

**Trabajo de Diploma en Opción al Título de
Ingeniero en Metalurgia y Materiales.**

**Preparación y caracterización físico –
química de mezclas de minerales
lateríticos empleados en la
tecnología HPAL**

Autor (a): Grelis Anllo Reyes

Moa, 2024



**Trabajo de Diploma en Opción al Título de
Ingeniero en Metalurgia y Materiales.**

**Preparación y caracterización físico –
química de mezclas de minerales
lateríticos empleados en la
tecnología HPAL**

Autor (a): Grelis Anllo Reyes

Tutores:

Ms.C. Aurelia Viada Estévez

Ing. Pedro Luis Merencio Guevara

Ms.C. Alfredo Yordanis Johnson

Ms.C. Lilian Vidiaux Arcia

DrC. Deisy Cisneros Sánchez

Moa, 2024

Dedicatoria y Agradecimientos

A Dios por darme esta oportunidad y las fuerzas necesarias para continuar hacia adelante.

A mi bebé que es mi motor impulsor Alan Bornot Anllo

A mis padres Yandris Reyes Correa, Raúl Anllo Durán y hermana Grtel Anllo Reyes.

Agradezco a mis padres, suegros, esposo, compañeros de aula y el colectivo de profesores por apoyarme en esta etapa de mi vida sin ellos no lo hubiera logrado y en especial a mi tutora Aurelia Viada Estévez.

Un agradecimiento especial a mi suegra Dmaris Ramírez Rill y a mi suegro Ramón Bornot quien no se encuentra entre nosotros, pero fue un motor importante en esta decisión de mi vida.

Resumen

En el trabajo se realizó una caracterización físico – química de las variantes de mezclas metalúrgicas de minerales lateríticos que pueden ser alimentadas al proceso de lixiviación ácida a presión (HPAL). Para la preparación de las mezclas se consideraron posibles modificaciones respecto al contenido de magnesio del mineral de alimentación con vistas a evaluar en investigaciones posteriores el consumo de ácido sulfúrico del proceso para incrementar el aprovechamiento de las menas lateríticas. Se tomaron muestras de los yacimientos Camarioca Norte, Atlantic, Zona Septentrional, Moa Oriental y Atlantic y se tuvieron en cuenta los trabajos de prospección, exploración de los yacimientos minerales y el muestreo geológico. La toma de muestra del material se realizó por el método de puntos y la homogenización se ejecutó por el método de cono y anillo. Las caracterizaciones físicas y químicas de las muestras se realizaron mediante el análisis granulométrico por vía húmeda y por absorción atómica, respectivamente. Como resultado del trabajo se prepararon tres mezclas cuyos contenidos de magnesio fueron: mínimo 2,7 %; medio 3,4 % y máximo 4,0 %. El porcentaje participación de las menas empleadas para la conformación de las mezclas, donde la serpentina fuera de balance es de 10,20 %; la limonita de balance es de 24,90 %; la Sapolita de Balance de alto Fe de un 22, 71 %. De acuerdo a los resultados se determinaron como principales fases mineralógicas para las mezclas con un contenido de Mg de 4 % corresponde un 34, 4 % a la antigorita; un 15, 2 % de goethita. Para mezclas con un contenido de Mg de 3,4 % corresponde un 25,4 %; un 32,7 % goethita. En las mezclas con un contenido de Mg de 4 % corresponde un 34, 4 % de antigorita; un 15, 2 % goethita. Según el estudio de correlación para el Zn y Cu es inversa, pero para el Ni, Co, Fe, Mn presentan una correlación directa respecto al contenido de Mg.

Palabras claves: mineral laterítico, mezclas de minerales, muestras de yacimientos

Summary

At work a physical characterization came true – chemistry of the variants of metallurgic mixtures of minerals lateríticos that can be fed to the process of acid lixiviation under pressure (HPAL). Lateríticas considered possible modifications in relation to the contents of magnesium of the mineral of nutrition with an eye to evaluate in after-inquiries the consumption of sulfuric acid of the process to increment the use of the ores themselves for the preparation of the mixtures. Camarioca Norte, Atlantic, North Zone, Moa Oriental and Atlantic took signs of the deposits and they had in account the works of prospection, exploration of the mineral deposits and the geological sampling themselves. The overtaking of sign of the material came true for the method of points and the homogenization was executed for the method of cone and ring. The physical characterizations and chemists of the signs sold off by means of analysis granulométrico for wet way and for atomic absorption themselves, respectively. Whose contentses of magnesium prepared three mixtures themselves as a result of work they went: Minimum 2.7 %; Means 3.4 % and peak 4.0 %. The percent participation of the ores used for the conformation of the mixtures, where the streamer go from balance comes from 10.20 %; the limonita of balance comes from 24.90 %; Balance's Saprolita of height Fe of a 22 71 %. They determined like principal phases mineralógicas for the mixtures with Mg's contents of 4 % according to the results a 34, 4 % corresponds to the antigorita; 15 2 % of goethita. A 25,4 % corresponds for mixtures with Mg's contents of 3.4 %; A 32,7 % goethita. 34 4 % of antigorita corresponds in the mixtures with Mg's contents of 4 %; A 15, 2 % goethita. According to the study of correlation for the Zn and Cu is inverse, but for the Neither, Co, Fe, Mn present a direct correlation in relation to Mg.'s contents

Key words: Mineral lateritic, mineral mixtures, signs of deposits

Contenido

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS.....	5
1.1 Características de los yacimientos lateríticos.....	5
1.2 Aspectos generales sobre la tecnología de lixiviación ácida a presión	8
1.3 Principales mejoras realizadas a la tecnología de lixiviación ácida a presión	10
1.4 Antecedentes de investigación sobre la caracterización física química de minerales lateríticos.	13
Conclusiones Parciales del Capítulo 1	21
2.1 Materia prima empleada	22
2.2 Preparación de las mezclas a partir de las muestras tomadas.....	22
2.2.1 Toma y preparación de las muestras.....	22
2.2.2 Procedimiento para la preparación de las muestras de CN	24
2.2.3 Procedimiento para la preparación de las muestras de Atlantic	25
2.3 Definición de menas a mezclar.....	25
2.4 Método espectrofotométrico por absorción atómica empleado para el análisis de composición química.	27
2.4.2 Técnica de absorción:	28
Conclusiones Parciales del Capítulo 2	29
CAPÍTULO 3 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	30
3.1 Caracterización de las muestras	30
3.2 Análisis granulométrico	30
3.3 Definición de las muestras a mezclar.	31
3.4 Tanteo para el cálculo del contenido de Mg	32
3.5 Análisis mineralógico de las muestras de mineral laterítico	36
Conclusiones Parciales del Capítulo 3	40
CONCLUSIONES GENERALES.....	41
RECOMENDACIONES	42
BIBLIOGRAFÍA	43

INTRODUCCIÓN

La tecnología de lixiviación ácida a presión (HPAL) es una de las vías más empleadas para el procesamiento de menas lateríticas que contienen níquel, por las altas recuperaciones de níquel y cobalto que se alcanzan con su aplicación (92 a 95 %). Existen varias Plantas en el mundo que se diseñaron con la referida tecnología: Moa Nickel S.A. – Pedro Sotro Alba (Cuba), Cawse, Bulong, Murrin Murrin y Ravensthorpe (Australia), Coral Bay Nickel Corporation, (Filipinas), Goro (Nueva Caledonia) y Ambatovy (Madagascar); (Stanković 2020).

El principio del proceso de lixiviación ácida a presión es la disolución del níquel y el cobalto a altas temperaturas en el agente lixivante, específicamente en ácido sulfúrico, e incluye principalmente tres pasos: preparación de pulpa, lixiviación y recuperación de níquel y cobalto de la solución lixiviada. La lixiviación se realiza a temperaturas entre 250 y 270 °C y presiones de 4 a 5 MPa. Por esta razón, requiere un alto costo de mantenimiento del equipamiento y también exige un estricto control de las condiciones del proceso (Djouani 2022).

En general, este proceso se lleva a cabo en un sistema con alta acidez para que las extracciones de níquel y cobalto sean superiores al 90 %, quedando de 25 a 100 g/L de ácido libre en los licores finales de la lixiviación. Con la tecnología HPAL se logran altas extracciones de níquel y cobalto, pero la misma no está diseñada para tratar menas lateríticas con contenidos de magnesio superiores a 2 %, porque aumenta el consumo de ácido sulfúrico (Djouani 2022)

A nivel internacional con esta tecnología se procesan y evalúan menas predominantemente limoníticas, caracterizadas por tener alto contenido de hierro (> 40 %) y bajo contenido de magnesio (< 5 %), (Gultom 2020). Normalmente el proceso de lixiviación tiene una duración de 90 min y el consumo de ácido está alrededor de los 250 a 350 kg/t de mineral (Cueto 2003).

Diversas investigaciones realizadas durante la primera década del 2000 para el procesamiento de minerales con contenidos de magnesio superiores al 2 % muestran que se mejora la extracción de níquel de minerales de laterita ricos en nontronita (Fe < 25 % y Mg > 3,5 %) al aumentar la carga ácida, o con la adición de una pequeña cantidad de sodio al agua de proceso. Los resultados indican que con el uso de agua de proceso que contiene 5 g/L de iones de sodio se logra

reducir en un 15 % el consumo de ácido sulfúrico, lo que también conduce a menos costo de neutralización debido a la menor acidez libre final en la descarga del autoclave (Proenza 2015) .

La evaluación de la adición de iones de sodio al agua que se emplea para el procesamiento de minerales limoníticos que contienen 4,6 % de magnesio, muestra que es posible reducir el consumo de ácido alrededor de un 30 % con extracciones de Ni y Co iguales a 94,6 % y 95,8 %, respectivamente. Otras investigaciones realizadas con minerales limoníticos, refieren además la reducción de los niveles de impurezas presentes en la solución lixiviada, la cual se explica por la estabilidad de la natrojarosita y la natroalunita, formadas debido a la presencia de iones de sodio (Elias 2002).

Proyectos desarrollados más recientemente logran un mayor aprovechamiento del perfil laterítico mediante la tecnología EPAL (Enhanced Pressure Acid leaching), en la cual se combina la tecnología HPAL del mineral limonítico con la lixiviación a presión atmosférica de la saprolita, típicamente caracterizada por bajos contenidos de hierro y altos contenidos de magnesio ($Fe < 10 \%$; $Mg > 15 \%$). La tecnología EPAL y las investigaciones antes descritas tienen en común la presencia de los iones de sodio en el agua que se emplea para preparar la pulpa del proceso de lixiviación (White 2013).

Los aspectos mencionados anteriormente indican que pudieran obtenerse efectos positivos con la adición de iones de sodio, es decir, modificando la carga salina del agua que se emplea para el proceso, pero estos no solo dependen del contenido de magnesio en el mineral, sino también del tipo de mineral que se utilice.

Las menas alimentadas al proceso de la PSA son fundamentalmente limoníticas. En un estudio realizado identifican que los valores de requerimiento de ácido oscilan entre 60 y 70 kg/t de ácido por 1 % en peso de Mg en el mineral para lograr extracciones de níquel entre 93 y 95% (White 2010) .

En este caso, el alcance del trabajo no contempla opciones que permitan incrementar el porcentaje de magnesio en las menas que se alimentan al proceso.

Los antecedentes encontrados en la bibliografía sobre el aprovechamiento del mineral serpentinitico en la empresa PSA, abordan fundamentalmente el uso del mismo para el tratamiento del licor residual (WL), (Cueto 2003).

Por otro lado, en la bibliografía publicada no aparecen trabajos que refieran el uso de aditivos que modifiquen la carga salina del agua para incrementar la utilización de las menas que contienen porcentajes de magnesio superiores a 2 % en dicha empresa.

De acuerdo con lo anterior, puede ser atractivo evaluar la posibilidad de estudiar diferentes vías que permitan lograr un mayor aprovechamiento de las menas lateríticas en el proceso de lixiviación ácida a presión de la empresa Moa Nickel S.A. – Pedro Sotto Alba (PSA), ya que en esta planta actualmente solo se procesan menas fundamentalmente limoníticas cuyos contenidos de magnesio oscilan entre 1 y 2 %, con eficiencias de recuperación de níquel y cobalto que promedian el 92 % y un consumo de ácido sulfúrico de alrededor de 328 kg/toneladas de mineral (Para relación ácido mineral $\approx 0,3$), (Cisneros 2016).

Sobre la base de lo antes explicado, se establece como **problema de investigación**: El insuficiente aprovechamiento de las menas lateríticas que contienen más de un 2 % de magnesio en el proceso tecnológico de la empresa Moa Nickel S.A. – Pedro Sotto Alba.

Objeto de estudio: Menas lateríticas que contienen más de 2 % de magnesio.

El presente trabajo tiene como **objetivo general**: Caracterizar físico – química de mezclas de minerales lateríticos empleados en la tecnología de lixiviación ácida a presión.

Como objetivos específicos:

1. Caracterizar los yacimientos lateríticos.
2. Identificar las menas a emplear.
3. Establecer las mezclas de minerales lateríticos.

Como **hipótesis de la investigación** se plantea: Si se definen las mezclas a emplear de mineral lateríticos con un contenido de 2 % de magnesio, así como su caracterización físico, química y mineralógica, se podrá realizar una evaluación

futura de los parámetros tecnológicos al modificar la carga salina del agua del proceso de lixiviación ácida a presión, de muestras de menas con diferentes contenidos de magnesio y el empleo de varias proporciones de ácido y aditivos que permitan determinar las mejores condiciones técnicas y económicas para incrementar el aprovechamiento de las menas lateríticas.

El **campo de acción:** Características físico – química y mineralógica de mezclas minerales lateríticos que contengan mas de 2 % de magnesio.

Y para dar cumplimiento a los objetivos, se plantea como **tareas de investigación**

1. Realizar una búsqueda bibliográfica relacionada con la temática tratada en la investigación.
2. Definir las mezclas a emplear en la etapa posterior de la investigación.
3. Caracterizar físico - química de las mezclas definidas.

Metodología de la Investigación.

En la presente investigación se emplea el método histórico-lógico para conocer la evolución y desarrollo del proceso de lixiviación ácida a presión, así como para establecer el problema y su posible solución o hipótesis del trabajo. También se emplearon el análisis, la síntesis, la deducción e inducción para evaluar los resultados y establecer las conclusiones sobre el proceso que se analiza.

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO.CONCEPTUAL

1.1 Características de los yacimientos lateríticos

Entre el 60 y el 70 % de los depósitos mundiales de níquel de la corteza terrestre está contenido en las lateritas ó minerales de óxido. Estas lateritas de níquel a menudo contienen reservas económicamente explotables de Ni y Co (Putzolu 2021).

Las lateritas son yacimientos supergénicos formados por la erosión química y mecánica de las rocas magmáticas (ultramáficas). La meteorización de la roca ultramáfica está influenciada por el clima, la geomorfología, el pH y el del agua circulante, la tectónica y la composición química y mineralógica de la roca madre. La tasa de meteorización varía de 10 a 50 metros por millón de años. La meteorización química moviliza los elementos más solubles (Mg, Ca y Si) y concentra los elementos menos solubles (Fe, Ni, Mg, Zn, Co, Y, Cr, Al, Ti, Cu) 4. Todos los depósitos de mineral laterítico siguen un perfil de meteorización similar (Stanković 2020)

Los perfiles de meteorización lateríticos se caracterizan, típicamente, por contener una zona más superficial limonita (figura 1.1) muy rica en óxidos e hidróxidos de hierro (goetita y hematita) y pobre en sílice. La limonita suele tener una zona especialmente rica en hierro (ferricreta o iron-cap) en la parte superior. Las zonas de limonita en las lateritas se pueden dividir en dos subzonas: "limonita roja" dominada por hematita" y por debajo de estase encuentra la "limonita amarilla" dominada por goethita. La zona de limonita está cubierta con costra de hierro (ferricreta) (Stanković 2020).

De la zona limonítica en la profundidad ocurre una transición hacia la zona de saprolita, que contiene fundamentalmente silicatos hidratados ricos en Mg y Ni (un grupo serpentino de minerales); y finalmente a la roca madre compuesta por minerales de olivino y piroxeno. Cabe destacar que la terminología utilizada para designar las diferentes zonas del perfil es muy variada y no existe un consenso general (Proenza 2015) .

Los yacimientos lateríticos se pueden dividir en tres subtipos:

Las lateritas de óxido están constituidas principalmente por la zona de limonita. La zona de limonita se forma después de la hidrólisis de los minerales olivino,

piroxeno y serpentina. El olivino es el primer mineral que se hidroliza, liberando iones de silicio y Mg^{2+} de la matriz de la roca. El hierro ferroso también se lixivia de la roca, y luego se oxida y precipita como hidróxido férrico, inicialmente amorfo y luego progresivamente cristalizado para formar goethita. Los iones de níquel y cobalto lixiviados de la roca ultramáfica tienen afinidad por los hidróxidos férricos amorfos y se incorporan a su estructura mediante una combinación de adsorción y sustitución de hierro férrico. Excelentes ejemplos de lateritas níquelíferas de tipo óxido se pueden encontrar en Moa (Cuba oriental), Goro (Nueva Caledonia) y Cawse.

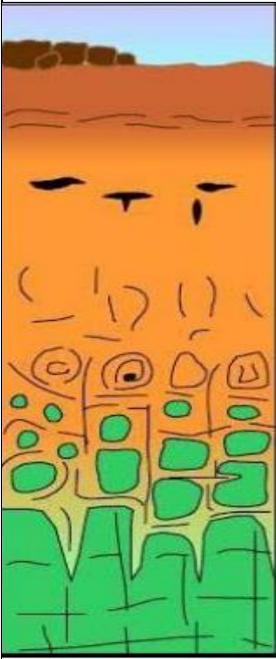
Perfil esquemático de la laterita	Nombre común	Composición química aproximada, (%)			
		Ni	Co	Fe	MgO
	Ferricreta				
	Limonita roja	<0,8	<0,1	>50	<0,5
	Limonita amarilla	0,8 a 1,5	0,1 a 0,2	40,0 a 50,0	0,1 a 5,0
	Transición	1,5 a 4,0	0,02 a 0,1	25,0 a 40,0	5 a 15
	Saprolita/ Ganierita/ Serpentina	1,8 a 3,0	0,02 a 0,1	10,0 a 25,0	15,0 a 35,0
	Protolito o roca madre	0,3	0,01	5,0	35,0 a 45,0

Figura 1.1 Perfil esquemático de la laterita, (Elías 2002).

Las lateritas arcillosas se forman en climas más fríos y secos. En estas condiciones, la sílice no se lixivia de la matriz rocosa como en las zonas tropicales húmedas. El Ni y el Co se concentran en la zona dominada por la arcilla esmectita nontronita. En la red cristalina de nontronita, los iones Fe^{2+} pueden sustituirse por iones de níquel. Las lateritas arcillosas suelen contener entre un 1,0 y un 1,5 % de níquel. Algunos ejemplos de lateritas níquelíferas de tipo arcilla son Murrin Murrin (Australia occidental) y Meseta de San Felipe (Camagüey, Cuba).

Las lateritas de silicato se forman como resultado del lento levantamiento tectónico con un nivel freático bajo en el perfil. La zona gruesa de saprolita se forma cubierta por una fina zona de limonita. La zona de saprolita está dominada por minerales serpentinos, goethita, arcillas esmectitas y garnierita (estructura mixta de silicatos hidratados de Ni Mg con alto contenido de Ni). El níquel se incorpora a los saprolitos mediante sustitución de Mg en serpentinas secundarias. El contenido habitual de Ni en las lateritas de silicato es 2,0 a 3,0 %. Las zonas ricas en garnierita pueden tener hasta un 20 % de Ni. Ejemplos de lateritas níquelíferas de tipo silicato hidratado son: Koniambo (Nueva Caledonia), Sorowako (Indonesia), Cerro Matoso (Colombia) y Falcondo (República Dominicana).

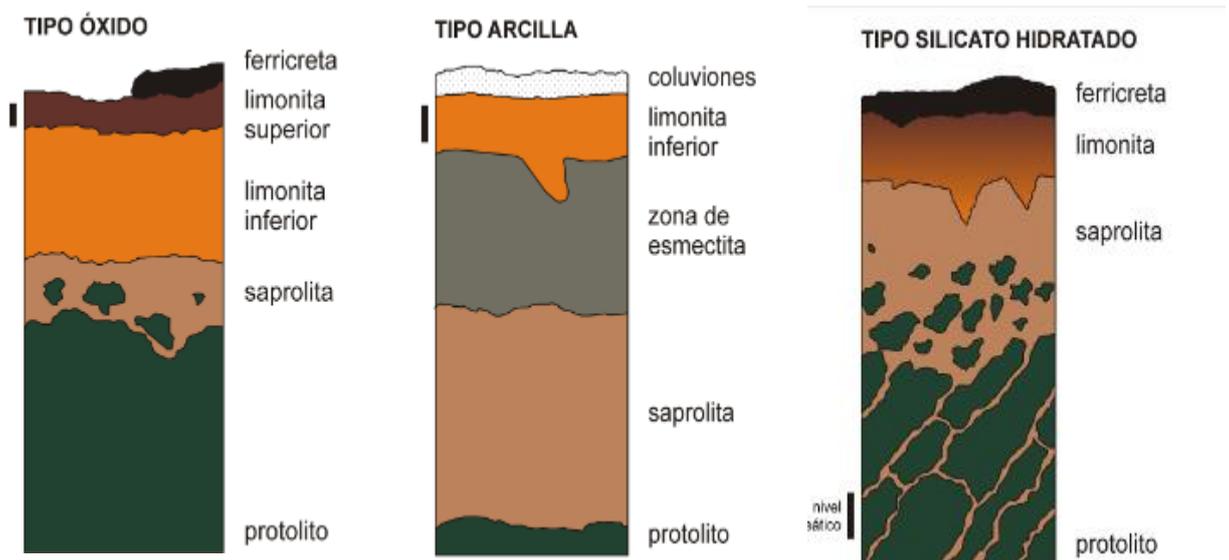


Figura 1. 2 Principales tipos de depósitos lateríticos. (Proenza, 2015).

Los depósitos lateríticos de Ni/Co se encuentran principalmente en las áreas tropicales, aproximadamente a 20 grados al norte y al sur del ecuador, pero algunos depósitos lateríticos se encuentran en áreas no tropicales de Europa (península de los Balcanes y montes Urales), Asia (Turquía, Kazajstán) y Estados Unidos (Oregón, California y Carolina del Norte), (Chalkley 2010). Los minerales lateríticos suelen contener entre un 0,8 y un 3 % de Ni y entre un 0,1 y un 0,2 % de cobalto. Estos elementos pueden concentrarse en cualquier capa del perfil de meteorización de la roca:

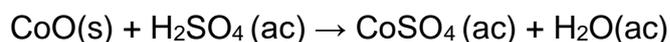
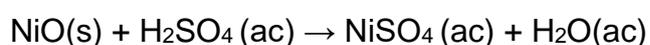
En los depósitos lateríticos de Cuba Oriental (Moa Bay), la goethita puede contener hasta 4,5 % en peso de NiO y la maghemita también es rica en Ni ($1,8 \leq$

NiO ≤ 8,1 % en peso) (Proenza, 2003, 2007). El Ni en la goethita puede estar en solución sólida, como una fase independiente o adsorbida en la superficie. La sustitución isomórfica del Ni²⁺ por Fe³⁺ en la goethita ha sido sugerida a partir de estudios con EXAFS (Carvalho 2003). Esta sustitución de Ni²⁺ por Fe³⁺ en la estructura de la goethita está localmente balanceada por la substitución de OH⁻ por O²⁻ (Singh et al., 2002). Manceau (2000) han documentado que hasta el 75 % del Fe en la estructura de la goethita puede estar sustituido por Ni, quedando el resto asociado con la estructura de la asbolana. Por otra parte, han demostrado la alta capacidad de adsorción de Ni en la superficie de la goethita. Estudios mediante micro-EXAFS, utilizando radiación sincrotrón, en goethita de depósitos de tipo óxido de Cuba demuestran que una parte del Ni no está en la estructura cristalina sino adsorbida.

1.2 Aspectos generales sobre la tecnología de lixiviación ácida a presión

La lixiviación ácida a alta presión (HPAL) se basa en la lixiviación con ácido sulfúrico de Ni y Co de lateritas a temperatura elevada (240 a 270 °C) y presión (4000 kPa) en un autoclave. La velocidad de la reacción química se acelera con la alta temperatura y presión. El proceso de lixiviación es muy eficiente, ya que finaliza en tan sólo 60 a 90 minutos con una recuperación de Ni y Co superior al 95 %. El hierro precipita como hematita durante la hidrólisis a temperaturas superiores a 200°C en una solución ácida (pH = 2 a 3), lo que reduce el consumo de ácido y elimina el hierro, evitando que afecte la separación de Ni y Co de la solución de lixiviación cargada (Dalvi 2004).

Las reacciones de lixiviación de níquel y cobalto son:



El proceso HPAL es adecuado para procesar minerales de limonita ya que los minerales de silicato y arcilla contienen minerales de ganga que consumen ácido, lo que afecta la economía general del proceso.

El alto consumo de ácido de 350 a 500 kg por tonelada de mineral es una de las principales desventajas del HPAL, por lo que la rentabilidad de las operaciones de HPAL depende de la disponibilidad y el precio del ácido sulfúrico. Además, los

costos de capital para HPAL pueden ser altos. Debido al ambiente altamente corrosivo, se requieren costosas autoclaves revestidos de titanio.

Los procesos de ácida a presión tienen las ventajas siguientes:

- Tratan lateritas de níquel limoníticas, nontroníticas y algunas saprolíticas que son abundantes (se estima que las lateritas aptas para procesos hidrometalúrgicos tienen más del doble de tonelaje en comparación con los minerales saprolíticos)
- No consumen tanta energía, ya que no requieren secado, calcinación ni fusión.
- La recuperación de níquel y cobalto es alta (~ 90 % para ambos).

Se han realizado varias investigaciones para determinar las variables de operación más influyentes, así como las condiciones en las que se obtienen los mayores valores de extracción de níquel y cobalto y prácticamente todas coinciden en la utilización de los mismos parámetros para el proceso de lixiviación:

Tabla 1.1 Operaciones globales de producción de Ni y Co mediante tecnología HPAL a partir de minerales lateríticos (Gultom, 2020).

Proyecto	País	Productos	Plan de Producción anual de Ni+Co, t/a
Ravensthorpe	Australia	Hidróxido de Ni y Co	25
Metanickel	Turquía		20
Murrin Murrin	Australia	Briquetas de Ni y Co	40
Goro	Nueva Caledonia	óxido de Ni y carbonato de Co	60
Ambatovy	Madagascar	Briquetas de Ni y Co	60
Ramu	Papua. Nueva Guinea	Hidróxido de Ni y Co	33
Tanganito	Filipinas	Sulfuro de Ni + Co	36
Coral By	Filipinas	Sulfuro de Ni + Co	24
Gördes	Turquía		10
Moa Bay	Cuba	Sulfuro de Ni + Co	34

En general las investigaciones realizadas en torno al proceso HPAL coinciden en aproximadamente las mismas condiciones de operación durante la lixiviación:

Guo (2011) estudiaron el comportamiento de lixiviación de metales de un mineral de laterita limonítica níquelífera de la región de Tubay, Mindanao, Filipinas, cuyas características químicas se muestran en la Tabla 1.1. Se examinaron los efectos del ácido sulfúrico agregado, la temperatura de lixiviación, el tiempo de lixiviación y la relación líquido/sólido (L/S) en la extracción de metales. En condiciones óptimas se extrae más del 97 % Ni, 96 % Co, 93 % Mn, 95 % Mg y menos del 1 % Fe. El análisis de los residuos de lixiviación ácida a alta presión mediante análisis químico y XRD indica que el hierro y el azufre residuales están presentes principalmente en las fases de hematita y alunita, respectivamente.

1.3 Principales mejoras realizadas a la tecnología de lixiviación ácida a presión

En el caso del proceso HPAL requiere minerales predominantemente limoníticos. En general los minerales tienen un contenido de Mg más bajo, generalmente menores de 4 % (a mayor Mg, el consumo de ácido es mayor), este proceso requiere un contenido de Al más bajo (las arcillas son grandes consumidoras de ácido; por lo tanto, el contenido de Al no debe ser demasiado alto (Djouani 2022)).

La lixiviación a presión se lleva a cabo en tanques pachuka o autoclaves revestidos de titanio (todas las plantas modernas). Las temperaturas de lixiviación varían en el rango de (245 a 270) °C. La separación sólido-líquido se realiza por decantación en contracorriente (CCD). Hay varias formas de purificar la solución que contiene níquel y separar el níquel y el cobalto. Algunas plantas producen materiales intermedios (sulfuros mixtos o hidróxidos mixtos) que se refinan en otro lugar. En la planta moderna, dicha separación se lleva a cabo mediante extracción por solventes (SX). Los productos finales producidos son electro-níquel, óxido de níquel o briquetas de níquel (Dalvi 2004).

Se han realizado varias investigaciones cuyo propósito es lograr un mayor aprovechamiento de las menas lateríticas. Estas se abordan más adelante y además se incluyen otras investigaciones que no se realizaron originalmente con

esta finalidad, pero sus resultados contribuyen de igual manera al logro de este propósito:

Granda (1992) estudiaron a escala de laboratorio la utilización del óxido de magnesio activo, formado durante la calcinación de la serpentina, como agente neutralizante primero del licor WL y posteriormente de la pulpa limonítica a alta temperatura, con lo cual se recuperaría el níquel contenido en la serpentina. Con este método se logra un mayor aprovechamiento de la serpentina, pero requiere instalaciones adicionales para la calcinación con la elevación del consumo energético.

Wang (2017) refiere en estudios recientes, el ácido nítrico y el ácido clorhídrico también se utilizan como agentes lixiviantes durante la lixiviación ácida a presión para tratar minerales de laterita de níquel con alto contenido de magnesio. El proceso con HNO_3 comprende varias etapas que son las siguientes: trituración y molienda del mineral hasta obtener valores iguales o superiores al 80 % de las partículas con tamaño inferior a 75 μm , lixiviación del mineral con ácido nítrico en autoclave (concentración de ácido nítrico de (500-1500) kg/t de mineral, relación líquido/sólido de 3~10:1, temperatura de lixiviación de (120-200) °C, tiempo de lixiviación de (30-120) min, velocidad del agitador de (300-500) rpm. Bajo estas condiciones alcanzaron extracciones de Ni y Co superiores a 97 %. En este trabajo se logran altos niveles de extracción de Ni y Co, pero se advierte la agresividad del ácido empleado para las instalaciones.

Sobre los tipos de yacimientos empleados en el proceso HPAL. Diferencias fundamentales entre los empleados a nivel internacional y los empleados en la empresa Moa Nickel S.A. – Pedro Sotto Alba.

Las condiciones de operación para la lixiviación ácida a presión no se han modificado sustancialmente con relación al proceso original desarrollado y operado en la Planta ubicada en Moa.

En general las mejoras principales introducidas al proceso HPAL están asociadas con las acciones para incrementar la eficiencia del proceso de lixiviación, reducir el consumo de ácido sulfúrico, ampliar la gama metales valiosos a recuperar, incrementar la calidad de los productos finales obtenidos, reducir el impacto de los residuales, así como el aprovechamiento de integral de las menas.

Se destaca dentro de las mejoras introducidas el empleo de aditivos que aporten iones monovalentes (Na, K, NH₄) al agua empleada al proceso HPAL, ya que constituye una opción beneficiosa para incorporar al proceso HPAL menas que contienen más de 4 % de Mg procedentes de yacimientos de tipo oxidado o arcilloso.

De acuerdo con los resultados de la búsqueda realizada se identificaron entre las principales vías para incrementar el aprovechamiento de las menas lateríticas mediante el proceso HPAL, las siguientes:

1. Introducción de la serpentina calcinada como agente neutralizante del licor de níquel y cobalto procedente del proceso de lixiviación (Serpentina) y también se alimenta previamente calcinada al proceso HPAL (AMAX).
2. Empleo de aditivos que modifican la carga salina del agua de proceso tales como: agua de mar, sulfato de sodio, sulfato de hierro (Aditivos).
3. Combinación de la lixiviación ácida a alta presión de la limonita con la lixiviación a presión atmosférica de la serpentina (Proceso EPAL).
4. Alimentación al proceso de una mezcla de mineral laterítico con mineral sulfuroso (CPAL)
5. Utilización de ácido nítrico (NAPL) o ácido clorhídrico como agente lixivante (HPhL).

Cada una de ellas posee ventajas y desventajas y su utilización en la empresa Moa Nickel S.A. Pedro Sotillo Alba depende, de las características químicas y mineralógicas de los yacimientos a explotar, la experiencia práctica en el uso de la tecnología y el acceso legal a ésta, disponibilidad de los reactivos químicos y otros materiales auxiliares, la flexibilidad del proceso, así como las necesidades de inversión y calidad de las instalaciones, entre otros aspectos que conforman los costos y definen la factibilidad técnico económica de introducir mejoras a un proceso tecnológico ya existente.

Independientemente de los resultados antes mostrados, vale la pena destacar que se han desarrollado otras tecnologías con la que se pretende lograr un mayor aprovechamiento de las menas lateríticas y reducir los costos de inversión. Entre ellas se incluyen procesos de lixiviación ácida a presión atmosférica con el uso del

ultrasonido, adición de reactivos oxidantes (oxígeno) y reductores (SO₂), así como el empleo de los ácidos nítrico y clorhídrico en reactores o en pilas (Wang 2017).

1.4 Antecedentes de investigación sobre la caracterización física química de minerales lateríticos.

Ostroumov (1983) desarrollaron una investigación cuyo objetivo es realizar una valoración general de los minerales presentes en la corteza de intemperismo del sector Atlantic de la mina de Moa; además exponer criterios sobre La concentración de las fases minerales por fracciones granulométricas. Para esto se utilizaron los resultados obtenidos por técnicas de difracción de rayos-X, ensayos térmicos, análisis granulométricos y análisis químicos en muestras representativa; de las rocas presentes en el yacimiento Moa.

En este trabajo se estudiaron tres cortes principales (AH₅₁, AN y AG₁₁ del sector Atlantic en el yacimiento. El principal método de investigación empleado fue el análisis por difracción de rayos- x, mediante el cual se obtuvieron 44 difractogramas de las diferentes fracciones granulométricas de las muestras de lateritas, las cuales fueron investigadas con el goniómetro alemán.

Las separaciones microgranulométricas se ejecutaron mediante el método de tamización (según tamiz de 80 micras) y levigación (según metodología propuesta por (Cueto 2003), empleándose una botella de sedimentación.

Se determinaron la composición granulométrica del mineral analizado en la investigación donde en el horizonte de ocres la granulometría predominante es la fracción 20 micras, donde alcanzan valores mayores de 45 % de la muestra En el horizonte superior, las concreciones y la granulometría del material laterítico aumenta de tamaño y ya aquí la fracción predominante es la de + 80 micras que alcanza valores de 60 % de la muestra. Se determinaron las principales fases mineralógicas presentes en el mineral, entre las cuales se encuentran magnetita, hematita, cuarzo hidrarilita, hidrobiotita, bohernita, entre otros.

Rojas *et al.* 1993 desarrolló una investigación la cual se combinaron con estudios petrográficos, para determinar con más exactitud la clase de tamaño granulométrico de los minerales que componen estas rocas y explicar mejor las alteraciones sucesivas que van sufriendo los minerales que la componen.

Se determinaron las fases minerales presentes en el material alimentado a los hornos son fundamentalmente óxidos e hidróxidos de hierro: goethita e hldrogoethita, hematita y magnetita, que alcanzan hasta un 70 % en masa de la muestra, además, silicatos de magnesio y silice: antlgorita, clorita y cuarzo.

La granulometría de las muestras en general es fina (menor que 56 micrones), variando su contenido de un 80 % en masa del material inicial hasta un 60 % en la pulpa en las etapas de lixiviación y sedimentación.

En este trabajo se realizó un estudio combinado de petrografía con análisis granulométricos, para determinar las fases y característica de las rocas del mineral que se alimentan en la empresa Comandante Ernesto Che Guevara, donde se utilizó la técnica de análisis químico – físico (difracción por rayos X); aunque pudieron emplear técnicas de absorción atómica para determinar la composición química y fases mineralógicas. Para el análisis granulométrico se emplearon tamices de 80 y 56 micrones, pudiéndose emplear otros tamices con otros tamaños de orificios y se determinaron las fases minerales presentes en el material alimentado a los hornos son fundamentalmente óxidos e hidróxidos de hierro: goethita e hldrogoethita, hematita y magnetita.

Rojas *et al.*1994 se analizó la influencia de la característica mineralógica del material limonítico en la sedimentación de la pulpa procesada en la industria "Pedro Sotto Alba", estableciéndose la dependencia de la velocidad de sedimentación con los factores, densidad, granulometría, composición química y composición mineralógica de este material. Se concluye que la diferencia mineralógica fundamental entre los materiales de buena y mala sedimentación radica en la composición mineralógica y química de la fracción gruesa (mayor que 0,074 mm).

Se analizó desde el perfil mineralógico, que influyen en la sedimentación del material limonítico son: la granulometría, la composición química, la composición mineralógica y la densidad.

La influencia de estos factores sobre la sedimentación hay que concebirla como un sistema, cuyos principales componentes son: granulometría-químico-mineralogía del material con que se elabora la pulpa y no como aspectos aislados,

los cuales son inherentes a un mismo objeto (las limonitas) y participan en un mismo, proceso (la sedimentación).

Rojas (2001), en esta investigación se realizó para perfiles de distinto grado de madurez, aspectos químicos, mineralógicos y físicos al nivel de perfil, de horizontes y de clase granulométrica. Los resultados mostraron una tendencia natural de concentración de las distintas fases minerales hacia determinada clase granulométrica. En el yacimiento Moa, tanto en perfiles maduros como inmaduros, la goethita se concentra en la clase granulométrica menor de 0,045 mm, la cual representa alrededor del 50 % en peso de los horizontes ocrosos para ambos tipos de perfil, y contiene como promedio 1,4 % de Ni.

En esta investigación el autor centra sus estudios en el análisis realizado para perfiles de distinto grado de madurez, aspectos químicos, mineralógicos y físicos al nivel de perfil, de horizontes y de clase granulométrica. Aunque se pudo realizar un análisis más profundo en cuanto a la composición química que representa cada fase mineralógica como influye está en la tecnología que se alimenta este material, además de utilizar técnicas de análisis químicos – físicos más avanzadas y analizar la composición química pos cada fracción de tamaño de partícula que represente el material y no solo para las clases de tamaño que fueron analizados en la investigación.

Rojas *et al.* 2012, en este trabajo se estudiaron el contenido de manganeso en los depósitos lateríticos ferroniquelíferos de Moa por lo que muestras enriquecidas de dos perfiles del yacimiento Punta Gorda se investigaron con el propósito de determinar las formas mineralógicas en que aparecen los óxidos de manganeso en este depósito. Mediante la aplicación de técnicas de Difracción de Rayos-X, Análisis Térmico Diferencial, Fluorescencia de Rayos-X, Microscopía Electrónica de Barrido y Espectroscopía Infrarroja.

Se pudo establecer que la forma mineralógica principal de los óxidos de manganeso en Punta Gorda es la litioforita; este mineral fue revelado por sus reflejos difractométricos y por sus características macroscópicas (grano de color negro, brillo semimetálico, no magnético y su aspecto botroidal o masivo).

Se determinó que la fracción granulométrica medianamente gruesa (-0,417+0,074 mm) resultó la segunda en importancia, representando entre el 15 y el 25 % de

masa de la muestra. La diferencia granulométrica principal entre el material laterítico y el silicatado (serpentinítico) se encontró en la proporción en que aparecen la clase granulométrica más fina (menor de 0,045 mm) y las más gruesas (mayores de 0,83 mm).

Se analizó que el perfil M-47 tiene también en el horizonte de ocre medio un material amarillo pardusco con porciones de color negro, con 1,35 % de MnO y 0,34 % de Co₃O₄ (muestra Mn8). Próximo al ocre inferior se distingue un material amarillo, ligeramente pardusco, con 1,59 % de MnO y 0,32 % de Co₃O₄ (muestra Mn19).

Cerpa *et al.* 2001, comprueban que el valor de la viscosidad aparente relación goethita/serpentina, lo cual sugiere que la goethita tiene una interacción más fuerte que la serpentina como resultado de un tamaño de partícula más pequeño que favorece la aparición de flóculos o grumos dando lugar a la formación de una microestructura diferente. Esta microestructura puede también estar afectada por el pH de la suspensión y, en particular, por el punto isoeléctrico (p.i.e) o por el punto de carga cero (p.c.c) de la misma.

Se pudo determinar que la pulpa cruda de laterita posee un 30 % de partículas mayores de 0,045 mm; por tanto, las partículas más finas son mayoritarias y determinan la velocidad de sedimentación de este mineral, así como su comportamiento reológico.

La composición minealógica determina, en gran medida, la distribución de tamaño de partículas en las suspensiones analizadas. Las muestras de laterita, de cieno carbonatado y de yeso son notablemente polidispersas y están compuestas, fundamentalmente, por partículas finas (menores de 0,045 mm). En cambio, el sulfuro de Ni + Co está constituido por partículas con una distribución de tamaño más próxima a la de un material mono disperso. El modelo matemático de-finido describe adecuadamente la distribución de tamaño acumulativa de las partículas sólidas tanto de las lateritas, como del cieno carbonatado y del yeso, no resultando así para el sulfuro de Ni + Co.

Proenza *et al.* 2022 planteó que el Ni y el Co son metales estratégicos en la construcción de sociedades sostenibles, sus propiedades físicas y químicas los hacen imprescindibles en la denominada transición energética que permitiría

alcanzar los ambiciosos objetivos de descarbonización de la economía. Los yacimientos lateríticos de Ni-Co contienen alrededor del 70 % de las reservas mundiales de Ni y representan la segunda fuente de obtención de Co a nivel mundial. En consecuencia, los mayores productores de Ni en el 2021 fueron países que albergan grandes yacimientos lateríticos de Ni-Co (Indonesia y Filipinas) Los enormes recursos de Ni en cortezas lateríticas desarrolladas sobre rocas ultramáficas ricas en olivino, unidos a su localización muy cerca de la superficie en comparación con los depósitos de sulfuros magmáticos de Ni, conlleva a que los yacimientos lateríticos sean la opción más atractiva para la industria del Ni.

Los depósitos lateríticos de Ni-Co suelen presentar una gran variabilidad vertical y horizontal. Los depósitos caracterizados por un mayor espesor de la zona oxidada, y con la mineralización de Ni localizada predominantemente en la parte inferior del horizonte limonítico (limonita inferior o amarilla), y en la más alta del horizonte saprolítico (saprolita ferruginosa), se denominan de “tipo óxido”. Excelentes ejemplos de este tipo de depósito se localizan en la parte de NE de Cuba (distrito de Moa o “Moa Bay”). Estos depósitos se desarrollan a partir de la meteorización de peridotitas mantélicas serpentinizadas y rocas ultramáficas y máficas serpentinizadas de la zona de transición manto-corteza (harzburgitas, dunitas, peridotitas impregnadas con plagioclasa y clinopiroxenos, sills/diques de gabro) de las ofiolitas de Moa- Baracoa. Esta variedad litológica del protolito tiene importantes implicaciones en la geoquímica y mineralogía de los perfiles lateríticos de Moa.

En esta contribución se presentan los resultados de un estudio mineralógico detallado (mediante DRX, μ DRX, μ Raman, FE-SEM y EMPA) de los oxihidróxidos de Fe como fases portadoras de Ni-Co en los perfiles lateríticos de tipo óxido del distrito de Moa (yacimientos Punta Gorda, Yagrumaje Norte y Yamanigüey). Además, se valoran las implicaciones de la mineralogía de la mena en los procesos metalúrgicos (lixiviación ácida a presión -HPAL- con ácido sulfúrico y tecnología Caron) utilizados para la extracción de Ni y Co.

La goethita es la fase mayoritaria en los horizontes limoníticos de los depósitos estudiados, y en el horizonte saprolítico superior coexiste con lizardita (politipo dominante 1T) y maghemita. En la parte inferior del horizonte limonítico, la goethita

puede constituir >90 % en peso de las fases identificadas mediante DRX y cuantificadas sobre la base del método de Rietveld. Hay varias generaciones de goethita, una de ellas muy rica en Al (hasta un 8 % en peso). Sistemáticamente la goethita de la parte más alta del horizonte saprolítico y limonítico inferior suele ser rica en Ni y Co, contiene hasta 4,3 % en peso de NiO y hasta 1,7 % en peso de Co₂O₃. Sin embargo, hacia la parte alta de la zona limonítica los contenidos de Ni en la goethita llegan a ser inferiores a 0,25 % en peso. Los agregados de goethita analizados mediante EMPA también presentan contenidos variables de Si (hasta 6 % en peso), Cr (hasta 2 % en peso) y Mn (hasta 1,2 % en peso). La goethita se forma predominantemente a partir de olivino y serpentina, y hacia la parte alta del perfil es reemplazada por hematites.

Se analizó que en el proceso HPLA además de disolver Ni y Co puede también lixiviar Mn y por tanto reducir la eficiencia del proceso de tratamiento de las menas ricas en Mn-Ni-Co.

Gali *et al.* 2006, según este investigador el Caribe alberga el 7 % de los recursos mundiales de níquel laterítico y de ellas Cuba contiene las mayores reservas. Los yacimientos cubanos son mayoritariamente tipo óxido y el níquel está asociado predominantemente con la goethita. No obstante, existen aún grandes lagunas en el conocimiento de las diferentes fases portadoras de Ni y Co. Además, en las fases establecidas como portadoras de Ni y Co, se desconoce si estos elementos están como iones adsorbidos en la superficie cristalina o como iones substituyendo en la estructura cristalina.

En este trabajo se estudia un perfil laterítico tipo óxido representativo del yacimiento Punta Gorda en Cuba oriental, se trata del frente de explotación L-48. Se han estudiado 10 muestras representativas de los diferentes horizontes del perfil, de muro a techo: 1 muestra de peridotitas serpentinizadas, muestra del horizonte saprolítico, 6 muestras del horizonte limonítico, muestra de una intercalación de gabro meteorizado en el horizonte limonítico y muestra de la ferricreta.

El estudio cuantitativo mediante DRX pone de manifiesto que la goethita es la fase predominante en el horizonte limonítico, y que la espinela es mayoritariamente maghemita. Por otra parte, la dimensión del dominio de difracción permite estimar

la superficie específica. En la hipótesis de dominios esféricos con el mismo radio, los valores de superficie resultantes oscilan entre 32 y 65 m²/g, valores considerables que sugieren un papel importante de los fenómenos de adsorción en la retención de metales (Ni, Co). En todo el horizonte limonítico, el contenido en Fe, calculados en base a la cuantitativa de DRX, expresado en tanto por ciento de Fe₂O₃ es relativamente constante, oscilando entre 70 % y 90 %.

Se determinó que los resultados indican que el principal mineral que contiene Ni en la zona de saprolita es la serpentina. En cambio, los principales minerales portadores de Ni en la zona limonítica son la goethita, maghemita y fases hidratadas de Mn.

Aiglsperger *et al.* 2016, en este trabajo se hace un estudio de contribución y datos mineralógicos de gestión de configuraciones de dos lateritas diferentes de níquel. Los tipos del área minador Moa Bay en Cuba (el tipo de óxido) y (ii) del área minador Falcondo en el Republica Dominicana (el Mg hidratado y tipos de silicatos) que están representadas en sus diferentes fases mineralógicas. La gestión acumulada de configuraciones y en los procesos complejos. Para el estudio de ambas minas se emplearon los métodos tradicionales de toma y preparación de las muestras, deerminandose las catarte risicas de estos minerales, las fases presentes mineralógicas y los contenidos de Ni, Mg y diferentes tipos de silicatos que abundan, de manera general se realiza un análisis químico geológico de ambos yacimientos niquelíferos existente en el área del Criba. Los resultados demuestran esa gestión de configuraciones es concentrada hacia la superficie adentro específico las zonas rico en el secundario Fe y Mn cargaas y preparación de las muestras en zonas con concentraciones altas de residuo Fe secundario y Mn cargando óxido (s) en niveles superiores de los perfiles de laterita Ni. Concentración de los factores del que involucran enriquecimiento residual por el desgaste intenso movilización de gestión de configuraciones durante cambiar a pH en forma con subsiguiente reprecipitación en barreras favorables del geochemical e interacciones sea la biósfera del entre y los terrenos limoníticos en niveles más altos del perfil (la zona crítica) con neoformación compleja. Los contenidos totales de gestión de configuraciones en ambos tipos de laterita Ni están bajos cuando son comparados con de convencional de mineral de gestión de configuraciones, coloca pero es de

significado económico como la gestión de configuraciones tenga que verse como subproductos baratos costados durante el Ni (+Co) métodos, extracción y producción. Para el análisis químico físico se empleó la técnica de análisis de difracción por rayos X.

Se determinaron las zonas donde están las concentraciones principales en Ni en minerales lateríticos y los óxidos presentes de Mg. Las principales zonas de mineral se encuentran en NiO, FeO y Mg y que las fases mineralógicas son spinela, gohetita y hematite

Conclusiones Parciales del Capítulo 1

1. De acuerdo a los estudios realizados sobre las mejoras realizadas en la tecnología de lixiviación acida a presión por investigadores internacionales como posibles vías para mejorar el aprovechamiento de las menas lateríticas alimentadas las siguientes: introducción de la serpentina como agente neutralizante o su procesamiento por separado mediante lixiviación a presión atmosférica, utilización de ácidos nítrico o clorhídrico como agentes lixiviantes y empleo de aditivos que modifican la carga salina del agua utilizada en el proceso de preparación de pulpa.
2. Se analizó que las principales fases mineralógicas que presentan los minerales lateríticos son la hematita, gohetitam y magnetita entre otros según los estudios realizados en los yacimientos de la región de Moa Cuba.

CAPÍTULO 2 MATERIALES Y MÉTODOS

Este capítulo tiene como objetivo realizar una descripción de las materias primas y las técnicas físicas - químicas empleadas durante el desarrollo de la investigación.

2.1 Materia prima empleada

Para dar cumplimiento al objetivo de la investigación se plantearon las siguientes tareas:

1. Identificación de las menas a emplear.
2. Toma de muestras.
3. Definición de menas a mezclar.
4. Preparación de muestras
5. Caracterización de muestra.

Para la ejecución de las tareas trazadas se tuvieron en cuenta una de las operaciones más importantes, tanto en los trabajos de prospección como en los de exploración de los yacimientos minerales y es el muestreo geológico, único método para determinar la calidad de las menas.

Con el propósito de garantizar la calidad de la investigación se tuvieron en cuenta investigaciones precedentes donde se realizó un arduo análisis crítico de trabajos anteriores descritos en el capítulo 1 con el objetivo de identificar aditivos que modifiquen la carga salina del proceso y propicien la reducción en el consumo de ácido sulfúrico y el incremento de las extracciones de níquel y cobalto.

Se tomaron muestras en el yacimiento Camarioca Norte (CN) Área 20, en ese momento la empresa Comandante Pedro Sotto Alba estaba minando ese yacimiento el cual tiene las características que se estaba buscando para el desarrollo de la investigación, lo mismo sucedió con el mineral de Atlantic tomado del depósito

2.2 Preparación de las mezclas a partir de las muestras tomadas.

2.2.1 Toma y preparación de las muestras

Se dispuso en total de 14 muestras:

CN Área 20 (seis muestras): Muestra-21; Muestra-22; Muestra-23; Muestra-24; Muestra-25; M-26 (tomadas en puntos diferentes del yacimiento)

Atlantic (una muestra): (tomada en depósito)

Yagrumaje Oeste (dos muestras): (tomadas en el yacimiento)

Zona Septentrional (tres muestras): (tomadas en el yacimiento)

Moa Oriental (dos muestras): (tomadas en el yacimiento)

Las muestras de Yagrumaje Oeste, Zona Septentrional, Moa Oriental y CN M-22; M-23; M-25 y M-26 fueron rechazadas pues con el empleo de ellas no se lograron ajustar los contenidos de Mg, Ni, Co y Fe en las mezclas a los niveles establecidos en el diseño de experimentos.

Para la toma de las muestras se utilizó el método por punto en el yacimiento estudiado donde se tomó de forma al azar en diferentes áreas y en las diferentes zonas del depósito analizado (Kaya 2011).

Camarioca Norte

Ubicación de las muestras tomadas

Las muestras tomadas en el yacimiento CN se encuentran enmarcadas en los límites espaciales siguientes:

Y: 213716.5585; **X:** 699266.5515; **Z:** 459.5

Por cada punto se toma una masa aproximadamente de 37 kg, a una distancia entre los puntos de un metro en el yacimiento para que sean representativas las muestras tomadas en CN (seis muestras: M-21; M-22; M-23; M-24; M-25; M-26). Las muestras se secan a 100 °C, para posteriormente realizar la homogeneización de las mismas depositando el material en un punto y luego en otro hasta completar cinco pases. Para el proceso de división o cuarteo de las muestras se toma el mineral homogeneizado hasta formar una pila en forma cónica, luego con una cuarteadora en forma de cruceta se realiza el anillo y se divide en cuatro partes, se toman dos partes y las otras dos se dejan de reserva, se repite el procedimiento hasta obtener la masa deseada. En este caso para realizar el método antes mencionado se aplicó de forma individual en cada muestra de los puntos seleccionados (Johnson 2005)

En la figura 2.1 se representa el método de cuarteo por el cono y el anillo.

La masa inicial es de 1 kg que se emplea para la realización del cuarteo y homogenización del material.

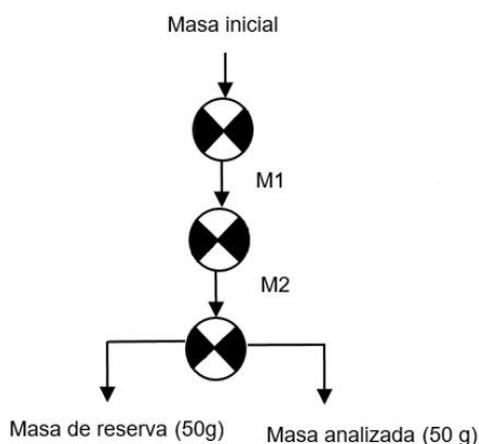


Figura 2.1 Método de cono y el anillo.

En la figura 2.1 se muestra el esquema por el cual se realizó la homogenización del material a través del método del cono y el anillo hasta obtener la masa del material requerida (50 g). Para el análisis granulométrico se tomó 1 kg de cada muestra homogeneizada y se prepara una pulpa, de la que se separan las fracciones +20 mesh y -20 mesh mediante un tamiz por vía húmeda.

2.2.2 Procedimiento para la preparación de las muestras de CN

1. Las muestras son secadas en la estufa a 100 °C por 24 horas.
2. Se dejan enfriar y se anotan los pesos.
3. Se homogenizan y cuarteo según método de cono y anillo.
4. Se toman 50 g para el análisis químico inicial de la muestra
5. Para análisis granulométrico se toma 1 kg de la muestra seca homogénea y se prepara una pulpa.
6. La pulpa preparada se pasa por el tamiz de 20 mesh.
7. La fracción -20 mesh se deja en reposo en una tanqueta para que sedimente, luego se decanta el agua y se homogeniza pulpa.
8. Se ponen a secar las muestras obtenidas en los pasos 6 y 7 (100 °C por 6 horas), 100 g de pulpa y todo lo retenido en el tamiz.
9. Una vez secadas las muestras se envasan 50 g para enviar el laboratorio analítico para análisis de Ni, Co, Fe, Mg, Cu, Zn y Mn.

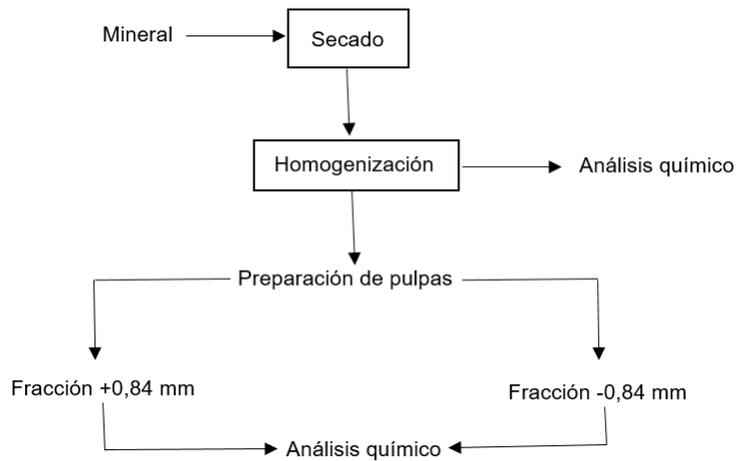


Figura 2.2 Esquema de tratamiento yacimiento CN.

2.2.3 Procedimiento para la preparación de las muestras de Atlantic

En el depósito Atlantic se tomó una masa de 66,18 kg en el cual también se realizó la toma de muestra y la homogenización por el método de punto, anillo y cono respectivamente que fue explicado anteriormente, hasta lograr la homogeneidad de la muestra y que sea representativa hasta obtener una masa de 50 g para el análisis químico y para el análisis granulométrico 1 kg

1. Se homogeniza la muestra preparando una pulpa.
2. Se toman 50 g para el análisis químico inicial de la muestra.
3. La pulpa preparada se pasa por el tamiz de 20 mesh.
4. La fracción -20 mesh se deja en reposo en una tanqueta para que sedimente, luego se decanta el agua y se homogeniza pulpa.
5. Se pone a secar (100 °C por 6 horas) 100 g de pulpa y todo lo retenido en el tamiz.
6. Una vez secadas las muestras se envasan 50 g para enviar el laboratorio analítico para análisis de Ni, Co, Fe, Mg, Cu, Zn y Mn.

2.3 Definición de menas a mezclar

Para la preparación de las mezclas a utilizar en los experimentos, se realizó un balance de masa con el objetivo de determinar la cantidad de material de las muestras individuales que debía participar en la mezcla para obtener los contenidos de Mg, Ni, Co y Fe definidos en el diseño de experimento. Donde se

introdujo la ecuación (6) en el programa EXCEL y se realizó un proceso de tanteo con los valores de la masa de las muestras individuales escogidas, hasta lograr los contenidos deseados de los elementos de interés para la conformación de la mezcla (Sariol 2011).

Masa de la mezcla (M_M):

$$M_M = \sum_1^n M_n \dots\dots\dots(1)$$

Masa de elemento químico en la mezcla (M_{iM}):

$$M_{iM} = \sum m_i \dots\dots\dots(2)$$

$$m_i = c_i * M_n \dots\dots\dots(3)$$

Sustituyendo (3) en (2)

$$M_{iM} = \sum_1^n (c_i * M_n) \dots\dots\dots(4)$$

Concentración de elementos en la mezcla (c_{iM}):

$$M_{iM} = c_{iM} * M_M \dots\dots\dots(5)$$

Sustituyendo (5) en (4) y despejando

$$c_{iM} = \frac{\sum_1^n (c_i * M_n)}{M_M} \dots\dots\dots(6)$$

Donde:

i: Ni, Co, Fe, Cu, Zn, Mn, Mg

n: Numero de muestras individuales a mezclar

M_n : Masa de muestras individuales

m_i : Masa de elemento en cada muestra

Los niveles de Mg a estudiar en la investigación son:

Nivel bajo: Mg=2,7 %

Nivel medio: Mg=3,4 %

Nivel alto: Mg= 4,0 %

Estos niveles fueron escogidos teniendo en cuenta el resultado de diversas investigaciones realizadas para el procesamiento de minerales con contenidos de magnesio superiores al 2 % las cuales mostraron mejoras en la extracción de níquel de minerales de laterita ricos en nontronita ($Fe < 25 \%$ y $Mg > 3,5 \%$) al aumentar la carga ácida, o la adición de una pequeña cantidad de sodio al agua

de proceso logrando además reducir en un 15 % el consumo de ácido sulfúrico (Sariol 2011).

La adición de iones de sodio al agua se ha empleado además para el procesamiento de minerales limoníticos que contienen 4,6 % de magnesio, pues es posible reducir el consumo de ácido alrededor de un 30 % con extracciones de Ni y Co iguales a 94,6 % y 95,8 %, respectivamente (Majendí 2011).

2.4 Método espectrofotométrico por absorción atómica empleado para el análisis de composición química.

Se establece para la determinación espectrofotométrica por absorción atómica de níquel y cobalto en muestras de mineral reducido y lixiviado.

2.4.1 Fundamento del Método

La muestra de ensayo es tratada con mezcla de ácidos (HCl + HNO₃), luego de reducir el volumen se transfiere cuantitativamente a un matraz aforado de 250 ml, se enrasa y se homogeniza, filtre. La determinación de níquel y cobalto se realiza directamente de la muestra filtrada (Majendí 2011).

Reactivos

Mezcla de ácidos (HCl + HNO₃)

Aparatos y Utensilios

Espectrofotómetro de absorción Atómica.

Lámpara de cátodo hueco de níquel y cobalto.

Quemador de aire-acetileno, con una ranura de 10 cm. de largo

Muestreo

La muestra de ensayo debe pulverizarse hasta una granulometría no mayor de 0,74 mm, secándose por un período no menor de dos horas a una temperatura de 107 ± 3 °C.

Procedimiento

- 1) Pesar $0,5000g \pm 2 \times 10^{-4}$ de la muestra.
- 2) Transferir cuantitativamente a un vaso de precipitado de 250 ml de capacidad.

- 3) Añadir 30 mL de mezcla de ácidos (HCl + HNO₃).
- 4) Disolver en la plancha hasta que quede en el vaso de precipitado un volumen de ± 5 ml de solución.
- 5) Enfriar y transferir cuantitativamente a un frasco volumétrico de 250 ml, lave bien el vaso de precipitado, enrase con agua destilada y homogeneice.
- 6) Filtre con papel cualitativo.

Nota: La determinación de níquel y cobalto se realiza directamente de la muestra filtrada.

2.4.2 Técnica de absorción:

Para el análisis utilice solamente reactivos de grado analítico reconocido y agua grado 3, según establece la NC ISO 3696.

- Ácido clorhídrico (HCl) ρ₂₀ (1,18 a 1,19) g/mL.
- Ácido nítrico (HNO₃) ρ₂₀ (1,40 a 1,41) g/mL.
- Ácido clorhídrico (1+1): En un recipiente de 1 L que contenga 500 mL de agua, añada lentamente 500 mL de ácido clorhídrico. Homogeneizar.
- Ácido clorhídrico (HCl), solución 5 mol/L: En un frasco volumétrico de 1 L de capacidad, que contenga aproximadamente 200 mL de agua, adicione 416 mL de ácido clorhídrico. Enrasar con agua y homogeneizar.
- Mezcla de agua, ácido clorhídrico y ácido nítrico: En un frasco que contenga 1 L de agua, añada lentamente 1 L de ácido clorhídrico.
 - Enfríe y añada 0,1 L de ácido nítrico.
 - Homogeneizar durante una hora.
- Solución de ácido nítrico 5 mol/L: En un frasco volumétrico de 1 L de capacidad, que contenga aproximadamente 200 mL de agua, adicione 313 mL de ácido nítrico. Enrasar con agua y homogeneizar (Majendié.2011).

Conclusiones Parciales del Capítulo 2

1. Se realizó la toma y preparación de las muestras a través del método por punto y el cono y anillo, donde se tomó una masa inicial de 1 kg para la realización del análisis granulométrico y para la composición química de 50 g.
2. Se identificaron y definieron las menas a emplear: Camarioca Norte y Atlantic y se conformaron las mezclas para su posterior caracterización y análisis físico – químico.

CAPÍTULO 3 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se realizó un análisis de los principales resultados obtenidos sobre la bases de estudios realizados anterior a este.

3.1 Caracterización de las muestras

Todas las muestras tomadas del yacimiento CN fueron caracterizadas, se entregaron 22 muestras al laboratorio analítico del CEDINIQ para la determinación de Ni, Co, Fe, Cu, Zn, Mn y Mg por el método de absorción atómica. En la tabla 1 se expone la composición química (en %) de las muestras que se utilizaron para la conformación de la mezcla.

Tabla 3.1 Composición química de las muestras

Yacimiento	Muestra	Ni (%)	Co (%)	Fe (%)	Cu(%)	Zn (%)	Mn (%)	Mg (%)
Atlantic	Muestra 1	1,29	0,10	38,80	0,01	0,02	0,62	3,74
CN M-21	Muestra 2	0,56	0,08	22,95	0,01	0,01	0,40	5,89
CN M-24	Muestra 3	0,85	0,16	47,29	0,01	0,02	0,77	1,24

En la tabla 3.1 se muestran las zonas donde se tomaron las muestras de minerales lateríticos en las diferentes regiones de los yacimientos de mineral. Además se observa la composición química de cada una de las muestras. Para la muestra 1 la composición química se obtuvo 1, 29 % de Ni; 0, 10 % de Co y 3,74 % de Mg.

3.2 Análisis granulométrico

En la tabla 3.2 se muestran los análisis granulométricos de muestra de mineral lateríticos.

Tabla 3.2 Análisis granulométrico de muestra de mineral laterítico.

Fraciones granulométricas	% en masa que representa			
(-0,83+0,4) mm	8,02	12,77	5,86	5,73
(-0,4+0,074) mm	20,85	26,71	14,3	15,49
(-0,074) mm	71,13	60,52	79,84	78,78

De acuerdo a estudios precedentes la composición mineralógica de los materiales sedimentación se detecta una marcada diferencia entre las fracciones gruesa y fina, mientras que la fracción menor que 0,074 mm está constituida por fases minerales tradicionales conocida en la laterita como son goethita, hematita y magnetita. En la clase

granulométrica mayores que 0, 074 mm están presente los silicatos de Mg y de sílice (Rojas1994).

3.3 Definición de las muestras a mezclar.

De acuerdo a la metodología explicada en el epígrafe 2.3 del capítulo 2 se definieron las muestras de mineral a mezclar donde se obtuvieron los siguientes resultados.

En la tabla 3.3 se muestra la composición química de las mezclas preparadas, no se determinaron los contenidos de sílice y el aluminio porque actualmente estos análisis no se realizan en el laboratorio analítico del CEDINIQ.

Tabla 3.3 Composición química de las mezclas

Niveles	Mezcla	Cantidad de mineral a mezclar (kg)	Ni (%)	Co (%)	Fe (%)	Cu (%)	Zn (%)	Mn (%)	Mg (%)
Mínimo (Mg=2,7 %)	Atlantic	7,00	1,037	0,125	41,705	0,011	0,017	0,674	2,719
	CN M-21	1,00							
	CN M-24	7,00							
Medio (Mg=3,4 %)	Atlantic	8,00	1,034	0,112	38,462	0,010	0,017	0,623	3,397
	CN M-21	2,65							
	CN M-24	4,35							
Máximo (Mg=4,0 %)	Atlantic	10,0	1,076	0,100	35,951	0,010	0,017	0,582	3,994
	CN M-21	3,55							
	CN M-24	1,45							

A continuación se muestra un ejemplo de cálculo para Mg=4,0 %:

Utilizando la ecuación (6) se introducen los valores de los contenidos de los elementos de interés de cada muestra individual (Tabla 3.3), en este caso el Mg, y se realiza un proceso de tanteo variando la masa de cada muestra (M_n) a utilizar en la mezcla, tomando como masa de la mezcla (M_M) 15 kg, obteniendo como resultado el contenido del elemento en la mezcla (c_{iM}) (Tabla 3.3). Luego de obtenido el resultado se compara con el valor establecido en los niveles del diseño de experimento, donde en este caso el contenido de magnesio debe ser de 4 %. Si la diferencia es mayor o menor a 0,01, buscando más precisión en el cálculo, entonces se debe realizar el proceso nuevamente variando la masa de cada muestra, buscando acercarse más al valor establecido.

Sustituyendo valores en la ecuación 6:

$$c_{iM} = \frac{3,744 * 11,5 + 5,89 * 2,05 + 1,24 * 1,45}{15}$$

$$c_{iM} = 3,8$$

Se compara con el valor establecido la diferencia es 0,2 mayor a 0,01, se calcula de nuevo.

$$c_{iM} = \frac{3,744 * 11 + 5,89 * 2,55 + 1,24 * 1,45}{15}$$

$$c_{iM} = 3,87$$

Se compara con el valor establecido la diferencia es 0,13 mayor a 0,01 se calcula de nuevo.

$$c_{iM} = \frac{3,744 * 10,5 + 5,89 * 3,05 + 1,24 * 1,45}{15}$$

$$c_{iM} = 3,94$$

Se compara con el valor establecido la diferencia es 0,06 mayor a 0,01, se calcula de nuevo.

$$c_{iM} = \frac{3,744 * 10 + 5,89 * 3,55 + 1,24 * 1,45}{15}$$

$$c_{iM} = 4,01$$

Se compara con el valor establecido la diferencia es 0,01 igual a 0,01 se detiene el proceso de tanteo y se toma este valor como el final.

Los niveles establecidos en cuanto a la composición química de Mg y de ñas elementos de interés coinciden con investigaciones realizados por otros autores (White 2013) que se dedican al procesamiento de mineral laterítico con características similares al de nuestra región mediante la tecnología de lixiviación acida a presión con el objetivo de mejorar los índices de extracción de Ni y Co y reducir el consumo de ácido sulfúrico.

3.4 Tanteo para el cálculo del contenido de Mg

En la tabla 3.4 se muestra el contenido de Mg en la mezcla de mineral laterítico.

Tabla 3.4 Tanteo para el cálculo del contenido de Mg en la mezcla

Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Mezcla (kg)	Mg (%)
11,5	2,05	1,45	15	3,80
11,0	2,55	1,45	15	3,87
10,5	3,05	1,45	15	3,94
10,0	3,55	1,45	15	4,01

Como se muestra en la tabla anterior el contenido de Mg para la muestra 1 es de 3,80 %; para la muestra 2 y 3 de 2,05 %; 1,45 % respectivamente. La masa total de la muestra es de 15 Kg.

Se tomaron cinco muestras en el yacimiento “Camarioca Norte” Área 20, en el Banco 102. El trabajo se desarrolló con el apoyo de los especialistas en Minas y Geología de la Mina Pedro Sotro Alba (PSA). A continuación, se representan los resultados estimados del bloque de donde se tomaron las muestras:

Tabla 3.5 Composición química del bloque donde se tomaron las muestras.

Y	X	Z	Ni	Fe	Co	Mg	Mn	Si	Sed
213716.5585	699266.5515	459.5	0.68	19.32	0.055	6.05	0.46	26.63	131

El departamento de tecnología de la fábrica Pedro Sotro Alba, facilitó resultados de los análisis analíticos de diez muestras pertenecientes a los yacimientos Camarioca Norte, Zona Septentrional y Atlantic. Se analizaron 39 muestras en total, tomadas de los yacimientos de la concesión minera de la empresa Moanickel S.A., entre las mismas dos pertenecientes a la concesión de Ferroníquel Minera S.A. donde PSA está minando actualmente.

El objetivo principal es determinar el contenido de magnesio que esté por encima de los estándares que el proceso asimile sin que afecte la ley mineral. Se mezclaron 5 muestras ajustadas a las necesidades de la investigación. Se representan los parámetros de las medidas y en la tabla 3.6 y 3.7. En la tabla 3.8, los resultados de las mezclas realizadas con los contenidos de los elementos químicos:

Tabla 3.6 Muestras a usar en el mezclado evaluando los contenidos de los elementos químicos.

Código	Ni (%)	Co (%)	Fe (%)	Mn (%)	Cu (%)	Zn (%)	Mg (%)	Ni+Co (%)	Masa (g)
M-21-D -20 mesh	0.56	0.075	22.95	0.40	0.01	0.01	5.89	0.63	14,356.00
M-25-D-20 mesh	0.52	0.050	15.47	0.69	0.01	0.02	5.63	0.57	15,622.20
Atlantic PSA	1.18	0.076	31.40	0.54	3.97	0.03	3.97	1.25	12,000.00
Atlantic CILA	1.29	0.100	38.80	0.62	0.01	0.02	3.74	1.39	13,500.00

Zona.Sept.Cila	1.72	0.098	33.99	0.56	0.01	0.02	2.53	1.82	12,700.00
-----------------------	------	-------	-------	------	------	------	------	------	-----------

En la tabla 3.6 se muestra la composición de las mezclas con un contenido de Mg mayor a 4 %. Las mezclas se realizaron usando menas con altos contenidos de magnesio (Mg), éstas presentan correlación directa con los contenidos de níquel (Ni). En las menas con contenidos de Mg muy altos, el contenido de Ni tiende a bajar, tal es el caso de la Serpentina fuera de balance (SF), la cual debe tener un por ciento de participación menor que el 20 %. En las menas Limonita de Balance (LB) y Sapolita de Balance de alto Fe (SB_{AFe}), las mezclas superiores al 80 % favorecen al proceso industrial.

Tabla 3.7 Por ciento de participación de las muestras.

Código	% Participación	Mena	Descripción
M-21-D -20 mesh	10,20	SF	Serpentina fuera de balance
M-25-D-20 mesh	9,43	SF	Serpentina fuera de balance
Atlantic PSA	22,71	SB _{AFe}	Sapolita de Balance de alto Fe
Atlantic CILA	24,90	LB	Limonita de Balance
Zona.Sept.Cila	32,76	SB _{AFe}	Sapolita de Balance de alto Fe

En la tabla 3.7 se muestra el por ciento de participación de las menas empleadas para la conformación de las mezclas donde la serpentina fuera de balance es de 10,20 %; la limonita de balance es de 24,90 %; la Sapolita de Balance de alto Fe de un 22, 71 %.

A continuación se muestra la tabla 3.8 en la cual se representa la composición química de las mezclas conformadas para la investigación.

Tabla 3.8 Composición química de mezcla de mineral laterítico de las diferentes muestras entregadas al CEDINIQ.

Mezcla	Ni (%)	Co (%)	Fe (%)	Mn (%)	Cu (%)	Zn (%)	Mg (%)	Ni+Co (%)	Masa (g)	Fracción Magnética
Mínimo	0.52	0.050	15.47	0.40	0.01	0.01	2.53	0.57	5,000.00	6.62
Mediana	1.18	0.076	31.40	0.56	0.01	0.02	3.97	1.25	5,000.00	10.12
Máximo	1.72	0.100	38.80	0.69	3.97	0.03	5.89	1.82	5,000.00	13.62

Promedio	1.05	0.080	28.52	0.56	0.80	0.02	4.35	1.13	5,000.00	10.12
----------	------	-------	-------	------	------	------	------	------	----------	-------

En la tabla 3.8 se muestra la composición química de los diferentes niveles de las mezclas conformadas para el desarrollo del trabajo, donde el promedio de Ni + Co es de 1,13 % y el de Mg de 4,35 %.

En la figura 3.1 se muestra el nivel de correlación en el análisis de tanteo desarrollado.

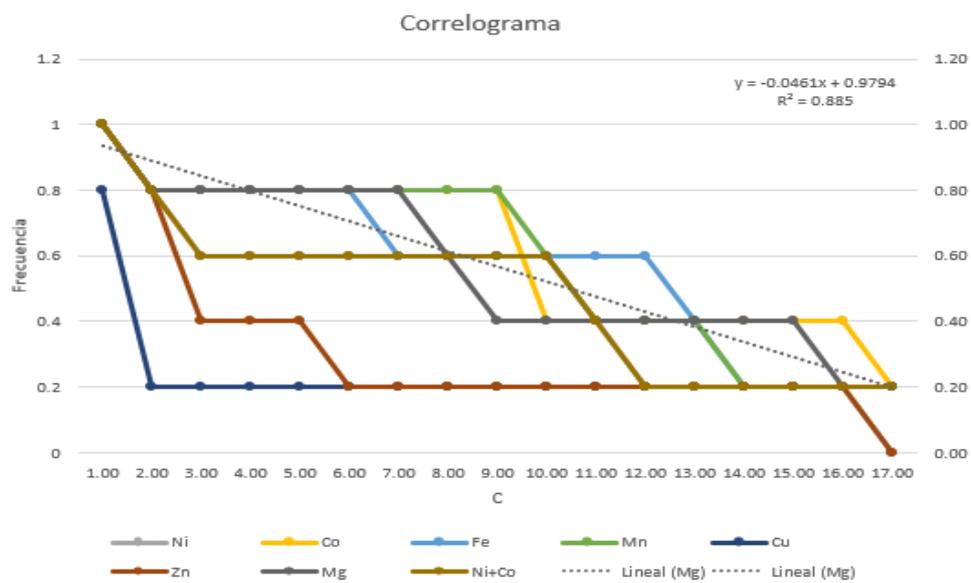


Figura 3.1 Correlograma de los elementos químicos mezclados por tipos de menas.

Como se observa en la figura 3.1 el coeficiente de correlación de los diferentes tipos de menas mezcladas sin afectar la ley mineral es del 88.5 %. Se tuvieron en cuenta siete elementos químicos (Ni, Co, Fe, Mn, Cu, Zn, Mg) para una masa estimada mayor que 12 Kg. El Zn y Cu presentan una correlación inversa, en cambio el Ni, Co, Fe, Mn presentan una correlación directa respecto al Mg.

3.5 Análisis mineralógico de las muestras de mineral laterítico

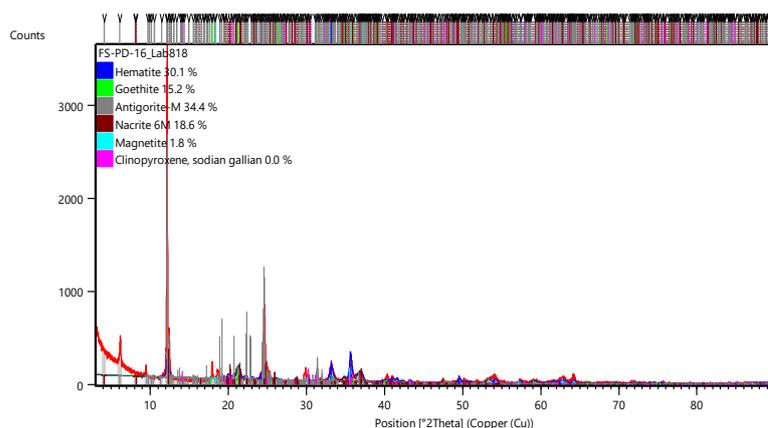


Figura 3.2 Resultados de los análisis de difracción por rayos X, 4 % de Mg.

En la figura 3.2 se muestran las principales fases mineralógicas obtenidas en las mezclas de mineral laterítico para un contenido de Mg de 4 %m donde las principales fases mineralógicas presentes son la goethita, birnesita, magnetita y antigorita.

Tabla 3.9 Composición química de las principales fases mineralógicas.

Nombre del mineral	Composición química	Cantidad de mineral en %
Goethita	FeOOH	15,2
Hematita	Fe ₂ O ₃	30,1
Nacrita	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	18,6
Antigorita	Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	34,4
Magnetita	Fe ₃ O ₄	1,8

En la tabla 3.9 se muestran la composición química de las principales fases mineralógicas donde corresponde un 34,4 % a la antigorita un mineral de magnesio; un 15,2 % al mineral de hierro goethita.

En la figura 3.3 se muestran los resultados de DRX de la muestra con un contenido de Mg de 3,4 %

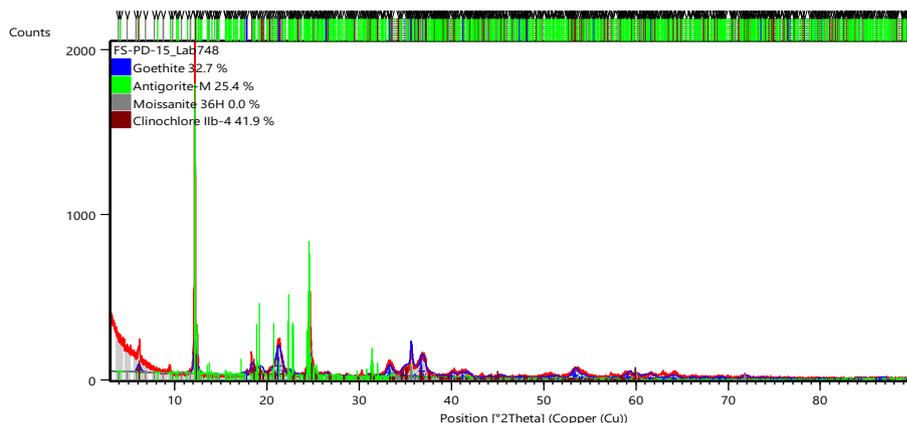


Figura 3.3 Resultados de los análisis de difracción por rayos X; 3,4 % Mg.

En la figura 3.3 se muestran las principales fases mineralógicas obtenidas en las mezclas de mineral laterítico para un contenido de Mg de 3,4 % donde las principales fases mineralógicas presentes son la goethita, antigorita y clinocloro.

Tabla 3.10 Composición química de las principales fases mineralógicas.

Nombre del mineral	Composición química	Cantidad de mineral en %
Goethita	FeOOH	32,7
Clinocloro	$(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_5\text{Al}((\text{OH})_8/\text{AlSi}_3\text{O}_{10})$	41,9
Antigorita	$\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	25,4

En la tabla 3.10 se muestran la composición química de las principales fases mineralógicas donde corresponde un 25,4 % a la antigorita un mineral de magnesio; un 32,7 % al mineral de hierro goethita.

En la figura 3.4 se muestran los resultados de DRX de la muestra con un contenido de Mg de 2,7.

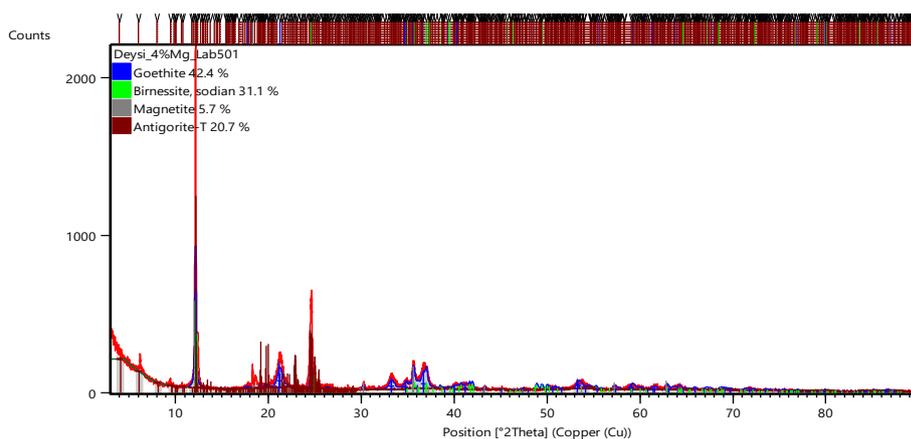


Figura 3.4 Resultados de los análisis de difracción por rayos X; 2,7 % Mg.

En la figura 3.4 se muestran las principales fases mineralógicas obtenidas en las mezclas de mineral laterítico para un contenido de Mg de 2,7 % donde las principales fases mineralógicas presentes son la goethita, birnesita, magnetita y antigorita.

Tabla 3.11 Composición química de las principales fases mineralógicas.

Nombre del mineral	Composición química	Cantidad de mineral en %
Goethita	FeOOH	42,4
Birnessita sódica	Mn ⁴⁺ , Mn ³⁺)/2O	31,1
Magnetita	Fe ₃ O ₄	5,7
Antigorita	Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	20,7

En la tabla 3.11 se muestran la composición química de las principales fases mineralógicas donde corresponde un 42,4 % a la goethita; antigorita un 20,7 %.

De forma general los análisis de difracción por rayos x corresponden a los descritos por el investigador (Rojas, 2012) donde la fase mineral principal portadora de níquel en los horizontes superiores del perfil laterítico del yacimiento Moa es la goethita que contiene 1,4 % de níquel como promedio (α FeO(OH)); como hematita (α Fe₂O₃), magnetita (γ Fe₂O₃). También existencia

Conclusiones Parciales del Capítulo 3

1. Se establecieron los niveles de porcentaje de Mg a estudiar en la investigación nivel alto 4 %, nivel medio 3,4 % y nivel bajo 2, 7 %. Tomando como referencia investigaciones precedentes relacionadas con este estudio de minerales lateríticos procesados en la tecnología de lixiviación acida a presión,
2. Se establecieron el porcentaje de participación de las menas empleadas para la conformación de las mezclas donde la serpentina fuera de balance es de 10,20 %; la limonita de balance es de 24,90 %; la Saprolita de Balance de alto Fe de un 22, 71 %.

CONCLUSIONES GENERALES

1. Se determinó de acuerdo a los análisis químicos de absorción atómica para el nivel mínimo (Mg 2,7 %) corresponde 1,037 % de Ni; 0, 125 % de Co. Para el nivel medio (Mg 3,4 %) corresponde 1,034 % de Ni; 0, 112 % de Co. Al nivel máximo (Mg 4 %) le corresponde 1,076 % de Ni; 0, 100 % de Co.
2. Se analizó según el estudio de tanteo que para los elementos Zn y Cu presentan una correlación inversa, en cambio el Ni, Co, Fe, Mn presentan una correlación directa respecto al contenido de Mg.
3. Se determinaron como principales fases mineralógicas para las mezclas con un contenido de Mg de 4 % corresponde un 34, 4 % a la antigorita un mineral de magnesio; un 15, 2 % al mineral de hierro goethita. Para mezclas con un contenido de Mg de 3,4 % corresponde un 25,4 % a la antigorita un mineral de magnesio; un 32,7 % al mineral de hierro goethita. En las mezclas con un contenido de Mg de 4 % corresponde un 34, 4 % a la antigorita un mineral de magnesio; un 15, 2 % al mineral de hierro goethita.

RECOMENDACIONES

Emplear las mezclas de mineral laterítico con los porcentajes de participación de los yacimientos escogidos y los niveles de Mg establecida en esta investigación en el proceso de lixiviación acida a presión posterior proceso de esta investigación que tributa a un proyecto

BIBLIOGRAFÍA

1. AIGLSPERGER, B *et al* 2016: Critical metals (REE, Sc, PGE) in Ni laterites from Cuba and the Dominican Republic. Ore Geology Review. Pg 23.
2. CALI, Q *et al.* 2010. Caracterización mineralógica de los perfiles laterítico tipo óxido: yacimiento punta gorda (cuba oriental). XXVI REUNIÓN (SEM) Pg 3.
3. CHALKLEY, M *et al.* 2010: Effect of magnesium on pressure leaching of Moa laterite ore. Canadian Metallurgical Quarterly. 49(3): p. 227-234.
4. CISNEROS, S.*et al.* 2016, Informe de etapa 01: Diagnóstico de la situación actual de las operaciones mineras de la PSA. SCT 300134 Diseño del sistema de operación de los Depósitos de menas lateríticas de la Empresa Moa Nickel SA-Pedro Sotro Alba (PSA), CEDINIQ: Moa. Holguín. Cuba.
5. CUETO, F. *et al* 2003: Efluente líquido (WL) de la tecnología de lixiviación ácida: alternativas de tratamiento. Minería y Geología. **19**(3-4): p. 6.
6. DALVI, A. et al. 2004:The past and the future of nickel laterites. in PDAC 2004 International Convention, Trade Show & Investors Exchange.Toronto: The prospectors and Developers Association of Canada.
7. DJOUANI, R. 2022: Advanced study on the extraction of Nickel from its ores. Oum el bouaghi university: Algeria. International Convention, Trade Show & Investors Exchange.Toronto: The prospectors and Developers Association of Canada.
8. ELIAS, M.2002: Nickel laterite deposits-geological overview, resources and exploitation. Giant ore deposits: Characteristics, genesis and exploration. CODES Special Publication, . **4**: p. 205-220.
9. GRANDA, O. 1993: Astorga-Gutiérrez, and J. Cheni, Aprovechamiento de la serpentina niquelífera en la neutralización de los licores de desecho de la empresa Pedro Soto Alba. Segunda Parte. Minería y Geología. **10**(2): p. 25-27.

10. GRANDA, O. 1992: Aprovechamiento de la serpentina niquelífera en la neutralización de los licores de desecho de la empresa Comandante Pedro Sotto Alba. *Minería y Geología*. **9**(1): p. 35-38.
11. GULTOM, T. 2020: High pressure acid leaching: a newly introduced technology in Indonesia. in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing.
12. JOHNSON, J. 2005: Optimisation of nickel extraction from laterite ores by high pressure acid leaching with addition of sodium sulphate. *Minerals engineering*, **18**(13-14), 1297-1303.
13. JOHNSON, J. 2005: Cashmore, and R. Hockridge, Optimisation of nickel extraction from laterite ores by high pressure acid leaching with addition of sodium sulphate. *Minerals engineering*. **18**(13-14): p. 1297-1303.
14. JOHNSON, J. *et al.* 2005: Pressure acid leaching of arid-region nickel laterite ore: Part IV: Effect of acid loading and additives with nontronite ores. *Hydrometallurgy*. **78**(3-4): p. 264-270.
15. KAYA, Ş. 2011: Topkaya, High pressure acid leaching of a refractory lateritic nickel ore. *Minerals engineering*. **24**(11): p. 1188-1197.
16. MAJENDIÉ, R. 2011: y otros. Caracterización física y química del perfil laterítico del yacimiento Yamanigüey para la producción de ferroníquel. V Simposio Geología, Exploración y Explotación de las Lateritas Niquelíferas. V congreso cubano de minería (MINERIA´2011)
17. PROENZA, A *et al.* 2022: Goethita, maghemita y hematites como menas de Ni y Co en lateritas de tipo óxido: lecciones aprendidas del estudio del distrito de Moa, Cuba. *Revista de la Sociedad Española de Mineralogía*. V. n.26. Pg. 2.
18. PROENZA, J. 2015: Mineralogía y Geoquímica de Ni, Co, EGP, Sc, REE en Yacimientos Lateríticos, Cuba. *Revista de la Sociedad Española de Mineralogía*. V. n.13. Pg. 2.
19. PUTZOLU, F *et al.* 2021: The Influence of the Magmatic to Postmagmatic Evolution of the Parent Rock on the Co Department in Lateritic Systems: The Example of the Santa Fé Ni-Co Deposit (Brazil). *Economic Geology*, **116**(4): p. 837-861.

20. ROJAS, A et al. 1993: Valoración Mineralógica del Material Procesado en la Empresa Ernesto Guevara. Revista Minería y Geología. V. 25n.1. Pg 22.p 3.
21. ROJAS, A et al. 1994: Influencia de la Composición del Material Limonítico de Frentes de Explotación de la industria `Pedro Sotto Alba. Revista Minería y Geología. V. 12n.1.p 7.
22. ROJAS, A et al. 2012: Identificación mineralógica de los óxidos de magnesio del yacimiento laterítico Punta Gorda, Moa, Cuba. Revista Minería y Geología. V. 28n.1. Pg 26.
23. ROJAS, A. 2001: Evidencia a favor de la Goethitas es la principal portadora de Ni en los horizontes lateríticos de la corteza ferroniquelíferas. Revista Minería y Geología. V. XVIII. Pg 11.
24. SARIOL, E.2011: Procedimiento para estabilizar la calidad del mineral que se suministra al proceso metalúrgico en la planta niquelífera Pedro Soto Alba, Moanickel SA. IV CONGRESO CUBANO DE MINERIA, V Simposio Geología, Exploración y Explotación de las Lateritas Niquelíferas Minería.
25. STANKOVIĆ, S *et al.* 2020: Review of the past, present, and future of the hydrometallurgical production of nickel and cobalt from lateritic ores. Metallurgical and Materials Engineering. 26(2): p. 199-208.
26. WANG, X. *et al.* 2017: Current studies of treating processes for nickel laterite ores. in 2nd International Conference on Mechatronics Engineering and Information Technology. Atlantis Press.
27. WHITE, D.2013: Acid leaching of nickel laterites with jarosite precipitation, in Ni-Co, Springer. p. 75-95.

