



Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa

“Dr. Antonio Núñez Jiménez”

Facultad de Metalurgia y Electromecánica

Departamento Metalurgia y Química

**Evaluación preliminar de la Fusión Reductora
de los “Escombros Lateríticos”, del Yacimiento
Camarioca Norte, áreas 1 y 2.**

**Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero
en Metalurgia y Materiales.**

Autor: Noslén Cobas García

Moa, 2018



Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa

“Dr. Antonio Núñez Jiménez”

Facultad de Metalurgia y Electromecánica

Departamento Metalurgia y Química

**Evaluación preliminar de la Fusión Reductora
de los “Escombros Lateríticos”, del Yacimiento
Camarioca Norte, áreas 1 y 2.**

**Trabajo de diploma en opción al título de Ingeniero en
Metalurgia y Materiales.**

Autor: Noslén Cobas García

Firma:

Tutores: Dr. C. María Caridad Ramírez Pérez. Profesora Auxiliar Firma:

Dr. C. José Alberto Pons Herrera. Profesor Titular

Firma:

Dr.C. Lorenzo Perdomo González. Profesor Titular

Firma:

Moa, 2018



Declaración de autoridad

Yo: Noslén Cobas García

Autor del Trabajo de Diploma Evaluación preliminar de la Fusión Reductora de los “Escombros Lateríticos”, del Yacimiento Camarioca Norte, áreas 1 y 2, declaro la propiedad intelectual al servicio del Instituto Minero Metalúrgico de Moa para que disponga de su uso cuando considere conveniente.

Noslén Cobas García
Pérez

Dr.C. María Caridad Ramírez

Dr.C. José Alberto Pons Herrera

Dedicatoria

Este trabajo va dedicado primeramente a mi mamá Marilyn García Rodríguez, y a mi papá Nelson Cobas López que son mis seres más queridos y que fueron mi motor impulsor para alcanzar esta meta, los cuales dedicaron todos estos años a mi cuidado y formación como profesional y a mi novia Maylen Pérez Pérez por su comprensión y ayuda incondicional.

A toda mi familia...

Agradecimientos

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

- ❖ A mis tutores María Caridad Ramírez Pérez, José Alberto Pons Herrera y Lorenzo Perdomo González por su ayuda.*
- ❖ A Iris Ceni Riveron y Agustín Alpajón por haberme hecho parte de su familia todo este tiempo.*
- ❖ A todos mis compañeros de aula, por haberme ayudado de una forma u otra.*
- ❖ A mis tías Yosleydis Riveras y Maida García por jugar un papel importante en mi carrera.*
- ❖ A mis tíos Noel Cobas, Jorge Riveron, Homero García, Filicito Cobas por haber contribuido a mi formación como profesional.*
- ❖ A mis abuelos Norma Rodríguez, Caridad López, Homero García e Inovelio Riveras por siempre apoyarme y enseñarme con sus experiencias*
- ❖ Al resto de mi familia por haberme dado aliento para que siguiera adelante con mis estudios.*

Pensamiento

“Si un día nuestro trabajo nos pareciera bueno, debemos luchar por hacerlo mejor; y si un día nos pareciera mejor debemos luchar por hacerlo perfecto.”

Fidel Castro Ruz.

RESUMEN

Los Escombros Lateríticos generados por la industria del níquel en Moa constituyen un residuo ambiental, que no tienen utilidad en la actualidad, por lo que se consideran Pasivos Ambientales Mineros-Metalúrgicos (PAMMs), representando uno de los principales problemas ambientales en la región de Moa. A ellos se asocia que existen insuficientes conocimientos sobre su comportamiento térmico, que imposibilita la toma de decisiones sobre su posible uso siderúrgico; por tanto, en la presente investigación se evalúan las características térmicas de este material unido a sus características físicas, químicas y mineralógicas. El trabajo está estructurado en tres capítulos, donde se muestran el marco teórico, los materiales y métodos empleados y por último, los resultados obtenidos, donde sobresale la obtención de un arrabio enriquecido con elementos valiosos como cromo, níquel, cobalto, que permiten decidir sobre las posibles investigaciones que se desarrollarán en el futuro, para mejorar el producto obtenido y tener finalmente un material de calidad, para su empleo en la industria siderúrgica cubana.

Palabras Claves: Arrabio, cromo, níquel, fusión reductora, siderurgia, Escombros Lateríticos, Pasivos Ambientales.

ABSTRACT

The Lateritic Debris generated by the nickel industry in Moa constitutes an environmental waste, which is of no use at present, which is why it is considered as Mining-Metallurgical Environmental Liabilities (PAMMs), representing one of the main environmental problems in the Moa region. They are associated with insufficient knowledge about their thermal behavior, which makes it impossible to make decisions about their possible steel use; therefore, in the present investigation the thermal characteristics of this material are evaluated together with its physical, chemical and mineralogical characteristics. The work is structured in three chapters, which show the theoretical framework, the materials and methods used and finally, the results obtained, which highlights the obtaining of a pig iron enriched with valuable elements such as chrome, nickel, cobalt, allowing to decide on the possible investigations that will be developed in the future, to improve the product obtained and finally have a quality material, for its use in the Cuban steel industry.

Keywords: Cast iron, chrome, nickel, reducing fusion, steelworks, Debris Lateritic, Environmental Liabilities.

ÍNDICE DE CONTENIDO

<i>Declaración de autoridad</i>	iii
<i>Dedicatoria</i>	iv
<i>Agradecimientos</i>	v
<i>Pensamiento</i>	vi
RESUMEN	vii
ABSTRACT	viii
ÍNDICE DE CONTENIDO	ix
Índice de Tablas.....	xii
Índice de Figuras	xiii
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO	7
1.1 Introducción	7
1.2 Características generales de los PAMMs.....	8
1.3 Conceptualización de los PAMMs	8
1.3.1 Leyes que regulan los pasivos ambientales de la actividad minera en el mundo y en Cuba.....	10
1.3.2 Tratamiento a los escombros lateríticos en Cuba.....	12
1.4 Caracterización de los Pasivos Ambientales “Escombros Lateríticos”, generados por la industria del níquel en Moa y Nicaro	15
1.5 Escombros Lateríticos del yacimiento Moa Oriental.....	17
1.6 Escombros Lateríticos del Yacimiento Punta Gorda	19
1.7 Escombros de la región de Mayarí.....	20
1.7.1 Escombros de Mina Martí en Nicaro.....	20
1.8 Usos de los Pasivos Ambientales, generados por la industria del níquel	21
1.9 Proceso de Reducción	23

1.9.1	Reducción por el método de Carbotérmica	23
1.9.2	Procesos con reductor sólido	24
1.9.3	Procesos con reductor en fase gaseosa	25
1.9.4	Procesos de reducción en estado líquido	25
1.9.5	Procesos de reducción por aluminotermia.....	25
1.10	Conclusiones del Capítulo I.....	28
CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS		29
2.1	Selección y preparación de la muestra	29
2.2	Ensayos analíticos realizados.....	31
2.2.1	Análisis Químico.....	31
2.2.2	Análisis Mineralógico	32
2.2.3	Análisis Granulométrico	33
2.2.4	Análisis Térmico	34
2.3	Ensayos Experimentales	36
2.3.1	Materias primas utilizadas.....	36
2.3.2	Preparacion de la mezcla pirometalúrgica	38
2.4	Procesamiento y desarrollo de la investigación	42
2.5	Conclusiones del capítulo II	43
CAPÍTULO III. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS		44
3.1	Resultados de los análisis químicos.....	44
3.2	Resultados de los análisis granulométricos	46
3.3	Resultado de los análisis mineralógicos	48
3.4	Resultados de los análisis térmicos.....	48
3.5	Resultado de los ensayos experimentales	52
3.6	Características de los productos de la fusión-reductora.....	54
3.7	Consideraciones sobre los efectos ambientales, sociales e industriales del uso del PAMMs “Escombros Lateríticos”	67

3.8 Conclusiones del capítulo III	68
CONCLUSIONES GENERALES	69
RECOMENDACIONES	71
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72
ANEXOS.....	75

Índice de Tablas

Tabla No. 1. Composición química promedio (%) de las Áreas 1 y 2 del Yacimiento Camarioca Norte.....	19
Tabla No. 2. Reacciones típicas de algunos procesos aluminotérmicos.	26
Tabla No. 3. Características del equipo de análisis térmico empleado en la investigación.....	35
Tabla No. 4. Composición química promedio (%), de los escombros lateríticos del yacimiento Camarioca Norte, Áreas 1 y 2.....	46
Tabla No. 5. Valores ponderados de las muestras iniciales, (%).....	46
Tabla No. 6. Características térmicas de los escombros lateríticos de Camarioca Norte, área 1.....	50
Tabla No. 7. Características térmicas de los escombros lateríticos del yacimiento Camarioca Norte área 2.	52
Tabla No. 8. Peso de la termita obtenida en el primer ensayo experimental.....	53
Tabla No. 9. Peso de la termita obtenida en el segundo ensayo.....	53
Tabla No. 10. Peso de la termita obtenida en el tercer ensayo.	54
Tabla No. 11. Composición química promedio (%) del metal obtenido durante las pruebas de fusión reductora de los Escombros Lateríticos del área 1.	55
Tabla No. 12. Composición química promedio (%) del metal obtenido durante las pruebas de fusión reductora de los Escombros lateríticos del área 2.	59
Tabla No. 13. Composición química promedio (%) de las escorias obtenidas durante las pruebas de fusión reductora de los Escombros lateríticos de área 1.	62
Tabla No. 14. Composición química promedio (%) de las escorias obtenidas durante las pruebas de fusión reductora de los Escombros lateríticos área 2.	64

Índice de Figuras

Figura.No.1: Ubicación de los Pasivos Ambientales en Cuba. Tomado de (Roche, 2009).....	7
Figura No. 2. Áreas donde fueron tomadas las muestras de investigación.	30
Figura No. 3. Esquema para la selección de las muestras utilizado en la investigación.	30
Figura No. 4. Equipo de Espectroscopia de Absorción Atómica empleado en los análisis químicos.	31
Figura No. 5. Equipo de Espectroscopia de masa empleado en los análisis químicos de los metales obtenidos durante las pruebas pirometalúrgicas.	32
Figura No. 6. Difractómetro de Rayos- modelo X Bruker AXS D8 Focus, empleado para los análisis mineralógicos.	33
Figura No. 7. Esquema utilizado en el análisis granulométrico de las muestras.....	34
Figura No. 8. Equipo de análisis térmico empleado en esta investigación.	35
Figura No. 9. Muestra de escombros lateríticos de las áreas 1 y 2.....	36
Figura No. 10. Muestras del reductor (aluminio) utilizado en las pruebas experimentales.	37
Figura No. 11. Mortero para triturar las materias primas.....	38
Figura No. 12. Tamizadora empleada para la tratamiento de las materias primas.....	39
Figura No. 13. Balanza digital utilizada para el pesaje de las materias primas.....	39
Figura No. 14. Mezcladora de laboratorio utiliza en los trabajos experimentales	39
Figura No. 15. Estufa utilizada para calentar la mezcla.	40
Figura No. 16. Crizol de grafito empleado en el proceso de fusión-reductora.....	40
Figura No. 17. Máquina rectificadora de soldadura	41
Figura No. 18. Secuencia de obtención de las termitas experimentales.....	41
Figura No. 19. Principales productos obtenidos durante las pruebas de fusión-reductora.	41

Figura No. 20. Contenido de los elementos mayoritarios en las fracciones granulométricas.	45
Figura No. 21. Características granulométricas de los escombros del Yacimiento Camarioca Norte, Área 1.	47
Figura No. 22. Características granulométricas de los escombros del Yacimiento Camarioca Norte, Área 2.	47
Figura No. 23. Difractograma típico de los escombros del Yacimiento Camarioca Norte.	48
Figura No. 24. Termograma de los escombros lateríticos de camarioca Norte, Área 1.	49
Figura No. 25. Termograma de los escombros lateríticos de Camarioca Norte, Área 2.	51
Figura No. 26. Contenido de hierro en dependencia del número de coladas en el metal, área 1.	56
Figura No. 27. Contenidos de níquel y cobalto en el metal obtenido a partir del área 1.	56
Figura No. 28. Contenidos de cromo en el metal obtenido a partir de la fusión del escombros del área 1.	57
Figura No. 29. Contenidos de carbono, silicio y manganeso en dependencia del número de coladas en el metal, área 1.	58
Figura No. 30. Contenidos de fósforo y azufre en dependencia del número de coladas en el metal, área 1.	58
Figura No. 31. Contenido de hierro en el metal, durante las diferentes coladas con escombros del área 2.	59
Figura No. 32. Contenidos de níquel y cobalto en el metal obtenido en las diferentes coladas, usando escombros del área 2.	60
Figura No. 33. Contenido de cromo en el metal obtenido en las diferentes coladas, usando escombros del área 2.	61
Figura No. 34. Contenidos de carbono, silicio y manganeso en el metal obtenido en las diferentes coladas, usando escombros del área 2.	61
Figura No. 35. Contenidos de fósforo y azufre en el metal obtenido en las diferentes coladas, usando escombros del área 2.	62

Figura No. 36. Contenidos de hierro (II) y hierro (III) en la escoria obtenida en las diferentes coladas, usando escombros del área 1.	63
Figura No. 37. Contenidos de óxido de cromo (III), níquel y cobalto en la escoria obtenida en las diferentes coladas, usando escombros del área 1.	63
Figura No. 38. Contenidos óxidos de hierro (II) e hierro (III) en las escorias obtenidas en las diferentes coladas, usando escombros del área 2.	64
Figura No. 39. Contenidos de óxido de cromo (III), níquel y cobalto en la escoria obtenida en las diferentes coladas, usando escombros del área 2.	65

INTRODUCCIÓN

Nuestro país desde hace ya varios años es uno de los principales países productores de níquel y cobalto en el mundo, lo que conlleva a la realización de grandes actividades mineras en determinadas provincias del mismo, un ejemplo de ello es el municipio de Moa, ubicado en la provincia de Holguín, que posee dos empresas activas actualmente: la Empresa “Comandante Pedro Soto Alba” y la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”. Dichas actividades mineras han contribuido al surgimiento de Pasivos Ambientales Mineros Metalúrgicos sólidos (PAMMs), que pueden definirse como aquella situación ambiental que, generada por el hombre en el pasado y con deterioro progresivo en el tiempo, representa actualmente un riesgo al ambiente y la calidad de vida de las personas, los cuales “han sido generalmente producidos por las actividades del hombre, ya sea por desconocimiento, negligencia, o por accidentes, a lo largo de su historia”, (Energía, Sociedad nacional de Minería Petróleo, 2004, pág. 1).

En el pasado no existían una serie de elementos tecnológicos e investigativos, con los cuáles sí se cuenta hoy en día, por tanto, los avances tecnológicos, el conocimiento científico y el marco normativo correspondiente han permitido a las empresas y las personas, realizar sus actividades teniendo en cuenta los daños que pueden ocasionarse al medio ambiente.

El proceso de industrialización a lo largo del siglo pasado y la urbanización descontrolada, han provocado la ocurrencia de problemas ambientales más difusos, no circunscriptos a un sitio específico, sino prácticamente a toda la humanidad. Esta situación del pasado se acentúa por el abandono de instalaciones o zonas ambientales degradadas, sin un manejo adecuado que evite su presencia negativa.

En este sentido, la minería, ha originado gran cantidad de pasivos ambientales, a través de las excavaciones abiertas abandonadas, socavones abandonados, depósitos de residuos sólidos industriales, deforestación y eliminación de cobertura vegetal, disposición de sustancias tóxicas y movimiento de tierras. (González Roché, 2017, pág. 10)

Uno de los grandes problemas que resultan de estos pasivos ambientales es la generación de drenajes ácidos, los cuales pueden afectar los cuerpos de agua, como ríos, lagos, lagunas, las aguas subterráneas y el mar, los suelos, el aire, el paisaje, la cobertura vegetal, el ambiente, la salud humana y la infraestructura. Los efectos que ocasionan estos residuales pueden ser variados, pudiéndose alterar las características químicas, físicas y biológicas de los cuerpos receptores. La forma cómo estos cuerpos se alteran también es variada, dependiendo de la temperatura local, la geografía del lugar, el aislamiento poblacional de la zona, la pluviosidad, los ecosistemas circundantes, etc. (González Roché, 2017, pág. 11)

Las empresas metalúrgicas de la región de Moa, se han especializado en la extracción de níquel y cobalto, donde las menas con valores de níquel inferiores al contenido mínimo prefijado, no se emplea en la producción de este elemento, porque no reúnen los requisitos en cuanto a los contenidos de estos metales valiosos, para ser incorporados a las plantas metalúrgicas y desde el punto de vista industrial constituyen las lateritas fuera de balance, que se concentran en las capas superiores de los yacimientos, por debajo de la capa vegetal y se les denomina comúnmente como “Escombros Lateríticos”, que al no ser utilizados por las industrias son considerado materiales de desechos o Pasivos Ambientales, (Pons Herrera & Ramírez Pérez, 2017, pág. 23).

Como resultado de la actividad minera desarrollada en la Empresa “Comandante Pedro Soto Alba”, se producen una gran cantidad de estos materiales de desechos, debido a que solo se trabaja en la capa limonítica por sus altos contenidos de níquel y cobalto y el bajo porcentaje de magnesio, este último es alto consumidor de ácido sulfúrico (agente lixivante), mientras que las lateritas fuera de balance por el bajo contenido de estos metales, no son procesadas por lo que generan un problema ambiental, relacionado con el grado de almacenamiento en condiciones inadecuadas de estabilidad, seguridad e integración con el entorno, además de provocar la contaminación de los ríos y el mar por el arrastre de estos materiales (sedimentos finos), aumentando la turbiedad del agua y disminuyendo la entrada de la luz a este recurso hídrico.

La explotación por más de cinco décadas, de los yacimientos lateríticos de la zona nororiental de Cuba, ha provocado la acumulación de volúmenes considerables de residuos sólidos. Entre ellos, se encuentran los escombros lateríticos, concreciones de

óxidos e hidróxidos de hierro no utilizados por las industrias metalúrgicas cubanas, pues no garantizan los contenidos de níquel y cobalto exigidos. Estos escombros constituyen una fuente de contaminación y destrucción ecológica en el municipio Moa (Terrero, C, 1998; Ramírez y Pons, 2001).

En este sentido el estado cubano realiza esfuerzos por incrementar la producción de níquel y cobalto; empeño que implica procesar mayores volúmenes de limonita, incrementándose por consiguiente los volúmenes de escombreras, razón por la cual se impone la necesidad de proponer usos a estos residuales sólidos.

Entre los yacimientos lateríticos más importantes de la Empresa Pedro Sotto Alba de Moa, están los de Moa Oriental, donde se concentran actualmente los mayores depósitos de escombros, sin utilización industrial. Entre estos se destacan los recursos existentes en el depósito mineral de Camarioca Norte, específicamente las áreas 1 y 2, que aunque se han caracterizado preliminarmente, aun son insuficientes los conocimientos metalúrgicos que se tienen sobre estos pasivos, que permitan proponer posibles usos industriales.

Situación Problemática

En trabajos realizados a lo largo de los últimos años con los escombros lateríticos del municipio de Moa del yacimiento Camarioca Norte, áreas 1 y 2, todavía existen imprecisiones acerca de sus características físicas-químicas, mineralógicas, térmicas y de su uso industrial, por otro lado no se ha tenido en cuenta los daños que estos residuos pueden ocasionar al medio ambiente lo que da paso a esta investigación y nos lleva a definir como problema científico lo siguiente.

Problema científico: Insuficiente estudio pirometalúrgico del Pasivo Ambiental “Escombros Lateríticos”, del yacimiento Moa Oriental Camarioca Norte, áreas 1 y 2, que limitan la toma de decisiones sobre sus posibles usos siderúrgicos.

Campo de acción

Estudio pirometalúrgico del comportamiento térmico del Pasivo Ambiental “Escombros Lateríticos” del yacimiento Moa Oriental Camarioca Norte, áreas 1 y 2, de la empresa “Comandante Pedro Soto Alba Moa Nickel S.A”.

Objeto de estudio

Pasivo Ambiental “Escombros Lateríticos” del yacimiento Moa Oriental Camarioca Norte, áreas 1 y 2.

Objetivo general: Determinar el comportamiento térmico del Pasivo Ambiental “Escombros Lateríticos”, a través de pruebas pirometalúrgicas y del conocimiento de sus características físicas, químicas y mineralógicas, que permitan la toma de decisiones sobre sus posibles usos siderúrgicos.

Objetivos específicos

1. Caracterizar térmicamente el PAMMs “Escombros Lateríticos”, del yacimiento Moa Oriental Camarioca Norte,, áreas 1 y 2.
2. Analizar integralmente las características físicas, químicas, mineralógicas y térmicas del PAMMs “Escombros Lateríticos”.
3. Desarrollar pruebas pirometalúrgicas, a escala de banco, y evaluar sus resultados en conjunto con las características físicas, químicas, mineralógicas y térmicas determinadas con anterioridad.

Hipótesis

A partir de las características físicas, químicas, mineralógicas y térmicas, del Pasivo Ambiental “Escombros Lateríticos”, del yacimiento Moa Oriental Camarioca Norte,, áreas 1 y 2, se desarrollarán pruebas experimentales pirometalúrgicas, que contribuirán a la toma de decisiones sobre sus posibles usos siderúrgicos.

Tareas de investigación

1. Búsqueda bibliográfica sobre las características y usos de los pasivos ambientales minero-metalúrgicos.

2. Selección, toma y preparación de las muestras, para su caracterización y estudio pirometalúrgico.
3. Analizar los resultados de la caracterización realizada con anterioridad, al PAMMs “Escombros Lateríticos” de la Empresa Pedro Sotto Alba de Moa y completar las informaciones necesarias, que permitan la toma de decisiones sobre los posibles usos siderúrgicos de los PAMMs, generados por las industrias del níquel en Moa.

Aportes de la investigación

Ambiental: El principal aporte ambiental que ofrece esta investigación, es el tratamiento que se le realiza al Pasivo Ambiental estudiado, con el objetivo de reducir la contaminación ambiental, que estos generan actualmente al medio ambiente del municipio de Moa, que faciliten la toma de decisiones sobre la definición de sus posibles usos industriales.

Social: El hecho de darle un uso a este tipo de residual, con más de 50 años depositados en un área urbana, permitirá en el futuro ofrecer nuevas fuentes de empleo para la población de la región.

Industrial: Aunque los resultados obtenidos son preliminares, el tratamiento y posible uso a este Pasivo Ambiental, brinda a la industria cubana la posibilidad de poder contar con una materia prima, siderúrgica, con altos contenidos de hierro y enriquecida con otros metales valiosos de gran demanda en las plantas metalúrgicas cubanas.

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO

1.1 Introducción

La mayoría de las empresas del tercer mundo explotan sus riquezas sin tener en cuenta los daños que ocasionan los rechazos y residuos al medio ambiente, si estos no son tratados, pueden convertirse en pasivos ambientales de ahí la necesidad de encaminar trabajos investigativos a dar tratamiento y uso a estos residuales.

Las capas superiores de los yacimientos, inmediatamente por debajo de la capa vegetal, se les denomina comúnmente “escombros lateríticos”, que, por no ser utilizados por las industrias metalúrgicas, son considerados materiales de desechos. (Palacios Rodriguez, 2001, pág 15).

En este capítulo se realiza una breve reseña de los trabajos realizados en años anteriores sobre los Pasivos Ambientales existentes en el mundo, en Cuba y específicamente en el municipio de Moa, exponiéndose los principales aspectos que caracterizan a estos materiales.

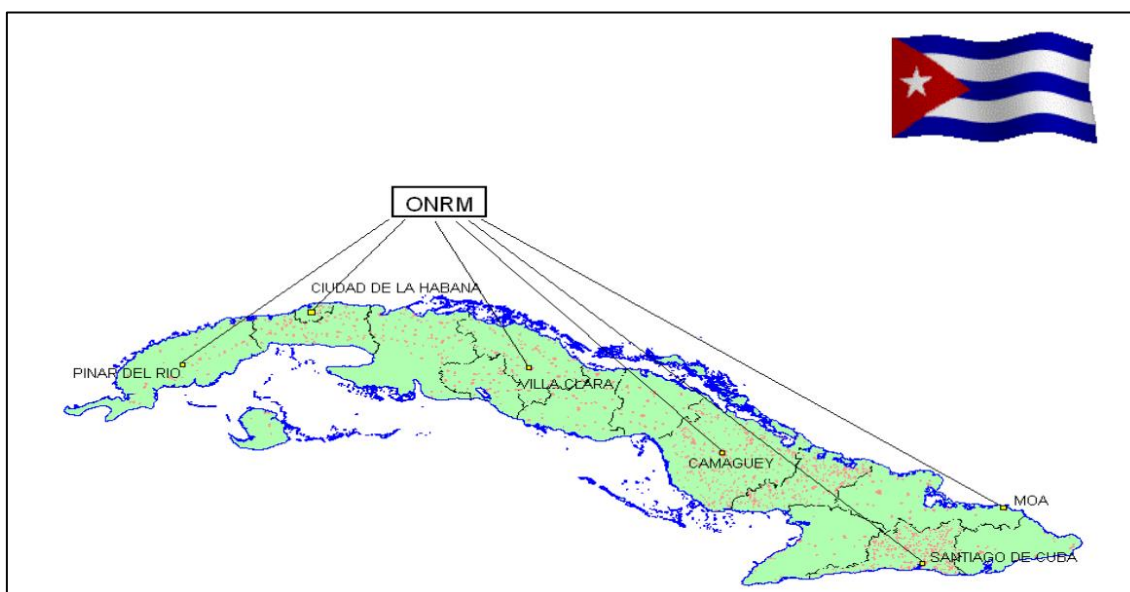


Figura.No.1: Ubicación de los Pasivos Ambientales en Cuba. Tomado de (Roche, 2009).

1.2 Características generales de los PAMMs

(Arranz González & Alberruche del Campo, 2008) (Moreno & Chaparro, 2008); (ASGMI, 2010); (Alberruche, Arranz, Rodríguez, Vadillo, & Fernández, 2014); (SNMP, 2004); (García, 2013). Todos coinciden en que:

El término pasivos ambientales mineros, empleado comúnmente para referirse a la minería abandonada en Iberoamérica, hace referencia a los impactos ambientales generados por las operaciones mineras abandonadas, con o sin dueño u operador identificables, y en donde no se haya realizado un cierre de minas reglamentado y certificado por la autoridad competente; 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. (Moreno & Chaparro, 2008)

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

1.3 Conceptualización de los PAMMs

En países de América Latina como Bolivia, México, Perú y Colombia, se han realizado investigaciones y bases normativas que muestran avances en la definición sobre los Pasivos Ambientales Mineros (PAM). Veamos algunos ejemplos de esta afirmación, a partir de los trabajos investigativos realizados por, Ríos Azahares en el año 2015, que se resumen a continuación.

En Bolivia, de acuerdo con la Ley Nro. 1333- Ley de Medio Ambiente, un pasivo ambiental es el conjunto de impactos negativos perjudiciales para la salud y/o el medio ambiente, ocasionado por determinadas obras y actividades existentes en un

determinado período de tiempo y los problemas ambientales en general no solucionados por determinadas obras o actividades en ejecución. (Ríos Azahares, 2015, pág. 12).

En México, los pasivos ambientales se definen como: “aquellos sitios contaminados por la liberación de materiales o residuos peligrosos que no fueron remediados oportunamente para impedir la dispersión de contaminantes, pero que implican una obligación de remediación, (Ríos Azahares, 2015, pág. 14).

El informe preliminar “Inventarios de Pasivos Ambientales Mineros” del Ministerio de Energía y Minas Dirección General de Minería del Perú en el año 2006 define como Pasivo Ambiental Minero “todas las instalaciones, efluentes, emisiones, restos o depósitos de residuos producidos por operaciones mineras, en la actualidad abandonadas o inactivas y que constituyen un riesgo permanente y potencial para la salud de la población, el ecosistema circundante y la propiedad” (Ríos Azahares, 2015, pág. 16).

En Colombia por ejemplo, no existe una legislación para evaluar los PAM pero se han propuesto las siguientes definiciones: (Ríos Azahares, 2015, pág. 18).

- Se denomina PAM a la obligación de incurrir en un gasto por una persona como consecuencia de una responsabilidad cuantificable económicamente, causada por actividades mineras inactivas o abandonadas que generan un riesgo para la salud y el patrimonio.
- Se entiende por PAM “la obligación económica causada por un daño ambiental generado por actividades mineras inactivas o abandonadas que pone en riesgo la calidad de vida, el ecosistema, bienes públicos o privados”.

A lo largo de la historia de la minería en Cuba, la actividad extractiva de yacimientos no metálicos y metálicos ha sido y es intensa, fundamentalmente las referidas al níquel. Los yacimientos que ya no se encuentran activos por razones técnicas, económicas o sociales, agrupan los PAM y constituyen huellas dejadas en el entorno que reclaman la toma de medidas para su rehabilitación. (González Roché, 2017, pág. 23).

En el IV Congreso Cubano de Minería (Seoane & Díaz Comesañas, 2011) plantearon que:

Los PAM son obligaciones financieras para la reparación de los daños causados al entorno por la actividad minera e impactos ambientales provocados por ella, así como por el incumplimiento de la legislación minera y ambiental al respecto existente en Cuba.

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

De muchos pasivos ambientales minero - metalúrgicos sólidos (PAMMs), generados por la industria del níquel en Cuba, “se conocen sus principales características físicas y químicas y posibles usos”, (González Roché, 2017), como resultado de un gran número de investigaciones desarrolladas con diversos propósitos. A continuación, se muestra un análisis del tratamiento dado a los escombros lateríticos de la región Mayarí – Moa.

1.3.1 Leyes que regulan los pasivos ambientales de la actividad minera en el mundo y en Cuba.

Es de gran importancia que todos los países que poseen o hayan poseído actividades mineras, tengan un documento vigente donde se le preste especial atención a los pasivos ambientales existentes y así las obligaciones que tienen las empresas correspondientes a los mismos. A continuación, hacemos referencia a dos de estos países.

LEY N° 28271. En Perú. (El Congreso de la República, 2004, págs. 2-6)

Artículo 1.- Objetivo

La presente Ley tiene por objeto regular la identificación de los pasivos ambientales de la actividad minera, la responsabilidad y el financiamiento para la remediación de las áreas afectadas por éstos, destinados a su reducción y/o eliminación, con la finalidad de mitigar sus impactos negativos a la salud de la población, al ecosistema circundante y la propiedad.

Artículo 2.- Definición de los Pasivos Ambientales

Son considerados pasivos ambientales aquellas instalaciones, efluentes, emisiones, restos o depósitos de residuos producidos por operaciones mineras, en la actualidad abandonada o inactiva y que constituyen un riesgo permanente y potencial para la salud de la población, el ecosistema circundante y la propiedad.

Artículo 10.- Reutilización de los pasivos ambientales mineros.

Los pasivos ambientales podrán ser reutilizados por el titular de la concesión minera en los que se encuentren ubicados, siempre que se implementen medidas de manejo ambiental y aquellas destinadas a su mitigación, remediación y cierre, conforme al estudio ambiental correspondiente, según lo establezca el Reglamento."

Artículo 11.- Reaprovechamiento de pasivos ambientales mineros.

Los pasivos ambientales que formen parte del inventario al que se refiere el artículo 3 y que pudieran contener valor económico podrán ser susceptibles de reaprovechamiento. El reaprovechamiento del pasivo ambiental deberá solicitarse y ejecutarse considerando medidas de manejo ambiental, mitigación, remediación y cierre, e incluyendo garantías ambientales conforme al estudio ambiental correspondiente, según lo establezca el Reglamento.

La Ley Minera en Cuba, en algunos de sus principales artículos señala, (Asamblea Nacional del Poder Popular, 1976):

Artículo 1: La presente ley se denomina Ley de Minas y tiene como objetivos establecer la política minera y las regulaciones jurídicas de dicha actividad de manera tal que garantice la protección, el desarrollo y el aprovechamiento racional de los recursos minerales en función de los intereses de la nación, trazando directivas obligatorias controladas por los funcionarios del gobierno vinculados con la actividad.

Artículo 43: Los concesionarios de explotación tienen las siguientes obligaciones:

- Iniciar la explotación en un plazo máximo de 2 años, contados a partir de la fecha del título.
- Elaborar y someter a la aprobación de la autoridad minera el proyecto de explotación según el procedimiento que se prevea en el reglamento de la presente ley.

- Explotar la reserva del yacimiento con pérdidas y diluciones mínimas.
- Planificar y ejecutar las investigaciones geológicas necesarias para incrementar el conocimiento del yacimiento para orientar los trabajos de explotación.

Como resultado del análisis de los principales conceptos y características de los pasivos ambientales, en diferentes países incluyendo al nuestro, se aprecia que todos coinciden en que estos materiales, son almacenamientos de residuos mineros a los cuales no se le ha dado un uso específico; lo que justifica el desarrollo de esta investigación con el objetivo de caracterizar térmicamente y evaluar los posibles usos que se le puedan dar, en este caso a los escombros lateríticos del yacimiento Moa Oriental, actualmente abandonados en varias zonas mineras de la Empresa Pedro Sotto Alba de Moa.

1.3.2 Tratamiento a los escombros lateríticos en Cuba.

Los escombros lateríticos cubanos han sido caracterizados por varios investigadores como Swardjo en 1969, quien dirigió sus trabajos fundamentalmente al estudio de los yacimientos niquelíferos de Pinares de Mayarí y Martí, en la región de Mayarí, con vista a la obtención de concentrados de Hierro para la producción de arrabio y aceros, citado por (Ortiz Bárcenas, 2015).

Varios autores han logrado caracterizar a los escombros como una mena de Hierro con contenidos altos de níquel, cobalto y cromo, Palacio Rodríguez, (2001), así como (Palacios Rodríguez & García Peña, 2013, pág. 13), donde se aprecia que en la composición mineralógica de los ocre predominan la goethita, la aluminogoethita, la maghemita, la hematita y la hidrargirita, coincidiendo estos con los trabajos desarrollados por Rojas en 1995, quien demostró que los principales minerales portadores de níquel y de cobalto en el corte laterítico del yacimiento Moa son, la goethita y la hidrargirita.

La investigación de las posibilidades de extracción de cobalto de los escombros lateríticos a partir de la lixiviación ácida, tuvo como propósito determinar el efecto de los principales parámetros tecnológicos y el modelo cinético del proceso de lixiviación ácida para la extracción de cobalto, realizaron la experimentación a escala de laboratorio con una muestra tomada en el yacimiento Yamanigüey perteneciente a la mina de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” (Palacios Rodríguez & García Peña, 2013, pág. 15).

La composición química promedio en (%) de la muestra de escombros tomada es de 0,64 % de Ni; 0,09 % de Co %; 0,77 % de Mn; 45,5 % de Fe; 7,6 % de Al; 1,93 % de Cr; 0,55 % de Mg; 0,02 % de Zn; 0,06 % de Cu y 3,31 % de SiO₂. Para el tratamiento de estos escombros, se utilizó como agente lixivante ácido sulfúrico con 98 % de pureza y como agente reductor azufre elemental con alta calidad industrial, obteniéndose como resultado que, con el aumento del valor de temperatura, reactivo lixivante, relación líquido - sólido, contenido de agente reductor, granulometría y con la disminución del tamaño de partículas existe incremento en la extracción de cobalto. Las extracciones de cobalto a temperatura de 180 °C promedio valores de 90 % mientras que a temperatura de 220 °C es superior con un valor promedio de 93 % durante los primeros 30 minutos. Citado en (González Roché, 2017).

(Ramírez Pérez, 2010) demostró la efectividad del uso de los escombros lateríticos del área 1, yacimiento Moa Occidental perteneciente a la fábrica Comandante Pedro Sotillo Alba, en el proceso de descarburización del acero ACI HK-40, fundamentado en la caracterización química, física, mineralógica y térmica de esos escombros; en esta investigación, se comprobó además, que estos materiales, están compuestos fundamentalmente, por óxido de hierro, lo que coincide con Swardjo, W, (1969) y Ostroumov, 1985, quienes caracterizaron estos residuos como menas de hierro con alto contenido de níquel, cobalto y cromo. Esto demuestra que el uso de este pasivo ambiental ha sido analizado por diferentes investigadores, pero no se ha llegado a la implementación concreta en la industria siderúrgica nacional.

Los análisis granulométricos realizados han demostrado, que el contenido de óxido de hierro no varía bruscamente con el tamaño de las partículas, en las mayores de dos milímetros este se incrementa entre 73,16 y 77,18 %, el aluminio es el segundo de los elementos mayoritarios en el escombros, con un contenido que se incrementa en la medida que disminuye el diámetro de las partículas y llega a alcanzar el 10 %, (Ramírez Pérez, 2010, pág. 34).

Por su parte, el estudio termodinámico indicó que el óxido de hierro (II), producto de la reducción del óxido de hierro (III) contenido en el escombros, es el compuesto que garantiza la oxidación del carbono y otras impurezas en el baño metálico, la cual fundamenta su utilización en la descarburización del acero ACI HK-40 y establece el procedimiento a escala industrial para partículas mayores de dos milímetros, (Ramírez

Pérez, 2010); lo que demuestra que, con la utilización de estos residuos es posible el aprovechamiento de más del 35 % de los escombros depositados en las escombreras de área 1, del yacimiento Moa Oriental, (González Roché, 2017, pág. 30).

González Roche, (2017), empleo en su investigación los escombros lateríticos del yacimiento Moa Oriental, específicamente los de depósito Camarioca Norte, áreas 1 y 2, cuyos resultados han sido tomados para la continuidad de esta investigación.

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

Este resultado, nos permitió comprender la posibilidad de utilizar este pasivo ambiental en la industria siderúrgica cubana, aprovechando los contenidos de los elementos valiosos que este posee, en este caso el níquel y el hierro, principalmente.

(Reyes González, 2014) demostró la efectividad que tiene la extracción de cobalto por lixiviación de los escombros lateríticos de los yacimientos pertenecientes a la Empresa “Comandante Pedro Soto Alba Moanickel S.A” en tinajas de percolación, que a diferencia de Palacios y García Peña, (2013), que utilizaron como agente reductor el sulfato de hierro (II), donde se estudiaron como variables independientes: la concentración inicial de ácido sulfúrico y la concentración inicial de sulfato de hierro (II).

Esta última investigación tiene gran efecto en el proceso de lixiviación, porque a medida que aumenta la concentración de sulfato de hierro (II), aumenta la extracción de cobalto en el transcurso del tiempo. Mediante los experimentos realizados se observó que a los 180 min se obtiene la mayor recuperación de cobalto de 0,101 g/L, esto demuestra que la presencia del sulfato de hierro (II) como agente reductor tiene una influencia directa sobre el cobalto, mientras mayor es la concentración inicial del agente reductor mayor

es la extracción de cobalto lograda, lo mismo ocurre con la concentración de ácido sulfúrico al aumentar esta se obtiene una mayor extracción de cobalto. Estos resultados demuestran también, los intentos realizados en los últimos años por emplear los escombros lateríticos, aprovechando sus elementos valiosos, en este caso a través de las vías hidrometalúrgicas.

Durán Suárez (2015), realizó un inventario de las escombreras existentes en los yacimientos Punta Gorda, Yagrumaje Sur y Yagrumaje Norte, pertenecientes a la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” de Moa, que permitió definir el volumen y los posibles usos industriales de estos residuales. Con la investigación realizada se estimó un volumen total de escombros de 47 millones de toneladas, equivalente a 32 millones de m³ con tonelaje promedio de hierro igual a 20 millones de toneladas, níquel igual a 263 000 toneladas y cobalto igual a 23 000 toneladas, por lo que, considerando los altos contenidos de hierro presentes en estas escombreras, se concluyó que los mismos pueden ser utilizables en la obtención de productos siderúrgicos.

1.4 Caracterización de los Pasivos Ambientales “Escombros Lateríticos”, generados por la industria del níquel en Moa y Nicaro

Cuba a pesar de ser un país subdesarrollado siempre ha tenido muy en cuenta la protección del medio ambiente, para evitar el incremento de la contaminación por el uso de los recursos minerales, un lugar importante en este tema lo ocupan los pasivos ambientales, los cuales hemos identificado y caracterizado durante el desarrollo de esta investigación. Elementos que se resumen a continuación en los principales yacimientos y depósitos investigados en los últimos años.

1.4.1 Escombros del Yacimiento Moa Occidental

La Empresa “Comandante Pedro Sotto Alba” procesa anualmente alrededor de 4,0 MM toneladas de mineral, de diferentes frentes de explotación conformando mezclas de los yacimientos Moa Oriental y Moa Occidental, con una producción final promedio de alrededor de 28 000 toneladas al año, utilizando para el procesamiento de sus minerales la tecnología de lixiviación ácida a presión, (González Roché, 2017, pág. 22).

Los principales depósitos minerales del yacimiento Moa occidental no son utilizados por esta empresa, por lo que constituyen pasivos ambientales metalúrgicos, generados

por las operaciones minera y metalúrgica, identificados principalmente, como: concreciones ferruginosas o escombros lateríticos, cuyas principales características se muestran a continuación.

Escombros del Yacimiento Moa Occidental, zona Atlantic

El depósito mineral Atlantic, pertenece al yacimiento Moa occidental, que dejó de ser explotado hace más de 15 años por la Empresa Pedro Sotto Alba de Moa, los escombros de esta zona, poseen contenidos de níquel que varían entre 0,6 y 0,9 %, el cobalto entre 0,05 y 0,07 %, el óxido de hierro como promedio tiene un contenido de 60 %, el óxido de aluminio de un 10 %, el óxido de cromo 2,3 %, el óxido de silicio de 3 % y de óxido de magnesio el contenido alrededor de 0,5 %. Desde el punto de vista mineralógico, en la composición de las lateritas y los ocre presentes en las escombreras predominan la goethita, la alumogoethita, magnetita e hidrargirita.

En cuanto a la granulometría de este pasivo, se comprobó que el 50 % de lo constituyen las partículas mayores de 1,25 mm, es decir, es una materia prima con predominio de partículas gruesas. (Ferreiro Guerrero & Santiesteban Domínguez, 2006), aspecto que es importante tener en cuenta para su posible uso siderúrgico, donde las partículas finas constituyen un problema para la operación eficiente de los principales equipos metalúrgicos, que emplean estas plantas.

Escombros de la Empresa Ferroníquel Minera S.A

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

Los escombros lateríticos de esta zona, pertenecen también al yacimiento Moa Occidental, y han sido almacenados, en dos grandes escombreras, y reforestadas como alternativa de rehabilitación, sin embargo no han sido utilizados los más de 5 MM de toneladas de estos residuales, a pesar de los estudios preliminares que se han realizado, entre los que destacan los trabajos de Huaraca Taype, (2018, pág. 33).

1.5 Escombros Lateríticos del yacimiento Moa Oriental

Los minerales presentes en el yacimiento Moa Oriental, son los que se encuentran actualmente en explotación, por la Empresa “Comandante Pedro Soto Alba Moanickel S.A” y dentro de ellos se encuentran diferentes depósitos, donde solo son extraídas las cortezas portadoras de níquel y cobalto, permaneciendo los escombros lateríticos, como residuos mineros, sin un uso adecuado, como ocurre con el resto de estos pasivos almacenados durante años por la Minería y la Metalurgia en Moa y Nicaro. A continuación, se exponen las características generales de los escombros lateríticos de la zona objeto de estudio de esta investigación.

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

De forma general, los escombros de Moa Occidental, están compuestos fundamentalmente, por óxidos de hierro, y aunque su contenido no varía bruscamente con el tamaño de las partículas, en las mayores de dos milímetros este se incrementa entre 73,16 y 77,18 % (Ramírez Pérez, 2010).

Destacan entre sus principales características químicas, que el contenido de aluminio, es el segundo de los elementos mayoritarios en el escombros, con valores que se incrementan en la medida que disminuye el diámetro de las partículas, que llega a alcanzar el 10 % (19 % como óxido) en las menores de 0,83 mm, mientras que los valores más bajos de este elemento, son del orden de 5 %, reportados en las partículas mayores de 4 mm, (Ghanesh Persaud, 2014, pág. 35).

Por su parte, los estudios mineralógicos, confirman que las fases principales en las concreciones ferruginosas son los óxidos de hierro, representados fundamentalmente, por maghemita ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) y goethita ($\alpha\text{-FeO.OH}$), (González Roché, 2017), (Ramírez Pérez, 2010).

Informes de la dirección de Minas de la Empresa “Comandante Pedro Soto Alba Moanickel S.A” 2017, reportan que las áreas 1 y 2 pertenecen al dominio 3 del yacimiento Camarioca Norte, ubicado al noroeste de la concesión minera, es el más contrastante con respecto al resto de los dominios, distinguiéndose por la ausencia del horizonte saprolítico, descansando el horizonte limonítico directamente sobre las rocas del basamento, al parecer con un predominio de redeposición de este último, (González

Roché, 2017), lo que brinda características similares a otros tipos de escombros anteriormente estudiados.

Morfológicamente posee las menores pendientes, con alturas entre los 300 y 460 metros para la superficie y entre 280 y 440 metros para el basamento, porque la correlación entre estos valores y la topografía del basamento, obtenida a partir de perfiles de georadar, corresponde a un bloque en descenso relativo, respecto al ubicado más al sur, con el cual contacta a través de una falla de dirección noreste que marca un escalón tectónico. Ello justifica que en este dominio se encuentren los mayores espesores de corteza redepositada desde los niveles más altos, lo que se hace evidente por los mayores espesores de corteza total en los que abundan restos fósiles, texturas estratificadas e intercalaciones de ocre estructurales e inestructurales. (González Roché, 2017, pág. 14). Estos elementos geológicos constituyen una regularidad de este tipo de pasivo ambiental, abundante en toda la región de Moa.

En el caso del Área 2 ubicada también, en la parte occidental de la concesión, constituye una morfoestructura alargada del sureste hacia el norte, correspondiente a la parte principal entre río Arroyón, que lo limita al oeste y un tributario de Revuelta de los Chinos al este, con alturas en ascenso gradual hacia el sur desde los 350 a 700 metros. Conjuntamente con el ascenso gradual de la topografía y del substrato rocoso, aumentan también los valores de la pendiente desde 0-12 grados hasta los 25 grados en su parte más meridional, (Dirección de Minería, Empresa Pedro Sotto Alba, 2015, pág. 33).

La propia fuente, plantea que, los límites morfológicos del dominio están representados por fallas, que controlan los barrancos de los tributarios ya mencionados, cortados al mismo tiempo por varias estructuras sublatitudinales que desplazan el cuerpo mineral, mientras que las rocas sobre las que se desarrollan las cortezas ferroniquelíferas son las peridotitas serpentinizadas y las harzburgitas serpentinizadas y en algunos sectores las rocas recrystalizadas de composición antigorítica. Estas características coinciden en muchos casos con rocas y minerales del yacimiento Moa Occidental, aspecto que ha sido tomado en cuenta para el desarrollo de esta investigación.

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

homogéneo de los depósitos, (Dirección de Minería, Empresa Pedro Sotto Alba, 2015, pág. 23).

Dentro de los ocreos aparecen frecuentemente inclusiones y fragmentos serpentiniticos ocretizados así como texturas estratiformes, mientras que en los cuerpos minerales que conforman este dominio, los mayores valores de potencia mineral útil y mayores contenidos, así como los menores valores del número mineral, se encuentran en la parte más septentrional, (González Roché, 2017, pág. 25).

Es típica la repetición de horizontes rocosos de diferentes litologías, así como la inclusión de bloques, también de diferentes litologías, entre los ocreos estructurales, predominando en ambos casos los bajos contenidos de níquel, elemento que caracteriza a los escombros lateríticos de la región de Moa en general.

EL caso específico del yacimiento Camarioca Norte, áreas 1 y 2, de estudios preliminares, se conocen las características químicas de los escombros lateríticos, los cuales se muestran en la siguiente tabla.

Tabla No. 1. Composición química promedio (%) de las Áreas 1 y 2 del Yacimiento Camarioca Norte

Depósito	Área	Ni	Co	Fe	SIO2	Mg	Al	Mn
Camarioca Norte	1	0,59	0,09	46,34	2,81	0,52	5,6	0,65
Camarioca Norte	2	0,62	0,07	42,45	4,09	0,91	7,5	0,55

Fuente: (Ghanesh Persaud, 2014).

1.6 Escombros Lateríticos del Yacimiento Punta Gorda

El yacimiento Punta Gorda, es explotado por la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara, y al igual que en la Empresa Pedro Sotto Alba, los escombros vertido en las escombreras de este yacimiento, se caracteriza por ser un material arcilloso-granuloso, representado por concreciones ferruginosas en forma de guisantes, (Durán Suárez Y. , Caracterización y evaluación de las escombreras de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara para posible uso industrial., 2015), el contenido de hierro está representado por un 43,67 %, mientras que el contenido de óxido de silicio es de 2,638 %; el contenido de óxido de magnesio de 0,971 %, el contenido de

cobalto de 0,053 % y el de níquel 0,578 %. Las características mineralógicas de estos pasivos están representadas por la presencia de goethita, como fase principal y de gibbsita, espinelas y asbolanas como fases secundarias.

Estos pasivos ambientales, tampoco han sido investigados a profundidad con vistas a definir un posible uso industrial, lo cual debe ser tomado en cuenta para los futuros trabajos investigativos, relacionados con el tratamiento de los pasivos ambientales, generados por la industria del níquel en Moa.

1.7 Escombros de la región de Mayarí

La paralización de las operaciones de la planta de níquel y cobalto, ubicada en Nicaro, inmovilizó los trabajos mineros, por lo que muchos de los yacimientos minerales, entre los que se encuentran los escombros lateríticos, han quedado acumulados sin posibilidades reales de ser estudiados y utilizados industrialmente. En este sentido sobresalen escasos trabajos, los cuales se exponen a continuación.

1.7.1 Escombros de Mina Martí en Nicaro

En la caracterización química realizada a los escombros lateríticos de Mina Martí, en Nicaro, se evidencia que el níquel posee un valor promedio de 0,80 %, que lo identifica como un mineral atractivo para su procesamiento como materia prima para la producción de arrabio con níquel, (Ortiz Bárcenas, 2015).

Precisamente el trabajo de Ortiz Bárcena, es uno de los más importantes, realizados sobre los escombros de Mina Martí, donde se comprobó que el contenido de hierro se incrementa a partir de las fracciones desde + 0,83 mm hasta + 6,30 mm; esta característica es positiva para su posterior utilización en el proceso de aglomeración, debido a que contribuye a la formación de granos primarios que disminuyen la formación de polvos.

Por su parte, los contenidos de los óxidos de aluminio y silicio son de 14,0 %, por tanto, se trata de una ganga ácida, lo que indica que para su posterior tratamiento metalúrgico es necesaria la adición de fundente (cal) para su aglomeración y posterior fusión, mientras que el contenido de cromo es uniforme en todas las fracciones, elemento que

es favorable, debido a que se puede recuperar en el proceso de fusión, (Ortiz Bárcenas, 2015, pág. 19).

No se tienen evidencias del estudio de otros tipos de escombros lateríticos de la región de Mayarí, lo cual constituye también una necesidad, para poder aprovechar de manera sostenible los recursos abandonados por la Minería de la antigua planta de níquel René Ramos Latour de Nicaro.

1.8 Usos de los Pasivos Ambientales, generados por la industria del níquel

La obtención de lupias de arrabio a partir del tratamiento metalúrgico de las colas de Nicaro es un ejemplo claro que demuestra la utilidad de los pasivos ambientales.

Entre los elementos de aleación más importantes, se tienen la presencia del carbón, entre 4,32 y 5,10 %, estos elevados valores se justifican, debido principalmente a la presencia del cromo en las lupias (entre 1,786 y 1,931 %), cuya presencia permite que el hierro asimile elevados contenidos de carbono, debido a la formación de un doble carburo de cromo y hierro, lo que trae consigo que el arrabio obtenido tenga una elevada capacidad de absorción de carbono, contrarrestando el efecto grafitizador del níquel cuyo contenido en las lupias se encuentran entre 0,608 y 0,621 %, lo que coincide con los reportes realizados por Bethlehem (1923), por Bethlehem archive (1966) y por Ferreiro (d) (2012). Citado en (Ferreiro Guerrero Y. , 2014, pág. 80).

En las lupias obtenidas el contenido del silicio oscila entre 0,27 y 0,59 %, con este bajo contenido de silicio la estructura de las lupias debe ser la de un arrabio blanco según reporta Howard (1962) y que coincide con lo planteado por Ferreiro (2014), mientras que el contenido de manganeso es bajo, oscila entre 0,178 y 0,384 %, en las fundiciones se desea que su contenido oscile entre 0,5 y 1,0 % para proteger a la fundición de la oxidación del baño metálico (Howard (1962)). (Ferreiro Guerrero Y. , 2014, pág. 81)

El contenido de azufre oscila entre 0,142 y 0,257 %, contenido característico de los arrabios blancos, de acuerdo a Howard (1962) para los hierros fundidos grises oscila entre 0,02 y 0,08 %. Citado en (Ferreiro Guerrero Y. , 2014, pág. 81).

Los contenidos de fósforo obtenidos en las lupias oscilan entre 0,023 y 0,026 %, por lo que de acuerdo al bajo contenido de fósforo (menor que 0,1 por ciento) las lupias de arrabio podrían clasificarse como arrabios hematites (Euronorm 1 - 81), no obstante los

contenidos presentes de níquel y cromo ($> 0,3 \%$) impiden que se clasifiquen las lupias como hematites, sino como lupias de arrabio aleadas dentro de la clase de designación "otros arrabios aleados" (Pig-SPA), de la norma europea Euronorm 1- 81. (Ferreiro Guerrero Y. , 2014, pág. 81).

Al tener en cuenta la presencia de los elementos de aleación en las lupias, ello trae consigo que el contenido de Hierro sea menor (91,23 %) que el que se obtiene por la tecnología ITMK3 (entre 96 y 97 %), de acuerdo a los valores reportados por Rutherford (2010). (Ferreiro Guerrero Y. , 2014, pág. 82).

De acuerdo a la composición química de las lupias obtenidas sería posible sustituir hasta un ocho por ciento de chatarras de acero por este material en la elaboración de aceros al carbono, según lo reportado por Ferreiro (2013), por lo que el mayor uso que se le podría dar a este material, sería para la obtención del acero "Mayarí", así como para la elaboración de aceros inoxidable, para el que se podría emplear más del 80 % como material de carga. (Ferreiro Guerrero Y. , 2014, pág. 82).

Otro uso evidente fue obtención de un producto prerreducido para la producción de arrabio con níquel (Nickel Pig Iron) a partir del tratamiento de los escombros lateríticos de mina martí de Nicaro.

El arrabio obtenido puede utilizarse en caliente al horno para la fundición de acero en una cantidad que corresponde al 50 % de la carga metálica de la acería de Acinox Las Tunas. Serían 6000 t de arrabio con níquel al mes, entonces esta entidad pudiera economizar 4000,00 MGwatt/mes de electricidad, que significan 712 000 usd/mes. (Ortiz Bárcenas, 2015, pág. 94).

(Ramírez Pérez, 2010) fue otro autor que estudió el posible uso de los escombros lateríticos, demostrando la efectividad del uso de los escombros lateríticos del área 1, yacimiento Moa Occidental perteneciente a la fábrica Comandante Pedro Sotto Alba, en el proceso de descarburización del acero ACI HK-40, fundamentado en la caracterización química, física, mineralógica y térmica de esos escombros.

Los dos primeros trabajos mencionados anteriormente hacen referencia al posible uso de los pasivos ambientales, generados por la Minería y la Metalurgia en Nicaro específicamente, las colas y los escombros de Mina Martí ; del cual fueron tomadas varias muestras de estos residuales, sometidas al proceso de reducción carbotérmica,

con el fin de obtener dos productos aprovechables en posteriores procesos siderúrgicos. La presente investigación posee gran semejanza con estos trabajos, pero esta vez el área en cuestión es el pasivo ambiental escombros lateríticos de Moa Oriental en la Empresa Comandante Pedro Soto Alba, al cual se le aplicará un proceso reductor por el método de aluminotermia.

1.9 Proceso de Reducción

En la actualidad se dispone de una gran cantidad de procesos alternativos al horno alto que permiten obtener hierro, como material de carga para la producción de aceros, a continuación de resumen las principales características de estos procesos:

Proceso de reducción directa: es el proceso mediante el que se emplean agentes reductores como gas natural, coque, aceite combustible, monóxido de carbono, hidrógeno o grafito, obtenidos de la reformación catalítica del CH₄. El procedimiento consiste en triturar la mena de hierro y pasarla por un reactor con los agentes reductores, con lo que algunos elementos no convenientes para la fusión del hierro son eliminados.

El producto del sistema de reducción directa es el hierro esponja, que consiste la obtención de pellets de mineral de hierro, que pueden ser utilizados directamente para la producción de acero con características controladas. (www.Xiderex.org, 2016, pág. 1).

Destacan entre los principales procesos de reducción los que emplean como reductor al carbón, llamado carbotérmica y los que emplean otros metales como el aluminio, Aluminotérmico, silicio, Silicotérmico, entre los más utilizados en el mundo.

1.9.1 Reducción por el método de Carbotérmica

El proceso de reducción con el carbono se verifica de forma general, mediante la reacción química siguiente:



Donde:

X: Elemento químico.

La reducción con carbono (reducción directa) se desarrolla en todos los casos con carácter endotérmico (referida a la temperatura ambiente), o sea, que el calor exigido para la reducción de los óxidos supera al desprendido por la combustión del carbono con formación de monóxido de carbono. Si se realiza una reducción indirecta con monóxido de carbono, la reacción es ligeramente exotérmica pero la reducción del óxido sería aún incompleta. Por esta razón la reducción se realiza en hornos eléctricos que son altos consumidores de energía, y donde las aleaciones obtenidas por este método tienen gran contenido de carbono, sin embargo no cubren todas las posibles aplicaciones que se presentan en la industria, para este tipo de material, (González González, 2013, pág. 19).

1.9.2 Procesos con reductor sólido

En los procesos con combustibles sólidos el reductor principal es el carbono, el cual produce otro agente reductor gaseoso, el monóxido de carbono, responsable del incremento de la presión interna del horno. Al actuar el carbono sólido, la reducción se da, únicamente, en los puntos de contacto, con una actuación temporal, debido a que, al formarse una capa de hierro metálico, la reducción ya no procede por contacto sino por difusión de átomos de carbono en el estado sólido. Finalmente, esto da menor penetración a los átomos de carbono, lo que da lugar a que el contenido de carbono sea menor que en los procesos con reductor gaseoso, entre el 0,1 y el 0,2 % (Conejo, 2000). (Ferreiro Guerrero Y. , 2014, pág. 20).

En el 2011 se mantuvieron operando en el mundo 54 módulos de reducción empleando carbón, con una capacidad de $7,03 \times 10^6$ t (World direct reduction statistics 2011), la mayoría de estos procesos operan con la utilización de hornos de tipo rotatorio: SL/RN (Stelco-Lurgi – Republic Steel – National Lead), CODIR (Coal Ore Direct Iron Reduction), DRC (Davy Reduction Corporation), SIIL (Sponge Iron India Limited), OSIL (Orissa Sponge Iron Limited, TDR (Tisco Direct Reduction), JSPL (Jindal Steel & Power Limited). Conejo (2000) considera que esta unidad de reducción es tecnológicamente la más flexible de todas las conocidas en la técnica de la reducción directa, puede aceptar materiales de carga de una amplia variedad granulométrica, lo que permite la utilización de cargas con granulometrías inferiores a las señaladas para los procesos en hornos de cuba. (Ferreiro Guerrero Y. , 2014, pág. 20).

1.9.3 Procesos con reductor en fase gaseosa

Conejo (2000) considera que los procesos con reductor en fase gaseosa más importantes comercialmente son los procesos Midrex y HYL; ambos representan el 72 % de la producción mundial por esta vía (Steel Statistical Yearbook, 2012), pero tienen el inconveniente que se necesitan contenidos mínimos de Hierro en las menas superiores a 64 %, (Ferreiro Guerrero Y. , 2014, pág. 21).

Los procesos con reductor en fase gaseosa requieren del suministro de gas natural para producir el gas reductor, donde el producto energético es costoso en comparación con el carbón no coquificable. En este caso, para reducir los costos de energía, o cuando la disponibilidad del gas natural es baja, se cuenta con una serie de procesos que operan con carbón solamente como reductor, (Ferreiro Guerrero Y. , 2014, pág. 21).

1.9.4 Procesos de reducción en estado líquido

El horno alto es la instalación metalúrgica en la que más se produce Hierro líquido en el mundo, se denomina hierro de primera fusión o arrabio, al hierro que procede directamente del alto horno, en el cual se realiza la transformación del mineral en hierro; y se denomina fundición de hierro al producto no forjable, obtenido por una o varias fusiones del arrabio, solo o mezclado con materiales férreos o especiales (Pezzano, 1963). (Ferreiro Guerrero Y. , 2014, pág. 21).

De acuerdo a la norma europea EURONORM 1-81 "Definición y clasificación de arrabios" las lupias obtenidas pueden clasificarse como lupias de arrabio, por cuanto los contenidos de los elementos de aleación no exceden los límites máximos presentes en la norma.

Pezzano (1963) define como arrabio al producto metálico obtenido por la reducción de minerales de hierro en altos hornos, plantea que el mismo es frágil y no forjable y lo clasifica de dos formas: (Ferreiro Guerrero Y. , 2014, pág. 21).

1.9.5 Procesos de reducción por aluminotermia

Los procesos de reducción empleando al aluminio como reductor, se llaman aluminotérmicos, y sus principales características se describen a continuación.

Básicamente térmita es el nombre genérico dado a las reacciones entre los óxidos metálicos y los agentes reductores. Como agentes reductores pueden utilizarse el aluminio, el magnesio, el calcio y el silicio. Cuando el agente reductor es el aluminio este proceso recibe el nombre de aluminotermia. El agente reductor más empleado ha sido el aluminio, debido a que el magnesio tiene una baja temperatura de ebullición y el calcio presenta carácter higroscópico. También se han utilizado mezclas de silicio y aluminio como elementos reductores, pero la utilización exclusiva de silicio precisa del aporte externo de calor, ya que por sí misma es difícil que la reacción progrese. (González González, 2013, pág. 11).

Las reacciones típicas de algunos procesos aluminotérmicos se muestran a continuación:

Tabla No. 2. Reacciones típicas de algunos procesos aluminotérmicos.

Reacciones			$\Delta H(\text{KJ/mol})$	Temperatura alcanzada ($^{\circ}\text{C}$)
$3\text{Fe}_3\text{O}_4 + 8\text{Al}$	$\longrightarrow$	$9\text{Fe} + 4\text{Al}_2\text{O}_3$	3 010	3 088
$3\text{FeO} + 2\text{Al}$	$\longrightarrow$	$3\text{Fe} + \text{Al}_2\text{O}_3$	783	2 500
$\text{Fe}_2\text{O}_3 + 2\text{Al}$	$\longrightarrow$	$2\text{Fe} + \text{Al}_2\text{O}_3$	759	2 960
$3\text{CuO} + 2\text{Al}$	$\longrightarrow$	$3\text{Cu} + \text{Al}_2\text{O}_3$	1 152	4 866
$3\text{Cu}_2\text{O} + 2\text{Al}$	$\longrightarrow$	$6\text{Cu} + \text{Al}_2\text{O}_3$	1 089	3 138
$3\text{NiO} + 2\text{Al}$	$\longrightarrow$	$3\text{Ni} + \text{Al}_2\text{O}_3$	864	3 171
$\text{Cr}_2\text{O}_3 + 2\text{Al}$	$\longrightarrow$	$2\text{Cr} + \text{Al}_2\text{O}_3$	2 287	2 977
$3\text{MnO} + 2\text{Al}$	$\longrightarrow$	$3\text{Mn} + \text{Al}_2\text{O}_3$	1 686	2 427
$3\text{MnO}_2 + 4\text{Al}$	$\longrightarrow$	$3\text{Mn} + 2 \text{Al}_2\text{O}_3$	4 356	4 993

Fuente: (González González, 2013).

La variación de energía libre (ΔG) para una reacción química a presión constante puede representarse por la ecuación siguiente: (González González, 2013)

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (2)$$

Donde:

ΔH : variación de entalpía del proceso (KJ/mol)

ΔS : variación de entropía del sistema (KJ/mol·K)

T: temperatura (K)

La igualdad anterior constituye la ecuación de una línea recta de la forma $y = n + mx$ cuyos coeficientes n y m representan ΔH y $-\Delta S$ respectivamente.

Es la acción reductora del aluminio sobre los óxidos de otros metales, cuando la reacción se inicia en un punto, se desarrolla por sí sola, debido a que el calor de formación del óxido de aluminio es mucho mayor que el de la mayoría de los demás óxidos metálicos, referidos a la misma cantidad de oxígeno. Es una reacción de oxidación-reducción fuertemente exotérmica, que genera 93,6 kcal y alcanza cerca de 3 000 °C, lo que produce una masa caliente de hierro fundido y escoria de óxido de aluminio refractario. El óxido de aluminio es mucho menos denso que el hierro líquido, lo que facilita la separación de los productos, el metal queda en la parte inferior cubierta de una capa de escoria. En la práctica debe trabajarse en función de lograr la mayor separación posible entre ambos productos. A temperatura tan elevada, no solo se funde el metal que se forma y que por su mayor densidad se reúne en el fondo, sino que también es capaz de fundir el óxido de aluminio formado y que se reúne en la superficie del metal, por su menor densidad, constituyendo una capa protectora.

Estas termitas solo reaccionan cuando un punto de la mezcla se calienta a una temperatura elevada mediante un cebo o fulminante. Una vez iniciada la reacción en un punto, el calor desprendido es suficiente para propagar la reacción a toda la masa de la termita. La propagación tiene lugar con una velocidad intermedia entre las reacciones explosivas y las reacciones ordinarias.

Teniendo en cuenta las características de la reducción Aluminotérmica, y la composición química de los escombros lateríticos, se utilizó este método en esta investigación, como alternativa de procesamiento premetalúrgico de este pasivo ambiental.

1.10 Conclusiones del Capítulo I

1. Los escombros lateríticos, generados por la industria del níquel en Nicaro y Moa, han sido estudiados con vistas a sus posibles usos, donde sobresalen los siguientes resultados:
 - ✓ Obtención de cobalto empleando la lixiviación ácida.
 - ✓ Obtención de un producto prerreducido para la producción de arrabio con níquel (Nickel Pig Iron), empleando el proceso de reducción carbotérmica.
 - ✓ Obtención de oxidante, proceso de descarburización, para la producción de acero ACI HK-40, con los escombros de Moa Occidental.
2. Los escombros lateríticos de Nicaro y Moa, están compuestos por aglomerados hematíticos, goethitas, serpentinas, espinelas cromíferas y óxidos de hierro (68,50 %), que lo convierten en una posible fuente de materia prima para la industria siderúrgica cubana.
3. A pesar de los estudios realizados para el conocimiento de los escombros lateríticos, no existen evidencias de sus usos industriales, que sirvan como referencia para la utilización de los pertenecientes al yacimiento Camarioca Norte.
4. Existe desconocimiento sobre las características térmicas del pasivo ambiental “Escombros lateríticos” del yacimiento Camarioca Norte, áreas 1 y 2, que limitan la toma de decisiones sobre sus posibles usos siderúrgicos.

CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se hace referencia a la metodología utilizada para la caracterización físico-química, mineralógica y térmica de los escombros lateríticos del yacimiento Camarioca Norte, Áreas 1 y 2 de la Empresa “Comandante Pedro Soto Alba Moanickel SA “, así como ilustrar los equipos empleados para el desarrollo de los análisis y las pruebas experimentales.

Este trabajo constituye la continuidad de una línea de investigación vinculada con el proyecto 1501, financiado por el CITMA, relacionado con el tratamiento y uso de los Pasivos Ambientales Minero-Metalúrgicos, generados por la industria del níquel en Moa. Durante el año 2017, se realizó la caracterización física, química y mineralógica de muestras de escombros lateríticos del yacimiento Camarioca Norte, áreas 1 y 2, que constituyen elementos de partida para la continuidad de estas investigaciones.

2.1 Selección y preparación de la muestra

El grupo de Geología – Minería de la Empresa “Comandante Pedro Soto Alba” fue el encargado de la toma de muestra, lo cual fue realizado, en la zona menífera del yacimiento Camarioca Norte, Áreas 1 y 2. A partir de estas muestras, trasladadas hasta la Planta de Beneficio del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, se conformó una muestra compósito representativa de los escombros lateríticos de estas zonas, las cuales fueron caracterizadas por González Roché, (2017).

Para el desarrollo de esta investigación se conformó una masa de 9,6 kg; la cual fue homogenizada y cuarteada a través del método del cono y el anillo, y trasladada hasta la Universidad Central de las Villas, Martha Abreu (UCLV), para la realización de pruebas pirometalúrgicas. El aspecto físico de la muestra, es de una coloración parda rojiza, que delata el alto contenido de óxidos de hierro en estos escombros, como es de esperar en horizontes de concreciones ferruginosas. (González Roché, 2017, pág. 24). En la figura

2 se muestran las áreas objeto de estudio, de esta investigación.



Figura No. 2. Áreas donde fueron tomadas las muestras de investigación.

Fuente: (González Roché, 2017).

La figura 3 muestra el esquema de trabajo utilizado, que incluye la toma de muestras para la investigación, la caracterización y el desarrollo de las pruebas pirometalúrgicas.

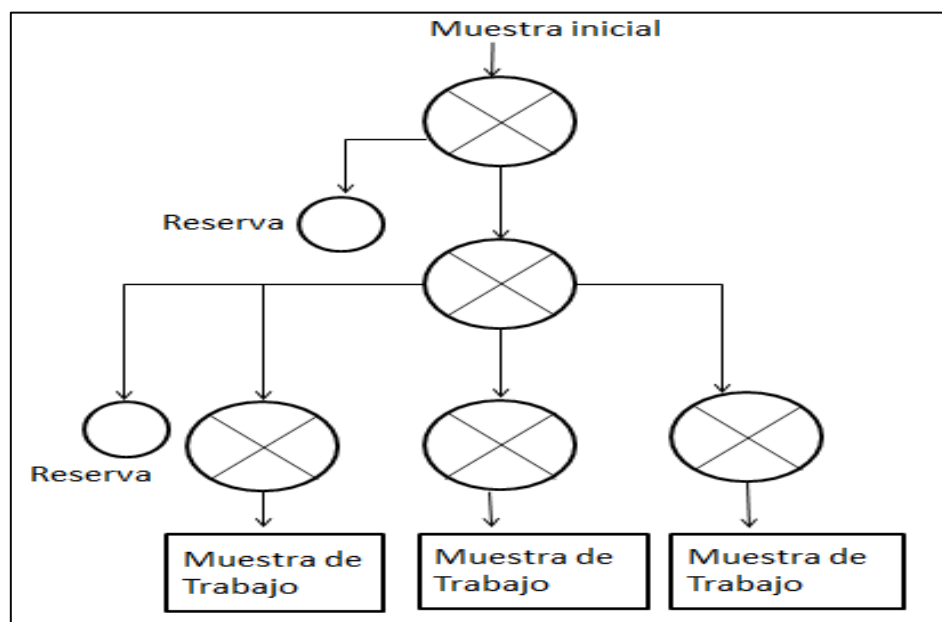


Figura No. 3. Esquema para la selección de las muestras utilizado en la investigación.

Fuente: (González Roché, 2017, pág. 25)

Para la realización de las pruebas pirometalúrgicas, se utilizó una masa de muestra de 3 kg de escombros para cada una de las áreas estudiadas, las cuales fueron pesadas en una balanza analítica ubicada en la planta de Beneficio del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, embaladas y trasladadas hasta la UCLV.

2.2 Ensayos analíticos realizados

En este epígrafe abordaremos los principales aspectos relacionados con los análisis químicos, mineralógicos, granulométricos y térmicos realizados, así como los equipos utilizados durante su desarrollo.

2.2.1 Análisis Químico

Los resultados de los análisis físicos y químico de las muestras experimentales, fueron tomados del trabajo anterior, (González Roché, 2017), con el objetivo de evaluar las principales características del pasivo ambiental “escombros lateríticos” del yacimiento Camarioca Norte, para su posible uso industrial. Las muestras de escoria y productos no fundidos, fueron analizadas químicamente en el Centro de Investigaciones y Desarrollo de la Industria del Níquel en Moa (CEDINIQ), empleando la técnica de Espectrofotometría de Absorción Atómica, Volumetría y Gravimetría, en el equipo modelo UNICAM SOLAR 929 (SIMPLE RAYO DE LUZ), que se muestra en la siguiente figura.



Figura No. 4. Equipo de Espectroscopia de Absorción Atómica empleado en los análisis químicos.

Fuente: (González Roché, 2017, pág. 29).

El procedimiento técnico de ensayo empleado para la determinación de Si, Al, Mg, Ni, Co, Mn, Cr, Fe, Cu y Zn, fue el UPL - PT – A-26, mientras que para la determinación de hierro (II), se empleó el método volumétrico, según el siguiente procedimiento técnico de ensayo: UPL-PT-V-03. Por su parte, las pérdidas por ignición (PPI) se

determinaron por el método gravimétrico, siguiendo el procedimiento: UPL-PT-G-01 (González Roché, 2017, pág. 29).

Las muestras de metal obtenidas, durante las pruebas pirometalúrgicas, fueron analizadas químicamente en el laboratorio de fundición de la Empresa Mecánica del Níquel (EMNi), utilizando un Espectrómetro de masa, modelo BLF, mostrado en la figura 5, cuyos principales características son las siguientes:

País de fabricación: Alemania,

Modelo: GS 1000-II,

Año de fabricación: 2015.

Voltaje: 230 volt,

Corriente máxima: 1,5 KvA,

Presión: 3 Bar,

Atmósfera: Argón,



Figura No. 5. Equipo de Espectroscopia de masa empleado en los análisis químicos de los metales obtenidos durante las pruebas pirometalúrgicas.

2.2.2 Análisis Mineralógico

Para la determinación de las fases presentes en las muestras las mismas fueron trasladadas hacia el Centro de Investigaciones para la Industria Minero Metalúrgica CIPIMM en la Habana se empleó el método de Difracción de Rayos X Bruker AXS D8 Focus.



Figura No. 6. Difractómetro de Rayos- modelo X Bruker AXS D8 Focus, empleado para los análisis mineralógicos.

Las características técnicas de este equipo, son las siguientes:

Óptica primaria:

- Voltaje: 35 kv
- Corriente: 25 mA
- Slit: 0.6 mm.
- Tubo Cu $K\alpha$

Óptica secundaria:

- Detector: Lynxeye
- Scan type: Continuous.
- Slit: 2.5 mm.
- Cu-Absorber: 0.05 mm

2.2.3 Análisis Granulométrico

Según (González Roché, 2017, pág. 26) la caracterización granulométrica de los escombros objeto de estudio, se realizó por vía seca, seleccionando el juego de tamices según la serie de Taylor y por la experiencia en el tratamiento de los escombros lateríticos, siguiente:

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

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

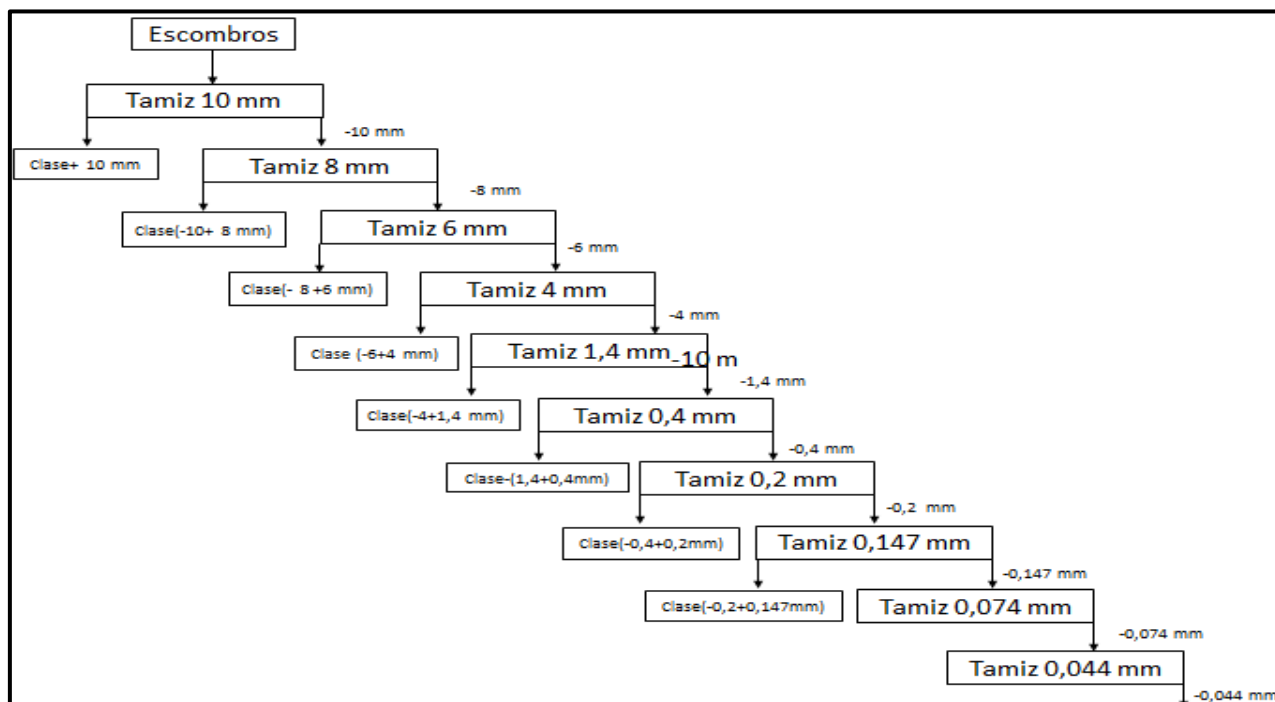


Figura No. 7. Esquema utilizado en el análisis granulométrico de las muestras.

Fuente: Tomado de (González Roché, 2017, pág. 26).

2.2.4 Análisis Térmico

El análisis térmico fue realizado en el Centro de Investigaciones para la Industria Minero Metalúrgica (CIPIMM) en la Habana, a través de la Termogravimetría (TG) y la Derivada de la Termogravimetría (DTG), utilizando un equipo de la firma alemana NETZSCH, modelo STA 449 F3.



Figura No. 8. Equipo de análisis térmico empleado en esta investigación.

Las características técnicas del equipo de análisis térmico se muestran en la tabla siguiente.

Tabla No. 3. 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 las curvas DSC y 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 las Derivadas de la Termogravimetría, DTG, para las diferentes velocidades de cambio de masa (dm/dt). Los porcentos de pérdidas de masa, así como los efectos endotérmicos y exotérmicos, asociados a estas pérdidas, se muestran en los termogramas obtenidos.

2.3 Ensayos Experimentales

Las muestras tecnológicas trasladadas hasta la Universidad Central de las Villas, fueron preparadas y mezcladas con el reductor empleado, para el desarrollo de las pruebas pirometalúrgicas, consistentes en ensayos de fusión-reductora. Las características de las materia primas utilizadas se exponen a continuación.

2.3.1 Materias primas utilizadas

Las mezclas metalúrgicas empleadas en las pruebas de fusión reductora, estuvieron conformadas por las siguientes materias primas:

- Pasivo Ambiental “Escombros Lateríticos” del yacimiento Camarioca Norte, áreas 1 y 2.



Figura No. 9. Muestra de escombros lateríticos de las áreas 1 y 2.

Elaborado por: Noslén Cobas García.

- Reductor: Virutas de aluminio procedentes de la producción de cafeteras en la Empresa EINPUT de Santa Clara, provincia Villa Clara.



Figura No. 10. Muestras del reductor (aluminio) utilizado en las pruebas experimentales.

Elaborado por: Noslén Cobas García.

Características del reductor (aluminio) utilizado

Aluminio:

El aluminio es el elemento metálico más abundante en la corteza terrestre; sólo los elementos no metálicos, oxígeno y silicio, son más abundantes. Se encuentra normalmente en forma de silicato de aluminio puro o mezclado con otros metales como sodio, potasio, hierro, calcio y magnesio, pero nunca como metal libre, mientras que los silicatos no son menos útiles, porque es extremadamente difícil, y por tanto muy caro extraer el aluminio de ellas, por su parte, la bauxita, un óxido de aluminio hidratado impuro, es la fuente comercial de aluminio y de sus compuestos. (Díaz Martínez, 2016, pág. 19)

El alto precio del aluminio en el mercado internacional hace que el producto sea totalmente reciclable, ya sea en forma de laminados, recipientes y hasta las virutas procedentes de las operaciones de maquinado son reaprovechadas. La generación de virutas de aluminio en la industria cubana se concentró durante muchos años en la producción de cafeteras en la Empresa EINPUT de Santa Clara. Por otro lado, en los últimos años se ha desarrollado vertiginosamente la carpintería de aluminio, encontrándose instalaciones diseminadas por todo el país, lo cual ha motivado un incremento considerable de las importaciones de Aluminio; así como en la generación de virutas. La Empresa ALCUBA centra el procesamiento y distribución de los laminados en el país y la empresa de 20 recuperación de materias primas se encarga de la recolección de estos residuos. (Díaz Martínez, 2016, pág. 19).

Composición química del aluminio

Dentro de la composición del aluminio se encuentran numerosos elementos como el Si (0,3 – 0,6); Fe (0,1 – 0,3); Mn (0,1); Cu (0,1); Mg (0,35 – 0,36); Zn (0,15); Cr (0,05); Al (92).

2.3.2 Preparación de la mezcla pirometalúrgica

Primeramente se trituro el mineral y el reductor, empleando para ello un mortero manual, el cual se muestra en la figura siguiente.



Figura No. 11. Mortero para triturar las materias primas

Elaborado por: Noslén Cobas García.

Posteriormente se realizó el proceso de clasificación, empleando una tamizadora con un tamiz de diámetro igual a 2 mm, como se aprecia en la figura siguiente.



Figura No. 12. Tamizadora empleada para la tratamiento de las materias primas.

Elaborado por: Noslén Cobas García.

Luego se pesaron las muestras empleadas en el proceso de fusión, compuestas por: 200 g de mineral y 47 g de reductor, empleando la balanza digital que se muestra en la figura siguiente.



Figura No. 13. Balanza digital utilizada para el pesaje de las materias primas

Elaborado por: Noslén Cobas García.

El siguiente paso fue mezclar las materias primas durante 30 minutos en la mezcladora rotatoria, que se aprecia en la figura siguiente.



Figura No. 14. Mezcladora de laboratorio utilizada en los trabajos experimentales

Elaborado por: Noslén Cobas García

Posteriormente se calentó la mezcla en una estufa a una temperatura de 270°C, durante una hora y treinta minutos, aproximadamente. Una imagen de la estufa empleada se observa en la figura siguiente.



Figura No. 15. Estufa utilizada para calentar la mezcla.

Elaborado por: Noslén Cobas García.

El paso siguiente fue introducir la mezcla en un crisol de grafito, cónico de 15,5 cm de diámetro interior y 4,5 cm de espesor, con una profundidad de 21 cm, donde se realizaron las pruebas de fusión-reductora de la mezcla metalúrgica conformada, con tres réplicas experimentales.



Figura No. 16. Crisol de grafito empleado en el proceso de fusión-reductora

Elaborado por: Noslén Cobas García.

Una vez introducida la mezcla en el crisol para iniciar la reacción del mineral con el Aluminio, se utilizó un electrodo de soldar como fuente de energía eléctrica, transformada en térmica para lograr la fusión de la mezcla. La máquina rectificadora de soldadura, empleada se muestra en la figura 17 y sus principales características son las siguientes:

- País: Alemania
- Voltaje o tensión en vacío: 82 V
- Equipo trifásico de: 220 V
- Potencia: 13 kVA

- Corriente máxima: 220 A
- Arco utilizado: 24-28 V



Figura No. 17. Máquina rectificadora de soldadura

Elaborado por: Noslén Cobas García.

El proceso de obtención de las termitas se muestra a continuación en la figura 18.



Figura No. 18. Secuencia de obtención de las termitas experimentales.

Elaborado por: Noslén Cobas García.

Una vez concluido el proceso de fundición se obtuvieron tres productos principales, metal, escoria y no fundidos, los cuales se muestran en la figura siguiente.

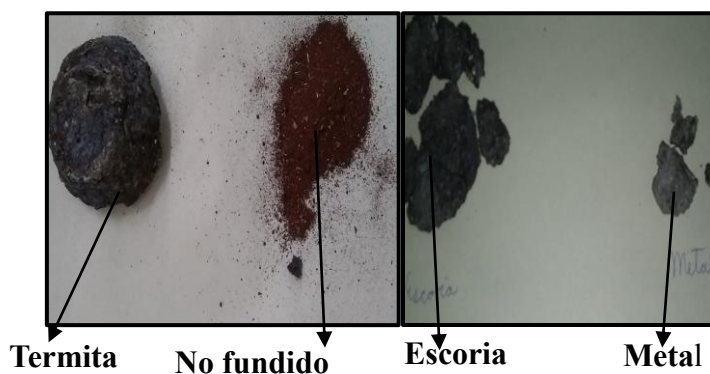


Figura No. 19. Principales productos obtenidos durante las pruebas de fusión-reductora.

Elaborado por: Noslén Cobas García

2.4 Procesamiento y desarrollo de la investigación

El procesamiento de las informaciones generados durante el desarrollo de esta investigación, se realizó empleando la paquetería de la Microsoft, 2013, mientras que los análisis y experimentos realizados, fueron financiados por el Proyecto 1501, Rehabilitación de Pasivos Ambientales Minero-Metalúrgicos sólidos (PAMMs), generados por la industria del níquel en Cuba.

2.5 Conclusiones del capítulo II

1. Las características físicas, químicas y mineralógicas realizadas en trabajos precedentes, constituyeron la base para realización de los estudios pirometalúrgicos, en esta investigación.
2. Las técnicas analíticas y experimentales empleadas, son de gran actualidad y confiabilidad y permitieron cumplir los objetivos trazados en esta investigación.
3. Las mezclas metalúrgicas conformadas con el PAMMs “Escombros Lateríticos”, del yacimiento Camarioca Norte, áreas 1 y 2 y el aluminio como reductor, garantizaron la realización de las pruebas de fusión-reducción.

CAPÍTULO III. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En el presente capítulo se muestran los resultados obtenidos a lo largo de toda la investigación, ya sean resultados analíticos y experimentales realizados.

Los resultados de los análisis químicos y físicos (granulométricos), sirvieron de partida para el análisis integral de las principales características del PAMMs “Escombros Lateríticos” del yacimiento Camarioca Norte, áreas 1 y 2 perteneciente a la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba, con vistas a la toma de decisiones sobre sus posibles usos siderúrgicos. Los principales resultados obtenidos se detallan a continuación.

3.1 Resultados de los análisis químicos

Químicamente, el escombros del yacimiento Camarioca Norte, áreas 1 y 2, está compuesto, fundamentalmente, por óxido de Hierro y su contenido no varía bruscamente con el tamaño de las partículas, por lo que se caracteriza a los escombros como menas de Hierro. (González Roché, 2017, pág. 35). Basado en este elemento, se decidió evaluar el comportamiento térmico de este PAMMs, en el proceso de fusión reductora, para comprobar las posibilidades reales de obtener productos siderúrgicos, a partir de este residuo.

El aluminio es el segundo de los elementos mayoritarios en el escombros, con un contenido que se incrementa en la medida que disminuye el diámetro de las partículas y llega a alcanzar hasta 10,43 %, en forma de óxido en las partículas mayores de 0,2 mm; mientras que los valores más bajos están en el orden de 7,46 %, en las partículas mayores de 10 mm, como se aprecia en la siguiente figura.

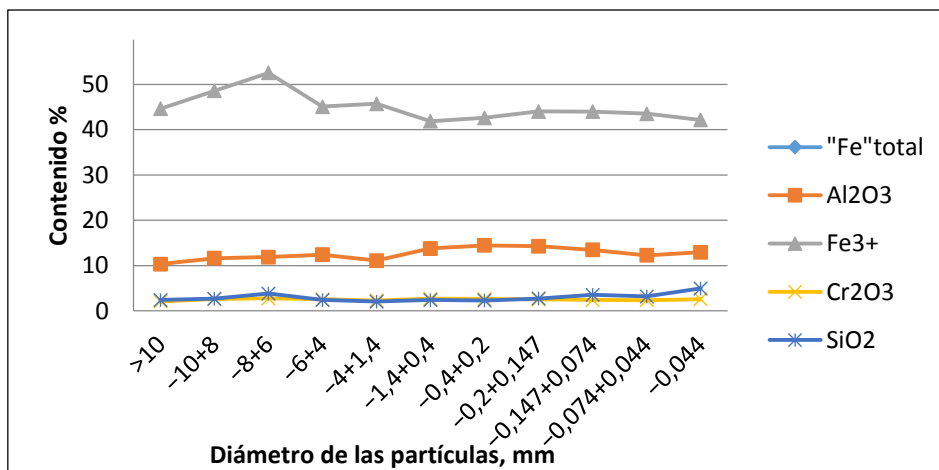


Figura No. 20. Contenido de los elementos mayoritarios en las fracciones granulométricas.

Fuente: (González Roché, 2017, pág. 36)

Por su parte, el contenido de magnesio se comprobó que se incrementa hacia las partículas más finas, principalmente, en las menores de 0,044 mm con contenido de óxido de magnesio de 14,303 %, con presencia significativa de los minerales arcillosos junto al aluminio y al silicio.

Es significativo, además, que el contenido de silicio, magnesio y aluminio se concentra, principalmente, en las partículas de menores de 1 mm, lo que indica, que, en caso de utilizarse en la industria siderúrgica, estos elementos contribuirán a mejorar las propiedades de viscosidad y fluidez de las escorias producidas.

Todos estos elementos, fueron considerados para la realización de las pruebas pirometalúrgicas, sobre todo el contenido de finos y la presencia de diferentes elementos químicos, deseables y no deseables para la producción de aceros.

La composición química promedio, del PAMMs Escombros Lateríticos, empleado en esta investigación, se caracteriza por el predominio del contenido de hierro, aluminio y cromo, con relativamente bajos contenidos de níquel y cobalto, como se aprecia en la tabla siguiente.

Tabla No. 4. Composición química promedio (%), de los escombros lateríticos del yacimiento Camarioca Norte, Áreas 1 y 2.

Escombros	CoO	MnO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Fet	NiO	Fe ²⁺	Fe ³⁺	Fe _t	PPI
ÁREA 1	0,07	0,597	0,241	3,09	14,069	2,701	39,263	0,412	0,106	39,157	13,186	13,08
ÁREA 2	0,08	0,601	0,234	3,89	13,691	2,821	40,251	0,44	0,11	40,17	13,11	13,0

Fuente: (González Roché, 2017)

Mientras que los valores ponderados, obtenidos para el desarrollo de las pruebas pirometalúrgicas se muestran en la tabla siguiente.

Tabla No. 5. Valores ponderados de las muestras iniciales, (%).

Valores ponderados	CoO	MnO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Fe _t	NiO	Fe ²⁺	Fe ³⁺
	0,069	0,588	0,237	3,042	13,850	2,659	55,218	0,406	-	-

Elaborado por: Noslén Cobas García.

3.2 Resultados de los análisis granulométricos

La composición granulométrica de las muestras, representada en las figuras de los anexos 1 y 2, evidencian un predominio de las partículas -1,4 y 0,4 mm, que alcanzan el 62,93 % en peso de la muestra para el área 1 y el 48,47 % para el área 2.

En el caso del área 1, se distinguen tres grupos granulométricos principales, de una parte, una granulometría fina, menor de 0,147 mm que representa el 3,31 % en peso de la muestra; un segundo grupo intermedio constituido por las fracciones mayores de 0,147 y menores de 6 mm, que representan el 79,2 % y un tercer grupo de fracciones más gruesa, mayores de 6 mm, que representan el 17,251 % en peso de la muestra, en las cuales, las fracciones individuales no superan el 12,5347 %, como se muestra en la figura siguiente.

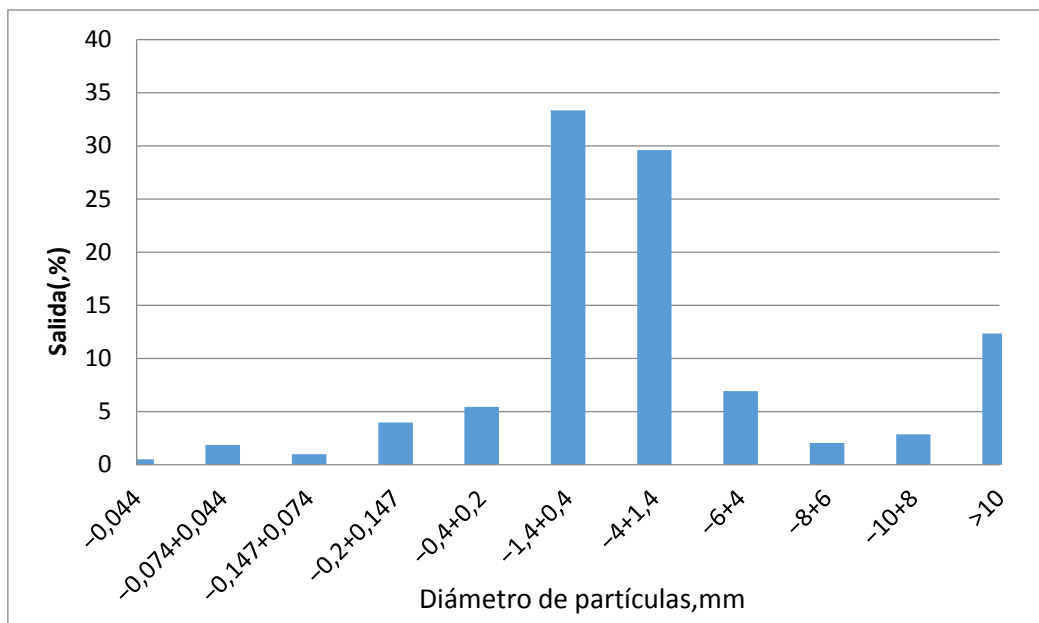


Figura No. 21. Características granulométricas de los escombros del Yacimiento Camarioca Norte, Área 1.

Fuente: (González Roché, 2017, pág. 34)

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

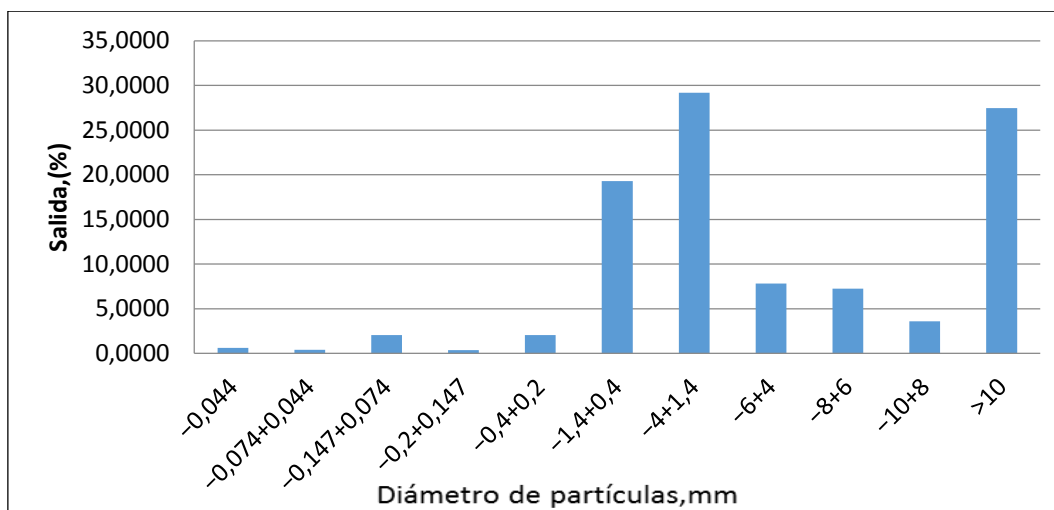


Figura No. 22. Características granulométricas de los escombros del Yacimiento Camarioca Norte, Área 2.

Fuente: (González Roché, 2017, pág. 34)

3.3 Resultado de los análisis mineralógicos

Se comprobó que mineralógicamente los escombros de las áreas de estudio, están constituidos por fases de hierro, hematita y maghemita, en correspondencia con la presencia mayoritaria de hierro, y en menor medida, por fases secundarias, como la magnesiocromita, periclasa, cromita y goethita, como se muestra en la figura siguiente.

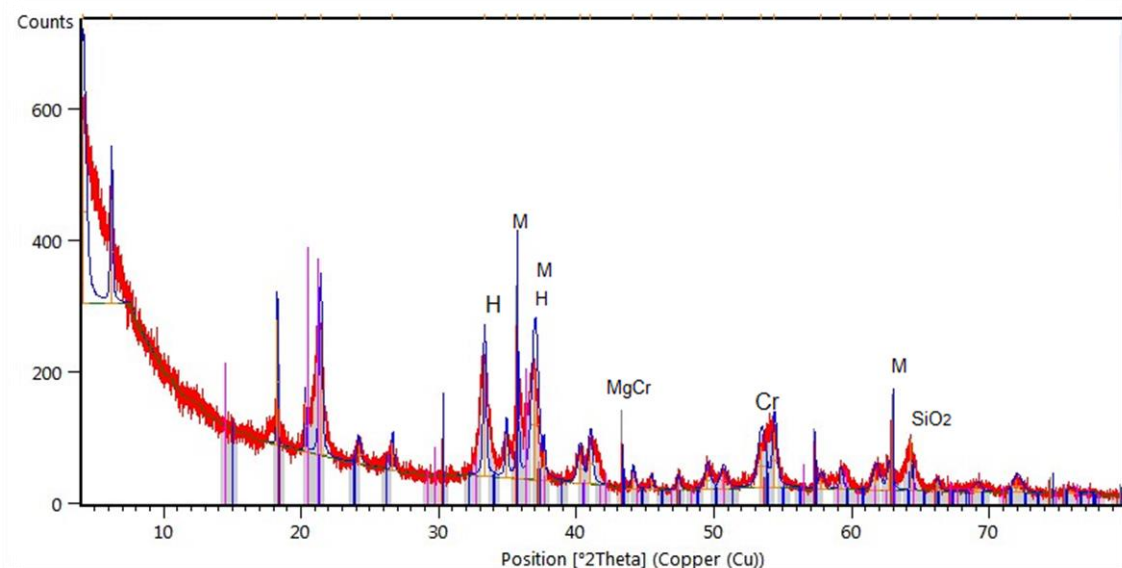


Figura No. 23. Difractograma típico de los escombros del Yacimiento Camarioca Norte.

Fuente: (González Roché, 2017).

Estos resultados confirman los análisis químicos, sobre el contenido predominante de óxidos de hierro, en estos pasivos, lo que a la vez brinda la posibilidad de evaluar su tratamiento metalúrgico para la posible utilización industrial, luego de una profundización de los estudios que actualmente se realizan en este sentido.

3.4 Resultados de los análisis térmicos

Los resultados de los análisis térmicos de cada una de las áreas estudiadas, demuestran que el comportamiento térmico de estos pasivos hasta la temperatura de 1000 °C, se desarrolla en dos escalones principales, y un tercero de menor magnitud, que confirman la presencia de minerales de hierro, aluminio y magnesio en estos materiales, como se muestra en la siguiente figura.

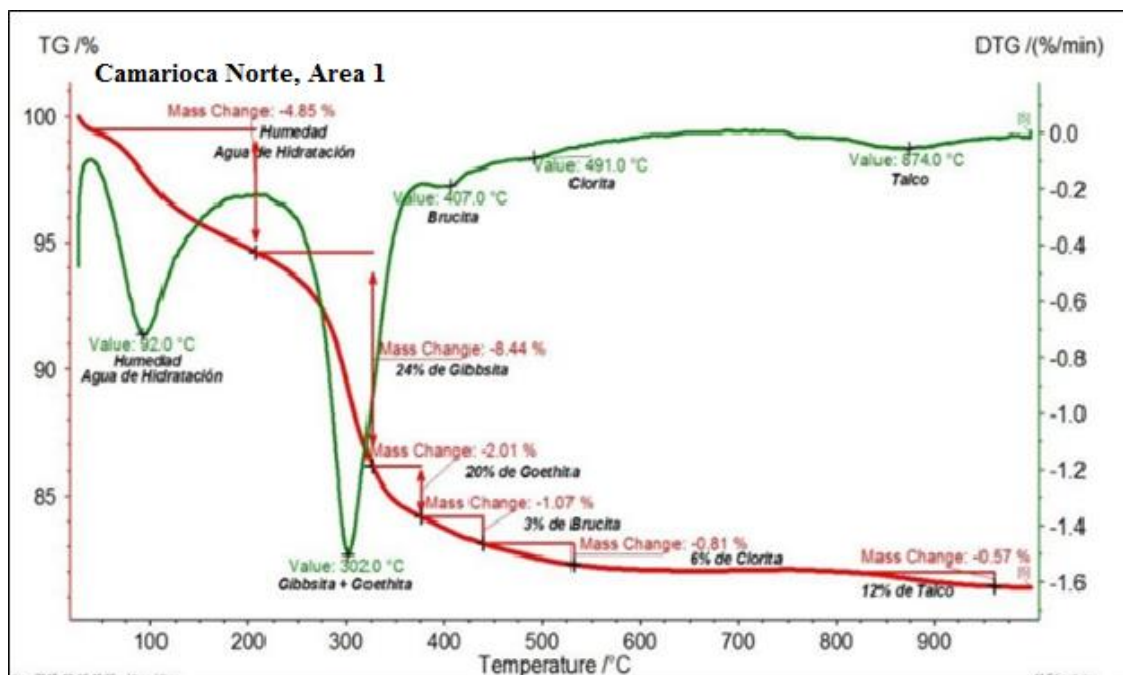


Figura No. 24. Termograma de los escombros lateríticos de camarioca Norte, Área 1.

Elaborado por: Noslén Cobas García.

Las muestras de los escombros exhiben termogramas muy semejantes con marcados contenidos de goethita y gibbsita, variables entre 20 % y 30 %, que en el caso del área 1 muestra un 3 % de brucita a la temperatura de 407 °C y 6 % de clorita a los 491 °C. En esta área se observan dos escalones principales y uno más pequeño, asociados a los siguientes elementos:

Un primer escalón en el intervalo de temperatura de 80 – 250 °C, aproximadamente, con un valor máximo a la temperatura de 92 °C, que indica la máxima rapidez con que el material pierde masa en ese intervalo la cual es de 4,85 %, esto está asociado a la eliminación del agua de hidratación de estos pasivos.

El segundo escalón y más pronunciado tiene lugar en el intervalo de temperatura entre 250 - 320 °C, con un valor máximo a la temperatura de a los 302 °C, indicando la máxima rapidez con que el material pierde masa en este intervalo la cual es de 8,44 %, asociado a la eliminación del agua interna que acompaña a los minerales presentes en estos residuales, principalmente, la gibbsita y la goethita.

Por último el tercer escalón ocurre en el intervalo entre 850 – 950°C, aproximadamente, en el cual es más lenta la pérdida de masa, siendo esta de 0,54 %, con un pico máximo

en los 874 °C, está asociado a la recristalización de los minerales de serpentina que se encuentra en las muestras, específicamente, el talco presente en estos pasivos.

En la siguiente tabla se resumen las características térmicas de los escombros lateríticos de Camarioca Norte, área1.

Tabla No. 6. Características térmicas de los escombros lateríticos de Camarioca Norte, área 1.

Curva	Intervalo de Temperatura (°C)	Pico máximo (°C)	Asociado a:
DTG/TG	80 – 250	92	Eliminación del agua hidratación
DTG/TG	250 -320	302	Eliminación del agua interna de la gibbsita y la goethita
DTG/TG	850 – 950	874	Recristalización de los minerales de serpentina

Elaborado por: Noslén Cobas García

El comportamiento térmico de los escombros del área 2, es muy similar al del área 1, con los mismos escalones, como se muestra en la figura siguiente.

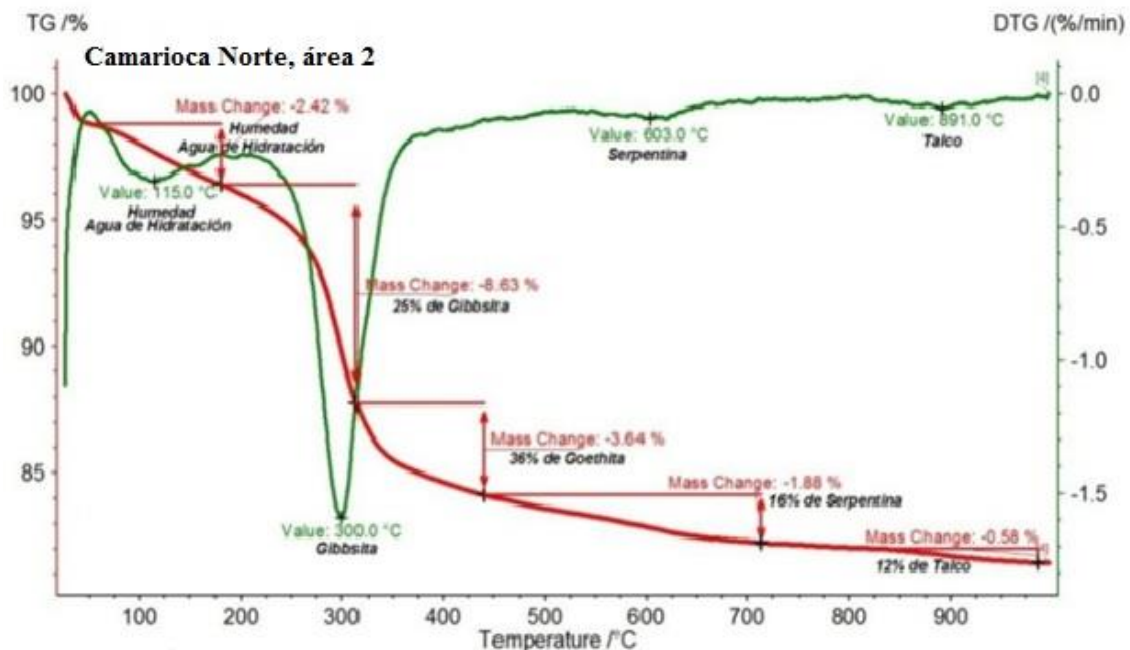


Figura No. 25. Termograma de los escombros lateríticos de Camarioca Norte, Área 2.

Elaborado por: Noslén Cobas García

En el termograma anterior se evidencian tres escalones, los cuales describen el comportamiento térmico del área 2, como se explica a continuación.

El primer escalón se presenta en un intervalo de temperatura entre 80 – 190 °C, con un valor máximo a la temperatura de 115 °C, que indica la máxima rapidez con la que el material pierde masa, la misma es de 2,42 %, asociado a la eliminación del agua higroscópica.

En el segundo escalón ocurre en el intervalo de 190 – 320 °C, se aprecia una mayor rapidez con la que pierde masa el material siendo esta de 8,63 %, asociado a la eliminación del agua interna de la gibbsita y la goethita, presentando un pico máximo a los 300 °C.

El tercer escalón es el más pequeño, ocurre entre 850 – 970 °C, aproximadamente, evidenciando que la pérdida de masa aquí ocurre de forma más lenta, la misma es de 0,58 % con un pico máximo en los 891 °C, asociado a la recrystalización de los minerales de serpentina, por la presencia del talco en estos pasivos ambientales.

La tabla mostrada a continuación, refleja un resumen de las características térmicas de los escombros lateríticos del área 2.

Tabla No. 7. Características térmicas de los escombros lateríticos del yacimiento Camarioca Norte área 2.

Curva	Temperatura (°C)	Pico máximo (°C)	Asociado a:
DTG/TG	80 – 190	115	Eliminación del agua de hidratación
DTG/TG	190 – 320	300	Eliminación del agua interna de la gibbsita y la goethita
DTG/TG	850 - 970	891	Recristalización de los minerales de serpentina

Elaborado por: Noslén Cobas García

El comportamiento térmico de los Escombros Lateríticos del yacimiento Camarioca Norte, tanto en el área 1 como en la 2, presentan características similares, con tres mecanismos de descomposición de los principales minerales presentes en esta residual, lo cual permite conocer las transformaciones que se verifican hasta los 1000 °C, aspectos que han sido tomados en cuenta para la realización de las pruebas experimentales, las cuales se detallan a continuación.

3.5 Resultado de los ensayos experimentales

Las pruebas de fusión reductora, se realizan a muestras de escombros de las áreas 1 y 2, en tres replicas para cada área, con las cantidades que se exponen a continuación.

Tabla No. 8. Peso de la termita obtenida en el primer ensayo experimental.

Productos	Cantidad escombros del área 1 (g)	Cantidad escombros del área 2 (g)
Metal	27	33
Escoria	154	127
No fundido	28	23
Total en (g)	209	183
Carga total introducida al crisol	247	247
Diferencia	38	64

Elaborado por: Noslén Cobas García.

Tabla No. 9. Peso de la termita obtenida en el segundo ensayo.

Productos	Cantidad escombros del área 1 (g)	Cantidad escombros del área 2 (g)
Metal	60	37
Escoria	120	144
No reaccionó	9	16
Total en (g)	189	197
Carga total introducida al crisol	247	247
Diferencia	58	50

Elaborado por: Noslén Cobas García.

Tabla No. 10. Peso de la termita obtenida en el tercer ensayo.

Productos	Cantidad escombros del área 1 (g)	Cantidad escombros del área 2 (g)
Metal	46	23
Escoria	129	148
No reaccionó	15	12
W Total en (g)	190	183
Carga total introducida al crisol	247	247
Diferencia	57	64

Elaborado por: Noslén Cobas García.

Como resultado de las pruebas pirometalúrgicas (fusión-reducción), se obtuvieron tres productos: metal, escoria y un producto no fundido, cuyos principales elementos se analizan a continuación.

3.6 Características de los productos de la fusión-reductora

Como resultado de las pruebas de fusión-reducción realizadas, se obtuvo un metal con alto contenido de hierro, con un valor promedio de 82,8 % para el área 1, acompañado de valores promedio de cromo de 1,3 %, además de Ni, Co, Si, Mn y C, que en conjunto constituyen un arrabio con elementos químicos muy utilizados en las cargas metálicas empleadas en Cuba y el mundo para la producción de aleaciones ferrosas.

En la tabla 11 y en las figuras 26, 27, 28, 29 y 30 se muestran los contenidos de los diferentes elementos, que componen a las muestras de metal obtenidas, en las pruebas de fusión reductora realizadas.

Tabla No. 11. Composición química promedio (%) del metal obtenido durante las pruebas de fusión reductora de los Escombros Lateríticos del área 1.

Coladas	Área	Fe	Ni	Co	Cr	C	Si	Mn	S	P
1	1	83,540	0,33	0,038	1,46	0,330	0,110	0,15	0,029	0,036
2	1	83,63	0,27	0,030	1,360	0,310	0,10	0,11	0,030	0,029
3	1	81,39	0,22	0,028	1,100	0,292	0,610	0,070	0,033	0,040
Promedio		82,853	0,273	0,032	1,307	0,311	0,273	0,11	0,031	0,035

Elaborado por: Noslén Cobas García.

Los relativamente altos valores de hierro, entre 81 – 83 %, demuestran que estamos en presencia de un arrabio, con posibilidades de utilizar en la industria siderúrgica, como material de carga, pero con la recomendación de que antes de utilizarse deben ser considerados algunos elementos importantes, como son la granulometría del pasivo ambiental estudiado y el tipo y cantidad de reductor a utilizar. La figura siguiente muestra el comportamiento del hierro en las diferentes coladas realizadas con los escombros del área 1.

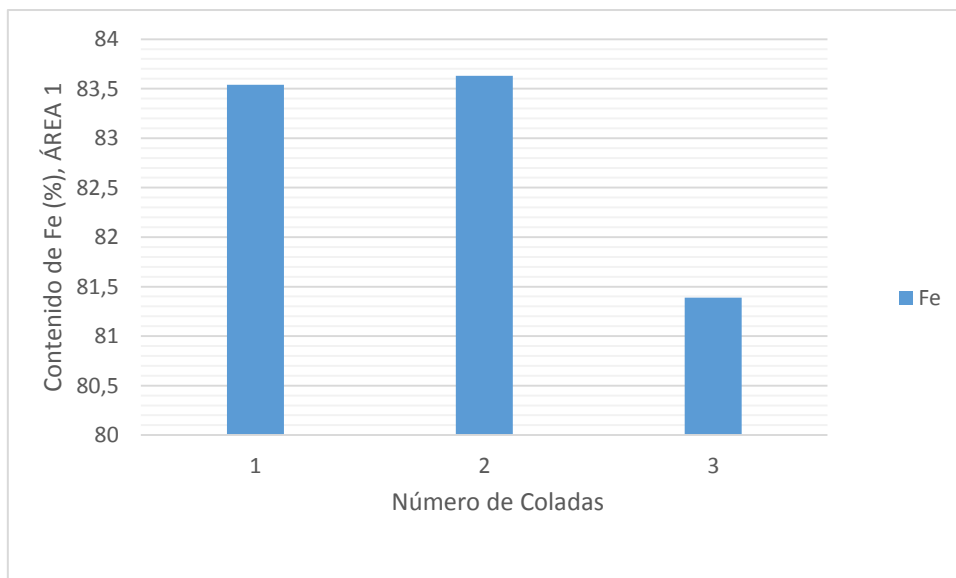


Figura No. 26. Contenido de hierro en dependencia del número de coladas en el metal, área 1.

Elaborado por: Noslén Cobas García.

En el caso del níquel y el cobalto, dos elementos importantes para cualquier proceso de obtención de aleaciones, su cantidad es bastante pequeña, comparada con otros productos de estos metales, con valores promedio de 0,27 y 0,032 %, respectivamente, para el caso del área 1, como se muestra en la figura siguiente.

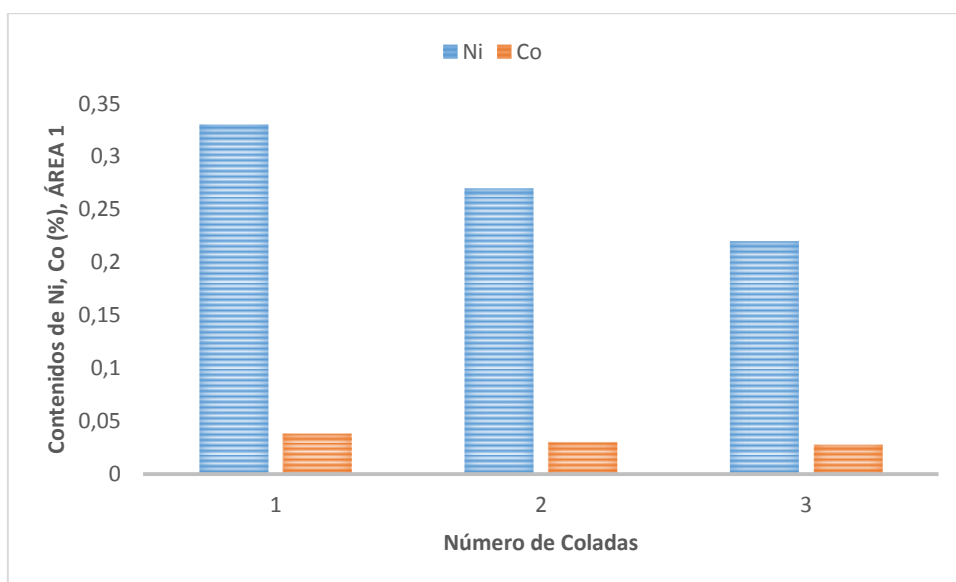


Figura No. 27. Contenidos de níquel y cobalto en el metal obtenido a partir del área 1.

Elaborado por: Noslén Cobas García.

La presencia del cromo en el contenido del metal obtenido varía entre 1,1 y 1,46 %, como se muestra en la figura 27, lo que le aporta un valor adicional al arrabio obtenido, teniendo en cuenta que este elemento, es de gran aplicación en la elaboración de diferentes aleaciones ferrosas, principalmente, los aceros inoxidable.

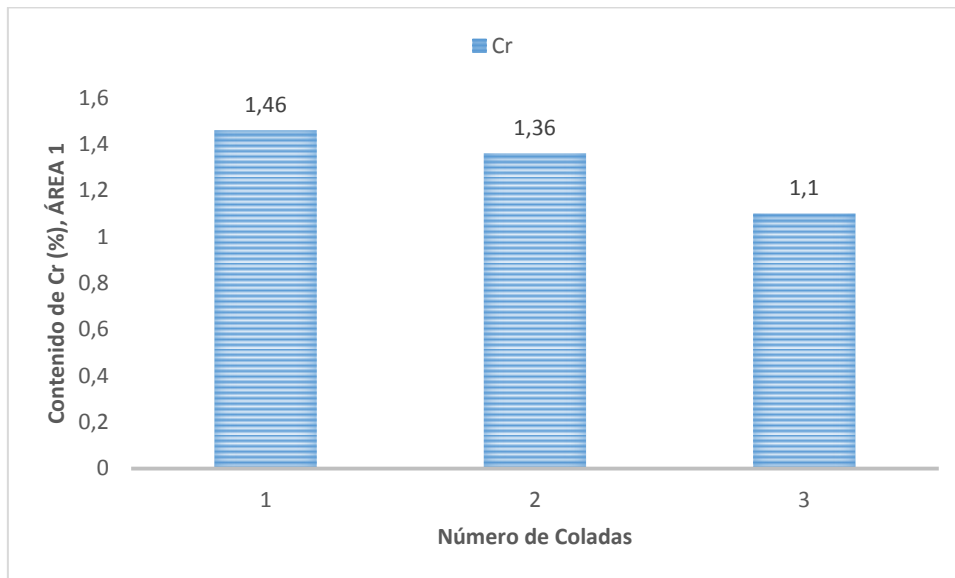


Figura No. 28. Contenidos de cromo en el metal obtenido a partir de la fusión del escombros del área 1.

Elaborado por: Noslén Cobas García

El contenido de elementos tradicionales en los aceros, como el C, Si y Mn están dentro de los rangos normales para los diferentes tipos de arrabio que se comercializan a nivel mundial, con valores que no superan el 1 % como se observa en la figura siguiente.

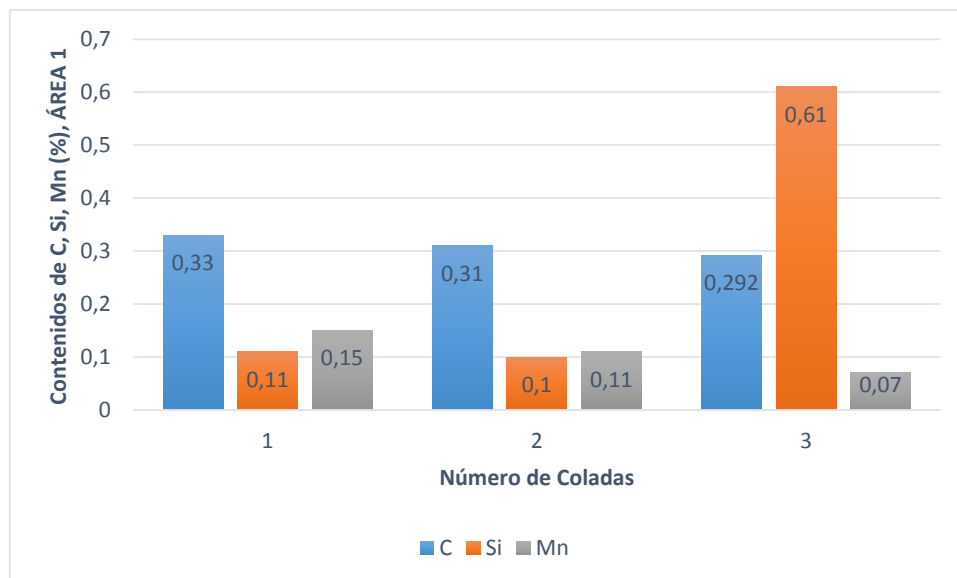


Figura No. 29. Contenidos de carbono, silicio y manganeso en dependencia del número de coladas en el metal, área 1.

Elaborado por: Noslén Cobas García

Otro de los aspectos importantes en los materiales siderúrgicos, es el contenido de las dos principales impurezas, P y S, las cuales, en este caso de estudio, oscilan entre 0,03 y 0,04 %, valores promedio normalmente exigidos, para estos tipos de materiales, como se muestra en la figura siguiente.

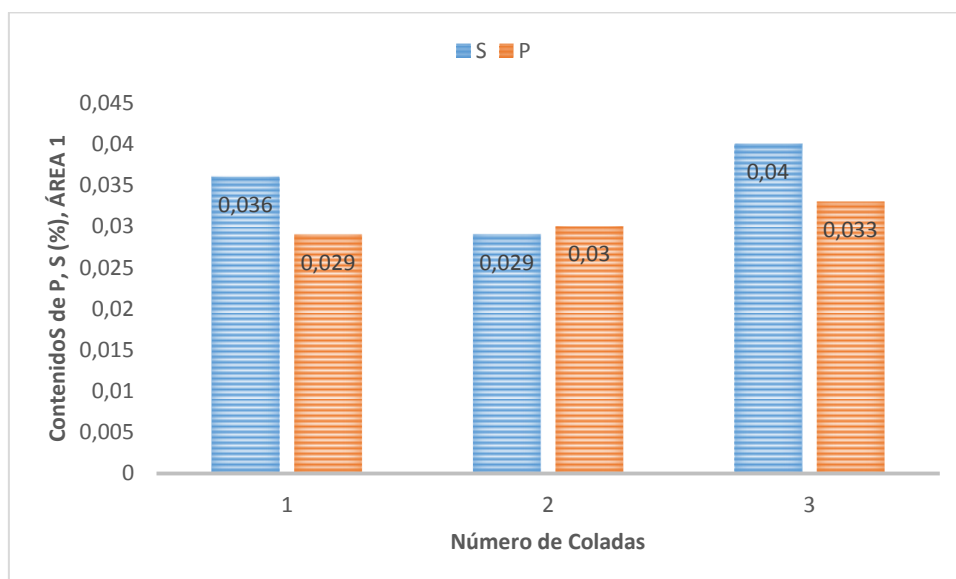


Figura No. 30. Contenidos de fósforo y azufre en dependencia del número de coladas en el metal, área 1.

Elaborado por: Noslén Cobas García.

En el caso de las pruebas de fusión reductora, empleando escombros del área 2, el metal obtenido tuvo características similares a las del área 1, como se observa en la tabla siguiente.

Tabla No. 12. Composición química promedio (%) del metal obtenido durante las pruebas de fusión reductora de los Escombros lateríticos del área 2.

Coladas	Áreas	Fe	Ni	Co	Cr	C	Si	Mn	S	P
1	2	83,690	0,23	0,041	1,44	0,280	0,810	0,09	0,040	0,032
2	2	79,94	0,10	0,015	1,02	0,332	0,60	0,05	0,038	0,037
3	2	84,37	0,27	0,05	1,69	0,344	0,440	0,10	0,04	0,05
Promedio		82,667	0,2	0,035	1,383	0,3187	0,6167	0,08	0,039	0,040

Elaborada por: Noslén Cobas García.

En este caso el contenido de Fe, osciló entre 79 y 84 %, con valor promedio de 82, 6 %, lo que confirma la posibilidad de obtener un arrabio que aportaría este importante elemento a las cargas metálicas utilizadas en la industria siderúrgica cubana. Esto resultados se muestran en la siguiente figura.

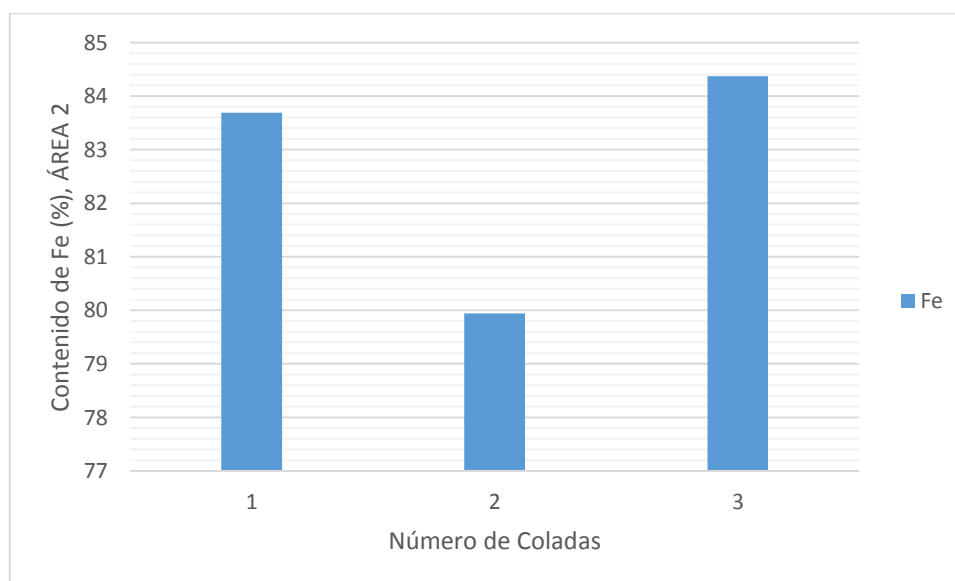


Figura No. 31. Contenido de hierro en el metal, durante las diferentes coladas con escombros del área 2.

Elaborado por: Noslén Cobas García.

El níquel y el cobalto tienen una variación promedio de 0,2 y 0,035 %, respectivamente, como se muestra en la figura siguiente, resultado similar al obtenido con los escombros del área 1.

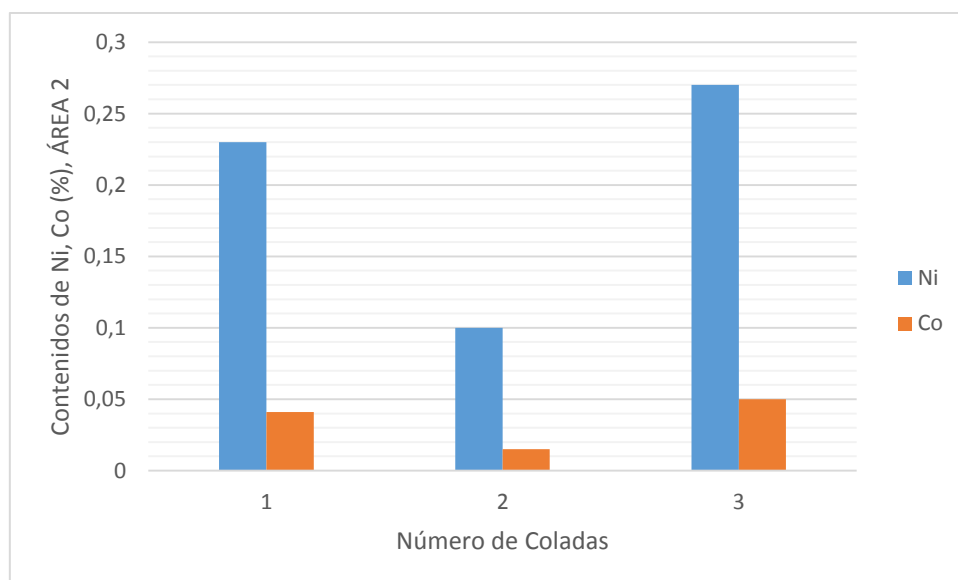


Figura No. 32. Contenidos de níquel y cobalto en el metal obtenido en las diferentes coladas, usando escombros del área 2.

Elaborado por: Noslén Cobas García.

El cromo por su parte, es el elemento luego del Fe, que contiene mayor cantidad en este producto metálico, con valores promedio de 1,38 %, como se observa en la figura siguiente.

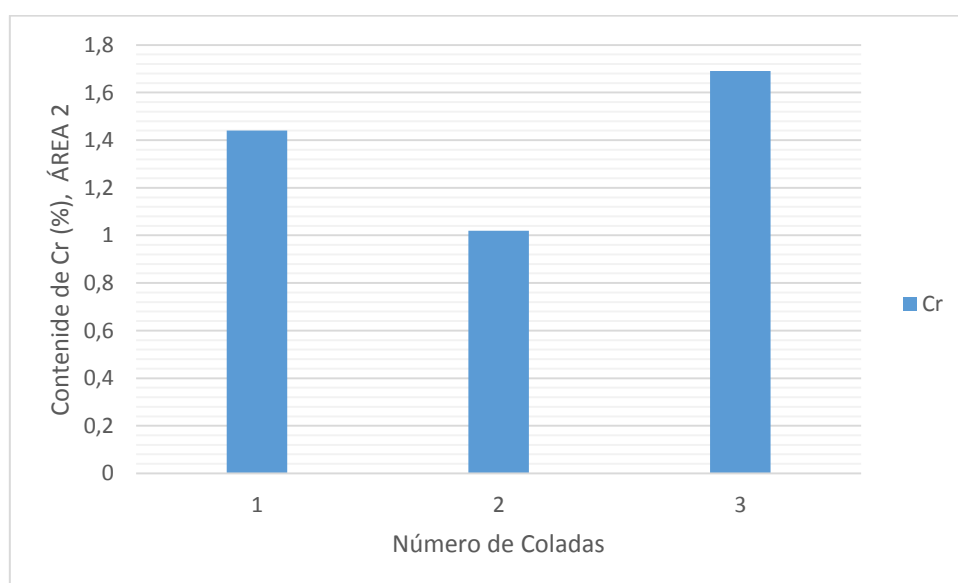


Figura No. 33. Contenido de cromo en el metal obtenido en las diferentes coladas, usando escombros del área 2.

Elaborado por: Noslén Cobas García.

Las impurezas C, Si y Mn se comportan muy similar a los escombros del área 1, como se muestra en la figura siguiente.

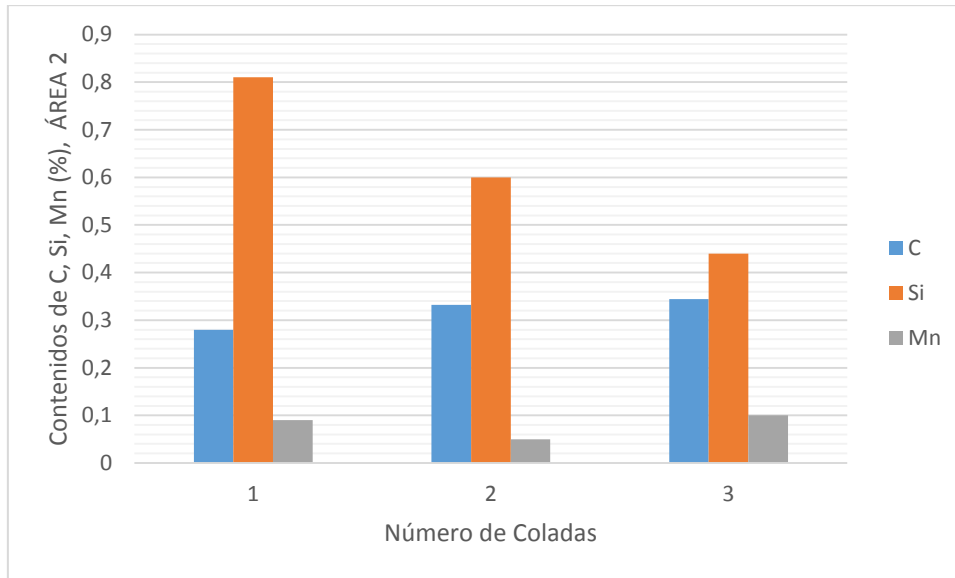


Figura No. 34. Contenidos de carbono, silicio y manganeso en el metal obtenido en las diferentes coladas, usando escombros del área 2.

Elaborado por: Noslén Cobas García.

Similar a los escombros del área 1, el contenido de las dos principales impurezas, P y S, las cuales, en este caso de estudio, oscilan entre 0,03 y 0,04 %, valores promedio normalmente exigidos, para estos tipos de materiales, no presentan un alto contenido como se muestra en la figura siguiente.

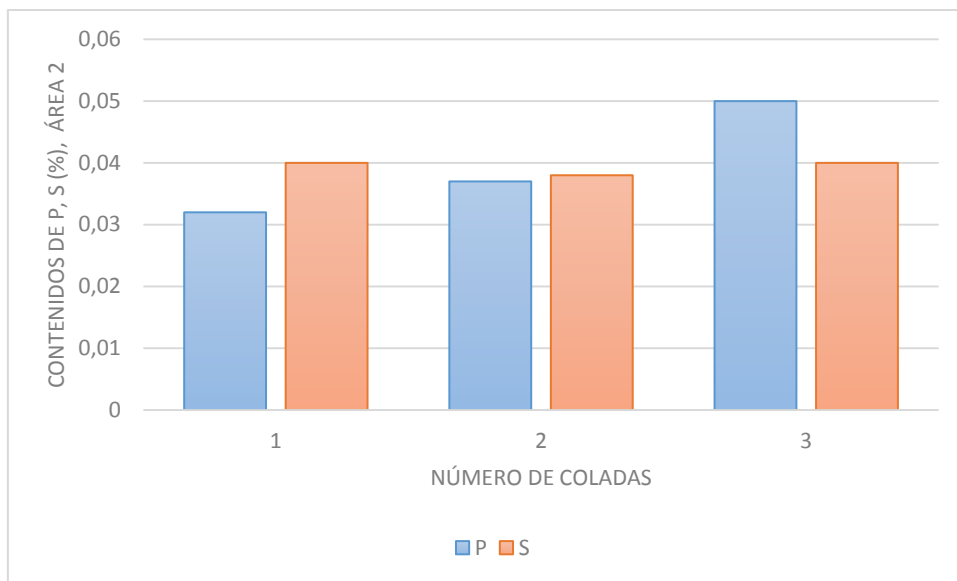


Figura No. 35. Contenidos de fósforo y azufre en el metal obtenido en las diferentes coladas, usando escombros del área 2.

Elaborado por: Noslén Cobas García.

Las escorias obtenidas durante las pruebas de fusión reductora, están compuestas principalmente, por Fe, en forma de Fe^{2+} e Fe^{3+} , con valores promedio de 17, 15 %, como se observa en la tabla 13 y en la figura 36, lo que confirma la ocurrencia del proceso de reducción de los óxidos superiores de este elemento, durante el desarrollo de la fusión de los escombros de área 1 y que gran parte de este han pasado a la escoria, aspecto debe ser investigado en trabajos posteriores, tratando de evitar la pérdidas de este elemento en este producto.

Tabla No. 13. Composición química promedio (%) de las escorias obtenidas durante las pruebas de fusión reductora de los Escombros lateríticos de área 1.

Coladas	Área	Fe Total	NiO	CoO	Cr ₂ O ₃
1	1	16,46	0,08	0,027	1,237
2	1	16,37	0,14	0,033	1,339
3	1	18,62	0,195	0,044	1,603
Promedio		17,15	0,138	0,035	1,393

Elaborado por: Noslén Cobas García.

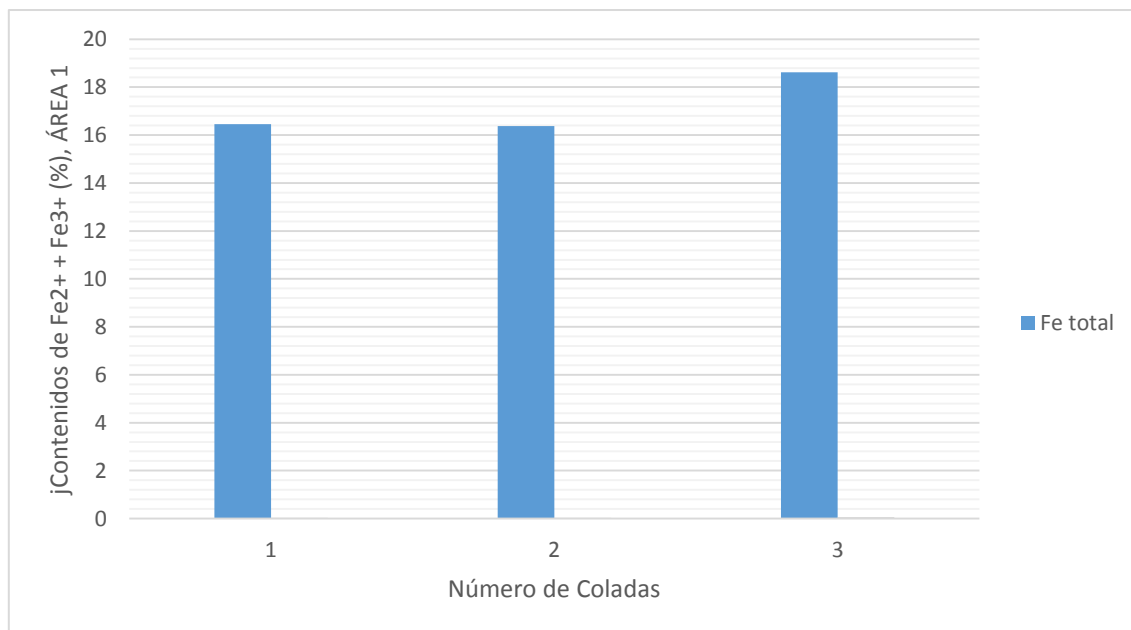


Figura No. 36. Contenidos de hierro (II) y hierro (III) en la escoria obtenida en las diferentes coladas, usando escombros del área 1.

Elaborado por: Noslén Cobas García.

También se aprecia la pérdida de elementos valiosos, como níquel, cromo y cobalto en las escorias, lo cual debe ser tratado de disminuir, para tratar de obtener un producto con presencia significativa de estos elementos. En la siguiente figura se muestran los contenidos de estos elementos en las diferentes coladas realizadas.

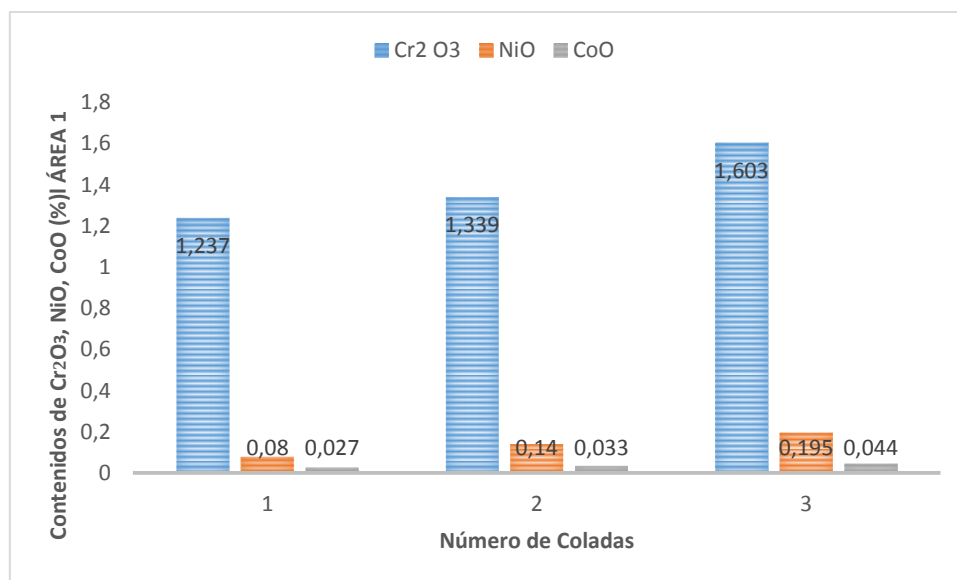


Figura No. 37. Contenidos de óxido de cromo (III), níquel y cobalto en la escoria obtenida en las diferentes coladas, usando escombros del área 1.

Elaborado por: Noslén Cobas García

En el caso de las escorias obtenidas, a partir del tratamiento de los escombros lateríticos del área 2, los resultados mostrados en la tabla 14 y las figuras 38 y 39, confirman lo expresado anteriormente con respecto al área 1, con la pérdida de Fe, Ni, Co y Cr en este producto, lo cual debe ser objeto de investigaciones futuras.

Tabla No. 14. Composición química promedio (%) de las escorias obtenidas durante las pruebas de fusión reductora de los Escombros lateríticos área 2.

Coladas	Área	Fe ²⁺ + Fe ³⁺	NiO	CoO	Cr ₂ O ₃
1	2	16,31	0,191	0,027	1,379
2	2	30,06	0,381	0,056	1,82
3	2	15,63	0,167	0,025	1,129
Promedio		20,667	0,246	0,036	1,443

Elaborado por: Noslén Cobas García.

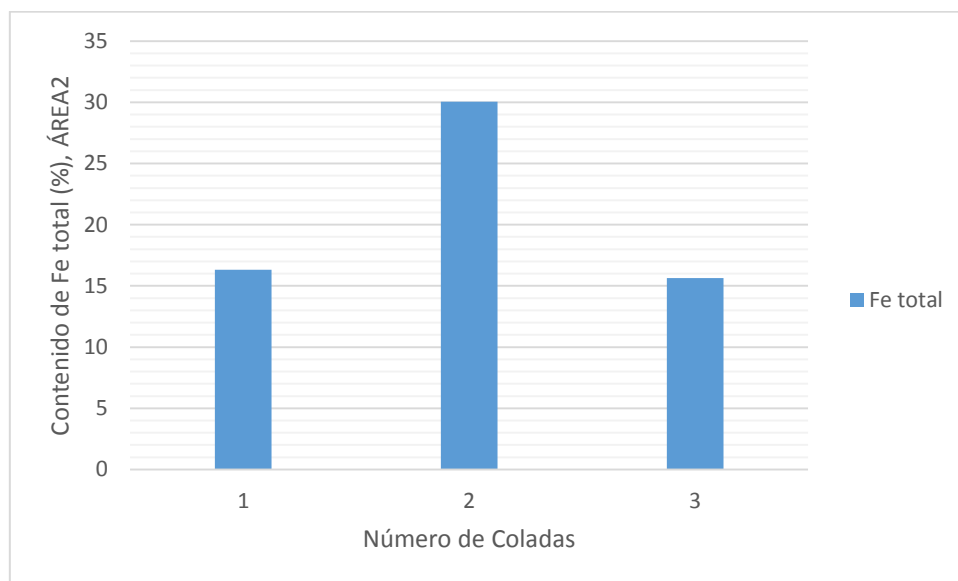


Figura No. 38. Contenidos óxidos de hierro (II) e hierro (III) en las escorias obtenidas en las diferentes coladas, usando escombros del área 2.

Elaborado por: Noslén Cobas García.

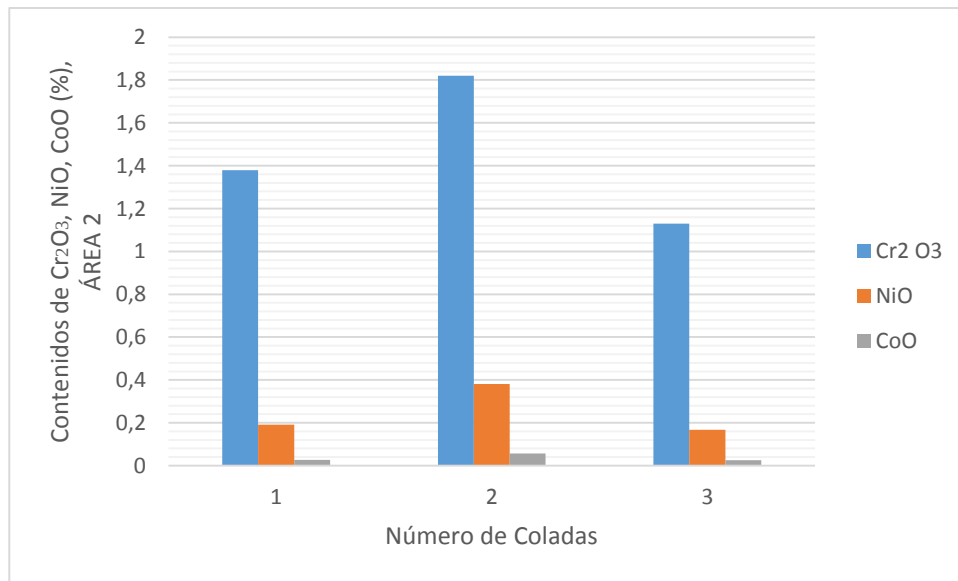


Figura No. 39. Contenidos de óxido de cromo (III), níquel y cobalto en la escoria obtenida en las diferentes coladas, usando escombros del área 2.

Elaborado por: Noslén Cobas García.

En las pruebas de fusión reductora se obtuvo metal, escorias como se explica anteriormente, pero también se obtuvo un producto no fundido en cada una de las coladas realizadas, lo cual está asociado a la falta de reductor y al tamaño de partícula del mineral el cual era muy fino, en este producto no fundido se tienen valores altos de Al_2O_3 y FeO principalmente como se observa en la tabla 15.

Tabla No. 15. Composición química promedio del producto no fundido, obtenido durante las pruebas de fusión reductora de los Escombros lateríticos.

Código	NiO	CoO	MnO	MgO	Cr₂O₃	SiO₂	Al₂O₃	Fe²⁺	Fe³⁺	Ni/Co	SiO₂/MgO	Fe/Cr
Escombros N-8 A-1	0,316	0,057	0,723	0,601	2,008	3,90	13,74	6,26	23,48	5,54	6,49	17,95
Escombros N-9 A-2	0,312	0,065	0,758	0,621	2,101	3,88	12,89	6,33	23,44	4,80	6,25	17,49
Escombros N-10 A-1	0,419	0,092	0,69	0,404	2,446	3,39	14,21	5,68	31,85	4,55	8,39	18,70
Escombros N-11 A-2	0,415	0,088	0,68	0,402	2,438	3,41	14,32	5,75	31,78	4,72	8,48	18,79
Escombros N-12 A-1	0,525	0,079	0,71	1,32	2,459	5,09	15,99	5,91	27,01	6,65	3,86	16,89
Escombros N-13 A-2	0,521	0,066	0,70	1,326	2,465	5,14	16,36	5,97	27,2	7,89	3,88	17,00
Promedio	0,42	0,07	0,71	0,78	2,32	4,14	14,59	5,98	27,46	5,69	6,22	17,80

Independientemente de los resultados obtenidos, es importante evaluar en otras investigaciones las posibilidades de implementar procesos de aglomeración, que permitan reducir la cantidad de finos que poseen estos PAMMs, al ser tratados en procesos pirometalúrgicos. Así como también evaluar el comportamiento de estos residuos con el empleo de otros reductores, como el carbón y gases.

3.7 Consideraciones sobre los efectos ambientales, sociales e industriales del uso del PAMMs “Escombros Lateríticos”.

Los resultados obtenidos en esta investigación, constituyen aportes ambientales, sociales e industriales, ya que, a partir de un Pasivo Ambiental Minero Metalúrgico, no utilizado durante más de 50 años por el país, se obtiene un arrabio con alto contenido de hierro y enriquecido con pequeñas cantidades de Cr, Ni, Co, Si, Mn y C, lo cual es un resultado, que aunque preliminar, permitirá en el futuro disminuir la contaminación ambiental que ocasionan actualmente, los “Escombros Lateríticos” de la Empresa Pedro Sotto Alba de Moa, sin un uso definido hasta la actualidad.

Desde el punto de vista social e industrial significa, que, con el desarrollo de estas investigaciones, se podrán obtener productos de uso industrial, lo cual generará nuevas fuentes de empleo para la sociedad, así como la generación de ingresos económicos, que deben ser determinados con el avance de las nuevas investigaciones relacionadas con esta temática.

3.8 Conclusiones del capítulo III

1. La composición química promedio, del PAMMs “Escombros Lateríticos”, del yacimiento Camarioca Norte, áreas 1 y 2, se caracterizan por el predominio del contenido de hierro, aluminio y cromo, con relativamente bajos contenidos de níquel y cobalto.
2. Los escombros estudiados poseen tamaños de partículas pequeñas, lo cual es un impedimento para su uso directo en los procesos pirometalúrgicos, como la fusión reductora, lo que indica la necesidad de desarrollar procesos de aglomeración, para evitar las pérdidas de elementos valiosos, por el fenómeno de arrastres durante las operaciones metalúrgicas.
3. Existe correspondencia entre las características físicas, químicas, mineralógicas y térmicas del PAMMs estudiado, con la presencia significativa de elementos muy utilizados en los procesos siderúrgicos.
4. El comportamiento térmico del PAMMs “Escombros lateríticos” del yacimiento Camariocas, áreas 1 y 2 hasta los 1000 °C, se desarrolla en tres escalones principales, evidenciando en estos la rapidéz con que va perdiendo masa el material, los cuales están asociados a la eliminación del agua externa e interna, así como a la reestructuración de los óxidos de aluminio, y hierro, principalmente.
5. Las pruebas pirometalúrgicas realizadas, demostraron la posibilidad de obtener un arrabio con altos contenidos de hierro, valores promedio de 82 %, acompañado de elementos valiosos como, cromo, níquel, cobalto, silicio y manganeso, empleados con frecuencia en los procesos siderúrgicos.

CONCLUSIONES GENERALES

1. El comportamiento térmico del Pasivo Ambiental “Escombros Lateríticos” del yacimiento Camarioca Norte, áreas 1 y 2 hasta los 1000 °C, se desarrolla a través del siguiente mecanismo:
 - En el intervalo de temperatura entre 80 – 250 °C, aproximadamente, mostrando una rapidez de pérdida de masa, esta pérdida es 2,4 – 5,0 % que posee un pico máximo a los entre 92 – 115 °C, lo cual esta asociado a la eliminación del agua de hidratación de este pasivo.
 - En el intervalo de temperatura entre 250 - 320 °C, que presenta también una rapidez de pérdida de masa, oscilando esta pérdida entre 8,44 y 9 % con un pico máximo alrededor de los 302 °C, asociado a la eliminación del agua interna que acompaña a los minerales presentes en estos residuales, principalmente, la gibbsita y la goethita.
 - En el intervalo de temperatura entre 850 – 970°C, con una rapidez de pérdida de masa, esta pérdida se evidencia con un promedio de 0,56 %, tiene un pico máximo que oscila entre 874 – 8,91°C, lo cual está asociado a la recristalización de los minerales de serpentina que se encuentra en las muestras, específicamente, el talco presente en estos pasivos.
2. El PAMMs “Escombros Lateríticos”, del yacimiento Camarioca Norte, áreas 1 y 2, se caracterizan por el predominio del contenido de hierro, aluminio y cromo, con relativamente bajos contenidos de níquel y cobalto y tamaños de partículas pequeñas, que imposibilitan su uso directo en los procesos pirometalúrgicos, lo que indica la necesidad de desarrollar procesos de aglomeración, para evitar las el arrastre de partículas y la pérdida de metales durante las operaciones metalúrgicas.
3. Como resultado de las pruebas de fusión-reducción, se obtuvo un metal con 82 % promedio de hierro ($\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+}$), enriquecido con 1,3 % de cromo, además de Ni, Co, Si, Mn y C, que en conjunto constituyen un arrabio, utilizado en las cargas metálicas para la producción de aleaciones ferrosas.
4. Los niveles de reducción alcanzados en las pruebas de fusión-reductora, pueden ser mejorados a partir de la aplicación de procesos de prerreducción y

aglomeración del PAMMs estudiado, el cual se caracteriza por poseer gran cantidad de finos.

5. Las escorias obtenidas, concentran elementos valiosos como hierro en forma de Fe^{2+} e Fe^{3+} , con valores promedio de 17,15 %, así como de níquel y cobalto y cromo, que indican la necesidad de profundizar en el estudio del proceso de reducción de este pasivo, evitar la pérdida de estos metales.

RECOMENDACIONES

1. Desarrollar un tratamiento pirometalúrgico, que incluya las operaciones de aglomeración y prerreducción del PAMMs “Escombros Lateríticos”, que permitan reducir las pérdidas por arrastres e incrementar los niveles de reducción de los principales elementos contenidos en estos residuales, y mejorar los indicadores del proceso de fusión.
2. Evaluar otros reductores en los procesos de reducción de los Escombros Lateríticos, generados por la industria del níquel en Moa.
3. Estudiar las escorias obtenidas como resultado de los procesos pirometalúrgicos, que se empleen para el tratamiento y uso de los PAMMs.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Asamblea Nacional del Poder Popular. (1976). *Ley de Minas*. Habana: ANPP.
Recuperado el 25 de 5 de 2018, de www.parlamentocubano.cu
- Cedron Lassús, M. F. (2013). *Elaboación de Criterios para la Transformacion de Pasivos Mineros en Activos Socio-Ambientales Sostenibles*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Díaz Martínez, J. I. (2016). *Obtención de aleaciones de hierro y escorias abrasivas y refractarias a partir del procesamiento aluminotérmico de cascarillas de laminación*. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Santa Clara: UCLV.
- Dirección de Minería, Empresa Pedro Sotto Alba. (2015). *Característica sgeológicas del yacimiento Moa Oriental, zona Camarioca Norte*. Moa: Empresa Pedro Sotto Alba.
- Durán Suárez, Y. (2015). *Caracterización y evaluación de las escombreras de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara para posible uso industrial*. Moa: ISMM.
- Durán Suárez, Y. (2015). *Caracterización y evaluación de las escombreras de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara para su posible uso industrial*. Moa: ISMM.
- Durán Suárez, Y. (2015). *Caracterización y evaluación de las escombreras de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara para su posible uso industrial*. Moa: ISMM.
- El Congreso de la República. (2004). *Ley que Regula los Pasivos Ambientales Mineros de la Actividad Minera*. Lima.
- Energia, Sociedad nacional de Minería Petroleo. (3 de noviembre de 2004). *www.informe quincenal de la snmpe*. Obtenido de informe quincenal de la snmpe.

- Ferreiro Guerrero, Y. (2014). *Obtención de lupias de arrabio a partir del tratamiento metalúrgico de las colas de Nicaro*. Instituto Superior Minero Metalúrgico, Departamento de Metalurgia. Moa: ISMM. Recuperado el 25 de 5 de 2018
- Ferreiro Guerrero, Y., & Santiesteban Domínguez, E. (2006). *Tratamiento previo de los escombros lateríticos del yacimiento "Atlantic" de Moa como paso inicial de una nueva tecnología en perspectiva*. Moa: ISMM.
- Ghanesh Persaud, A. (2014). *Metodología para el inventario de los pasivos ambientales mineros- metalúrgicos, generados por las industrias del níquel en Moa*. Moa: ISMM.
- González González, L. E. (2013). *Obtención de FeMn medio carbono mediante procesamiento aluminotérmico*. Uiversidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Villa Clara: UCLV.
- González Roché, Y. (2017). *Evaluación de las principales características físico-químicas de pasivo ambiental escombros lateríticos para su posible uso industrial*. Moa: ISMM.
- Huaraca Taype, S. (2018). *Características físico-químicas, mineralógicas y térmicas del Pasivo Ambiental Escombros Lateríticos del Yacimiento Moa Occidental, de la Empresa Ferroníquel Minera S.A*. Moa: Instituto Superior Minero Metalúrgico.
- Moreno, C., & Chaparro, E. (2008). *Conceptos básicos para entender la legislación aplicable a la industria minera en los países andinos*. División de Recursos Naturales e infraestructura. Santiago de Chile: Santiago de Chile.
- Ortiz Bárcenas, J. (2015). *Obtección de un producto prerreducido para producción de arrabio con níquel (Nickel Pig Iron) a partir del tratamiento de los escombros lateríticos de Mina Martí en Nicaro*. Moa: ISMM. Recuperado el mayo de 2018
- Palacios Rodriguez, A. (2001). *Recuperación de cobalto por medio de la lixiviación ácida de los escombros lateríticos*. Moa: ISMM.
- Palacios Rodríguez, A., & Garcia Peña, E. (2013). *Extracción de cobalto por lixiviación de los escombros lateríticos en tinas de percolación*. Moa: Insitituto Superior Minero Metalúrgico.

- Pons Herrera, J. A., & Ramírez Pérez, M. C. (2017). *Tratamiento y uso de Pasivos Ambientales Minero-Metalúrgicos, generados por la industria del Níquel en Cuba*. Moa: Instituto Superior Minero Metalurgico de Moa.
- Ramírez Pérez, M. (2010). *Utilización de los escombros lateríticos de la zona A, yacimiento Moa Occidental en el proceso de descarbización del acero ACI HR-40*. Moa: ISMM.
- Reyes González, O. (2014). *Extracción de cobalto por lixiviación de los escombros lateríticos en tinajas de percolación*. Metalurgia Química. Moa: ISMM.
- Ríos Azahares, Y. (2015). *Evaluación ambiental de los Pasivos Ambientales Mineros de la mina de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara*. ISMM, Departamento de Minas. Moa: ISMM.
- Roche, Y. (2009). *Estrategia para evaluación de pasivos ambientales mineros en Cuba*. La Habana: Oficina Nacional de Recursos Minerales.
- Seoane, N. P., & Díaz Comesañas, J. L. (2011). *Pasivos Ambientales Mineros en CUBA. Bases Metodológicas*. La Habana: ANPP.
- www.Xiderex.org. (11 de enero de 2016). *Proceso de reducción directa DRI*. Recuperado el 24 de 5 de 2018, de www.Xiderex.org:xiderexdotcomdtmx.worppress.com

ANEXOS

ANEXO No.1. Análisis granulométrico de la muestra de escombros del Área 1 utilizados en la investigación.

No	Clase de tamaño	Peso ,g	γ % Salida	Retenido
1	>10	47,7169	12,5347	12,5347
2	-10+8	10,8798	2,8580	15,3927
3	-8+6	7,7894	2,0462	17,4389
4	-6+4	26,2928	6,9068	24,3457
5	-4+1,4	112,6476	29,5912	53,9369
6	-1,4+0,4	126,902	33,3357	87,2726
7	-0,4+0,2	20,7713	5,4564	92,7290
8	-0,2+0,147	15,0667	3,9579	96,6869
9	-0,147+0,074	3,7199	0,9772	97,6640
10	-0,074+0,044	7,0289	1,8464	99,5105
11	-0,044	1,8636	0,4895	100,0000
Total		380,6789	100	

Fuente: (González Roché, 2017, pág. 25)

ANEXO No.2. Resultado del análisis granulométrico de la muestra de escombros del Área 2 utilizados en la investigación.

No	Clase de tamaño	Peso ,g	γ % Salida	Retenido
1	>10	149,70	27,4543	27.4543
2	-10+8	19,50	3,5762	31.0305
3	-8+6	39,40	7,2258	38.2563
4	-6+4	42,60	7,8126	46.0689
5	-4+1,4	159,10	29,1782	75.2471
6	-1,4+0,4	105,20	19,2932	94.5403
7	-0,4+0,2	11,10	2,0357	96.5760
8	-0,2+0,147	2,01	0,3686	96.9446
9	-0,147+0,074	11,06	2.0284	98.9730
10	-0,074+0,044	2,20	0.4035	99.3765
11	-0,044	3,40	0.6235	100.0000
Total		545,27	100.0000	

Fuente: (González Roché, 2017, pág. 25)

ANEXO No. 3. Composición química promedio del metal obtenido durante las pruebas de fusión reductora de los Escombros lateríticos.

Resultados Pruebas de banco de Fusión con Escombros Lateríticos_PSA_Metal																			
Código	Descripción	C	Si	Mn	Ni	Co	Cr	Al	Mo	Cu	P	S	Mg	Pb	Ti	V	Nb	W	Fe
Metal N-1	1ra colada (AREA 1_Al)	0,330	0,110	0,15	0,33	0,038	1,46	0,99	0,01	1,04	0,036	0,029	0,50	0,023	0,136	0,019	0,005	0,01	83,540
Metal N-2	1ra colada (AREA 2_Al)	0,280	0,810	0,09	0,25	0,041	1,44	0,891	0,02	1,21	0,032	0,040	0,41	0,021	0,123	0,022	0,004	0,01	83,690
Metal N-3	2da colada (AREA 1_Al)	0,310	0,10	0,11	0,27	0,030	1,360	0,73	0,012	1,32	0,029	0,030	0,38	0,023	0,140	0,024	0,005	0,01	83,63
Metal N-4	2da colada (AREA 2_Al)	0,332	0,66	0,05	0,10	0,015	1,02	0,921	0,022	1,38	0,037	0,038	0,33	0,026	0,130	0,025	0,004	0,01	79,94
Metal N-5	3ra colada (AREA 1_Al)	0,292	0,610	0,070	0,22	0,028	1,100	0,940	0,024	1,2	0,040	0,033	0,30	0,016	0,115	0,018	0,005	0,01	81,39
Metal N-6	2da colada (AREA 2_Al)	0,344	0,440	0,10	0,27	0,05	1,69	0,954	0,017	1,22	0,05	0,04	0,29	0,023	0,12	0,014	0,004	0,01	84,37
	Promedio	0,315	0,455	0,095	0,240	0,034	1,345	0,905	0,018	1,228	0,037	0,034	0,368	0,022	0,129	0,022	0,005	0,010	82,76

ANEXO No. 4. Vista superior del crisol donde se realizó la fusión reductora.

