determinación de la composición química es de suma importancia, pues estos residuos suelen encontrarse en una mina abandonada o en depósitos donde se favorece la contaminación de ellos y por tanto la alteración en su composición. Para ello se utilizan métodos y técnicas analíticas que garantizan la confiabilidad de los resultados. Entre las técnicas se pueden mencionar: espectrofotometría de Absorción Atómica, Espectroscopia de plasma inductivamente acoplado, y fluorescencia de rayos X entre otras.

Desde el punto de vista mineralógico los escombros lateríticos son muy complejos y se necesita de técnicas adecuadas para determinar las fases presentes; usualmente se combinan la Difracción de rayos X y la Microscopía.

La composición promedio de las escombreras cubanas es la siguiente: Ni - 0,75 %; Co - 0,074 %; Cu - 0,02 %; Fe - 47,4 %; Cr - 3,35 %; SiO₂ - 3,66 %; Al₂O₃ - 8,6 %; MnO₂ - 0,51 % y MgO - 0,82 %, (Lorenzo Ricardo, 2001), (Ramírez Pérez, 2010) (Rodríguez Abreu, 2012), (Ortiz Bárcenas, 2015) y (Roché González, 2017).

Dichos escombros son concreciones de óxidos e hidróxidos de hierro no utilizables por las tecnologías actualmente instaladas para la extracción de níquel, debido a que no poseen los contenidos de níquel y cobalto exigidos; no obstante, presentan un contenido de hierro atractivo para la industria siderúrgica, como refiere (Ortiz Bárcenas, 2015) en su investigación.

Se puede asegurar entonces que por el contenido de hierro en los escombros lateríticos, entre 43 % y 53 %, estos forman parte de las reservas de minerales de hierro, aspecto que se debe tener en cuenta para el aprovechamiento de esta materia prima.

Durante la preparación y el beneficio de los minerales lateríticos para el proceso de lixiviación acida a presión, Almira Elías, (2003) demuestra que en el escombros los contenidos de níquel, hierro, óxido de cromo y cobalto son: 0,43 %; 50,1 %; 2,95 % y 0,02 %, respectivamente y que el aumento del hierro en la clase mayor de 0,83 mm es debido a la separación de los perdigones constituidos por aglomerados naturales con elevados contenidos de hierro, siendo la salida de esta clase 38,5 %. También se observan contenidos elevados de este metal en las clases más finas; (pág. 4)

Con relación a las fases mineralógicas que conforman los escombros, Palacios Rodríguez, (2001) plantea que la goethita y la gibbsita son las principales y sus contenidos son 15 % y 60 % respectivamente. Mientras que los minerales oxidados de manganeso (asbolanas) se encuentran entre 2,5 y 3 %, a los cuales el cobalto se asocia mayoritariamente, (2001).

Ramírez, (2010) demostró que las fases principales en los escombros de Zona A son los óxidos de hierro, representados fundamentalmente por maghemita (γ -Fe₂O₃) y goethita (α -FeO.OH). El predominio de esas fases está en correspondencia con la presencia mayoritaria del hierro y su amplia distribución en el perfil granulométrico estudiado. La maghemita constituye la fase principal, con contenidos entre 10,80 % y 77,60 %,

concentrándose hacia las fracciones mayores de 2 mm, mientras que el contenido de goethita oscila entre 12,54 y 31,60 %, concentrándose hacia las menores de 2 mm.

La caracterización de los escombros de diferentes yacimientos no ha estado limitada solo a la composición química y mineralógica, Ramírez Pérez, (2010) demostró que en los escombros de Zona A las fases predominantes son maghemita, goethita, hematita y otras como magnetita y cuarzo; la autora además caracterizó térmicamente estos residuos combinando las técnicas de Análisis Termogravimétrico (ATG), Térmico Diferencial (ATD) y Calorimetría Diferencial de Barrido (CDB), lo que le permitió definir las etapas en que se verifica la descomposición térmica de los mismos en atmosfera inerte.

Térmicamente, estos pasivos se caracterizan por un efecto endotérmico con máximo a los 100 °C, que se corresponde con la disminución de masa de agua que posee, así como de dos efectos endotérmicos consecutivos cuyo pico principal aparece a los 300 °C. La aparición de este doble efecto está relacionada con la deshidroxilación de la goethita.

Un efecto exotérmico, con máximo a 876,2 °C, en la curva de ATD, es característico de los procesos de cristalización de los óxidos presentes en estos pasivos. En el intervalo entre 720 y 850 °C, se produce la aglomeración de las partículas y el inicio de la sinterización, formándose en el caso de los compuestos de hierro, partículas de α -Fe₂O₃.

La presencia mayoritaria de hierro y aluminio en los escombros de Zona A, refiere Ramírez, constituye una regularidad de los escombros lateríticos cubanos, que justifica que estos residuos se consideren óxidos de hierro con diferentes grados de contaminación con el aluminio.

La combinación de estas técnicas fue utilizada por Ortiz en la caracterización de los escombros de Mina Martí, facilitándole al autor tomar decisiones durante el proceso de reducción carbonotérmica efectuado en su investigación.

En resumen, el empleo de técnicas y sus combinaciones han sido utilizadas en diferentes investigaciones, para caracterizar los residuos mineros de distintas regiones de Cuba, permitiendo a los investigadores analizar resultados y tomar decisiones. Sin embargo, la literatura no refiere estudios de caracterización en los escombros pertenecientes a las escombreras de la Empresa Ferroníquel Minera S.A. Por lo antes expuesto, se imponen la necesidad de determinar las características físicas-químicas, mineralógicas y térmicas de estos residuales, con lo cual será posible profundizar estos conocimientos y proponer variantes de utilización.

1.3 Experiencias en el mundo y en Cuba sobre el tratamiento de los escombros lateríticos

El Caribe contiene alrededor del 10 % de los recursos mundiales de minerales lateríticos, con los depósitos más importantes en el este de Cuba y en la Cordillera Central de la República Dominicana.

La extracción minera en Cuba se realiza garantizando contenidos superiores a 0,9 % de níquel. Los materiales con contenido menor a este, son considerados escombros o residuales que se almacenan o son utilizados en los viales mineros, (Lorenzo Ricardo, 2001).

La mayoría de las industrias o empresas minero metalúrgicas de países en vías de desarrollo, no toman importancia del 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 la mina. Estos desechos, si no son tratados se convierten en Pasivos Ambientales.

El aprovechamiento de Pasivos Ambientales Mineros es un mecanismo favorable para la recuperación ambiental; por ejemplo, aún se desconoce cuál es su verdadero potencial en el Perú. Evidentemente, su ámbito de aplicación es limitado, ya que la extracción minera sólo podrá llevarse a cabo en algunos de ellos: aquellos que contengan minerales cuya recuperación sea económicamente viable, (Gutiérrez Sianiegas, 2004, pág. 55).

En la actualidad se encuentran trabajando proyectos de reforestación ligado a conservación de aguas y suelos, asociados a zonas con presencia de PAMMs en la provincia de Hualgayoc- Cajamarca, (Alva Bazán, 2007, pág. 22).

China es el líder mundial en la producción de arrabio con níquel (NPI), a partir de mineral laterítico importado, con una producción de 300 mil toneladas por año. Se trata de un producto alternativo para la producción de aceros, que permite utilizar minerales de baja ley en níquel.

Como resultado de la explotación de los yacimientos lateríticos en la zona nororiental de Cuba, se ha originado la acumulación de importantes residuos mineros, dentro de los cuales se encuentran los escombros lateríticos de Mina Martí, pertenecientes a la Empresa Comandante “René Ramos Latour” de Nicaro. Dichos escombros “son concreciones de óxidos e hidróxidos de hierro no utilizables por las tecnologías actualmente instaladas

para la extracción de níquel, debido a que no poseen los contenidos de níquel y cobalto exigidos; presentan un contenido de hierro atractivo para la industria siderúrgica”, (Ortiz Bárcenas, 2015, págs. 2-3).

Según Azahares Ríos, (2015), las primeras investigaciones sobre los escombros lateríticos de la región de Mayarí-Punta Gorda, se desarrollaron en el Centro de Investigaciones Metalúrgicas (CIME) y estuvieron dirigidas fundamentalmente, al estudio de los yacimientos niquelíferos de Pinares de Mayarí y Mina Martí, con vista a la obtención de concentrados de hierro para la producción de arrabio y aceros. De manera centralizada se acometieron acciones para el rescate de los pasivos mineros. Se plantea que es a nivel de territorio, en primera instancia, donde deben emprenderse acciones para la rehabilitación de éstos, rescatándolos en función de sus necesidades y con los recursos financieros, materiales y humanos disponibles en los mismos.

Ganesh Persaud, (2014) plantea que el nivel de desarrollo de un país se determina si hay posibilidades para la inversión en nuevos métodos para el aprovechamiento de sus desechos industriales. Cuba es un país en vías de desarrollo por la tanto tiene la necesidad de desarrollar sus propios métodos para controlar las afectaciones que provocan al medio ambiente las emanaciones de residuales. En el municipio de Moa existen plantas metalúrgicas y minas que impactan al medio ambiente, debido a la emisión continua de Pasivos Ambientales. Estos recursos pueden estar en estado sólido, líquido o en forma de polvo y/o gas, (pág. 5).

Ramírez Pérez, (2010) se refiere a importantes resultados en el campo de la caracterización y de la aplicación de métodos para el aprovechamiento de los escombros lateríticos cubanos. La búsqueda de alternativas que posibiliten la utilización de este horizonte laterítico, considerado un residuo de la minería del níquel, en procesos tecnológicos sin afectar la calidad de los productos, debe significar un reto a los investigadores, para lo cual es necesario determinar los problemas, a partir de las contribuciones de la bibliografía existente, (pág. 6)

Las investigaciones por más de 50 años se han realizado de forma aislada, por diferentes entidades científicas, centros de investigación y el sector empresarial, sin embargo, no han seguido un programa organizado ni orientado al estudio integral de los Pasivos Ambientales generados por la industria del Níquel, que permitan establecer políticas para el tratamiento y uso de estos recursos, (Ganesh Persaud, 2014, pág. 6)

A partir del conocimiento de las características Beltrán Guilart, Penedo Medina, & Falcón Hernández, (2010), consideran en un futuro los minerales de baja ley, como los escombros lateríticos, representarán fuentes importantes para obtener níquel y cobalto.

Los autores evaluaron las posibilidades de tratar minerales lateríticos de baja ley en níquel con ácido sulfúrico a temperatura ambiente en columnas. Las recuperaciones de níquel fueron del 85 % en cuarenta días de lixiviación, mientras que las de aluminio fueron de alrededor de 70 %.

Los estudios realizados por Palacios Rodríguez, (2001), al lixiviar los escombros lateríticos de zona A con soluciones de ácido sulfúrico y sulfato de hierro, indican que se puede alcanzar una alta recuperación de cobalto, de manera que esta puede constituir una variante para el tratamiento de los escombros en áreas de recuperar el cobalto que contiene.

Dada la evolución industrial en Cuba, las empresas siderúrgicas buscan alternativas para su desarrollo. En tal sentido, un trabajo de especial interés para esta investigación es el realizado por (Ramírez Pérez, 2010), quien demuestra la factibilidad del uso de las partículas mayores de 2 mm de los escombros lateríticos de zona A, como oxidantes en la descarburación del acero ACI HK-40, basado en una rigurosa caracterización físico-química y del estudio de descomposición térmica de estos PAMMs. La autora establece el procedimiento para la adición de este residuo al horno de arco eléctrico.

Las lateritas y los escombros lateríticos han sido utilizados para producir hierro y acero de forma industrial; (Ortiz Bárcenas, 2015, pág. 9) realizó sus investigaciones solo por la vía de horno rotario y alto horno dado su contenido de hierro y compleja composición mineralógica. Los resultados despejan la duda del autor acerca de la selección de la tecnología a utilizar.

El mismo autor caracteriza los escombros lateríticos de mina Martí en Nicaro, determina la composición granulométrica, química, mineralógica y realiza los ensayos de reducción a muestras previamente seleccionadas y preparadas. Los ensayos de reducción carbotérmica por el método Termogravimétrico y la fusión demostraron la posibilidad de obtener un producto pre-reducido para obtención de arrabio con níquel (Nickel Pig Iron - NPI). Los resultados de Ortiz en el tratamiento de los escombros de Mina Martí y de Ramírez con los de zona A, demuestran la posibilidad de utilizar estos PAMMs en la industria siderúrgica como materia prima para producir aceros.

Debe considerarse también la propuesta de (Palacios Rodríguez, 2001) en cuanto a la posibilidad de recuperar el cobalto que contienen estos residuos mineros, utilizando la lixiviación ácida como método de extracción.

Conclusiones del capítulo I

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

1. Las definiciones dadas en el mundo a los Pasivos Ambientales Mineros se restringen a aquellos residuos de minas cerradas o abandonadas y edificaciones no utilizadas en la actualidad, que constituyen peligro para el ecosistema y para la vida de las personas. En Cuba no existe una definición aprobada oficialmente, lo cual debe constituir objetivo de las investigaciones que se desarrollan en la actualidad.
2. Los escombros lateríticos están constituidos mayoritariamente por óxidos de hierro y aluminio y las fases reportadas por los estudios de Difracción de rayos X (maghemita, goethita, gibbsita) están en correspondencia con los contenidos de estos óxidos. Lo anterior constituye una regularidad química y mineralógica de los escombros lateríticos de la región Mayarí- Moa.
3. La caracterización térmica ha estado limitada solo a los escombros de Zona A del yacimiento Moa Occidental y a los de Mina Martí, sin incluir a los depositados en las escombreras de la empresa Ferroníquel Minera S.A.
4. Los escombros lateríticos, por su contenido de hierro, pueden ser utilizados como materia prima para la industria siderúrgica, esencialmente como material oxidante de los aceros y para la obtención de Nickel Pig Iron (NPI).
5. No existen evidencias de la caracterización físico-química y térmica de los escombros del yacimiento Moa Occidental pertenecientes a la Empresa Ferroníquel Minera S.A, lo que limita la propuesta de usos a este PAMMs y justifica el desarrollo de esta investigación.

CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS

Este capítulo tiene como objetivo establecer la metodología para la caracterización físico-química, térmica y mineralógica del Pasivo Ambiental escombros lateríticos del yacimiento Moa Occidental de la Empresa Ferroníquel Minera S.A.

2.1 Selección y preparación de las muestras

El grupo de Geología – Minería de la Empresa Ferroníquel Minera S.A fue la encargada de la toma de muestra, esta fue tomada de la zona del escombros lateríticos del yacimiento de Moa Occidental. Se conformó una muestra de compuesto representativa de los escombros lateríticos del yacimiento Moa Occidental con una masa de 13.6 kg; luego trasladada al laboratorio 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).

El aspecto físico de la muestra, con una coloración rojiza oscura, delata al alto contenido de hierro en estos escombros, como es de esperar en horizontes de concreciones ferruginosas.

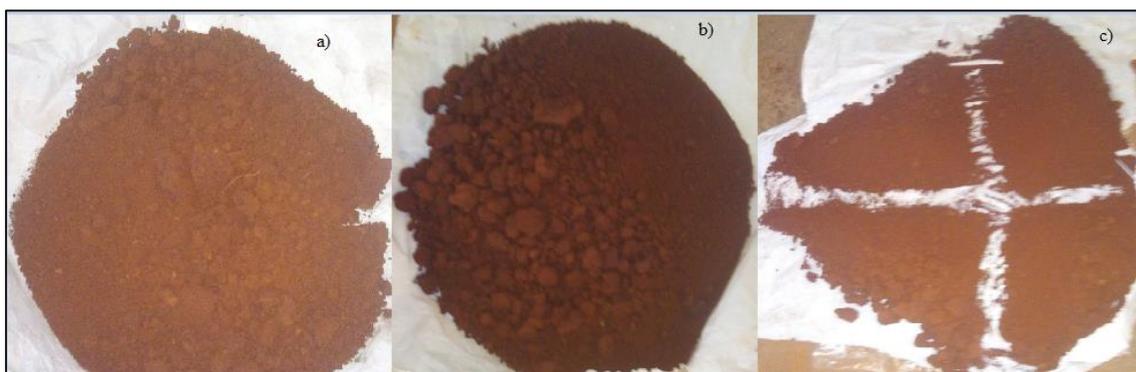


Figura 2. Procedimiento para la homogeneización y cuarteo de la muestra inicial a) muestra inicial, b) muestra homogeneizada y c) muestra cuarteada.

Elaborado por: Silvia Catalina Huaraca Taype

Herramientas:

- ✓ 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 cuchara de albañil sobre la anterior y luego haciendo un anillo, seguidamente se forma nuevamente el cono.
3. Por medio de cada cuchara de albañil, 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 cuchara de albañil. (Ver figura 3)

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 que pesa 6,6 kg para realizar otros tipos de muestras y la otra que pesa 6,5 kg para análisis granulométrico por vía seca, luego de realizar el procedimiento de homogeneización y cuarteo.



Figura 3. Procedimiento del cuarteo manual realizado a los escombros lateríticos del yacimiento Moa Occidental.

Elaborado por: Silvia Catalina Huaraca Taype

La figura 4 muestra el esquema de trabajo utilizado para la selección de las muestras y los testigos o reservas de investigación, para el desarrollo de la caracterización química y granulométrica, mineralógica y térmica.

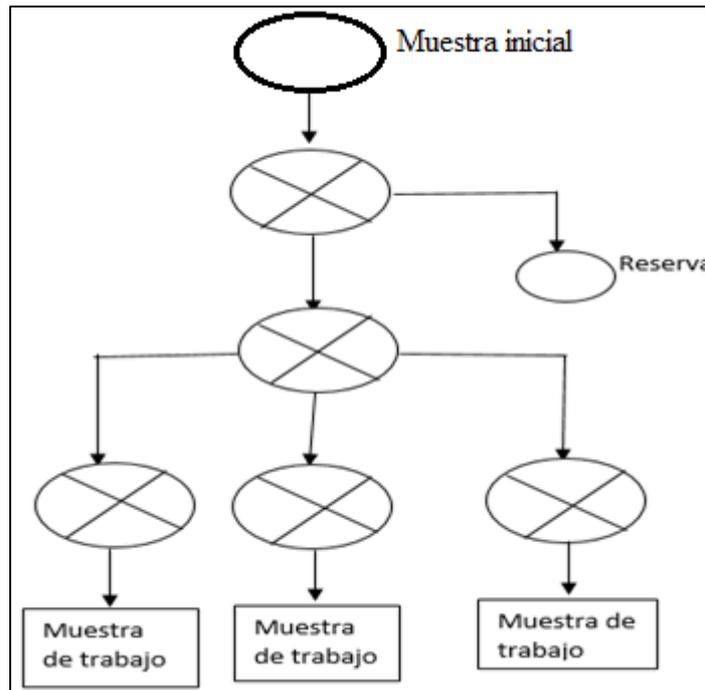


Figura 4. Esquema empleado para la selección de las muestras de la investigación

Elaborado por: Silvia Catalina Huaraca Taype

En la tabla 1, se muestran las masas empleadas en las tres réplicas, las cuales fueron pesadas en la balanza analítica ubicada en el comedor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa para realizar el análisis de tamiz.

Tabla 1. Masa de las muestras utilizadas para el análisis granulométrico

Réplicas	Masa (Kg)
1	1,9
2	2,6
3	2,2
TOTAL	6,7

2.1.1 Caracterización granulométrica

El análisis de la composición granulométrica del material se realizó por vía seca para un espectro de diámetro de partículas entre 0,074 mm y 10 mm. Los tamices fueron escogidos según la serie de Taylor $\sqrt{2}$ teniendo en cuenta las investigaciones por

(Ramírez Pérez, 2010) en el tratamiento de los escombros lateríticos del yacimiento Moa Occidental.

Un tamiz realiza solamente una separación de dos fracciones. Es un método más sencillo para clasificar granulométricamente y consiste en pasar el material de acuerdo al tamaño de los tamices que poseen orificios o mallas 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, representa tamaño medio. El material que no atraviesa los orificios del tamiz se designan como rechazo o fracción positiva y el que pasa se llama tamizado o fracción negativa. Los tamices utilizados se muestran en la figura 5.



Figura 5. Juego de tamices utilizados en el análisis granulométrico

Elaborado por: Silvia Catalina Huaraca Taype

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

Las fracciones granulométricas resultantes del análisis son las siguientes: +10 mm, -10+8 mm, -8+5 mm, -5+1,98 mm, -1,98 + 0,50 mm, - 0,50 + 0,35 mm, -0,35 + 0,10 mm, -0,10 +0,088 mm, -0,088+0,074 mm y -0,074 mm y el esquema empleado se muestra en figura 6.

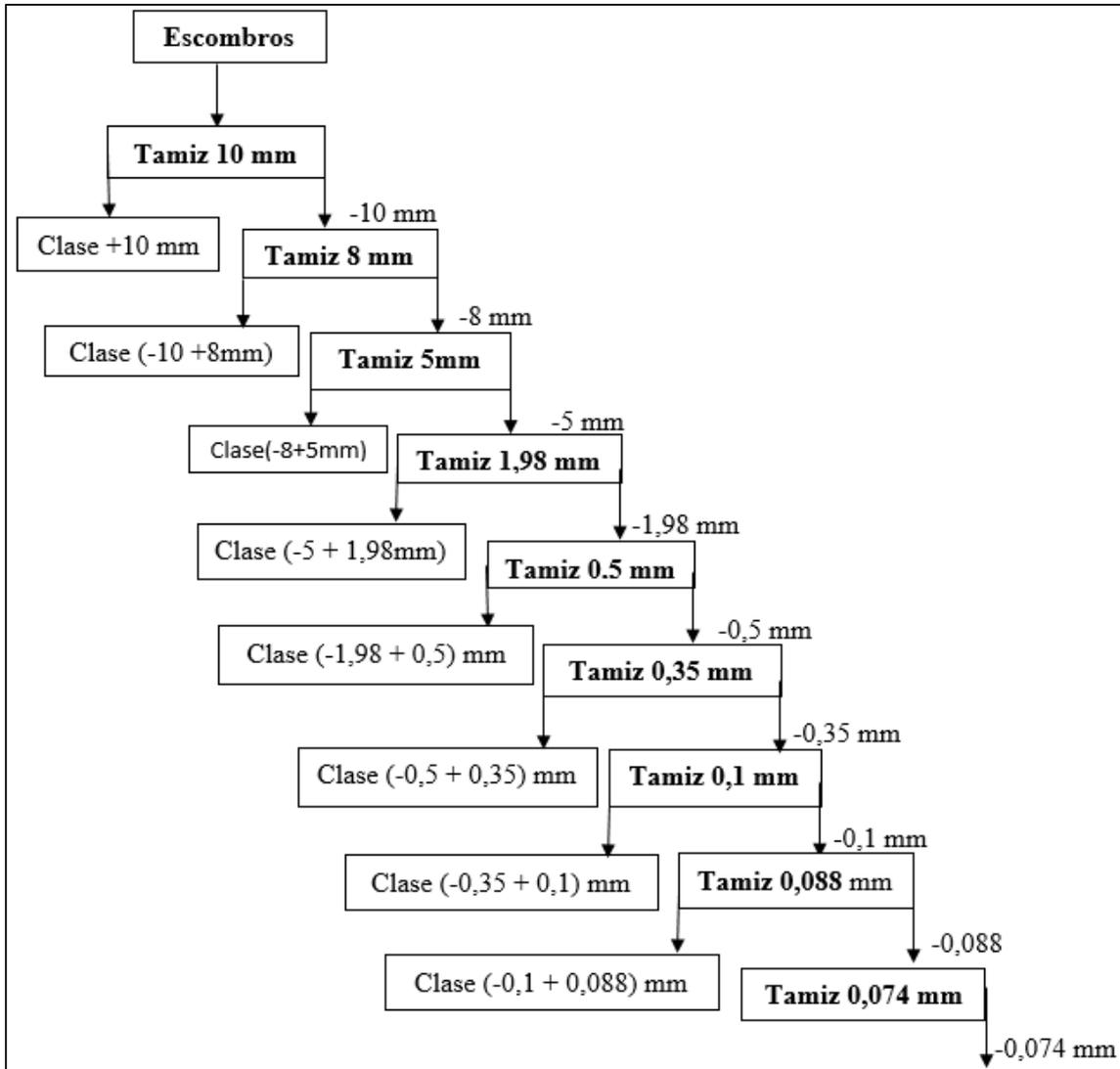


Figura 6. Esquema utilizado en el análisis granulométrico de las muestras

Elaborado por: Silvia Catalina Huaraca Taype

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

Se detallan las técnicas y el equipamiento utilizados en la caracterización de una muestra sin tamizar de los escombros lateríticos estudiados. En todos los casos las muestras se pulverizaron hasta conseguir el tamaño de partículas exigido para los análisis, menor que 0,074 mm, y una vez preparadas, se enviaron a los laboratorios del Centro de

Investigación y Desarrollo del Níquel en Moa (CEDINIQ) y del Centro de Investigaciones para la Industria Minero Metalúrgica (CIPIMM), ubicado La Habana.

La caracterización química, mineralógica y térmica se realizó con el financiamiento del Proyecto “Rehabilitación de Pasivos Minero Metalúrgicos generados por la industria del níquel en Moa” PAP 1501.

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

2.2.1 Caracterización química

Para la determinación de la composición química de la muestra de escombros objeto de la investigación, se utilizaron los métodos de Espectrofotometría de Absorción Atómica y Volumetría.

El procedimiento técnico de ensayo empleado en el CEDINIQ para la determinación de Si, Al, Mg, Ni, Co, Mn, Fe y Cr, es el siguiente: UPL - PT – A-26 Vigente a partir de: 10 de mayo de 2017.

Las mediciones se realizaron en un Espectrofotómetro de Absorción Atómica ATI UNICAM SOLAR 929 (DOBLE RAYO DE LUZ) como se muestra en la figura 7.



Figura 7. Equipo de Espectroscopia de Absorción Atómica empleado en la caracterización química.

Para la determinación de hierro(II) se empleó el método Volumétrico con el siguiente procedimiento técnico de ensayo: UPL-PT-V-03 Emitido: 1 de agosto de 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, ubicado en los laboratorios del CEDINIQ, es un 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 2θ 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.

Para el tratamiento de los datos mineralógicos y la cuantificación de las fases, se emplearon los softwares ANALYSE y High Score Plus de Panalytical (Versión 3.0B). 01.02.2011. Para la identificación de las fases se utilizó la base de datos PDF2 Año 2015.

2.2.3 Caracterización térmica

El análisis térmico fue realizado en el CIPIMM. Las muestras fueron analizadas en un equipo cuya foto se muestra en la figura 8.



Figura 8. Equipo de análisis térmico del CIPIMM, empleado en esta investigación.

El equipo es de la firma alemana NETZSCH, modelo STA 449 F3. El Análisis Térmico se realiza a través de los termogramas de TG que se obtuvieron empleando para ello los siguientes parámetros de operación:

Tabla 2. Características del equipo de análisis térmico empleado en la investigación.

Régimen de calentamiento	Dinámico
Masa de muestras	Se especifica en el termograma
Masa del material de referencia	60,20 mg (Al_2O_3)
Tipo de crisoles	Al_2O_3 (tamaño estándar)
Material del horno	SiC (T.amb. – 1500°C)
Gas utilizado en la cámara de calentamiento	Ar
Flujo del gas protector de la termobalanza	20,0 ml/min (Ar)
Velocidad de calentamiento	10,0 °C /min
Sensibilidad de la termobalanza	0,001 mg – 35.0 g
Sensibilidad de la curva TG	-0,001 - 5000 $\mu\text{V}/\text{mg}$
Tiempo total de medición	1h:37 min
Rango de temperatura de trabajo	27-1000°C

Los datos de las curvas termogravimétricas (TG) se convirtieron en termogramas continuos con el empleo del programa “Proteus” para el procesamiento de datos de Análisis Térmico, en su versión 5.2.1/07.04.2001, el cual suministra el fabricante del equipo, compatible a su vez con Windows para Office, obteniéndose además por esta misma vía los termogramas $D^1\text{TG}$ de la primera velocidad de cambio de masa (dm/dt). El error del análisis cuantitativo TG que se reporta es del $\pm 2.00\%$.

2.2.4 Otros equipos empleados durante la investigación.

Para determinar las masas de los productos del análisis granulométrico, se utilizó una balanza digital modelo Sartorius BS 124S, ubicada en los laboratorios del departamento de Metalurgia-Química del ISMM, con una capacidad máxima de 120 g y una desviación de 1 mg.

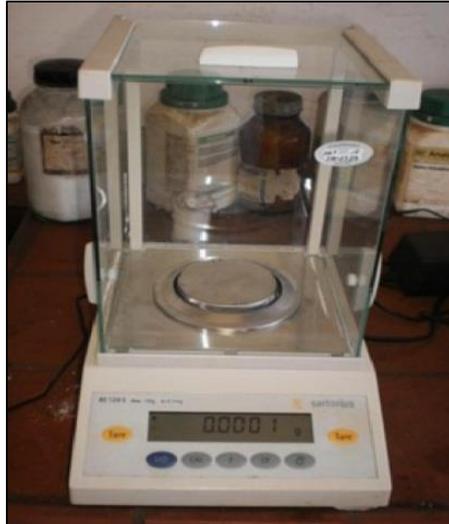


Figura 9. Balanza utilizada para el pesaje de las muestras.

El asentamiento bibliográfico se realizó con la utilización de la norma APA en su Sexta Edición, (Universidad de Lima, 2014), lo que garantizó una estrecha relación entre las citas bibliográficas, y las referencias que aparecen en la Bibliografía de esta tesis, evitando de esta forma el uso incorrecto de las fuentes consultadas.

Conclusiones de capítulo II

1. Las vías de selección y preparación de la muestra estuvieron acordes con la metodología existente, garantiza la selección adecuada de las fracciones granulométricas y la confiabilidad de los resultados de la caracterización.
2. Los métodos y técnicas aplicados en la determinación de las características físicas, químicas, mineralógicas y térmicas del material, son correctos, de modo que los resultados de la investigación son confiables.

CAPÍTULO III. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se discuten los resultados de la caracterización granulométrica, química, térmica y mineralógica de los escombros del yacimiento de Moa Occidental pertenecientes a la Empresa Ferroníquel Minera SA. Se realiza una comparación con otros escombros de la región Mayarí-Moa y se hacen propuestas de uso a partir de las investigaciones precedentes.

3.1 Análisis de la caracterización de los escombros del yacimiento Moa Occidental pertenecientes a la Empresa Ferroníquel Minera S.A

A continuación, se analizan y discuten los resultados de la caracterización granulométrica, así como la composición química y mineralógica de estos Pasivos Ambientales.

3.1.1 Resultados de la caracterización física y química

La caracterización física de los escombros lateríticos del yacimiento de Moa Occidental, se realiza por el tamaño del grosor de la muestra analizada, o sea, por su composición granulométrica, se separa de acuerdo al orificio de los tamices seleccionados, según la serie de Taylor, de 10 mm hasta 0,074 mm y la caracterización química se realiza con una porción de la muestra del testigo en el laboratorio del CEDINIQ; los resultados obtenidos se detallan a continuación.

3.1.1.1 Resultados de los análisis granulométricos

La composición granulométrica del Pasivo Ambiental estudiado, por retenido y cernido, se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Resultados del análisis granulométrico promedio del Pasivo Ambiental, escombros lateríticos del yacimiento Moa Occidental, pertenecientes a la Empresa Ferroníquel Minera S.A

Clase de tamaño (mm)	Peso (g)	Salida γ (%)	Salida acumulativa (%)	
			Por el Retenido γ (%)	Por el Cernido γ (%)
+10	317,13	16	16	100
- 10 + 8	90,43	5	21	84
- 8 + 5	111,18	6	26	79
- 5 + 1,98	603,03	30	57	74
-1,98 + 0,5	495,33	25	82	43
-0,5 + 0,35	126,78	6	88	18
-0,35 + 0,1	161,87	8	96	12
-0,1 + 0,088	25,45	1	98	4
-0,08 + 0,074	2,92	0,1	97,8	2
-0,074	43,45	2	100,0	2,2
Total (g)	1977,56	100	-	-
Total (kg)	1,98	-	-	-

En la figura 10 se muestra el contenido de las fracciones granulométricas estudiadas.

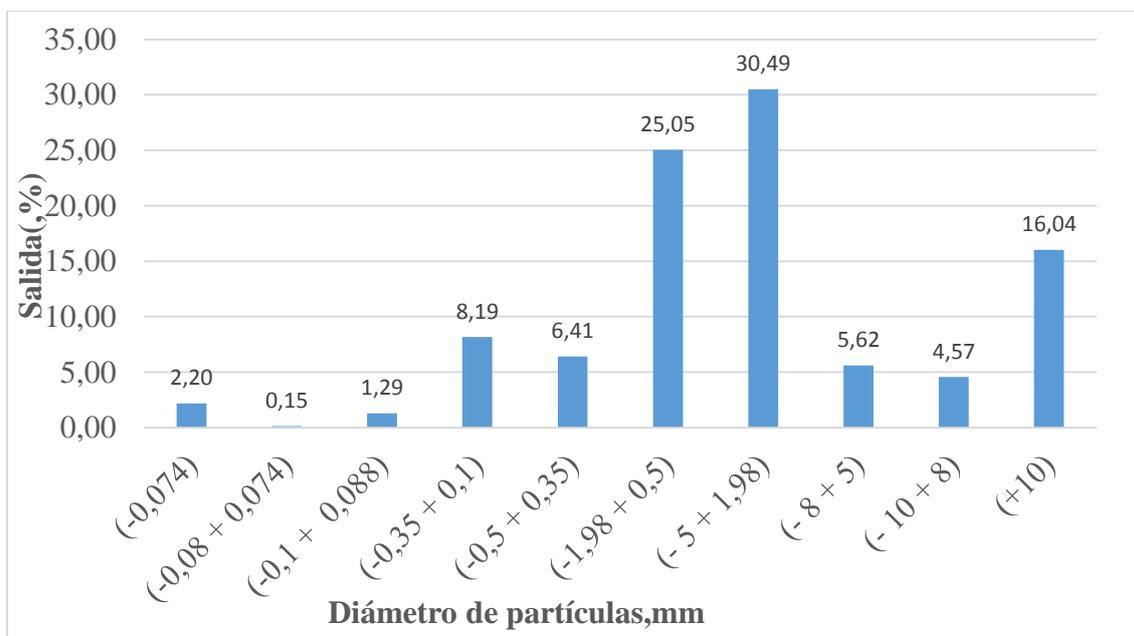


Figura 10. Características de tamaño promedio parcial de los escombros lateríticos del yacimiento Moa Occidental.

La composición granulométrica de las muestras, representada en la figura 10, evidencia un predominio de las partículas mayores de 0,1 mm que representan el 96 % del total en la muestra; se destacan entre ellas las del tamaño entre 0,5 mm y 1,98 mm que agrupan el 55,54 % del peso de la muestra del escombros lateríticos de Moa Occidental.

De forma general se distinguen tres grupos granulométricos: un grupo de granulometría fina, menor de 0,1 mm que representa el 3,64 % en peso de la muestra; un segundo grupo granulométrico intermedio constituido por las fracciones mayores de 0,1 mm y menores de 5 mm, las que representan el 70,14 % y un tercer grupo de granulometría más gruesa, mayores de 5 mm, que representa el 26,23 % en peso de la muestra y en las cuales, las fracciones individuales no superan el 16,04 %. Este resultado coincide con el trabajo realizado con escombros de Moa Oriental por Roché González, (2017).

3.1.1.2 Resultados de la caracterización química

En la siguiente tabla se refleja la composición química promedio del escombros laterítico estudiado.

Tabla 4. Composición química de los escombros lateríticos del yacimiento Moa Occidental pertenecientes a la Empresa Ferroníquel Minera S.A.

Contenido expresado como óxido (%)							
Fe ₂ O ₃	NiO	CoO	Cr ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	MnO
68,2	0,61	0,087	3,07	13,45	3,51	1,09	0,48

Químicamente, el escombros del yacimiento Moa Occidental, está compuesto fundamentalmente por óxido de hierro, coincidiendo con (Ramírez Pérez, 2010), (Roché González, 2017), (Ganesh Persaud, 2014), (Palacios Rodríguez, 2001) y otros, al caracterizar a los escombros como menas de hierro.

El óxido de aluminio es el segundo de los elementos mayoritarios en este residuo, con un contenido de 13,45 %. La presencia mayoritaria de hierro y aluminio en los escombros del yacimiento Moa Occidental, constituye una regularidad de los escombros cubanos.

Se comprobó la presencia del níquel en la muestra de escombros lateríticos, con un contenido del óxido de níquel(II) igual a 0,61 %, común para este tipo de residuos que no cumplen con la ley exigida para este elemento para que pueda incorporarse al proceso

extractivo de la industria. En lo referente al óxido de magnesio(II), el contenido es de 1,09 % y forma parte de los minerales arcillosos junto al aluminio y al silicio. El contenido de este óxido es superior al reportado en las investigaciones realizadas con escombros de otros yacimientos y tiene su explicación en el grado de contaminación a que están expuestos estos desechos al ser depositados en las escombreras; en este caso puede atribuirse a la contaminación con serpentina, que generalmente poseen altos contenidos de magnesio.

El dióxido de silicio es el tercero de los elementos mayoritarios, su contenido es de 3,51 %, aunque se evidencia en la tabla 4 que el contenido de óxido de cromo(III) está en el orden de 3,07 %. El contenido de los óxidos de silicio y aluminio reportados en el análisis de la muestra entera del escombro estudiado, son similares a los obtenidos por (Ramírez Pérez, 2010) quien expresó que junto con la presencia de magnesio constituye un elemento a considerar en el uso de estos residuos, esencialmente para la industria del acero, pues ellos contribuyen a mejorar las propiedades de viscosidad y fluidez de las escorias.

Los óxidos de cobalto(II) y de manganeso(II) se encuentran en menor cuantía entre los determinados, 0,087 % y 0,48 %, respectivamente, coincidiendo con otras investigaciones realizadas por (Roché González, 2017), (Ganesh Persaud, 2014), (Ramírez Pérez, 2010), (Ortiz Bárcenas, 2015) y otros.

En resumen, los escombros lateríticos del yacimiento Moa Occidental pertenecientes a empresa Ferroníquel Minera S.A, están constituidos mayoritariamente por óxidos de hierro y aluminio con contenidos que superan al de los restantes elementos que lo componen: níquel, cromo, magnesio, manganeso y silicio, todos en forma de óxidos.

3.1.2 Resultados de la caracterización mineralógica y térmica de los escombros del yacimiento de Moa Occidental pertenecientes a la Empresa Ferroníquel Minera S.A

Se realizó la caracterización mineralógica y térmica con técnicas adecuadas para cada tipo de análisis. Los resultados se analizan a continuación.

3.1.2.1 Resultados de la caracterización mineralógica

El análisis de Difracción de rayos X indica que las fases principales en los escombros estudiados corresponden a óxidos de hierro y aluminio, y están representados fundamentalmente por maghemita y gibssita como fases principales (figura 11). El

predominio de esas fases está en correspondencia con la presencia de hierro como elemento mayoritario, seguido del aluminio con un contenido de 13,45 % del óxido.

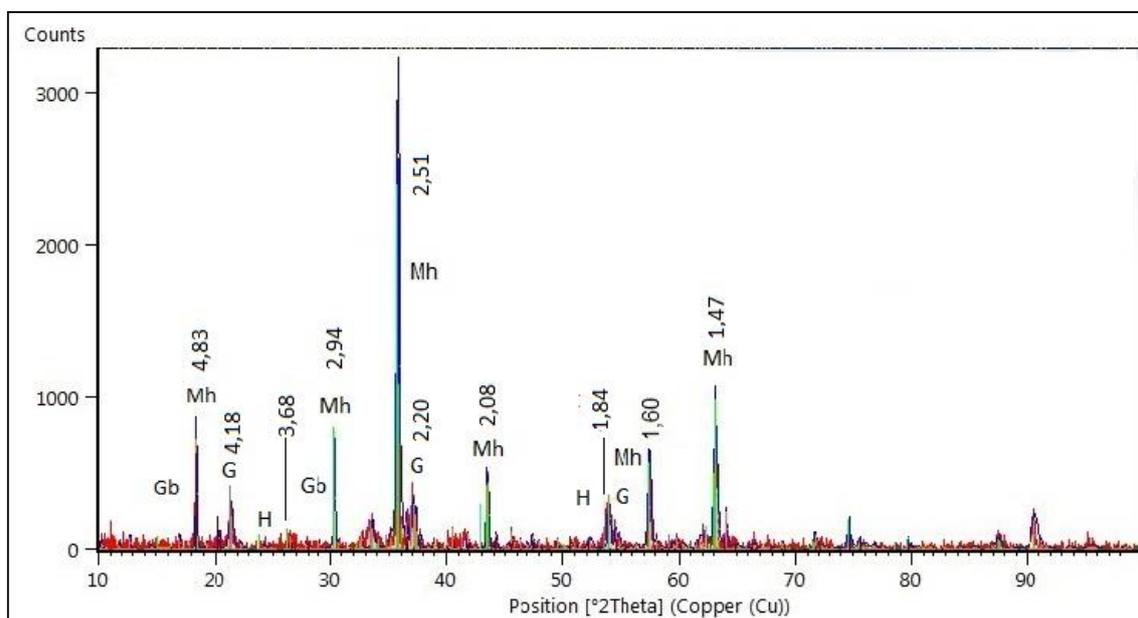


Figura 11. Difractograma de los escombros lateríticos del yacimiento Moa Occidental, pertenecientes a la Empresa Ferroníquel Minera S.A. Mh: maghemita; G: goethita; Gb: gibbsita; H: hematita.

En el difractograma anterior se observa la presencia de otras fases como son: la goethita y la hematita, sin embargo, el contenido de las fases determinado por el análisis cuantitativo (tabla 5), indica que la maghemita y la gibbsita son las principales pues sus contenidos son superiores, 72,50 % y 19,20 %, respectivamente. Si bien la goethita y la hematita se consideran secundarias, la presencia de ellas se justifica por el contenido de hierro en estos residuales, como se analizó anteriormente.

Tabla 5. Composición mineralógica cuantitativa del escombros estudiado, determinada con High Score Plus, versión 3.0B

Contenido de las fases mineralógicas (%)			
Maghemita	Goethita	Gibbsita	Hematita
72,50	5,94	19,20	2,36

3.1.2.2 Resultados de la caracterización térmica

El termograma de la muestra del escombros laterítico estudiado, figura 12, exhibe cambios de masa importantes; el primero, con una pérdida de 3,89 % de la masa, corresponde a la

salida del agua de hidratación del material. El segundo cambio en la masa de la muestra, 6,86 %, en el intervalo de temperatura entre 200 °C y 300 °C, aproximadamente, es atribuible a la transformación de la gibbsita a bohemita. Un tercer escalón en la curva de TG a partir de 300 °C, representa una pérdida de masa de 3,31 % e indica el inicio de la deshidroxilación de la goethita que se transforma en hematita.

Un último cambio en la masa a los 856 °C como evidencia la curva de la derivada de termogravimetría (DTG), con un valor de 0,69 %, está asociado a la transformación de los minerales de talco, mineral presente en la serpentina. La presencia de minerales de talco no constituye una regularidad de los escombros lateríticos cubanos. Como se analizó en el epígrafe 3.1.1.2, en los escombros depositados en las escombreras de la empresa Ferroníquel Minera SA, objeto de esta investigación, se ha reportado un contenido de magnesio superior al que comúnmente presenta este tipo de residuos mineros en Moa, que indica un alto grado de contaminación por serpentina. La presencia de talco reportado en el análisis térmico corrobora lo antes expuesto.

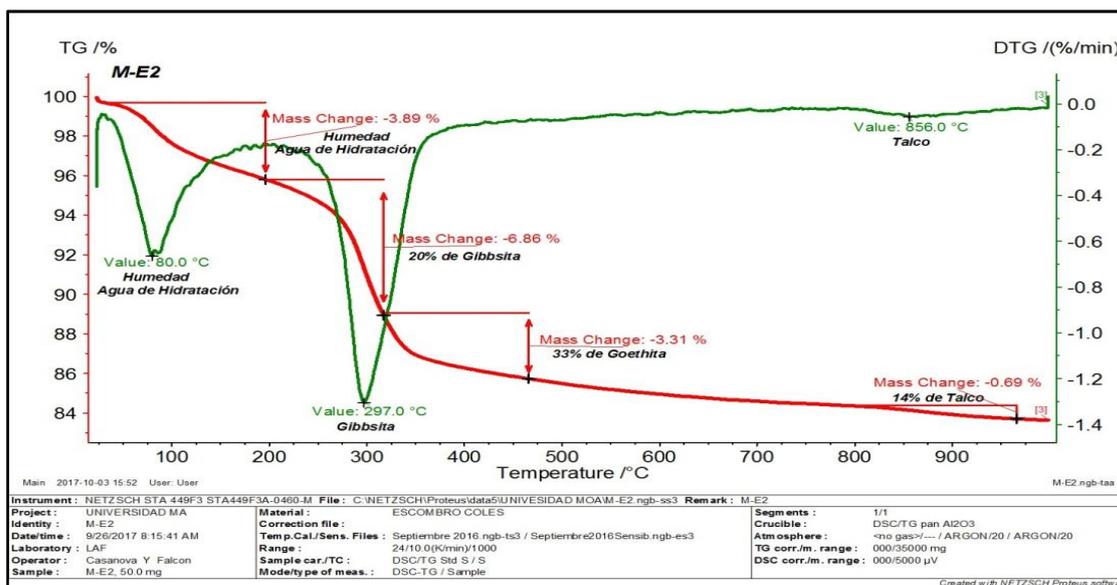


Figura 12. Termograma de escombro laterítico del yacimiento Moa Occidental.

Los resultados obtenidos a través del termograma resultante del análisis termogravimétrico a una muestra de escombro expuesto a temperaturas de hasta 1000 °C, corrobora los resultados de los análisis químicos y mineralógicos realizados, es decir, la presencia mayoritaria de fases de hierro y gibbsita que se corresponde con el elevado contenido de hierro y el aluminio como elemento secundario.

En la tabla 6 se muestran a manera de resumen, los intervalos de temperatura en que ocurren las principales pérdidas de masa.

Tabla 6. Resumen de los análisis térmicos

Intervalos de Temperatura (ΔT)	Máximo (°C)	Pérdida de masa (%)	Asociada a:
50-150 °C	80	3,89	Agua de hidratación
200-300 °C	297	6,86	20 % de Gibbsita, agua de constitución
300-460 °C	-	3,31	33 % de Goethita, deshidroxilación
850-1000 °C	856	0,69	14 % de talco

Elaborado por: Silvia Catalina Huaraca Taype

3.2 Análisis comparativo de las características de los escombros lateríticos

Se realizan los análisis comparativos de los escombros lateríticos de la región de Moa y Nicaro.

3.2.1 Comparación de las características químicas de los escombros lateríticos

Para realizar 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 Moa Occidental, y las investigaciones realizadas por varios autores que han tenido como objetivo en sus trabajos la caracterización física -química, 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 7 se muestran los resultados de diferentes investigaciones en cuanto a la caracterización química de distintos yacimientos.

Tabla 7: Composición química (en %), de diferentes tipos de escombros lateríticos de las regiones de Nicaro y Moa

Pasivos	Contenido promedio de cada uno de los elementos, (%)								Fuentes
	CoO	MgO	MnO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	NiO	
Mina Martí	0,221	6,004	0,346	8,261	6,271	2,150	68,193	0,800	Ortiz 2015
Zona A, PSA	0,144	0,211	0,750	2,130	13,000	3,296	73,655	0,691	Ramírez 2010
Camarioca Norte	0,021	0,366	0,645	3,051	12,809	2,601	44,771	0,451	Roché 2017
FEMSA	0,012	5,430	0,610	15,930	12,580	2,440	59,490	0,840	Ganesh 2014
Escombros Moa Occidental	0,087	1,09	0,48	3,51	13,45	3,07	68,2	0,61	Huaraca 2018

Elaborado por: Silvia Catalina Huaraca Taype

Como se observa en la tabla 7, el elemento mayoritario de estos pasivos ambientales son pertenecientes a las diferentes industrias de la región Mayarí – Moa (Empresa Comandante Pedro Soto Alba de Moa, Empresa Comandante Ernesto Che Guevara, y Mina Martí de Nicaro), es el hierro, en el cual la Zona A tiene un contenido del óxido superior al resto de los elementos en todos los escombros analizados, mientras Mina Martí y Moa Occidental coinciden con el mismo valor, la cual es elevado, con valores que oscilan entre 68 % y 73 %, mientras que el menor contenido, 44,77 %, como se confirma en Camarioca Norte correspondiente a la Empresa Pedro Soto Alba.

El segundo elemento mayoritario es el óxido de aluminio, los contenidos del elemento en forma de óxido varían de un yacimiento a otro entre 6 % y 13 %, observándose que en los del yacimiento Mina Martí el contenido es el menor entre todos los escombros analizados.

Por otra parte, no existe una diferencia significativa en los contenidos de óxido de níquel(II) y óxido de cromo(III) en los escombros estudiados; los contenidos oscilan entre 0,451 % en Camarioca Norte y 0,840 % en FEMSA para el níquel, en el caso del cromo,

6,271 % en Mina Martí y 13 % en los escombros de Zona A; de acuerdo a las bibliografías consultadas resulta de interés para la propuesta de usos de este desecho.

En lo referente al dióxido de silicio, el contenido varía considerablemente, observándose que en el escombro de FEMSA es superior al resto de los escombros, con un valor promedio de 15,93 %. El contenido de óxido de magnesio, es muy variable en los diferentes escombros, reportándose los mayores en los de Zona A y Camarioca Norte. 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(II) es el que tiene menores contenidos, que varían entre 0,012 y 0,22 %, común para los escombros lateríticos cubanos.

De la comparación se puede resumir como regularidad química, que los elementos mayoritarios en los escombros, en cuanto a contenidos de sus óxidos, 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.

3.2.2 Comparación de las características mineralógicas de los escombros lateríticos

En la tabla 8 se muestran los resultados de diferentes investigaciones en cuanto a la composición mineralógica de distintos yacimientos de la región de Moa y Mina Martí.

Como se observa en la tabla 8, los escombros de Moa y de Nicaro contienen las fases maghemita, hematita y goethita, siendo la maghemita la mayoritaria en casi todos los yacimientos, con un contenido que oscila entre 17 % y 72 %. La presencia de estas fases de hierro está en correspondencia con el hecho de que el hierro es el elemento que se encuentra en mayor cuantía en estos residuos mineros. Sin embargo, no se reporta la fase gibbsita en los escombros de mina Martí en Nicaro, y es que este es el yacimiento, de los que se comparan en esta investigación, que menor contenido de aluminio presenta. Tampoco hay evidencia de gibbsita en el yacimiento Camarioca Norte, lo cual a nuestro juicio debe ser una errada interpretación de los difractogramas, pues el contenido de óxido de aluminio en esos escombros está en el orden de 12,8 %. En los restantes yacimientos de Moa el contenido de gibbsita oscila entre 11 % y 19,20 %.

Por otra parte, las fases magnetita y cuarzo solo se reportan en los escombros de zona A, pertenecientes a la empresa Moanickel SA Pedro Sotto Alba en Moa.

Tabla 8. Comparación de fases mineralógicas de los escombros lateríticos de las regiones de Moa y Nicaro.

Yacimiento/ Fuente	Goethita (%)	Gibbsita (%)	Maghemita (%)	Hematita (%)	Magnetita (%)	Cuarzo (%)
Moa Occidental (Huaraca, 2018)	5,94	19,20	72,50	2,36	--	--
Zona A (Ramírez Pérez, 2010)	20	11	59,19	3,90	37	3,90
Mina Martí Nicaro (Ortiz Bárceñas, 2015)	12-30	--	60 - 70	10 -70,20	--	--
Camarioca Norte Área 1 (Roché González, 2017)	--	--	17,67	20,03	--	--

3.2.3 Comparación de las características térmicas de los escombros lateríticos

En la tabla 9, se muestran las comparaciones en el comportamiento térmico de los escombros lateríticos de los yacimientos de la región Moa y Nicaro.

Los estudios de caracterización mediante registros de termogravimetría y análisis térmico diferencial no son muy abundantes. Para realizar la comparación de las características térmicas, se toman los resultados obtenidos en la zona A, mina Martí y los obtenidos en esta investigación. Los termogramas obtenidos para los tres yacimientos están reflejados en la figura 13.

En los tres yacimientos, las primeras variaciones de masa se deben a la pérdida del agua de hidratación que acompaña al material y tienen lugar hasta los 200 °C, aproximadamente.

Tabla 9. Comparación de las características térmicas de los escombros lateríticos de yacimientos de la región de Moa y Nicaro.

Yacimiento/fuente	Curva	Efectos	Temperatura	Pérdida de masa
Zona A (Ramírez,2010)	ATD/TG	Endotérmico	100 – 200 °C	Agua de hidratación
		Endotérmico	250 °C – 375 °C	Deshidroxilación de la goethita
		Endotérmico	375 - 500 °C	No supera el 1 %, maghemita se transforma a hematita y la gibbsita a bohemita
		Exotérmico	Máximo 876,2 °C	Cristalización de óxidos de hierro
		Endotérmico	1345 °C	Valor medio de 2,42 %
Mina Martí Nicaro (Ortiz, 2015)	ATD/TG	Endotérmico	180 °C – 400 °C	Desprendimiento del agua fuertemente ligada de la goethita, 10,00 %
		No determinado	453 °C de manera continua y lenta	Agua débilmente enlazada
		Endotérmico	550 °C - 670 °C	1,84 % desprendimiento del agua de constitución de la antigorita
		Exotérmico	825 °C	Característico de la antigorita, una variedad de la serpentina
Moa Occidental (Huaraca, 2018)	DTG/TG	--	50 °C -150 °C	Agua de hidratación
		--	200 °C - 300 °C	20 % de Gibbsita, agua de constitución
		--	300 °C - 460 °C	33 % de Goethita, deshidroxilación
		--	850 °C - 1000 °C	14 % de talco

Mientras el material continúa calentándose, se verifican una serie de efectos endotérmicos medidos sobre las curvas de ATD, a lo que les acompañan pérdidas de masa que son atribuibles a la transformación de fases como: goethita, gibbsita y antigorita. Aunque en la presente investigación no se pueden mostrar los registros de ATD, la presencia en este escombros de las fases goethita y gibbsita, justifica la posibilidad de que sucedan estos efectos endotérmicos.

Alrededor de los 850 °C tiene lugar una disminución de la masa, acompañada de un efecto exotérmico, debido a la reorganización estructural y cristalización de los óxidos presentes en estos escombros. Alrededor de esa temperatura se ha reportado la presencia de talco en la muestra de Moa Occidental, que tiene su explicación por el grado de contaminación de estos residuos, como se analizó anteriormente.

El conocimiento del comportamiento de un material cuando es expuesto al incremento de la temperatura, es de gran importancia para la toma de decisiones y para las propuestas de uso.

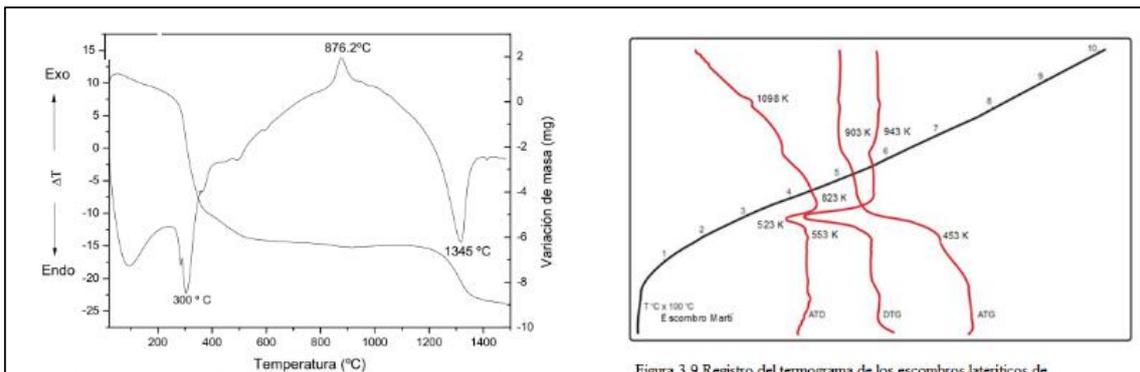


Figura III.10 Curvas representativas de ATD/TG obtenidas para el escombros de Zona A (Ramírez,2010)

Figura 3.9 Registro del termograma de los escombros lateríticos de Mina Martí calentados linealmente hasta 1 473 K.(Ortiz,2015)

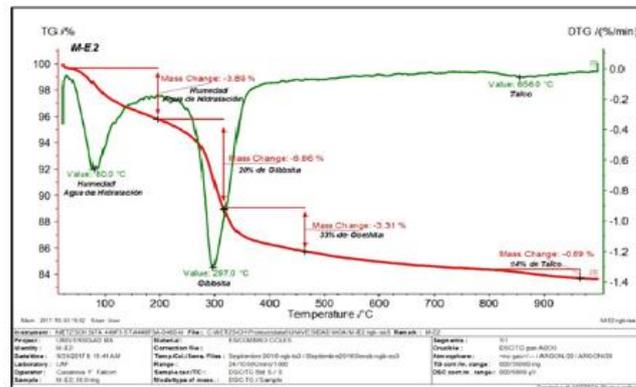


Figura 12. Termograma de la escombrera de Moa Occidental (Huaraca,2018)

Figura 13. Comparación de los termogramas de los yacimientos de la región Moa y mina Martí en Nicaro.

3.3 Propuestas de usos a partir del análisis comparación con otros escombros

De acuerdo a los resultados físico-químicos, mineralógicos y térmicos realizados a los escombros lateríticos del yacimiento Moa Occidental pertenecientes a la Empresa Ferroníquel Minera S.A y comparados con otros escombros de la región de Moa-Nicaró, investigado por otros autores, a los que se hace referencia en el capítulo I, se propone el uso de este escombros, ya que sus características químicas y mineralógicas son similares en casi todos como se muestra en la tabla 10 y térmicas que se observa en la tabla 9 y figura 13, por presentar un contenido de hierro atractivo y de acuerdo a los ensayos realizados de reducción carbotérmica y fusión para la obtención de arrabio con níquel (Nickel Pig Iron - NPI), puede ser utilizado en la industria siderúrgica como materia prima para producir aceros.

Tabla 10: Composición química (en %) y las fases mineralógicas de diferentes tipos de escombros lateríticos de las regiones de Nicaró y Moa

Pasivos/Fuentes	Composición química, contenido promedio de cada uno de los elementos, (%)				Fases mineralógicas de los escombros lateríticos			
	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	NiO	Goethita (%)	Gibbsita (%)	Maghemita (%)	Hematita (%)
Mina Martí Ortiz, 2015	6,271	2,150	68,193	0,800	12-30	--	60 - 70	10 -70,20
Zona A, PSA Ramírez, 2010	13,000	3,296	73,655	0,691	20	11	59,19	3,90
Camarioca Norte Roché, 2017	12,809	2,601	44,771	0,451	--	--	17,67	20,03
Escombros Moa Occidental Huaraca, 2018	13,45	3.07	68,2	0,61	5,94	19,20	72,50	2,36

Las partículas mayores de 2 mm de los escombros lateríticos se presentan mayor cantidad de fracciones gruesas, se puede utilizar como oxidantes en la descarburación de aceros especiales termoresistentes, aspecto que fue demostrado y fundamentado en investigaciones precedentes.

Es decir, los escombros lateríticos del yacimiento Moa Occidental pertenecientes a la empresa Ferroníquel Minera S.A pueden ser utilizados en la industria siderúrgica, convirtiéndose así de PAMMs en Activos.

Conclusiones del capítulo III

1. En los escombros lateríticos del yacimiento Moa Occidental pertenecientes a la Empresa Ferroníquel Minera S.A, se distinguen tres grupos granulométricos: uno de granulometría fina que representa el 3,64 % en peso de la muestra; un segundo grupo intermedio constituido por las fracciones mayores de 0,1 mm y menores de 5 mm, las que representan el 70,14 % y un tercer grupo de granulometría más gruesa, mayores de 5 mm, que representa el 26,23 % del peso de la muestra y en las cuales, las fracciones individuales no superan el 16,04 %.
2. Están constituidos mayoritariamente por óxidos de hierro y aluminio, cuyos contenidos (68,2 % y 13,45 % respectivamente) superan al de los restantes elementos que lo componen: níquel, cobalto, cromo, magnesio, manganeso y silicio, todos en forma de óxidos.
3. Mineralógicamente están representados por las fases maghemita y gibbsita como las principales, sus contenidos son de 72,50 % y 19,20 % respectivamente. Otras fases como la goethita (5,94 %) y la hematita (2,36 %) también fueron reportadas por el método de Difracción de rayos X.
4. Se comprobó que, durante el calentamiento de una muestra de estos residuos, el registro de termogravimetría exhibe cambios importantes en la masa del material:
 - El primero, con una pérdida de 3,89 % de la masa, corresponde a la salida del agua de hidratación del material.
 - El segundo cambio en la masa de la muestra, 6,86 %, en el intervalo de temperatura entre 200 °C y 300 °C, aproximadamente, es atribuible a la transformación de la gibbsita a bohemita.
 - Un tercer escalón en la curva de TG a partir de 300 °C, representa una pérdida de masa de 3,31 % e indica el inicio de la deshidroxilación de la goethita que se transforma en hematita.
 - Un último cambio en la masa a los 856 °C, como evidencia la curva de la derivada de termogravimetría (DTG), con un valor de 0,69 %, está asociado a la transformación de los minerales de talco, mineral presente en la serpentina. La presencia de minerales de talco no constituye una regularidad de los escombros lateríticos cubanos, sin embargo, el contenido de magnesio es de 1,09 % justifica la presencia de esta fase.

5. Los escombros objeto de esta investigación pueden ser utilizados en la industria siderúrgica, como oxidantes en la producción de aceros y como materia prima en la producción de arabio con níquel (NPI). Lo anterior se justifica por la similitud en la composición físico-química, mineralógica y térmica con escombros de otros yacimientos que han sido probados para estos fines.

CONCLUSIONES GENERALES

1. No existen evidencias de la caracterización físico-química y térmica de los escombros de Moa Occidental pertenecientes a la empresa Ferroníquel Minera S.A, lo que limita la propuesta de usos a este PAMMs y justificó el desarrollo de esta investigación.
2. En estos residuos mineros predominan las partículas mayores de 0,1 mm que representan el 96 % del total, destacándose entre ellas las del tamaño entre 5 mm y 0,5 mm que agrupan el 55,54 %.
3. Mineralógicamente están representados por las fases maghemita y gibbsita como las principales, (72,50 % y 19,20 % respectivamente) y otras como la goethita (5,94 %) y la hematita (2,36 %), que se justifican por la presencia mayoritaria de óxidos de hierro y aluminio, cuyos contenidos (68,2 % y 13,45 % respectivamente). Químicamente están caracterizados también por la presencia de níquel, cobalto, cromo, magnesio, manganeso y silicio, todos en forma de óxidos.
4. Al calentar las muestras hasta 1000 °C se producen cambios en la masa del material asociados a la pérdida de agua de hidratación, la transformación de la gibbsita en bohemita, la deshidroxilación de la goethita y a la presencia de minerales de talco.
5. De las características físico-químicas, mineralógicas y térmicas realizadas a los escombros lateríticos del yacimiento Moa Occidental pertenecientes a la empresa Ferroníquel Minera S.A y al compararlos con otros escombros de la región de Moa-Nicaró, se propone su uso en la industria siderúrgica como materia prima para producir aceros y para la producción de arabio con níquel (NPI).

RECOMENDACIONES

1. Continuar las investigaciones de otros PAM de los escombros lateríticos similares a los investigados, existentes en otras áreas de explotación de la industria cubana del Níquel.
2. Realizar pruebas experimentales con los escombros lateríticos del yacimiento Moa Occidental pertenecientes a la Empresa Ferroníquel Minera S.A, para corroborar la propuesta de uso en la industria siderúrgica, especialmente como material oxidante en la elaboración de aceros y en la producción de arrabio con níquel (Nickel Pig Iron) y establecer los procedimientos en tales casos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adasme Aguilera, C., Arranz Gonzáles, J. C., & et., a. (2010). *Pasivos ambientales mineros manual para el inventario de minas abandonadas o paralizadas*. Barquicimeto.
- Alberruche Arranz, E., & Rodriguez, F. (2014). *Manual para la evaluación de riesgos de instalaciones de residuos de industrias*. Madrid: IGME.
- Alberruche, E., Arranz, J., Rodríguez, R., Vadillo, L., Rodríguez, V., & Fernández, F. (2014). Manual para la evaluación de riesgos de instalaciones de residuos de industrias extractivas cerradas o abandonadas. *Dirrección General de Calidad y Evaluación Ambiental y Medio Natural e IGME*, 318.
- Almira Elías, N. (2003). *Estudio preliminar sobre la cinética y termodinámica del comportamiento térmico de los escombros lateríticos de la zona A en la región de Moa*. Moa: Instituto Superior Minero Metalúrgico.
- Alva Bazán, E. (2007). *Pasivos Ambientales Mineros*. Lima.
- Andreiev, S., Perov, V., & Zverievich, V. (1987). *Trituración, desmenuzamiento y cribado de minerales*. La Habana: Pueblo y Educación.
- Arranz González, J., & Alberruche del Campo, E. (2008). Minería, medio ambiente y gestión del territorio. Master Internacional "Aprovechamiento Sostenible de los Recursos Minerales". *Serie Posgrado. Modulo Medio Ambiente. Red DESIR, Universidad Politécnica de Madrid, UE/Programa Alfa II-0459-FA, OEI*, 95.
- ASGMI (Asociación de Servicios Geología y Minería Iberoamericanos). (2010). Pasivos Ambientales mineros. *Manual para el inventario de minas abandonadas o paralizadas*, 37.
- Azahares Ríos, Y. (2015). *Evaluación ambiental de los Pasivos Ambientales Mineros de la mina de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara*. Moa: Instituto Superior Minero Metalurgico .
- Beltrán Guilart, Y., Penedo Medina, M., & Falcón Hernández, J. (2010). Análisis de la extracción y selectividad en la lixiviación de lateritas fuera de balance con ácido piroleñoso y sus mezclas con ácido sulfúrico. *Tecnología Química*, 90-96.
- Calzada Jiménez, J. A. (2014). *La evaluación estratégica del impacto paisajístico en los pasivos mineros y su rentabilidad ambiental*. Iquitos: Universidad de la Rioja.

- Cedron Lassús, M. F. (2013). *Elaboracion de criterios para la transformaci3n de pasivos mineros en activos socio-ambientales sostenibles*. Lima: Pontificia Universidad del Per3.
- Ch3vez Quijada, M. (2015). *Los pasivos ambientales mineros: Diagn3sticos y propuestas* . Puno: Grufides .
- Desarrollo Ambiental y Social Sostenible. (2005). Riqueza y sostenibilidad: Dimensiones Sociales y Ambientales de la Miner3a en el Per3. *Desarrollo Ambiental y Social Sostenible*, 4-5.
- Ferreiro Guerrero, Y., Leyva Gonz3lez, O., & S3nchez Cruz, A. (2010). Obtenci3n de un concentrado de hierro a partir de los escombros later3ticos del yacimiento Pinares de Mayar3. *Ciencias Holgu3n*, 1-2.
- Ganesh Persaud, A. (2014). *Metodolog3a para el Inventario de los Pasivos Ambientales Mineros-Metalurgicos, generados por las industrias del N3quel en Moa*. Moa: Instituto Superior Minero Metal3rgico.
- Guti3rrez Sianiegas, J. (2004). *Reaprovechamiento y remediaci3n de pasivos ambientales mineros*. Lima: Derecho Ambiental y Minero.
- Lorenzo Ricardo, D. (2001). *Recuperaci3n de cobalto mediante la lixiviaci3n 3cida con sulfato de hierro II en los escombros later3ticos*. Moa: Instituto Superior Minero Metal3rgico.
- Ministerio de Energ3a y Minas de Per3. (2015). *Remediaci3n de pasivos ambientales mineros en el Per3*. Lima: Minem.
- Ministerio de Energ3a y minas en Per3. (2015). *Remediaci3n de pasivos ambientales mineros en el Per3*. Lima.
- Moreno, C., & Chaparro, E. (2008). *Conceptos b3sicos para entender la legislaci3n aplicable a la industria minera en los pa3ses andinos. Divisi3n de Recursos Naturales e Infraestructura*. Santiago de Chile : Naciones Unidas CEPAL.
- Ortiz B3rcenas, J. (2015). *Obtenci3n de un producto prerreducido para la producci3n de N3quel (Nickel pig iron) a partir del tratamiento de los escombros later3ticos de mina Mart3 de Nicaro*. Moa: Instituto Superior Minero Metal3rgico.
- Palacios Rodr3guez, A. (2001). *Recuperaci3n de cobalto por medio de la lixiviaci3n 3cida de los escombros later3ticos*. Moa: Instituto Superior Minero Metal3rgico.

- Pease García, H. (2004). *Ley que regula los Pasivos Ambientales de la actividad Minera*. Lima: Congreso de la República.
- Ponce Seoane, N., & Días Comesañas, J. L. (2011). *Pasivos Ambientales Mineros en Cuba. Bases metodológicas*. Habana: IV congreso cubano de minería (Minería 2011) Cierre de Minas y Pasivos Mineros Ambientales .
- 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*. Moa: Instituto Superior Minero Metalurgico.
- Roché González, Y. (2017). *Evaluación de las principales características físico químicas del pasivo ambiental "escombros lateríticos" para su posible uso industrial*. Moa: Instituto Superior Minero Metalurgico.
- Rodríguez Abreu, Y. (2012). *Lixiviación ácida de escombros lateríticos a presión atmosférica*. Moa: Instituto Superior Minero Metalúrgico.
- Sociedad Nacional de Minería Petroleo y Energía. (2004). Pasivos Ambientales. *Informe quincenal de la snmpe*, 1-4.
- Sotomayor, A. (2015). *Remediación de Pasivos Ambientales Mineros*. Lima: Consorcio de Universidades "Metas del Perú al Bicentenario".
- Tauler Ferré, E., & Proenza Fernández, J. A. (2008). *Caracterización meneralógica del perfil Laterico de Ni de Loma Ortega*. República Dominicana. Dominicana: Departamento de cristalografía, Mineralogía y Depósitos Minerales.
- Universidad de Lima. (2014). *Citas y Referencias Recomendaciones y aspectos básicos del estilo APA. Citar vs Plagiar*. Lima: Universidad de Lima.

