

# Uso sustentable de los Pasivos Ambientales Minero Metalúrgicos sólidos, generados por la industria del Níquel en Moa, Cuba.

## Sustainable Use of Solid Metallurgical Mining Environmental Passives, generated by the Nickel industry in Moa, Cuba.

Dr.C José Alberto Pons Herrera<sup>1</sup>, Dr.C María Caridad Ramírez Pérez<sup>2</sup>, Dr.C Jesús Ortiz Bárcenas<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Moa, S/N Las Coloradas, Moa, Holguín, Cuba, CEP; 83320; jpons@ismm.edu.cu

<sup>2</sup>Universidad de Moa, S/N Las Coloradas, Moa, Holguín, Cuba, CEP; 83320, mramirezp@ismm.edu.cu

<sup>3</sup>Ministerio de Industrias de Cuba. Boyeros, La Habana; jesus@sime.cu

### CITAR COMO:

Herrera, J. A. P., M. C. R. Pérez e J. O. Bárcenas. Uso sustentable de los pasivos ambientales minero metalúrgicos sólidos, generados por la industria del Níquel en Moa, Cuba. Revista Angolana de Geociências, 2021, 2(1), p. 145-154

### INFORMAÇÃO ADICIONAL:

**Recebido:** 10/10/2020

**Aceite:** 10/02/2021

**\*Autor para**

**correspondência:** José

A.Pons Herrera (e-mail:

jpons@ismm.edu.cu)

**Licença:** CC BY NC

**Copyright:** Centro de Investigação em Ciências Geológicas Aplicadas

**Conflito de interesses:** Os autores declaram que não há conflitos de interesses

**Resumen:** El aprovechamiento sustentable de los Pasivos Ambientales Minero Metalúrgicos, generados por las industrias del Níquel en Cuba, es una necesidad para el desarrollo socio-económico del país. En la presente investigación se muestran las características físico-química de los principales residuales sólidos que generan estas industrias, comprobándose la relación entre los cambios mineralógicos a partir del incremento de la temperatura en la mayoría de los minerales presentes en las rocas serpentinizadas de la región de Moa, se demuestra la disponibilidad de importantes recursos naturales, principalmente, minerales de hierro depositados en presas de colas o relaveras, así como en los propios yacimientos, como resultado de las operaciones mineras y metalúrgicas de producción de Níquel, utilizables para la producción de materia prima siderúrgica y de materiales de construcción. Se exponen además las características de los rechazos serpentiniticos de las plantas de preparación y las posibilidades de su utilización, industrial.

**Palabras Claves:** Residuos Mineros, Metalúrgicos, Sustentabilidad, Níquel.

**Abstract:** The sustainable use of the Metallurgical Mining Environmental Liabilities, generated by the Nickel industries in Cuba, is a necessity for the socio-economic development of the country. In the present investigation the physic-chemical characteristics of the main solid residuals that these industries generate are shown, checking the relation between the mineralogical changes from the temperature increase in the majority of the minerals present in the serpentine rocks of the region of Moa, demonstrates the availability of important natural resources, mainly, iron ore deposited in tailings dams or tailings, as well as in the deposits themselves, as a result of the mining and metallurgical operations of nickel production, usable for production of iron and steel raw material, and de construction materials. The characteristics of the serpentinitic rejections of the preparation plants and the possibilities of their industrial use are also exposed.

**Key words:** Mining, Metallurgical, Residues, Sustainability, Nickel

## INTRODUCCIÓN

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).

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, (Ramirez Perez & Pons Herrera, 2017, pág. 23).

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 demostrar las posibilidades de aprovechar de manera sustentable los Pasivos Ambientales Minero Metalúrgicos, generados por las industrias del Níquel en Moa, Cuba, como una necesidad del propio desarrollo socio-económico del país, en este caso, nos referiremos a las presas de colas o relaveras que se almacenan, junto a los rechazos serpentiniticos residuos de procesos metalúrgicos.

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 han sido identificados y caracterizados durante el desarrollo de diversas investigaciones, en los últimos años, (Pons Herrera, Ramirez Pérez, & Cobas García, 2018).

El objetivo principal de este trabajo es demostrar el potencial de Pasivos Ambientales Minero Metalúrgicos sólidos (PAMMs), existentes en la región de Moa, Cuba con posibilidades de utilización industrial a partir de su caracterización físico-química, sin considerar aún la viabilidad técnica-ambiental de su proceso de reciclaje.

La zona de estudio de esta investigación lo constituyen los principales depósitos de PAMMs, localizados en las cercanías de las plantas productoras de minerales lateríticos en la región oriental de, Cuba, específicamente en el municipio de Moa, representada en la figura siguiente.

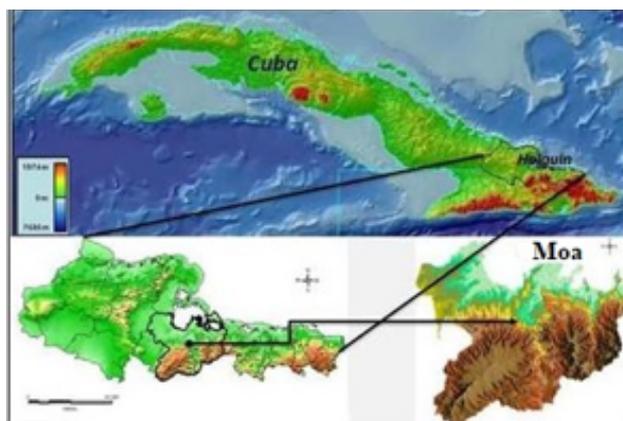


FIGURA 1. Localización de la zona de estudio

Fuente: (Ramirez Perez & Pons Herrera, 2019)

El objeto de estudio son los escombros lateríticos y rechazos serpentiniticos, producto de las actividades mineras de exploración y explotación de minerales lateríticos de níquel y las relaveras generadas como resultado de los procesos metalúrgicos de las plantas productoras de este metal en Moa.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Análisis mineralógicos

Se realizó con el objetivo de identificar las fases minerales presentes en las muestras objeto de estudio; se tomaron porciones adecuadas de las muestras pulverizadas y se realizaron los análisis en un difractómetro Siemens, modelo D5000, con monocromador para haz difractado de LiF (100) y equipado con ánodo de Cu, (ver figura 2a). Los difractogramas se registraron con una constante de tiempo de 5 s y a una velocidad de exploración del papel de 0,030 %/s. Para la identificación de las fases se utilizaron los ficheros Powder Diffraction File, Hanawalt Search Manual for Experimental Patterns Inorganic Phases. ISO 9001 2015 y los datos de JCPDS. Se realizaron análisis de control externo en el laboratorio de Metalurgia y Materiales del Instituto Politécnico Nacional de México (IPN) empleando un Difractómetro de rayos-X Bruker AXS D8 Focus, (ver figura 2 b). Las características comunes de ambos equipos se muestran en la tabla siguiente.

Tabla 1 - Características técnicas comunes del equipamiento de difracción de rayos X empleado en los análisis mineralógicos.

Características	Unidad
Voltaje	35 kV
Corriente	25 mA
Tubo	Cu Ka
Slit (Óptica primaria)	0,6 mm
Slit (Óptica secundaria)	2,5 mm
Detector	Lynxeye
Scan type	Continuous
Cu-Absorber	0.05 mm



**FIGURA 2.** Difractómetro de Rayos-X, empleados para los análisis mineralógicos. **a).** difractómetro Siemens, modelo D5000; **b).** difractómetro Bruker AXS D8 Focus.

### Análisis químicos

La composición química se determinó con el uso de un equipo de absorción atómica de llama, Spectr AA-220FS, VARIAN, además se determinó el contenido de los elementos en forma de óxidos, utilizando un espectrómetro de emisión de fluorescencia de rayos X por dispersión de longitudes de onda (FRX-dλ), PHILIPS modelo PW1404

con ánodo de Rh, tensión y corriente del generador de 100 kv y 80 mA, respectivamente, utilizándose para la determinación espectrofotométrica, el método de las cápsulas compactadas con lecho de ácido bórico.

### Análisis térmicos

Los análisis termogravimétricos permitieron determinar los intervalos de temperatura en que ocurren las variaciones de masa producidas por el calentamiento de las muestras estudiadas. Para ello se empleó un analizador TGA – 50, de la firma japonesa ZHIMATZU, con computadora acoplada a la termobalanza que facilita el procesamiento de los datos y la reproducción de los resultados obtenidos, (Figura 3 a).

Los análisis térmicos de control, se realizaron en el Centro de Investigación para la Industria Minero Metalúrgica de Cuba (CIPIMM), con el objetivo de determinar el comportamiento térmico de los pasivos ambientales estudiados. Los termogramas, se obtuvieron en un equipo de la firma alemana NETZSCH, modelo STA 449 F3, (Figura 3 b).



**FIGURA 3.** Equipos de análisis térmicos empleados en la investigación. **(a)** Modelo ZHIMATZU **(b)** modelo NETZSCH, STA 449 F3.

Los parámetros de operación comunes de los equipos empleados en los análisis térmicos se muestran en la tabla siguiente.

**Tabla 2** - Datos técnicos comunes del equipamiento de análisis térmico empleado.

Características	Valores
Régimen de calentamiento	Dinámico
Rango de la masa de muestras	26,59 - 31,59 mg
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	-0,001 - 5000 $\mu V/mg$
Tiempo total de medición	1h:37 min
Rango de temperatura de trabajo	27-1500 °C

Los datos de las curvas Termogravimétricas (TG) y su derivada (DTG) se convirtieron en termogramas continuos con el empleo del programa “Proteus” para el procesamiento de datos de Análisis Térmico, en su versión 5.2.1/07.04.2001, el cual suministra el fabricante del equipo, compatible a su vez con Windows para Office, obteniéndose además por esta misma vía los termogramas DTG de las velocidades de cambio de masa ( $dm/dt$ ), que se verifican en el material.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Escombros lateríticos o concreciones ferruginosas

Los escombros lateríticos están compuestos mayoritariamente por partículas mayores de 0.83 mm, contenedoras de importantes elementos químicos, como, hierro, aluminio y cromo; las principales fases mineralógicas son óxidos e hidróxidos de hierro como la maghemita y la goethita, fases que tienen incorporados en sus estructuras al aluminio, cromo, silicio, níquel, cobalto, magnesio mayoritariamente, (Ramírez Pérez, Alguacil Priego, Pons Herrera, & al, 2006).

El proceso de descomposición térmica del escombros, se desarrolla según el mecanismo: deshidroxilación de la goethita y su transformación en hematita, luego la aglomeración de las partículas y cristalización de los óxidos presentes, y posteriormente la descomposición de la hematita a partir de 1200 °C, demostrándose que el óxido de hierro (II) formado en la interface metal-escoria, es el agente oxidante que garantiza la descarburización durante la elaboración de aceros, (Ramírez Pérez, 2010).

Los escombros lateríticos de Mina Martí en Nicaro están compuestos por aglomerados hematíticos, goethitas, serpentinatas, espinelas cromíferas y óxidos de hierro (68,50 %), que lo define como un mineral de hierro, de compleja composición química, física y mineralógica, como materia prima utilizable en la industria siderúrgica, (Ortiz Barcenás, 2015).

En todos los yacimientos lateríticos cubanos estos recursos minerales, caracterizados por poseer contenidos de níquel menor de 1 %, no son alimentados a las plantas productoras de este metal y se almacenan en diferentes sectores de las áreas de minería, como se muestra en la figura siguiente.

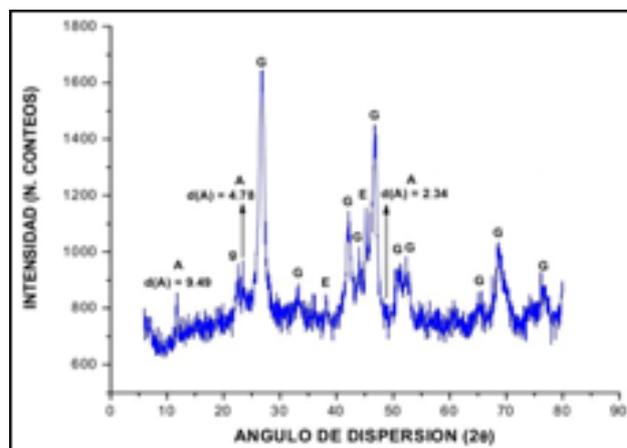


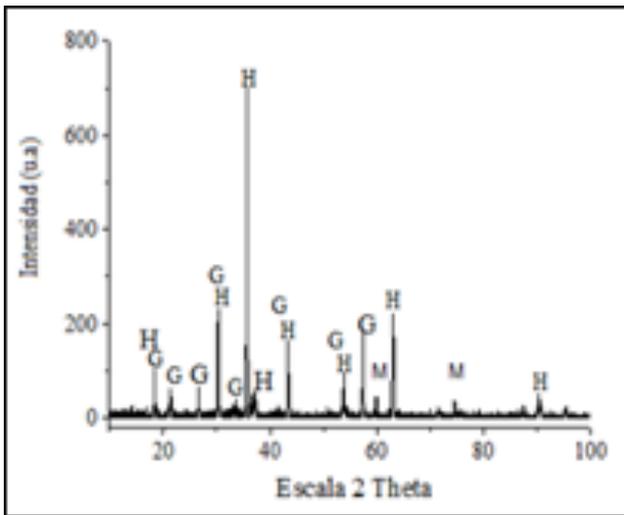
**FIGURA 4.** Escombros lateríticos almacenados como parte de las actividades mineras.

*Fuente:* (Ramírez Pérez & Pons Herrera, 2017).

### Características mineralógicas

Las fases principales en los escombros lateríticos de la región de Moa son los óxidos de hierro, representados, fundamentalmente, por maghemita ( $\gamma-Fe_2O_3$ ) y goethita ( $\alpha-FeO.OH$ ), en correspondencia con la presencia mayoritaria del hierro y su amplia distribución en los perfiles granulométricos estudiados con anterioridad por Ramírez Pérez et al (2006). En las figuras siguientes se muestran los difractogramas típicos de dos de los principales yacimientos lateríticos de la región de Moa, donde los escombros lateríticos constituyen una masa de mineral sin una utilización a escala industrial, a pesar de los resultados obtenidos hasta el momento, (Ramírez Pérez & Pons Herrera, 2019); (Ortiz Barcenás, 2015); (Ferreiro Guerrero, 2015).





**FIGURA 5.** Difractogramas de los escombros lateríticos de la región de Moa, Punta Gorda (a). Moa Occidental (b). M: maghemita; G: Goethita; H: Hematita, g: Gibbsita; E: Espinelas C: Cuarzo, A: Asbolanas.  
Fuente: (Ramírez Pérez, Pons Herrera, & Romero Ramírez, 2018).

En la tabla siguiente se muestran las principales fases mineralógicas de este pasivo ambiental, según las fracciones granulométricas en que ellos se distribuyen de manera natural en los yacimientos lateríticos de la región de Moa.

**Tabla 3** - Composición mineralógica cuantitativa promedio de los escombros lateríticos de la región de Moa, Cuba.

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

Fuente: (Ramírez Pérez, 2010); (Ramírez Pérez, et. al, 2006).

### Características químicas

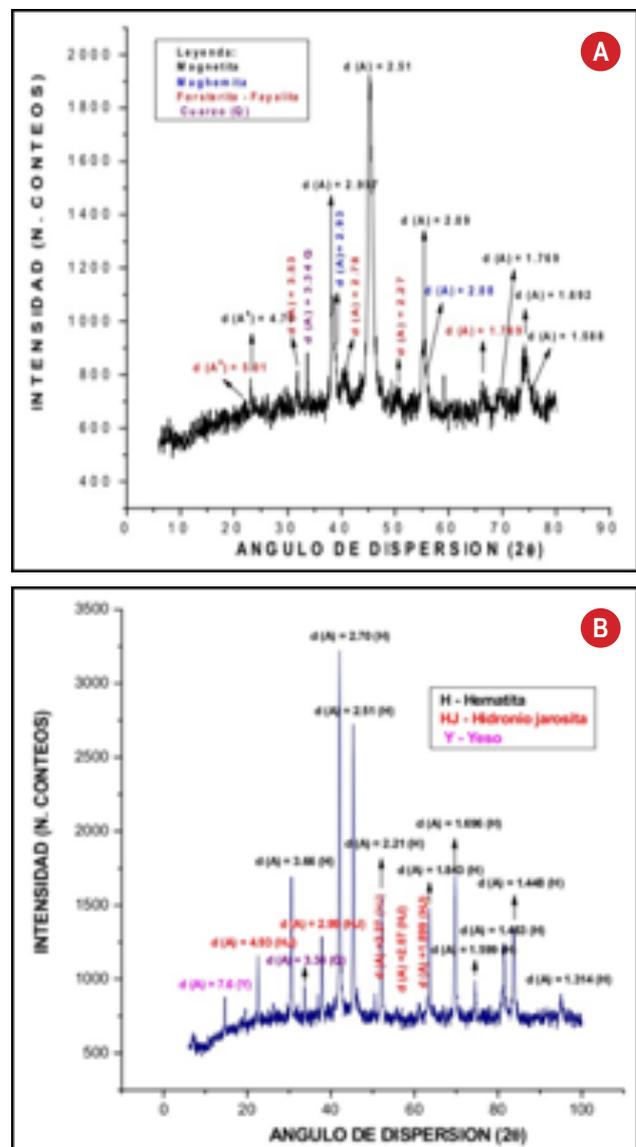
Los escombros lateríticos poseen contenidos de hierro superior al 65 %, el elemento predominante, característica común de los minerales lateríticos cubanos, sin embargo, estos constituyen pasivos ambientales mineros, por no contar con contenidos de Níquel y Cobalto exigidos en los cut off de las empresas productoras. Los principales componentes de este residual se muestran en la tabla 4.

Los contenidos de Níquel, Cobalto, Hierro, Cromo y Manganeso, presentes en estos residuales mineros, constituyen una motivación para la evaluación de estos como materia prima siderúrgica, lo cual ha sido demostrado por Ortiz Bárcenas, (2015) y Ramírez Pérez, (2010), y más recientemente por Pons Herrera et al, (2018).

**Tabla 4** - Composición química promedio (%), de los Escombros Lateríticos de la región de Nicaro-Moa, Cuba.

Compuestos, (%)	Escombros (Nicaro)	Escombros (Moa)
NiO	0,7 – 0,8	0,68 – 0,70
CoO	0,05 - 0,45	0,13 – 0,16
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	66,5 – 69,1	68,51 – 77,2
MgO	5,8 – 6,2	0,25 – 0,33
MnO	0,30 – 0,35	0,68 – 0,78
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,5 – 6,7	10,2 – 18,80
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,0 – 2,5	2,80 – 3,65
SiO <sub>2</sub>	8,0 – 8,7	1,6 – 4,02

Fuente: (Ortiz Barcenas, 2015); (Ramírez Pérez, 2010).



**FIGURA 6.** Curvas representativas de ATD/TG obtenidas para los escombros lateríticos de la región de Moa, yacimientos Punta Gorda (a) y Moa Occidental (b).

Fuente: (Lopez, Ramírez Pérez, & Pons Herrera, 2008); (Valdivia García, Alonso Pérez, Cabrera, & al., 2013).

### Posibilidades de utilización industrial

Las posibilidades de utilización de los escombros lateríticos generados por las actividades mineras de las industrias productoras de níquel en Cuba, han sido demostradas a través de pruebas experimentales a escala industrial, y se resumen en la tabla a continuación.

Tabla 5 - Principales usos de los "Escombros Lateríticos", cubanos.

Pasivo Ambiental	Productos obtenidos	Utilización
Escombros Lateríticos	Oxidantes; Nickel Pig Iron (NPI)	Industria siderúrgica

Fuente: (Ramírez Pérez, 2010); (Ortiz Barcenas, 2015).

### Relaveras de la producción de níquel

Las relaveras de los procesos de producción de níquel, constituyen pasivos ambientales metalúrgicos, acumulados durante años y que varían sus características en dependencia de la tecnología empleada, una vista de estas presas de colas o relaveras de níquel se observan en la figura siguiente.

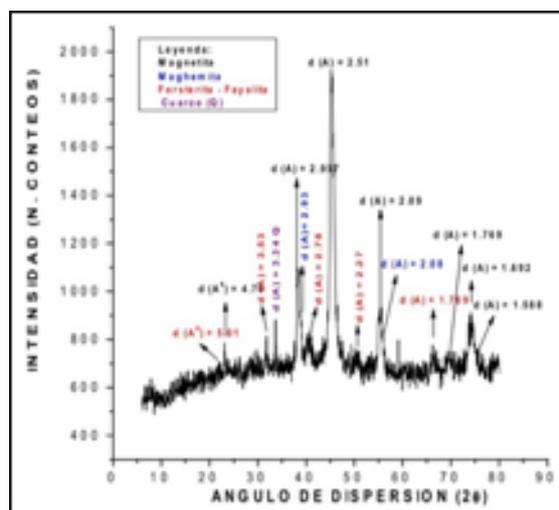


FIGURA 7. Relaveras de la producción de Níquel en Moa, Cuba.

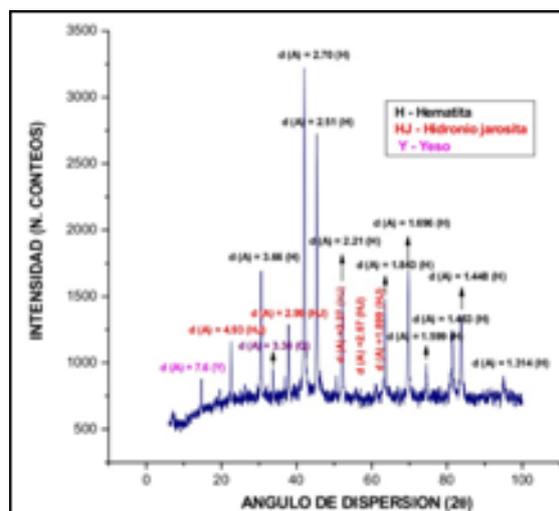
Fuente: (Castellanos Suarez & Hernández, 2009).

### Características mineralógicas

Las principales fases mineralógicas presentes en las relaveras de níquel dependen, principalmente, de las tecnologías empleadas para el procesamiento de los minerales lateríticos, que aportan impurezas indeseables como el azufre, y varían algunos contenidos de elementos como níquel y cobalto, producto de las eficiencias metalúrgicas de estas tecnologías, sin embargo es común en estos pasivos la presencia mayoritaria de hierro, fundamentalmente en forma de hematita, como se aprecia en la figura siguiente.



A



B

FIGURA 8. Difractogramas de las relaveras de los procesos CARON (a) y HPAL (b).

Fuente: (Pons Herrera, Ramírez Pérez, & Hernández Tirado, 2018)

### Características químicas

La principal diferencia en los contenidos químicos de estos residuales es la presencia de azufre en las relaveras de la tecnología de lixiviación ácida a presión (HPAL, por sus siglas en inglés), que para el uso como materia prima siderúrgica, constituye una problemática a resolver, no obstante ya existen experiencias positivas en el tratamiento pirometalúrgica de estos residuales, (Pons Herrera, Ramírez Pérez, & Hernández Tirado, 2018). La tabla siguiente muestra los intervalos de variación de la

composición química promedio de las relaveras de la producción de níquel, a través de las dos principales tecnologías existentes en Cuba actualmente.

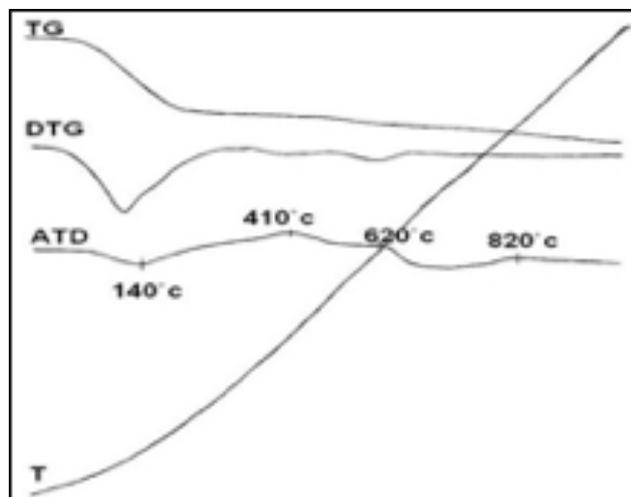
**Tabla 6** - Composición química promedio (%), de las relaveras de la producción de Níquel, según la tecnología de procesamiento empleada.

Composición química (%)	Relaveras (Tecnología HPAL)	Relaveras (Tecnología CARON)
Ni	0,06 – 0,14	0,39 – 0,45
Co	0,08 – 0,01	0,072 – 0,08
Fe	44 - 48	40,9 – 45
Mg	0,05 – 0,10	7,55 – 8,78
Mn	0,3 – 0,4	0,56 – 0,68
Al	3 – 4	2,32 - 4,24
Cr	1 – 2	1,8 – 2,2
Ca	2 – 3	0,35 – 1,05
S	2 – 3	0,2 – 0,3
SiO <sub>2</sub>	10,7 – 17,12	19,49 – 21,22

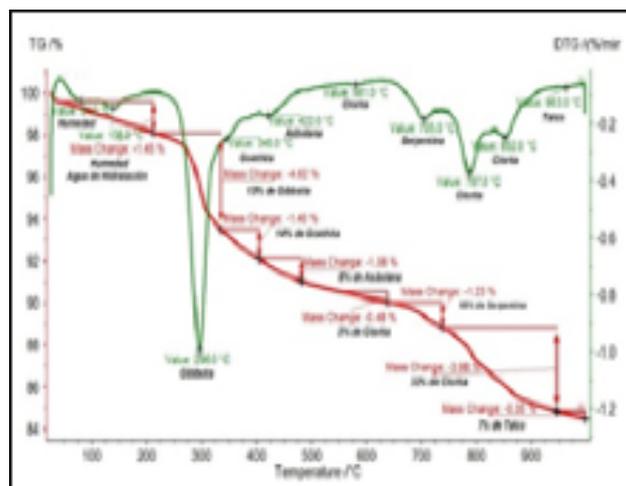
Fuente: (Pons Herrera & Ramirez Pérez, 2017); (Cutíño Abreu, 2015).

### Características térmicas

El comportamiento térmico de las relaveras, igualmente tiene una alta dependencia de las tecnologías empleadas, ya que el proceso CARON aplica un proceso de reducción, convirtiendo muchos de los óxidos en compuestos metálicos, mientras que el proceso HPAL es totalmente hidrometalúrgica con el uso de ácido sulfúrico, como agente lixiviante, lo que provoca que la mayoría de los óxidos presentes en los minerales de alimentación precisan posteriormente de un proceso pirometalúrgico para su conversión en especies metálicas. La figura siguiente ilustra termogramas del pasivo ambiental metalúrgico, que generan ambas tecnologías de producción de Níquel en Cuba.



**A**



**B**

**FIGURA 9.** Termogramas de las relaveras de los procesos CARON (a) y HPAL (b).

Fuente: (Pons Herrera, Ramirez Pérez, & Hernandez Tirado, 2018); (Ramirez Perez & Pons Herrera, 2019).

El comportamiento térmico de las relaveras de níquel, brindan informaciones sobre los principales parámetros que se deben considerar para la obtención de productos industriales a partir del tratamiento de estos residuales industriales.

### Posibilidades de utilización industrial

A partir de los estudios de investigación realizados, se han podido evaluar las posibilidades de utilización de estos pasivos, para la obtención de materias primas siderúrgicas, principalmente, arrabio enriquecido con níquel como se resume en la tabla siguiente.

**Tabla 7** - Principales usos de las relaveras de la producción de Níquel en Cuba.

Pasivo Ambiental	Productos obtenidos	Utilización
Relaveras	Material de carga	Industria siderúrgica

Fuente: (Ferreiro Guerrero, 2015); (Pons Herrera, Ramirez Pérez, & Hernandez Tirado, 2018).

Los productos obtenidos, constituyen una fuente importante de materia prima para la industria siderúrgica nacional y una alternativa para la reducción de la contaminación ambiental, que actualmente generan las relaveras de níquel al ecosistema de la región de estudio.

Rechazos serpentiniticos de las plantas de preparación de mineral El Pasivo Ambiental "Rechazo Serpentinitico", constituye un residual del proceso minero, generado durante la separación de los minerales lateriticos contenedores de níquel, de las rocas serpentiniticos fuera del balance metalúrgico, exigido por las plantas productoras de estos minerales, el cual es almacenado en las cercanías de los recursos lateriticos, como se muestra en la figura siguiente.

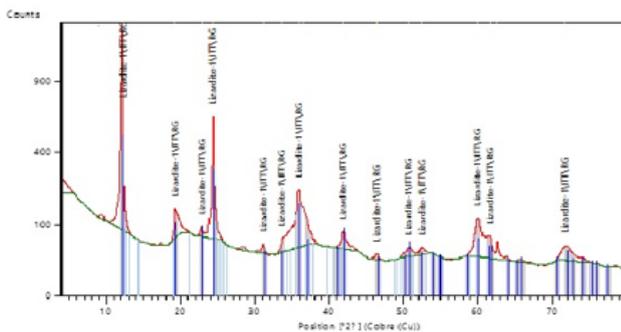


**FIGURA 10.** Rechazo serpentinitico resultante de los procesos mineros en la industria metalúrgica del Níquel en Moa.  
*Fuente:* (Montero Gil, 2019).

Este Pasivo Ambiental Minero, está compuesto principalmente, por minerales de serpentina, con predominio de SiO<sub>2</sub> y MgO, lo cual es común en los principales yacimientos lateríticos de la zona de estudio, constituyendo motivo de estudio y utilización industrial por diferentes investigadores, en los últimos años por, Gil, Pons, et. Al, (2019); Pons, Ramirez, Puchol, (2019), entre otros.

### Características mineralógicas

Mineralógicamente estos residuales se caracterizan por la presencia mayoritaria de fases de serpentina, arcillas y cuarzo, principalmente, como se muestra en la figura y tabla.



**FIGURA 11.** Difractograma del rechazo serpentinitico de los procesos mineros.  
*Fuente:* (Montero Gil, 2019).

**Tabla 8 -** Composición mineralógica semicuantitativa del rechazo serpentinitico

Fases mineralógicas	Fórmula química	Contenido de las fases mineralógicas (%)
Lizardita	Mg <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	66
Gibbsita	Al(OH) <sub>3</sub>	33,44
Clorito de calcio	Ca(ClO) <sub>2</sub>	28,41
Talco	Mg <sub>3</sub> (Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> )(OH) <sub>2</sub> ·3MgO·4SiO <sub>2</sub> ·H <sub>2</sub> O	19,63
Cuarzo	SiO <sub>2</sub>	33,93
Espinela de Hierro	Mg(Al,Fe) <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	18,99
Espinelas de Cobalto y Manganeseo	Co <sub>2</sub> MnO <sub>4</sub>	20,40

*Fuente:* (Montero Gil, Pons Herrera, Ramirez Perez, & Alvarez Ortiz, 2019)

### Características químicas

Mas del 60 % del rechazo serpentinitico esta compuesto por SiO<sub>2</sub> y MgO, característico de los minerales serpentiniticos cubanos, como se aprecia en la tabla siguiente. Este pasivo ambiental, por sus relativamente bajos contenidos de níquel y cobalto, no son admitidos por las plantas procesadoras de minerales lateríticos y constituye un rechazo que ha sido evaluado para su utilización como material de construcción, (Montero Gil, Pons Herrera, Ramirez Perez, & Alvarez Ortiz, 2019).

Granulométricamente los rechazos serpentiniticos se caracterizan por poseer partículas gruesas, con predominio de las fracciones granulométricas mayores de 4 mm, (ver figura), lo que demanda de un proceso de preparación mecánica, para su posterior utilización industrial.

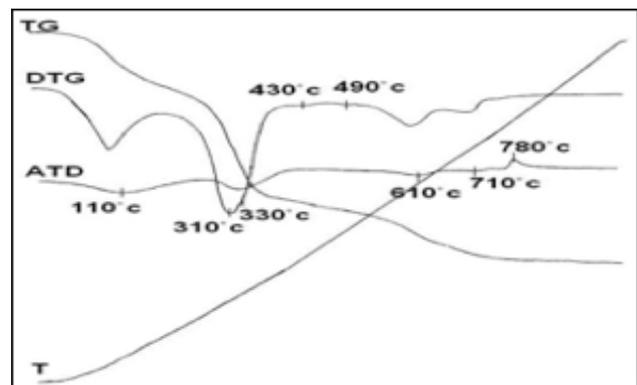
**Tabla 10 -** Características granulométricas, retenido y cernido del rechazo serpentinitico.

Clases de Tamaño (mm)	Salida Promedio (gramos)	Retenido (%)	Cernido (%)
-0,074	119,2	3,21	100
-0,088+0,074	114,2	6,282	96,79
-0,10+0,088	27,97	7,034	93,72
-0,35+0,10	376,2	17,15	92,97
-1,98+0,35	1200	49,42	82,85
-4+1,98	1200	81,7	50,58
-6+4	344,3	90,95	18,31
+6	336,5	100	9,05
<b>Total</b>	<b>3718</b>	<b>100</b>	<b>0,00</b>

*Fuente:* (Pons Herrera, Ramirez Pérez, & Herrera Casas, 2018).

### Características térmicas

Las características térmicas de este pasivo son muy comunes a los minerales de serpentina de la región norte oriental de Cuba, con dos etapas bien definidas en la descomposición térmica de este material, asociados a la eliminación de la humedad higroscópica a temperaturas entre 150 – 300 oC, proceso que presenta efectos endotérmicos definidos y posteriormente alrededor de los 830 oC, ocurre de la recristianización de los minerales de olivino, principalmente la forsterita, estudiado por Pons Herrera desde el año 2010 hasta la actualidad, (Pons Herrera, Ramirez Perez, Quintana Puchol, & al, 2019).



**FIGURA 12.** Termograma del rechazo serpentinitico estudiado.  
*Fuente:* (Pons Herrera, Montero Gil, & Ramirez perez, 2019).

**Tabla 9** - Composición química promedio (%) del Pasivo Ambiental Minero "Rechazo serpentinitico".

Yacimientos Lateriticos	Contenido promedio de los compuestos químicos, (%)							Fuentes bibliográficas
	NiO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	MgO	
Moa Occidental	0,40	0,58	8,05	0,58	0,25	38,08	21,75	(Montero Gil, Características del Rechazo Serpentinitico de la Planta de Preparacion de Mineral de la Empresa Moa Nickel SA., 2019)
Yagrumaje	0,32	0,9	8,9	0,9	0,53	39,4	36,6	(Pons Herrera & Ganesh Persaud, 2014)
Moa Oriental	0,57	0,86	5,36	0,86	0,621	29,16	33,201	(Pons Herrera, Ramirez Pérez, & Herrera Casas, 2018)

### Posibilidades de utilización industrial

El rechazo serpentinitico es un material serpentinitico, evaluado para su uso en la industria de materiales de construcción y en la siderurgia, como se resume en la tabla 9.

**Tabla 11** - Principales usos del rechazo serpentinitico.

Pasivo Ambiental	Productos obtenidos	Utilización
Rechazo Serpentinitico	Morteros, bloques de hormigón, pavimentos, balastro para el ferrocarril y fundentes	Material de construcción Industria siderúrgica

**Fuente:** (Montero Gil, Pons Herrera, Ramirez Perez, & Alvarez Ortiz, 2019); (Pons Herrera, Ramirez Pérez, & Herrera Casas, 2018).

### Aprovechamiento sustentable de los Pasivos Ambientales Minero Metalúrgicos

Los pasivos ambientales estudiados, están presentes en los principales yacimientos lateriticos de la región de Moa, ya sea de forma natural formando parte de las cortezas ferroniquelíferas, o creadas por el propio hombre en el caso de los rechazos serpentiniticos y las relaveras, pero sin un estudio profundo sobre sus características físicas y químicas, así como mineralógicas y térmicas; lo que limita la toma de decisiones sobre sus posibles usos industriales.

La caracterización realizada a los rechazos de las plantas de preparación y las posibilidades de su utilización, a partir de experiencias de otras empresas, que minimizan las afectaciones al medio ambiente durante el desarrollo del proceso productivo existente actualmente en Cuba, constituyen una motivación importante para el uso sostenible de este residuo minero, (Montero Gil, Pons Her-

ra, Ramirez Perez, & Alvarez Ortiz, 2019).

Los resultados de caracterización y el estudio general realizado con los pasivos ambientales, relaveras, rechazo serpentinitico y escombros lateriticos, presentes en los yacimientos lateriticos cubanos, permiten tomar decisiones sobre el posible uso de estos residuales, principalmente, como materia prima siderúrgica (oxidantes, NPI, fundentes), material de construcción, luego de cumplir con los requisitos exigidos a estos tipos de productos y su certificación, por las instituciones autorizadas.

Adicionalmente estos pasivos se acumulan en grandes cantidades día a día en las zonas mineras, afectando al ecosistema de la región, sin tener definido actualmente un uso específico. Por tanto, los resultados de esta investigación contribuirán a la toma de decisiones sobre la necesidad de un uso sostenible de los recursos naturales, con que cuenta la industria cubana del níquel, con vistas a garantizar el desarrollo industrial de nuestro país.

El aprovechamiento sustentable de los Pasivos Ambientales Minero Metalúrgicos, generados por las industrias del Níquel en Cuba, es una necesidad para el desarrollo socio-económico del país, que cuenta con más 50,0 millones de toneladas de mineral de hierro depositado en las relaveras de las plantas productoras, utilizables para la producción de materia prima siderúrgica.

### CONCLUSIONES

El conocimiento de las características mineralógicas, químicas y térmicas de los Pasivos Ambientales Minero Metalúrgicos sólidos (PAMMs), generados por la industria procesadora de minerales lateriticos de la región de Moa, Cuba garantizan su utilización en diferentes ramas de la economía, principalmente, como materia prima siderúrgica y como material de construcción.

Los pasivos Ambientales Minero Metalúrgicos, estudiados poseen regularidades comunes independientemente de la tecnología de procesamiento que se emplee, lo cual favorece su aprovechamiento de manera sostenible, reduciendo la contaminación ambiental, que ocasionan al ecosistema.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CASTELLANOS SUAREZ, J., & HERNÁNDEZ, A. N. (2009). *Aprovechamiento de las Colas Niquelíferas del Proceso Carbonato Amoniacal*. La Habana: III Convención Cubana de Ciencias de la Tierra. Geociencias.
- [2] CUTIÑO ABREU, E. (2015). *Aprovechamiento Sustentable de las Colas de la Empresa Ernesto Che Guevara, para su Comercialización con Fines Siderúrgicos*. Moa: Maestría en Desarrollo Sostenible. Instituto Superior Minero Metalúrgico.
- [3] FERREIRO GUERRERO, Y. (2015). *Reducción Carbónica de Nodulizados Autorreducibles del Concentrado de Hierro de las Colas de Nicaro para la Obtención de Lupias de Arrabio*. Moa: Tesis Doctoral. Instituto Superior Minero Metalúrgico.
- [4] LOPEZ, F., RAMÍREZ PÉREZ, M., & PONS HERRERA, J. E. (2008). *Kinetic Study of the Thermal Decomposition of low Grade Nickeliferous Laterite Ores*. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 1-6.
- [5] MONTERO GIL, E. (2019). *Características del Rechazo Serpentinítico de la Planta de Preparación de Mineral de la Empresa Moa Nickel SA*. Moa: Maestría de Desarrollo sostenible. Instituto Superior Minero Metalúrgico.
- [6] MONTERO GIL, E., PONS HERRERA, J., RAMÍREZ PÉREZ, M., & ALVAREZ ORTIZ, A. (2019). *Sustentabilidad del Uso de Pasivos Ambientales Minero Metalúrgicos sólidos, Generados por la Industria del Níquel en Moa*. La Habana: XII Convención Internacional sobre Medio Ambiente y Desarrollo.
- [7] 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: Universidad Santiago de Chile.
- [8] ORTIZ BARCENAS, J. (2015). *Obtención de un Producto Prerreducido para la Producción de Arrabio con Níquel (Nickel Pig Iron) a partir del Tratamiento de los Escombros Lateríticos de Mina Marti de Nicaro*. Moa: Tesis Doctoral. Instituto Superior Minero Metalúrgico.
- [9] PONS HERRERA, J. A., & GANESH PERSAUD, A. (2014). *Metodología para el Inventario de los Pasivos Ambientales Minero-Metalúrgicos, Generados por la Industria Minero Metalúrgica de Producción de Níquel*. Moa: Instituto Superior Minero Metalúrgico.
- [10] PONS HERRERA, J. A., MONTERO GIL, E., & RAMÍREZ PÉREZ, M. (2019). *Perspectivas de Utilización Industrial del Pasivo Ambiental Minero "Rechazo Serpentinítico"*. Moa: Instituto Superior Minero Metalúrgico.
- [11] PONS HERRERA, J., & RAMÍREZ PÉREZ, M. (2017). *Características de las Presas de Colas del Proceso Ácido a Presión de Producción de Níquel en Moa*. Moa: Instituto Superior Minero Metalúrgico.
- [12] PONS HERRERA, J., RAMÍREZ PÉREZ, M., & COBAS GARCÍA, N. (2018). *Fusión Reductora de los "Escombros Lateríticos", de la Región de Moa*. Moa: Instituto Superior Minero Metalúrgico.
- [13] PONS HERRERA, J., RAMÍREZ PÉREZ, M., & HERNANDEZ TIRADO, R. (2018). *Estudio Pirometalúrgico del Pasivo Ambiental "Presas de Colas", de los Procesos de Producción de Níquel*. Moa: Instituto Superior Minero Metalúrgico.
- [14] PONS HERRERA, J., RAMÍREZ PÉREZ, M., & HERRERA CASAS, S. (2018). *Caracterización del Pasivo Ambiental "Rechazo Serpentinítico" para su posible uso industrial*. Moa: Instituto Superior Minero Metalúrgico.
- [15] PONS HERRERA, J., RAMÍREZ PÉREZ, M., QUINTANA PUCHOL, R., & AL, E. (2019). *Comportamiento Térmico y Mineralógico de las Dunitas Serpentinizadas de la región Moa-Baracoa bajo Temperaturas de hasta 1600 °C*. *Minería y Geología*, 183-195.
- [16] RAMÍREZ PÉREZ, M. (2010). *Utilización de los Escombros Lateríticos de Zona A, Yacimiento Moa Occidental en el Proceso de Descarburización del Acero ACI HK-40*. Moa: Tesis Doctoral. Instituto Superior Minero Metalúrgico.
- [17] RAMÍREZ PÉREZ, M., & PONS HERRERA, J. (2017). *Características Físico-Químicas del Pasivo Ambiental "Escombros Lateríticos" para su Posible Uso Industrial*. Moa: Instituto Superior Minero Metalúrgico.
- [18] RAMÍREZ PÉREZ, M., & PONS HERRERA, J. A. (2019). *Tratamiento y Uso de los Pasivos Ambientales Minero Metalúrgicos sólidos Generados por la Industria del Níquel en Moa*. La Habana: Ministerio de Ciencia y Tecnología (CITMA).
- [19] RAMÍREZ PÉREZ, M., ALGUACIL PRIEGO, F. J., PONS HERRERA, J., & AL, E. (2006). *Caracterización Físico Química de los Esteriles Mineros: Yacimiento Moa*. Holguin. Cuba. Madrid: Instituto de Geología y Minero de España.
- [20] RAMÍREZ PÉREZ, M., PONS HERRERA, J., & ROMERO RAMÍREZ, M. (2018). *Estudio Termodinámico de Concreciones Ferruginosas del Yacimiento Moa Occidental para su Uso Siderúrgico*. *Minería y Geología*, 299-317.
- [21] VALDIVIA GARCÍA, G., ALONSO PÉREZ, J., CABRERA, I., & AL., E. (2013). *Actualización del Conocimiento Mineralógico de Menas Lateríticas y Residuos Sólidos de las Industrias Niquelíferas Cubanas*. La Habana: V Congreso Cubano de Minería. Geociencias.

