



INFLUENCIA DEL BENEFICIO DE LA MENA LATERÍTICA EN LOS PRINCIPALES INDICADORES TÉCNICO- ECONÓMICOS DE LA EMPRESA COMANDANTE ERNESTO CHE GUEVARA

TESIS EN OPCIÓN AL TÍTULO DE
INGENIERO EN METALURGIA Y
MATERIALES

AUTOR(S): René Jiménez Legrá

TUTOR(S): MSc. Hugo Javier Angulo Palma

Ing. Ángel Legrá Legrá

Moa, 2022

Aniversario 64 de la Revolución



INFLUENCIA DEL BENEFICIO DE LA MENA LATERÍTICA EN LOS PRINCIPALES INDICADORES TÉCNICO- ECONÓMICOS DE LA EMPRESA COMANDANTE ERNESTO CHE GUEVARA

TESIS EN OPCIÓN AL TÍTULO DE
INGENIERO EN METALURGIA Y
MATERIALES

AUTOR(S): Rene Jimenez Legrá

Firma _____

TUTOR(S): MSc. Hugo Javier Angulo Palma

Firma _____

Ing. Ángel Legrá Legrá

Firma _____

Moa, 2022

Aniversario 64 de la Revolución



PENSAMIENTO

PENSAMIENTO

"El ingeniero ideal es un compuesto... No es un científico, no es un matemático, no es un sociólogo ni un escritor, pero puede utilizar los conocimientos y las técnicas de cualquiera de estas disciplinas o de todas ellas para resolver problemas de ingeniería."

N. W. Dougherty



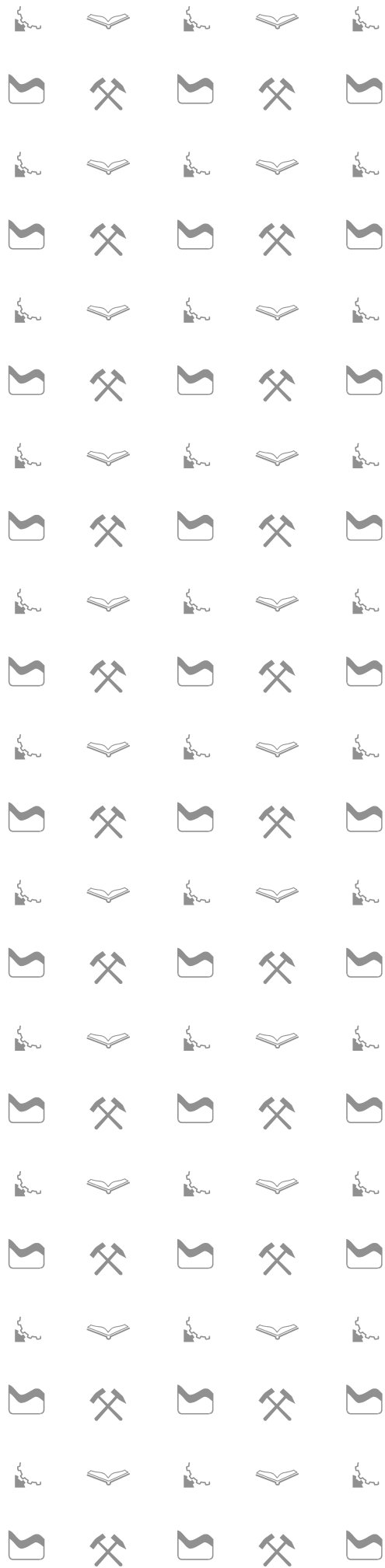
DEDICATORIA

DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado a todos aquellos que han contribuido de una forma u otra a mi formación.

- A mi esposa Yadira Rodríguez Hernández que es Lic. Enfermería, y fue la bujía de mi inspiración; animándome y brindándome su apoyo constantemente por 7 largos años para continuar con mis estudios y convertirme en un profesional.
- A mis dos hermosos hijos: Basti Daniela Jiménez Rodríguez y Ezequiel Jiménez Rodríguez, que tuvieron paciencia para no ver a papá tan seguido los fines de semana mientras me superaba y colaboraron con los quehaceres de la familia.
- A mis suegros: Dania Hernández Hernández y Gaspar Rodríguez González; que nunca me faltaron sus sabios consejos en cada etapa de esta parte de mi vida; demostrándome que no bastaba solo con el conocimiento si no eres universitario, e inspirándome la confianza suficiente para darme cuenta que si podía convertirme en un verdadero ingeniero.
- A dos grupos de compañeros de trabajo: aquellos que nunca me otorgaron siquiera un día libre para poder asistir a los encuentros y poder presentarme en un examen; pero que gracias a eso me esforcé el doble y pude terminar la carrera con un promedio mayor a 4,5; y al otro grupo que son como la familia y me apoyaron y se sacrificaron junto conmigo para nunca dejar de faltar a un encuentro injustificadamente. Todos ellos saben quiénes son los protagonistas.
- A mis compañeros de la carrera y en especial a José Carlos Marrón Mena; por ser mi colega de estudio y apoyo en todo momento, y a su bella familia por permitirnos pasar tantas horas molestando en los horarios de almuerzo y comida en nuestras casas con asuntos universitarios.
- A aquellos que ya se graduaron y a los que se graduarán después de mí.

A todos ustedes *¡muchas gracias por ayudarme a crecer!*



AGRADECIMIENTOS

AGRADECIMIENTOS

Agradezco la realización de este trabajo a:

- A mis tutores MSc. Hugo Javier Angulo Palma e Ing. Ángel Legrá Legrá por su preocupación, ayuda en la gestión y análisis de información para la realización de este trabajo.
- A todos los profesores del Departamento de Metalurgia y Química.
- A todos los que de una forma u otra han tenido que ver en la realización de este trabajo.
- A la Revolución y en especial a nuestro Comandante en Jefe Fidel Castro Ruz por permitirme realizarme hoy como profesional.



RESUMEN

RESUMEN

En esta investigación se evaluó el impacto que genera el beneficio granulométrico de la mena laterítica en los principales indicadores técnicos-económicos del proceso Caron, mediante el uso de las instalaciones y procedimientos establecidos en el Centro de Investigaciones del Níquel. En ella se demostró que la mena laterítica que se alimenta al proceso metalúrgico se caracterizó por el predominio las fases mineralógicas de los óxidos y oxi-hidróxidos de minerales de hierro, descritas granulométricamente por los modelos Rosin–Rammler y la función Swebrec con errores residuales inferiores a 1,95 y un quimismo inadecuado en las fracciones granulométricas superiores a 20 mm para su procesamiento por la tecnología carbonato-amoniaca. La evaluación de los procesos de reducción-lixiviación-sedimentación demostró que el rechazo de las fracciones superiores a 20, 10, 8 y 6,3 mm garantiza extracciones de níquel y cobalto superiores a 88 y 59% respectivamente, y velocidades de sedimentación y densificación de las pulpas lixiviadas en los rangos de 0,89-1,17 m/h y 1 701-1 842 kg/m³ respectivamente luego del tratamiento electromagnético. La valoración técnico-económica-medio ambiental mostró que las alternativas tecnológicas más viables para la ejecución de las operaciones de la empresa son el rechazo de las fracciones granulométricas superiores a 6,3 mm con un incremento de las utilidades en alrededor de 61 millones de USD/a y el rechazo de las fracciones superiores a 20 mm con un incremento del aprovechamiento integral de las menas lateríticas.

Palabras Claves: Beneficio granulométrico, mena laterítica, proceso Caron.



ABSTRACT

ABSTRACT

In this research, the impact generated by the granulometric benefit of the lateritic ore in the main technical-economic indicators of the Caron process was evaluated, through the use of the facilities and procedures established in the "Centro de Investigaciones del Niquel". It was shown that the lateritic ore fed to the metallurgical process was characterized by the predominance of the mineralogical phases of iron ore oxides and oxy-hydroxides, described granulometrically by the Rosin–Rammler models and the Swebrec function with lower residual errors at 1,95 and inadequate chemistry in granulometric fractions greater than 20 mm for processing by carbonate-ammonia technology. The evaluation of the reduction-leaching-sedimentation processes showed that the rejection of fractions greater than 20, 10, 8 and 6.3 mm guarantees nickel and cobalt extractions greater than 88 and 59%, respectively, and sedimentation and densification rates of the leached pulps in the ranges of 0,89 - 1,17 m/h and 1 701 - 1 842 kg/m³ respectively after electromagnetic treatment. The technical-economic-environmental assessment showed that the most viable technological alternatives for the execution of the company's operations are the rejection of particle size fractions greater than 6.3 mm with an increase in profits of around 61 million USD/a and the rejection of fractions greater than 20 mm with an increase in the comprehensive use of lateritic ores.

Keywords: Particle size benefit, lateritic ore, Caron process

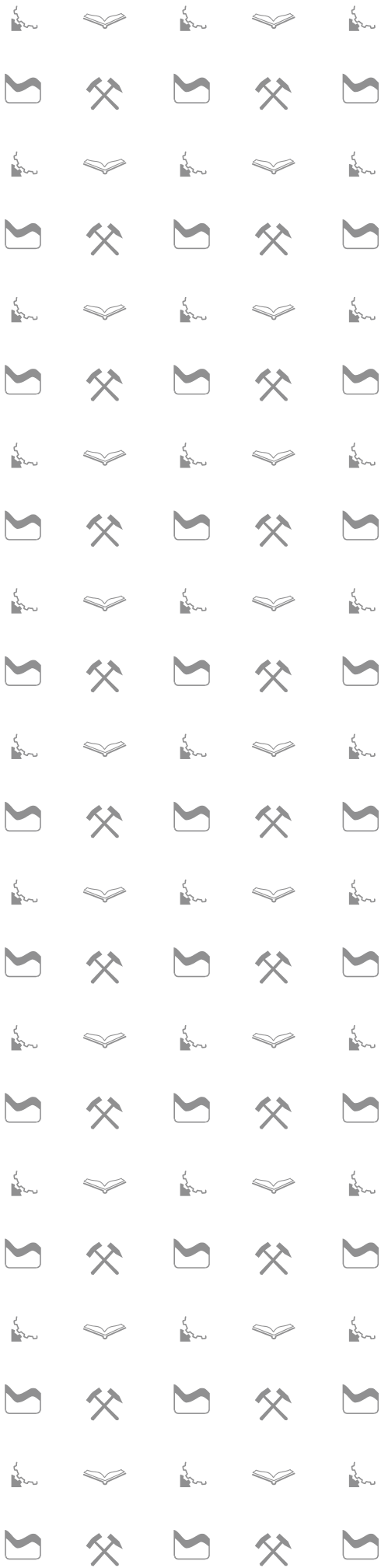


ÍNDICE

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I MARCO TEÓRICO	4
1.1 Menas lateríticas. Características químico-físicas	4
1.2 Generalidades del proceso Caron	7
1.3 Regularidades del proceso de Preparación del Mineral en la tecnología carbonato amoniacal	9
1.4 Regularidades del proceso de reducción en la tecnología carbonato amoniacal	12
1.5 Antecedentes de la investigación	18
1.6 Conclusiones parciales del Capítulo I	20
CAPÍTULO II MATERIALES Y MÉTODOS	21
2.1 Equipos y utensilios que se utilizaron	21
2.2 Materiales y soluciones.....	25
2.3 Técnicas Analíticas	26
2.4 Metodologías	28
2.5 Condiciones y parámetros de operación.....	32
2.6 Datos que se consideraron para la valoración económica.....	33
2.7 Conclusiones parciales del Capítulo II	33
CAPÍTULO III ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	35
3.1 Caracterización químico-físico-mineralógica de la mena laterítica bajo análisis..	35
3.2 Caracterización químico-físico de las muestras alimentadas al horno de botella	40
3.3 Régimen térmico de trabajo.....	42
3.4 Caracterización químico-física del mineral reducido.....	43

3.5 Caracterización química del mineral reducido/lixiviado.....	46
3.6 Velocidad de sedimentación y densificación de las pulpas lixiviadas	48
3.7 Valoración técnico-económica-medio ambiental.....	50
3.8 Conclusiones parciales del Capítulo III	52
CONCLUSIONES	53
RECOMENDACIONES	55
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56
ANEXOS	67



INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

El níquel (Ni) y el cobalto (Co) son elementos metálicos críticos que presentan actualmente una alta demanda en el mercado internacional. (Angulo, Legrá, Lamorú, Gálvez & Castillo, 2021)

El Ni se utiliza principalmente para la producción de aleaciones como es el caso de los aceros inoxidable, las aleaciones aeroespaciales y los aceros especiales; mientras que el Co es un ingrediente clave en las baterías recargables, un campo que ha crecido rápidamente como resultado de la utilización de los teléfonos móviles, los vehículos eléctricos y otros productos electrónicos de consumo. (Crundwell, Moats, Ramachandran, Robinson & Davenport, 2011)

Las principales reservas de estos metales se encuentran en las menas lateríticas y en las sulfurosas, donde la primera contiene el 70% de las reservas del Ni del mundo y constituye el 40% de la producción anual. (Ilyas, Srivastava, Kim, Ilyas, & Sattar, 2020)

Una de las principales tecnologías que es capaz de extraer el Ni y el Co a partir de las menas lateríticas es el proceso Caron, comúnmente denominado tecnología carbonato-amoniaco. (Angulo, 2018)

Específicamente en Cuba la entidad que procesa las menas lateríticas en forma de óxido y silicatos hidratados mediante la tecnología carbonato-amoniaco es la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara (ECG), la cual inicia sus operaciones a partir de 1987.

Dentro del esquema tecnológico de la ECG la Unidad Básica de Producción (UBP) Preparación de Mineral constituye una de las secciones más importantes de la cadena productiva, ya que incide directamente en la calidad del mineral que se entrega a la UBP Hornos de Reducción al garantizar una humedad menor de 4,9% y una

granulometría de 84 a 88 % menor que 74 micras. Se conoce que esta planta es una de las áreas que mayor consumo de energía presenta, razón por la cual se han realizado diferentes investigaciones con el objetivo de economizar el proceso incrementando o manteniendo sus niveles de eficiencia. (Coello, Menéndez & Laborde, 2008; Coello, 2015)

En el 2005 investigadores del Centro de Investigaciones del Níquel (CEDINIQ) "Capitán Alberto Fernández Montes de Oca" evaluaron la implementación del rechazo (*scalping* seco) a escala de Planta Piloto al preparar una muestra tecnológica con un porcentaje de participación de los yacimientos de Punta Gorda y Yagrumaje Norte de 85 y 15% respectivamente. La prueba consistió en evaluar dos opciones del beneficio del mineral que sale del Secador de Tambor Rotatorio, la primera rechazando las fracciones superiores a 10 mm y la segunda las mayores de 6,3 mm. Los resultados más satisfactorios se lograron al rechazar las fracciones superiores a 6,3 mm obteniéndose un incremento anual al procesar 3 500 000 t de mineral a horno de 2 293,34 y 175 t/a de Ni y Co respectivamente. (Basulto, Alepuz, Majendié, Legrá, García, Ramírez & Rivero, 2005)

La implementación de la propuesta del rechazo de la fracción mayor de 6,3 mm a escala industrial no pudo materializarse debido a limitaciones tecnológicas existentes en la UBP Preparación de Mineral y problemas financieros para acometer nuevas inversiones, por lo que finalmente se aplicó el beneficio del *scalping* seco de las fracciones superiores a 10 mm en las descargas de los secaderos de la ECG. (Carballo, 2014)

Actualmente la ECG alimenta menas lateríticas de cuatro yacimientos, incorporándose dos nuevos yacimientos con respecto a las evaluaciones realizadas en el 2005 (Legrá, 2015; Legrá, Angulo & Lamorú, 2022). La incorporación de dos yacimientos genera incertidumbre en la efectividad que se logra al beneficiar el mineral mediante el rechazo

de las fracciones superiores a 10 mm. Teniendo en cuenta lo antes planteado se propone la ejecución de la siguiente investigación que presenta como **problema investigativo**: Insuficiente conocimiento del efecto de la aplicación del beneficio granulométrico que se realiza a la mena laterítica, en los principales indicadores técnicos-económicos de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

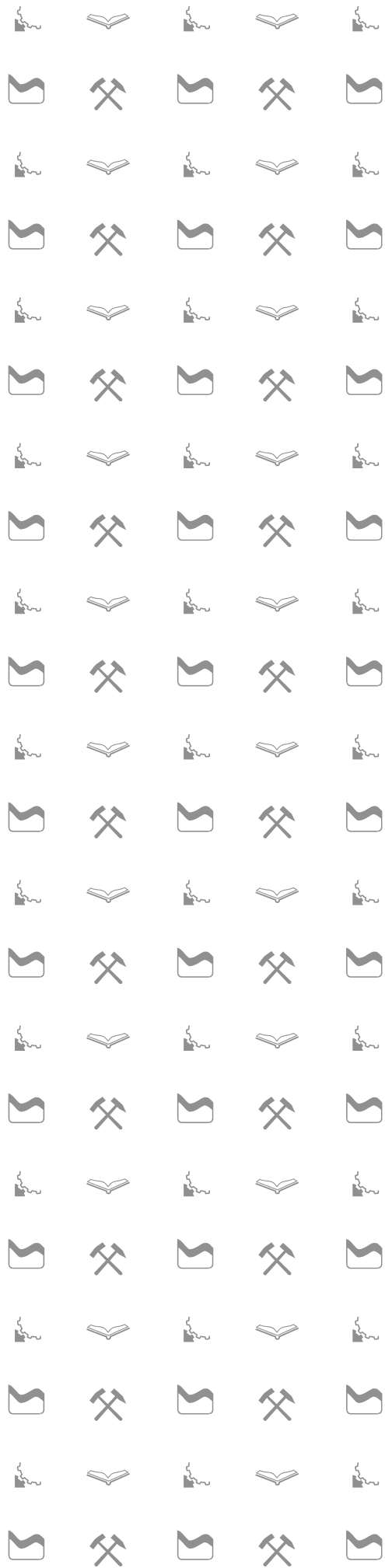
Objetivo General: Evaluar el impacto que genera el beneficio granulométrico de la mena laterítica en los principales indicadores técnicos-económicos de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

Objetivos Específicos:

1. Caracterizar químico-físico-mineralógicamente la mena laterítica que se alimenta al proceso metalúrgico de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.
2. Caracterizar químico-físicamente las muestras de mena laterítica luego de la aplicación de los beneficios granulométricos.
3. Evaluar el efecto que genera el beneficio granulométrico de la mena laterítica en los procesos de reducción, lixiviación y sedimentación de la tecnología carbonato-amoniaco.
4. Valorar desde el punto de vista técnico-económico-medio ambiental el impacto que tiene la aplicación del beneficio granulométrico a la mena laterítica en las condiciones actuales de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

Hipótesis: Si se logra establecer la relación entre el beneficio granulométrico de la mena laterítica con los principales indicadores técnico-económico, se logrará determinar el efecto en la eficiencia de los procesos de reducción, lixiviación y sedimentación de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

Objeto de Estudio: Eficiencia en la tecnología carbonato-amoniaco.



CAPÍTULO I

MARCO

TEÓRICO

CAPÍTULO I MARCO TEÓRICO

En este capítulo se muestra una panorámica de las regularidades de las menas lateríticas y del proceso Caron, a partir del énfasis de las particularidades del proceso de reducción y las principales variables que influyen en el mismo. También se presentan los antecedentes relacionados con los beneficios que se han aplicado en la sección de Secado y Molienda para incrementar las extracciones y eficiencia metalúrgica del proceso.

1.1 Menas lateríticas. Características químico-físicas

Las lateritas níquelíferas son depósitos formados por la erosión química de las rocas de peridotita bajo climas húmedos. A través de los procesos de erosión, el níquel se concentra en diferentes minerales secundarios. Pueden clasificarse como depósitos de silicatos hidratados, depósitos de silicatos de arcilla y depósitos de óxido en la base de la mineralogía del mineral. Los principales países con reservas de este tipo de menas son Nueva Caledonia, Cuba, Filipinas, Indonesia, Colombia, Australia, República Dominicana y Omán. (Al-Khribash, 2020; Fu et al., 2018; Gleeson, Butt & Elias, 2003; Ito, Otake, Maulana, Sanematsu & Sato, 2021; Putzolu, et al., 2018; Tupaz, et al., 2020)

En general pueden ser clasificadas en dos tipos de acuerdo a su contenido de hierro y magnesio: limonitas y saprolitas. La capa más superficial y la base del depósito contienen los más bajos contenidos de níquel (valores inferiores a 0,8%), la primera compuesta principalmente por hematita y la segunda se corresponde a la roca sin meteorizar. (Díaz Bello, 2016)

Las lateritas se caracterizan por presentar un complejo comportamiento químico-físico-mineralógico. Específicamente en Cuba las principales fases mineralógicas identificadas son la goethita, la hematita, la gibbsita, la maghemita, la magnetita, la

lizardita, el cuarzo, la espinela, la forsterita y la caolinita junto con esmectitas y las cloritas (Angulo, Legrá, Lamorú, Gálvez & Castillo, 2021; Domènech, Galí, Villanova-de-Benavent, Soler & Proenza, 2017; Toirac & Rojas 2021).

Se reconoce que estas complejas menas se dividen en cinco zonas del perfil: zona de ferricreta, zona de limonita, zona intermedia de transición, zona de serpentina y la zona de roca básica (Shoubao, L., B. Eng, & M. Eng., 1999).

- Zona de Ferricreta: Esta zona se encuentra en la parte superior del depósito de laterita y se caracteriza por presentar una alta concentración de hierro. Ha sufrido la mayor cantidad de desgaste y gran parte del níquel de la roca madre original se ha lixiviado. Las menas principales en esta zona son la goethita y la hematita, que ha sido recristalizada como resultado de ataques repetidos por agencias naturales. Dado que el valor del mineral no es muy alto, esta zona generalmente se descarta durante la extracción.
- Zona de Limonita: Esta zona se encuentra debajo de la zona de protección de hierro y también ha sido sometida a una extensa intemperie. Esta zona tiene característicamente un tamaño de grano fino, bajo contenido de níquel y una composición química y mineralógica uniforme. La fase mineral primaria que contiene la mayor parte del níquel es goethita. Esta zona representa la parte superior de un mineral de laterita.
- Zona Intermedia de Transición: La zona cae entre las zonas de las menas de limonita y saprolita. La existencia de esta zona se debe a la dificultad de separar las zonas de limonita y saprolita durante la extracción.
- Zona de Serpentina: Esta zona se encuentra en la parte inferior del depósito de laterita y justo encima de la roca de la plataforma, representa una etapa de meteorización intencional. Las fases minerales ricas en níquel, como la serpentinita

se encuentran en esta zona. Ambas composiciones químicas y mineralógicas en esta zona son extremadamente heterogéneas.

- Roca Básica: Esta es la roca original antes del inicio del proceso de laterización. Los minerales principales en la roca madre son serpentina y olivino. Los minerales menores son ortopiroxeno y clinopiroxeno.

Por su complejo comportamiento químico-físico-mineralógico, Oxley y Barcza (2013) reconocen que los métodos más adecuados para el tratamiento de este tipo de menas son los pirometalúrgicos e hidrometalúrgicos, donde el proceso Caron es uno de los más importantes, ver figura 1.1.

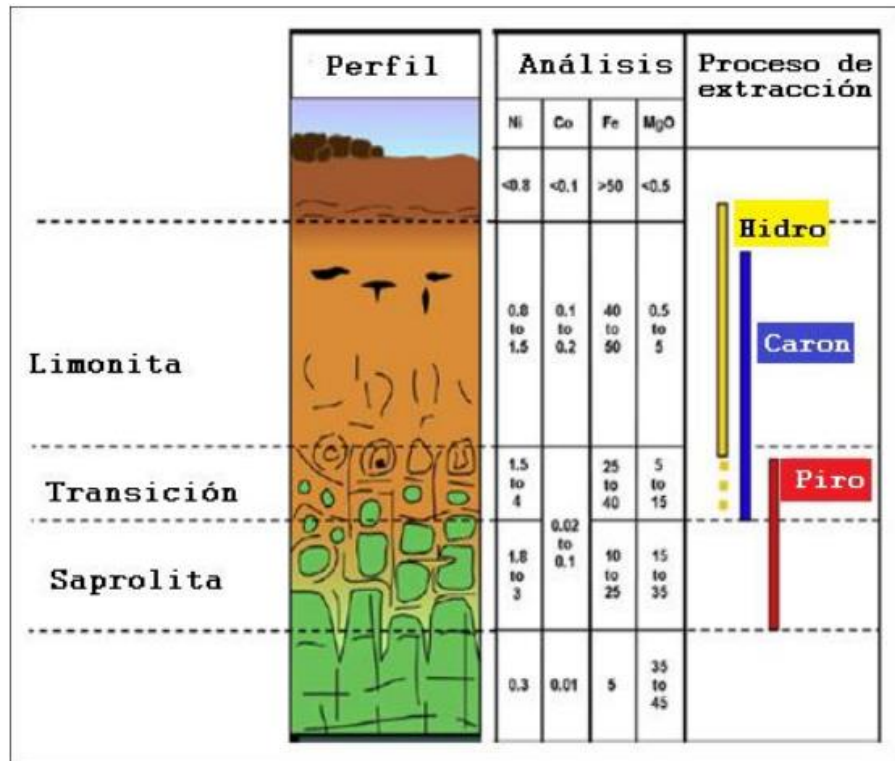


Figura 1.1. Perfil laterítico de níquel con sus opciones de procesamiento (Díaz Bello, 2016)

Un estudio realizado por Coello, Quijano, Menéndez-Aguado, Pole & Llorente (2019) demostró que los modelos granulométricos más efectivos para caracterizar las menas lateríticas cubanas antes y después del proceso de molienda son los de Rosin–Rammler (RR), Gates–Gaudin–Schuhmann (GGS) y la función Swebrec (SWEF), descritos por las expresiones matemáticas 1.1, 1.2 y 1.3 respectivamente.

$$P_{(x)} = 100 \times \left(1 - e^{-\left(\frac{x}{a}\right)^n}\right) \dots (1.1)$$

$$P_{(x)} = 100 \times \left(\frac{x}{k}\right)^m \dots (1.2)$$

$$P_{(x)} = 100 \times \left\{ \frac{1}{1 + \left[\frac{\ln\left(\frac{x_{max}}{x}\right)}{\ln\left(\frac{x_{max}}{x_{50}}\right)} \right]^b} \right\} \dots (1.3)$$

Donde:

$P_{(x)}$: pasante acumulativo para un tamaño x , %.

x : Tamaño de la partícula, mm o μm .

a : Módulo de tamaño de RR para el cual el $P(x)$ es igual a 63,2%

n y m : Módulo de distribución de RR y G-G-S respectivamente.

k : Módulo de tamaño de GGS para el cual $P_{(x)}$ es igual a 100%.

X_{max} : Tamaño de partícula límite para el cual $P_{(x)}$ es igual al 100%.

X_{50} : Tamaño de partícula media para el cual $P_{(x)}$ es igual al 50%.

b : Parámetro de ondulación de la función Swebrec.

1.2 Generalidades del proceso Caron

En 1924 la Oficina de Patentes de los Estados Unidos publica a Martinus Hendricus Caron una nueva invención que consistía en la recuperación de Ni y Co a partir de minerales lateríticos en forma de óxidos y silicatos hidratados. La nueva tecnología

propuesta por Caron se basaba en lixiviar las menas lateríticas, previamente reducidas y enfriadas sin la presencia de oxígeno, con una solución carbonato-amoniacoal con el objetivo de extraer el contenido de los metales de interés, aprovechando la gran selectividad que mostraba el licor amoniacoal. (Hendricus Caron, 1924; 1950)

La primera planta industrial que utilizó la tecnología carbonato-amoniacoal en la lixiviación de minerales lateríticos fue puesta en operación en Nicaro-Cuba en el año 1943 (Miranda, 2014).

Posteriormente a la planta de Nicaro surgieron cronológicamente las industrias de SERED (antigua Checoslovaquia en 1962), Marinduque en Filipinas (conocida como NONOC en 1974), GREENVALE en Australia (1974), TOCANTINS en Brasil (1980) y Punta Gorda en Moa-Cuba (1987). (Chang-Cardona, 2004). Actualmente solo se encuentran en operación las tres últimas.

Se recomienda utilizar el proceso Caron cuando los contenidos de Ni, Fe y MgO, en la mena laterítica, superan los porcentajes de 0,9; 35,0 y 2,0% respectivamente (Angulo et al., 2021; Díaz Bello, 2016).

Las principales secciones del proceso que presentan mayor incidencia en su eficiencia metalúrgica son: Preparación del Mineral, Hornos de Reducción y Lixiviación y Lavado. El área de Preparación del Mineral se basa en la transformación física de la mena laterítica, que consiste en eliminar parte de la humedad que posee (desde un porcentaje de humedad de 40 hasta 3% aproximadamente) y de reducirle su tamaño hasta que presente una fineza -0,074 mm para un porcentaje del 86 al 88; dejándolo en las condiciones ideales para ser introducido en una atmósfera reductora. Los Hornos de Reducción se encargan de transformar químicamente la mena laterítica, previamente secado y molido, al eliminar parte de su contenido de oxígeno (O) al ponerlo en contacto con una atmósfera rica en monóxido de carbono (CO) e hidrógeno

(H₂). La tercer sección se caracteriza por lixiviar al mineral reducido mediante la utilización de una solución de carbonato amoniacal y un flujo de aire que permiten que la mayor cantidad del contenido de hierro (Fe) presente en el mineral precipite y que la mayor cantidad del contenido de Ni y Co pase a estado de solución en el licor; obteniéndose colas empobrecidas de Ni y Co, y licores con un despreciable contenido de Fe. (Angulo, 2018)

1.3 Regularidades del proceso de Preparación del Mineral en la tecnología carbonato amoniacal

La planta Preparación de Mineral es donde se inicia el proceso productivo de la tecnología carbonato amoniacal. La mena laterítica, con una relación limonita/serpentina que oscila en los rangos de 3/1 a 6/1, se envía desde la UB-Mina hasta los Secadores de Tambos Rotatorio de la planta con el objetivo de disminuir su humedad. Para garantizar esta operación el tambor secador posee una longitud igual a 48 metros y un diámetro 4,5 metros; así como una cámara de combustión dotada de un quemador de petróleo, suministro de aire de combustión, aire de pulverización, aire secundario y gases procedente de la planta de Hornos. Los gases combustionados dentro de la cámara alcanzan una temperatura de 1 500 °C y disminuyen hasta 750 a 850 °C al ponerse en contacto con el aire en exceso que se suministra para aumentar el volumen de gases necesarios para realizar el proceso de sacado. La circulación los gases en el tambor secador se realiza en dirección paralela con el sentido de alimentación de la mena, siendo su temperatura al salir del equipo cercano a los 100 °C. El material seco se envía la sección de molienda, donde se logra la disminución granulométrica de la mena requerida por la tecnología (porcentaje entre 84 y 88% para las fracciones inferiores a 0,074 milímetros) mediante la dosificación de 120 t/h a molinos de bolas en forma de cilíndrica con 5,7 metros de longitud, 3,2 metros de diámetro y un peso de carga de bolas de 54 toneladas. El producto que el molino

entrega es transportado hacia los silos de mineral del Taller de Hornos de Reducción mediante el empleo de bombas neumáticas. (Coello et al., 2019; Mestre, 2010)

Coello, Llorente y García (2020) demostraron que el aumento de la humedad en la molienda seca de los minerales lateríticos ejerce una influencia negativa en la operación, ya que incrementa el consumo energético de los molinos de bolas. Su investigación fue destinada fundamentalmente a la determinación del efecto que tiene la introducción del petróleo aditivo junto con el mineral en los molinos. El estudio demostró que al adicionar el petróleo en la alimentación del molino se produce efectos negativos porque incide en la formación de la clase + 100 mesh, ya que incrementa su contenido en el producto molido y provoca la disminución de la productividad de estos equipos, efecto debido al alto nivel de incrustación en las paredes y sistema aerodinámico de la instalación.

Coello (2015) plantea que la molienda de las menas lateríticas se caracteriza por consumir el 21% de toda la energía demandada por la tecnología carbonato-amoniaco (figura 1.2), lo que implica que esta es una de las áreas más estudiadas con el fin de lograr disminuciones energéticas.

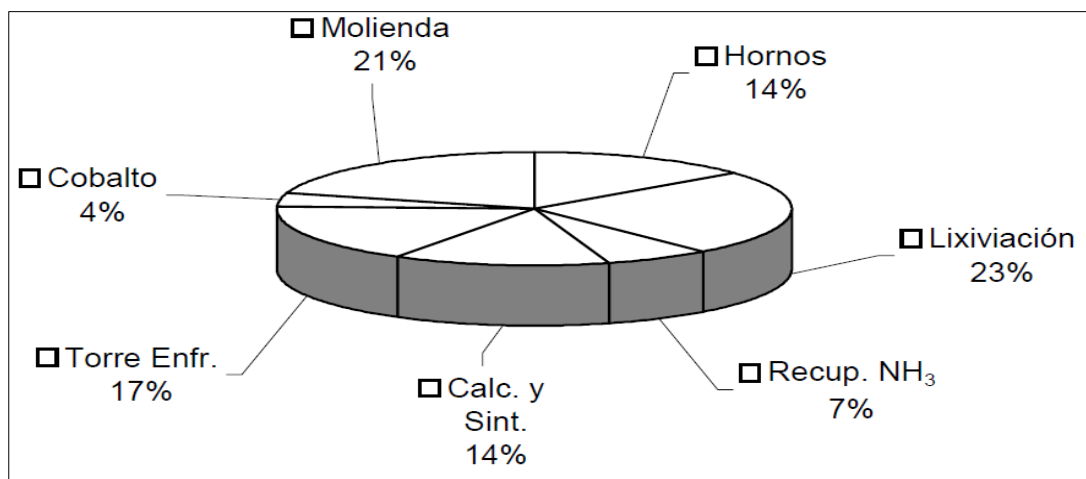


Figura 1.2. Consumo de la energía en el proceso Caron cubano.

Coello, Menéndez y Laborde (2008) determinaron el índice de Bond para diferentes mezclas de limonita-serpentina. El consumo específico de energía en molienda mostró la tendencia de incrementarse a medida que aumentó el contenido de serpentina desde 2,5 hasta 16,5 kW-h/t para un rango de 10 a 85% de saprolita.

Alisa (2012) determinó el rango de variación del índice de Bond a las menas de los yacimientos Yagrumaje Norte y Sur de la Empresa "Comandante Ernesto Che Guevara", a través de diferentes relaciones de serpentina–limonita. Como resultado fundamental obtuvo que el consumo específico de energía en los molinos de la Empresa "Comandante Ernesto Che Guevara" debe fluctuar entre 3,4 y 24,4 kW-h/t para composiciones extremas del material a moler.

Galindo (2017) realizó un estudio para determinar el índice de Bond en mezclas de mena laterítica y carbón antracita (CA). Demostró que al incrementar la adición del carbón antracita en la mezcla el consumo específico de energía aumenta desde 11,34 a 76,85 kW-h/t para un porcentaje de CA de 0 a 100% al procesar menas lateríticas con una relación limonita/serpentina de 3/1.

Ramos (2018) realizó un estudio similar al de Galindo con la diferencia de que evaluó la influencia de utilizar el carbón bituminoso (CB). Su investigación demostró que resulta más económico utilizar este reductor en el proceso Caron por concepto de ahorro de energía en el proceso de molienda, ya que al utilizar un tamiz de corte de 75 μ m el índice de Bond para el CB disminuye más de 1,86 veces.

Angulo y colaboradores determinaron el consumo específico de la mena laterítica, relación limonita/serpentina 3:1, y diferentes mezclas con el CB en el rango de 3,5 a 5,5% mediante el análisis del índice de Bond. Llegaron a la conclusión de que el incremento de carbón bituminoso en la mezcla aumenta el consumo específico de energía de molienda desde 12,80 kW-h/t (3,5% CB) hasta 20,52 kW-h/t (5,5% CB) al

utilizar un tamiz de corte de 75 μm . (Angulo, 2018; Angulo, Legrá y Coello, 2020; Angulo, Legrá y Hernández, 2021)

1.4 Regularidades del proceso de reducción en la tecnología carbonato amoniacal

La reducción del mineral mediante el uso de agentes reductores procedentes del *fuel-oil* es un fenómeno físico-químico y heterogéneo, debido a que la materia que lo compone se encuentra en diferentes estados de agregación. Las porciones físicamente distintas de un sistema heterogéneo se conocen con el nombre de fase y se encuentran separadas por límites definidos, en este caso el mineral constituye. Este proceso se realiza en los hornos tipo Herreshoff que están compuestos por un cilindro metálico en posición vertical y revestido interiormente con ladrillos de chamota o alta alúmina, protegido exteriormente por una carcasa metálica, instalaciones para la agitación, alimentación y descarga del mineral y cámaras de combustión. Están formados interiormente por 17 hogares o soleras que tienen forma de bóvedas esféricas. El horno dispone de un eje central rotatorio al cual se le articulan 68 brazos, cuatro por cada hogar. Cada brazo posee, en dependencia del hogar, de ocho a 12 paletas o dientes inclinados que, en dependencia de la zona del horno, serán de retención o de barrido para permitir la descarga de un hogar a otro en forma de zigzag. En los hogares pares la descarga se realiza a través de 30 orificios localizados equidistantes en la periferia, mientras que en los hogares impares por un orificio localizado en el centro alrededor del eje central. Al reactor se le acoplan cámaras de combustión que están equipadas con quemadores de petróleo de alta presión, que se ubican dos por cada hogar en los hogares seis, ocho, diez, doce, y una en los hogares 14 y 15. En la tabla 1.1 se presentan algunas especificaciones del horno. (Montero, 2016)

Tabla 1.1. Especificaciones del horno de reducción a escala industrial

Especificaciones	Unidad de Medida	Valores
Volumen	m ³	387
Productividad	t/h	18
Diámetro interior	m	6,048
Diámetro exterior	m	6,780
Espesor del revestimiento	m	0,342
Espesor del revestimiento del eje	m	0,075
Altura total el horno	m	23,5
Altura de la parte cilíndrica	m	18,89
Velocidad de rotación del eje central	rad/s	0,023
Temperatura de los gases a la salida	°C	350-400

Las principales variables que se controlan en el Horno de Reducción son el porcentaje de extractables de Ni y Co. El sentido físico de estas variables es cuantificar que cantidad de cada uno de esos elementos, logra pasar a estado de solución tomando como base la cantidad que entró en el mineral que se alimenta al horno. La manera en que suele determinarse es según la ecuación 1.4. (Angulo, 2018)

$$\% Met_{ext} = \left[1 - \left(\left(\frac{Met_{min\ lix}}{Met_{alim}} \right) * \left(\frac{Fe_{alim}}{Fe_{min\ lix}} \right) \right) \right] \dots (1.4)$$

Donde:

$\% Met_{ext}$ es el % de extractable del metal bajo análisis (Ni o Co).

$Met_{min\ lix}$ es el % del contenido del metal bajo análisis (Ni o Co) en el mineral luego del proceso de lixiviación

Met_{alim} es el % del contenido del elemento analizado (Ni o Co) en el mineral que se alimenta a los hornos de reducción.

Fe_{alim} es el % del contenido de hierro presente el mineral que se alimenta a los hornos de reducción.

$Fe_{min\ lix}$ es el % del contenido de hierro presente en el mineral luego del proceso de lixiviación.

Diferentes investigaciones reconocen que las características de la mena laterítica, el perfil de temperatura, las características del horno y la concentración de la atmósfera reductora constituyen las variables más importantes a controlar durante la reducción del proceso Caron (De Graaf, 1979; Pickles, Forster & Elliott, 2014; Pickles & Elliott, 2015; Pickles & Anthony, 2018a; 2018b; Angulo, Legrá, Lamorú, Gálvez & Castillo, 2021)

De Graaf (1979) reconoce que la reducción en el proceso Caron de las menas limonitas pueden alcanzar el 95% de extracción, mientras que las menas saprolíticas solo alcanzan el 65%. La investigación demostró que la composición química de la materia prima influye directamente en los resultados de extracciones del horno ya que en dependencia de esta se fijan las temperaturas y el régimen de calentamiento de la mezcla de minerales, así por ejemplo cuando la mezcla de minerales es serpentinitico el régimen de temperatura cercano a los 800 °C; mientras que para los minerales limoníticos las condiciones de reducción pueden ser menos severas ya que se reducen a temperaturas cercanas a los 550 °C.

Por este ser un proceso heterogéneo, donde se pone en contacto una fase gaseosa y una fase sólida, la granulometría del mineral influye durante el proceso de reducción. Las reacciones ocurren fundamentalmente en la interfase sólido gas y la velocidad de la reacción está determinada por la penetración del gas al interior de los poros de la partícula, por lo que si estas son pequeñas aumentara la superficie activa del mineral, será mayor el contacto entre las fases, lo que incide directamente en la conversión de la reacción. (Mestre, 2010) En la práctica se trabaja con un 84 a 88% de fracción menor de 0,074 mm (Coello et al. 2019).

El número de hogares presentes en el equipo ha sido un factor de importancia en el desarrollo de los hornos modernos. Fue detectado que el número de caídas de un hogar a otro influía directamente en los resultados de la reducción debido a que en el

momento de las caídas ocurre mayor contacto entre las fases, donde las partículas son rodeadas completamente por el gas, calentándolas a las temperaturas indicadas y reduciendo el Ni y el Co. (Guillén, 2007)

La inestabilidad en la alimentación al horno afecta seriamente el perfil de temperaturas y la operación del mismo. Todas las condiciones son fijadas para el tonelaje a procesar, por lo que si en este tiempo al horno se les suministra más o menos mineral que el fijado las temperaturas comenzarán a bajar o a subir respectivamente, y ambas situaciones son inconveniente para el proceso. (Fernández, 2008)

Rodríguez (2008) evaluó el efecto de la homogenización del mineral en las extracciones de Ni y Co del proceso de reducción. Concluyó que al aumentar la homogenización general del mineral en 28,9 grados se produce un incremento de 4,36 y 1,88% en las extracciones de Ni y Co respectivamente.

Meriño (2010) analizó la influencia de la disponibilidad de las cámaras del horno Herreshoff en función de los extractables de Ni y Co. Pudo demostrar que los hornos necesitan una disponibilidad de cámaras por encima de 85% para obtener buenos resultados en las extracciones.

Campos (2012) demostró el impacto positivo de la adición directa del petróleo aditivo en el sinfín alimentador de cada horno sobre los parámetros técnico-económicos de los hornos de reducción.

Chang, Rojas & Arce (2014) obtuvieron a escala industrial las dependencias gráficas que demuestran la influencia del contenido de los principales minerales sobre los extractables de Ni y Co.

Angulo, Terencio, Legrá y Videaux (2017) demostraron que el horno de soleras múltiples convencional presenta un comportamiento de acuerdo al modelo de flujo no

ideal, con un tiempo de residencia igual en el rango de 70 a 80 minutos; ver figura 1.3. La determinación de los extractables de níquel en los hogares pares del horno permitió mostrar sus tres zonas fundamentales: zona de calentamiento, reducción parcial y total; ver figura 1.4.

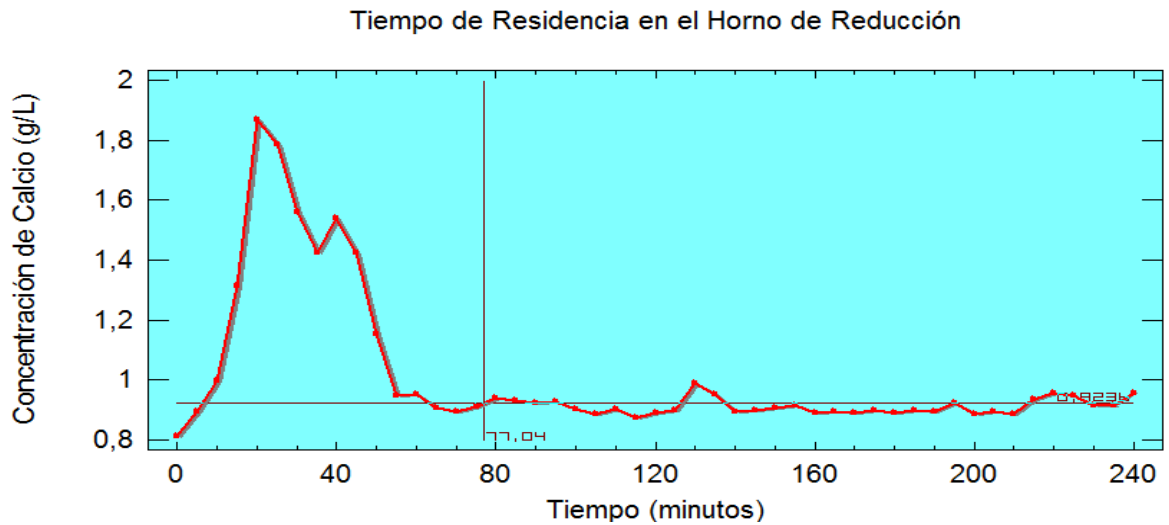


Figura 1.3 Determinación del tiempo de residencia en el horno piloto.

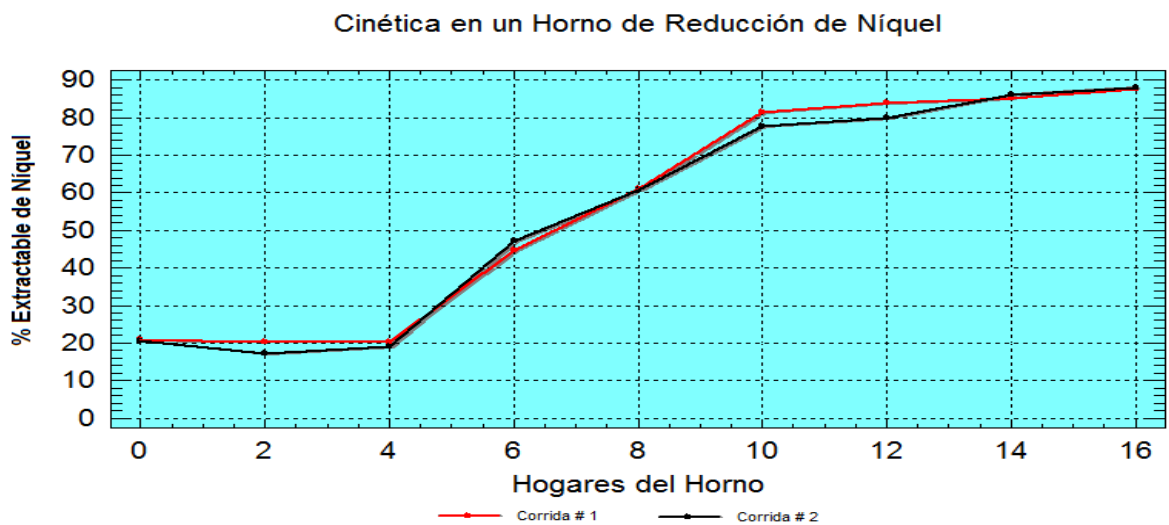


Figura 1.4 Comportamiento del extractable del níquel en el horno piloto.

Angulo, Legrá, Hernández, Lamorú & Vega (2018) determinaron el efecto de sustituir el petróleo aditivo por el carbón bituminoso en el proceso Caron. Comprobaron que al utilizar a partir de un 4% de carbón bituminoso se logra sustituir al petróleo sin que se afecten las extracciones de níquel y cobalto, con un ahorro económico de más de 23,55 millones de USD/a.

Angulo, Legrá, Hernández, Lamorú & Toro (2020) evaluaron la utilización de tres mezclas de carbón bituminoso y fuel-oil para sustituir el petróleo aditivo en la tecnología carbonato-amoniaco. Los mejores resultados de extracciones se lograron con la mezcla CB20-PT12.50, con un ahorro económico de más de 15,5 millones de USD/a.

Angulo et al. (2021) demostraron el efecto negativo de la alimentación del aire de postcombustión en el hogar seis del horno de reducción en las extracciones del Ni. Mediante el uso de un polinomio de orden dos concluyeron de que el aumento de la temperatura de H-6, en el rango de 492 a 850, provoca una disminución de 1,3% de las extracciones del Ni por cada 71 °C que se incrementa.

Legrá, Angulo & Lamorú (2022) reportan los resultados de procesar a escala piloto una muestra tecnológica conformada con los minerales de los yacimientos Camarioca Este, Yagrumaje Norte, Yagrumaje Sur y Punta Gorda, mezclados en las proporciones de mayor probabilidad en que se alimentaron al proceso metalúrgico de la Empresa "Comandante Ernesto Che Guevara" durante el año 2022. En el horno piloto evaluaron dos regímenes de reducción que se establecieron en correspondencia a las características del mineral y al régimen utilizado en los hornos industriales previo a la ejecución de la corrida al considerar estudiar la influencia del perfil térmico del horno en las extracciones de níquel y cobalto; así como las posibles incidencias en la velocidad de sedimentación y densificación de las pulpas antes y después de la floculación electromagnética en la primera y segunda etapa de lixiviación, mediante la ejecución de dos campañas. Durante el desarrollo de la primera campaña, se seleccionó el régimen

térmico alto como el de mejores resultados, en que se lograron extractables de 74,14 y 38,16% para el níquel y cobalto respectivamente, con una temperatura de trabajo en el hogar quince del horno en el rango de 770 a 780 °C y un porcentaje de petróleo aditivo de 2,5%. Al efectuar la segunda campaña, durante el proceso de reducción química se corroboraron los resultados de la campaña anterior y se obtuvieron extractables de 72,92 y 38,53% para el níquel y el cobalto respectivamente. En el último sedimentador de lavado se obtuvieron valores promedio de eficiencia del Ni de 100,10% y del Co 79,75 %. El promedio de las velocidades de sedimentación después del electroimán de primera y segunda etapa de lixiviación fue 1,07 y 0,83, con una densificación de las pulpas moderada con valores promedios de 1 772 y 1 827 g/L respectivamente.

1.5 Antecedentes de la investigación

Basulto et al. (2005) evaluaron la implementación del rechazo *scalping* seco a escala de Planta Piloto al preparar una muestra tecnológica con un porcentaje de participación de los yacimientos de Punta Gorda y Yagrumaje Norte de 85 y 15 % respectivamente. La prueba consistió en evaluar dos opciones del beneficio del mineral que sale del Secador de Tambor Rotatorio, la primera rechazando las fracciones superiores a 10 mm y la segunda las mayores de 6,3 mm. Los resultados más satisfactorios se lograron al rechazar las fracciones superiores a 6,3 mm obteniéndose un incremento anual al procesar 3 500 000 t de mineral a horno de 2 293,34 y 175 t/a de Ni y Co respectivamente, con un valor estimado de alrededor 30 millones de USD.

Mestre (2010) evaluó el impacto de la introducción del rechazo de las fracciones superiores a 10 mm a escala industrial en los procesos de Molienda y Hornos de Reducción. La separación granulométrica mediante el beneficio de las fracciones propició la disminución de los componentes nocivos al proceso (SiO₂ y MgO) lo que provocó que se produjeran mejoras en indicadores como: Incremento en la productividad de los molinos al 2,77%, la eficiencia operativa fue superior en un

10,747%, la disminución del consumo de energía en molienda en un 4,694%, disminución de alrededor de un 2% de los elementos nocivos en la muestra HR-1 de un y un efecto económico total es de 957 660,04 USD/a.

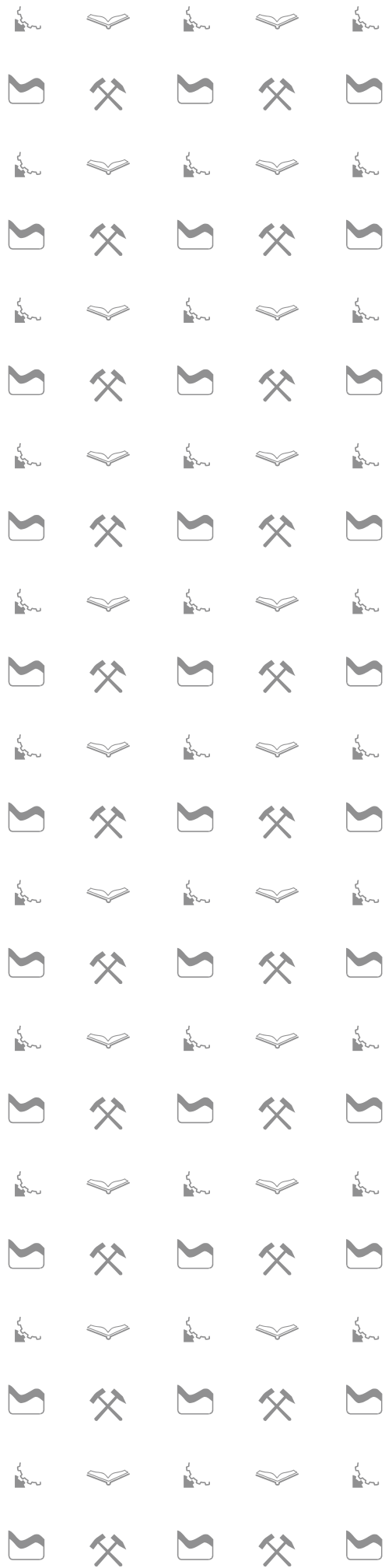
Liranza (2010) evaluó el impacto de la introducción del rechazo de las fracciones superiores a 10 mm a escala industrial en los procesos de Lixiviación y Lavado, Recuperación de Amoníaco y Calcinación. Los resultados obtenidos muestran que con la introducción del proceso de beneficio en la industria se favorecen los indicadores técnico económico en la planta de Lixiviación y Lavado, incide en la disminución del consumo de ácido sulfúrico y en los mantenimientos a equipos, tuberías y accesorios; se producen mejoras en indicadores claves del proceso como el incremento: en 85,88 g/L de la densidad de la pulpa en los sedimentadores de primera etapa y la eficiencia metalúrgica de la empresa en 1,37%, la disminución del costo de producción en más de seis millones de USD, y el crecimiento de los ingresos brutos y de las utilidades en más de 12 y 18,2 millones de USD/a respectivamente.

Arias (2013) realizó la evaluación de las extracciones de níquel y cobalto en el proceso de reducción cuando solo se muelen las partículas menores de 6.3 mm. Llegó a la conclusión de que cuando se realiza este beneficio se incrementan las extracciones de níquel y cobalto en 1,79 % y 7,11 % respectivamente al utilizar como referencia los resultados que se obtuvieron durante el rechazo de las fracciones menores de 10 mm.

Resulta importante resaltar que ninguna de las investigaciones que se citaron en este epígrafe incluyeron en su estudio mezclas de menas lateríticas con predominio del yacimiento Camarioca Este, debido a que la explotación del yacimiento por la ECG comenzó en el 2016 (Legrá, 2015).

1.6 Conclusiones parciales del Capítulo I

- Las menas lateríticas cubanas constituyen una fuente importante de extracción del níquel y el cobalto que se caracterizan por presentar un complejo comportamiento químico-físico-mineralógico, donde los modelos granulométricos más efectivos para caracterizarlas antes y después del proceso de molienda son los de Rosin–Rammler, Gates–Gaudin–Schuhmann y la función Swebrec.
- El proceso Caron constituye una de las tecnologías más importantes para procesar actualmente las menas lateríticas, siendo las secciones de Preparación del Mineral, Hornos de Reducción y Lixiviación y Lavado donde ocurren las principales transformaciones físico-químicas.
- Las principales variables que se controlan en la sección de Preparación del Mineral son la humedad y la granulometría de la mena laterítica.
- El control de los extractables de níquel y cobalto constituye la esencia del proceso de reducción en la tecnología carbonato-amoniacoal, siendo las características de la mena laterítica, el perfil de temperatura, las características del horno y la concentración de la atmósfera reductora las variables que más influyen.
- Las principales fracciones granulométricas que se han evaluado para beneficiar la mena laterítica que se alimenta al proceso Caron son los rechazos de las fracciones superiores a 10 y 6,3 mm, sin considerar la incorporación del yacimiento de Camarioca Este.



CAPÍTULO II

MATERIALES Y

MÉTODOS

CAPÍTULO II MATERIALES Y MÉTODOS

Para realizar esta investigación se utilizaron instalaciones del Centro de Investigaciones del Níquel "Capitán Alberto Fernández Montes de Oca" (CEDINIQ), donde los equipos y materiales fundamentales son los que se relacionan a continuación.

2.1 Equipos y utensilios que se utilizaron

1. Horno mufla (figura 2.1).

El horno mufla utilizado en esta investigación es de procedencia alemana, con un rango de temperatura de (30 a 1000) °C. El motor que tiene acoplado tiene una potencia de 2,8 kW, una tensión de 220 V y una frecuencia de 60 Hz. El peso del equipo es de 30 Kg, y su cámara interior posee un revestimiento por óxido de silicio. Sus principales dimensiones están tabuladas en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Dimensiones del Horno mufla

Cámara	Largo (mm)	Alto (mm)	Ancho (mm)
Interior	300	95	550
Exterior	550	350	550



Figura 2.1 Horno mufla para efectuar la reducción.

2. Reactor de Lixiviación (figura 2.2).

Los reactores utilizados para lixiviar se caracterizan por tener una capacidad de cuatro litros y una altura de 241 mm. A estos se le acopla un sistema de agitación mecánica con velocidad de rotación en el rango de 400 a 460 rpm.



Figura 2.2 Banco de reactores para lixiviar.

3. Trituradora de mandíbula (figura 2.3).

La trituradora de mandíbulas es un equipo utilizado para disminuir el tamaño de partículas. La que se usó en la investigación poseía una longitud en la quijada de 150 mm y una boca de descarga de 6,3 mm. Las principales dimensiones de la boca de alimentación son: ancho y largo de 55 y 75 mm respectivamente.



Figura 2.3 Trituradora de mandíbula.

4. Molino de Bolas (figura 2.4).

El molino de bolas se utilizó para pulverizar, hasta que alcanzase el grado de fineza establecido por el proceso de reducción del proceso Caron, la mena laterítica. Sus principales dimensiones son: diámetro y largo de 360 mm.



Figura 2.4 Molino de bolas.

5. Tamizadora por vía húmeda (figura 2.5).

La tamizadora que se utilizó en esta investigación es del modelo RX-29, tipo Rotap W.S Tyler Blvd, mentor OH4460. El motor que tiene acoplado tiene una potencia de 560 kW y presenta una protección para evitar que se introduzca el agua en su interior.



Figura 2.5 Tamizadora por vía húmeda.

6. Balanza Analítica.

La balanza analítica utilizada es de marca Radwag, con pesaje máximo de 10 Kg, error de $\pm 0,1$ gramos y corriente de 220 V.

7. Estufa eléctrica.

La estufa eléctrica utilizada en la investigación es de marca MEMMERT, logrando temperaturas en su interior que oscilan desde 30 a 250 °C.

8. Tamices de Serie Tyler.

El juego de tamiz utilizado en la investigación se presenta en la tabla 2.2.

Tabla 2.2 Juego de tamices seleccionado para el análisis granulométrico

N°	Tamaño (milímetros)	N°	Tamaño (milímetros)	N°	Tamaño (milímetros)	N°	Tamaño (milímetros)	N°	Tamaño (milímetros)
1	150,00	6	20,00	11	6,30	16	0,71	21	0,15
2	100,00	7	16,00	12	4,00	17	0,50	22	0,090
3	75,00	8	12,50	13	3,15	18	0,40	23	0,075
4	50,00	9	10,00	14	2,38	19	0,315	24	0,045
5	25,00	10	8,00	15	1,00	20	0,25	25	0,037

9. Cortador de Rifles (figura 2.6).

Consiste en un recipiente en forma de V que tiene en sus costados una serie de canales que descargan alternativamente en dos bandejas ubicadas en ambos lados del cortador. Sus funciones fundamentales son la de homogenizar y dividir.

10. Cronómetro digital.

11. Probetas de 1 000 y 2 000 mL.

12. Mortero de porcelana.



Figura 2.6 Cortador de Rifle.

2.2 Materiales y soluciones

Los principales materiales y soluciones que se utilizaron en este estudio fueron:

1. Muestra tecnológica de la mena laterítica.
2. Petróleo tecnológico.
3. Licor carbonato-amoniaco fuerte.
4. Agua destilada.

La muestra tecnológica (MT-MO) que se utilizó para ejecutar los diferentes experimentos concebidos en la investigación se correspondió a una parte de la muestra metalúrgica de los minerales que procesó la ECG en el 2021, que se conformó a partir de los yacimientos Camarioca Este, Punta Gorda, Yagrumaje Norte y Yagrumaje Sur. La MT-MO quedó constituida de aproximadamente 12 toneladas base seca de mineral, consideradas representativas y suficientes para ejecutar el programa de pruebas que se planificó.

El petróleo tecnológico que se empleó para realizar los experimentos, presentó características similares al que se utiliza en los secaderos y hornos de reducción de la ECG. En el Anexo A se muestran sus características principales.

El licor carbonato amoniaco fue suministrado por la ECG mediante un sistema de bombeo interconectado entre la Planta de Recuperación de Amoniaco y las

instalaciones de la Planta Piloto. Para utilizarlo en la lixiviación del mineral reducido de acuerdo al procedimiento de QT, se diluyó hasta que presentó una concentración de amoníaco que osciló en el rango de 80 a 85 g/L. En el Anexo A se presentan sus características principales.

Los principales materiales y soluciones que se obtuvieron fueron:

1. Mineral reducido.
2. Pulpa carbonato amoniacal

El mineral reducido presenta una coloración negruzca. Es muy tóxico, abrasivo y pegajoso, que al ponerse en contacto con el aire toma una coloración rojiza indicando que se ha reoxidado, siendo su densidad cercana a 4,0 t/m³.

La pulpa amoniacal formada al mezclar el mineral reducido y el licor carbonato amoniacal tiene una relación líquido/sólido de 6/1 aproximadamente. Esta tiene una temperatura que puede oscilar entre (33 a 38) °C con un porcentaje de sólidos de aproximadamente 14 y una densidad que oscila entre 1,13 y 1,14 t/m³.

2.3 Técnicas Analíticas

Las técnicas analíticas que se emplearon durante la ejecución del estudio fueron la espectrometría de absorción atómica (EAA) y la difracción de rayos X (DRX).

La EAA se utilizó con el objetivo de determinar el contenido de los elementos químicos presentes en las muestras, ya que permite determinar con una alta confiabilidad, los contenidos de los siguientes elementos: hierro, níquel, cobalto, magnesio, y otros metales. Sus componentes principales son: la fuente de radiación, el atomizador, el monocromador y el detector. La base de esta técnica consiste en pasar el elemento a analizar a su forma atómica en estado libre por medio de la llama, a través de la cual se hace incidir una radiación continua, que es característica para cada elemento. A través

de un dispositivo adecuado se realiza la selección de la radiación y la medida de la variación de la intensidad de la luz, relacionada directamente con la concentración del elemento. En la figura 2.7 se muestra el equipo de forma integral.

La DRX se utilizó para determinar las principales fases mineralógicas presentes en la mena laterítica *in situ*. Los difractogramas de DRX se realizaron por el método de polvo en un Difractómetro X'PERT³ de PANalytical con las siguientes condiciones: Barrido tipo Gonio en $[\theta]$ registro angular desde 4.0042 hasta 79.9962 con distancia de paso en 2θ de 0.0080 con radiación de Cu y filtro de níquel. La diferencia de potencial es de 40 kV y corriente de 30 mA. La calibración del equipo se chequea con patrón externo de silicio. El análisis cualitativo de las fases se realiza con la utilización del programa HighScore de Panalytical. En la figura 2.8 se muestra el equipo de forma integral.



Figura 2.7 Equipo de Espectrometría de Absorción Atómica.



Figura 2.8 Equipo de Difracción de Rayos X.

2.4 Metodologías

Las metodologías que se utilizaron durante la investigación fueron:

1. Metodología para la toma y preparación de la mena laterítica.
2. Metodología para la reducción de la mena laterítica en el horno de botella a escala de laboratorio.
3. Metodología para lixiviar y lavar el mineral reducido a escala de laboratorio.
4. Metodología para la determinación de la velocidad de sedimentación de la primera etapa de lixiviación.

2.4.1 Metodología para la toma y preparación de la mena laterítica

A partir de la muestra tecnológica de la mena laterítica, se conformó una pila de aproximadamente 22 m de largo por 3,5 de alto, para la que se inició el proceso de prehomogenización empleando el método de formación de pilas cónicas sucesivas con

la utilización de un cargador frontal marca VOLVO modelo L-120. El proceso de prehomogenización se realizó en cinco pasos, aprovechándose en cada uno, el proceso de segregación que experimenta los tamaños mayores de partículas, con el objetivo de separar las rocas mayores de 150 mm. Luego del proceso de prehomogenización, se tomaron con un cargador frontal muestras puntuales totalmente aleatorias de la pila de mineral prehomogenizado, conformándose una muestra compósito de 12 toneladas base seca aproximadamente. La muestra compósito se alimentó a la sección de Preparación de Mineral de la Planta Piloto del CEDINIQ, con el objetivo de realizar la toma de la muestra representativa de la mena laterítica (alrededor de 250-300 kg) en flujo dinámico. A la muestra que se toma en flujo dinámico de 250 a 300 kg se le realizó una caracterización granulométrica, luego del proceso de secado, con el objetivo de determinar las características químicas en cada una de las fracciones de interés. Posterior a la toma y caracterización de la muestra, se conformaron muestras metalúrgicas mediante el rechazo de algunas fracciones granulométricas en correspondencia con los resultados del análisis químico por fracciones.

2.4.2 Metodología para la reducción de la mena laterítica en el horno de botellas

Para realizar el proceso de reducción de la mena laterítica se utilizó un horno de botellas a escala de laboratorio, ver figura 2.1, mediante la utilización del Procedimiento Específico UPI-PE-16 (Legrá, 2018). Los principales pasos a seguir se describen a continuación:

1. Moler la mena laterítica que se utilizaran para realizar los experimentos, resultante de la metodología 2.4.1, hasta que presenten una granulometría de 0,074 mm para un porcentaje del 84-88 % de todo el material.
2. Introducir y mezclar 145,0 g de la mezcla a reducir, según las proporciones establecidas, con 2,9 g de petróleo (combustible que simula el efecto de las

cámaras en los hornos de reducción) en las botellas del horno de reducción a escala de banco.

3. Conectar la mufla y prefijar la temperatura a 250 °C.
4. Introducir las dos botellas con la mezcla descrita en el paso 2 en la estufa con temperatura de 250 °C durante cinco minutos, comenzando a poner en operación en este momento el mecanismo motriz, tomando las lecturas de temperaturas a intervalos de 5 minutos.
5. Reducir la mena laterítica de acuerdo a la estructura del programa prefijado en el controlador de temperatura.
6. Apagar el horno y sacar las botellas de la mufla añadiendo argón a razón de 5 L/minutos, para llevar a cabo el proceso de desacople de las botellas de la mufla y el mecanismo de transmisión.
7. Sacar las botellas de la mufla e introducir en la cesta durante 20 minutos sin interrumpir la adición del gas inerte.
8. Añadir agua corriente para su enfriamiento durante 2 horas.

2.4.3 Metodología para lixiviar y lavar el mineral reducido

El proceso de lixiviación y lavado del mineral reducido se realizó siguiendo las indicaciones descritas en la Instrucción Puesto de Trabajo UPI-IPT-10 (Legrá, 2018). Los principales pasos a seguir se presentan a continuación:

1. Tomar un recipiente de 250 mL, purgándolo con Argón.
2. Añadir al recipiente purgado 200 mL de una solución carbonato amoniacal con una concentración de amoníaco en el rango de 80 a 85 g/L.
3. Pesar una masa de mineral resultante de la metodología 2.4.2 de 70 a 80 g para añadirla al recipiente de 250 mL, dejando suficiente muestra de mineral reducido para realizar los análisis de metálicos.

4. Introducir la mezcla formada en el paso 3 al reactor de lixiviación (figura 2.2), agregándole el resto del licor con concentración de amoníaco de 80 a 85 g/L hasta llevarlo a una relación líquido/sólido de 10 a 1.
5. Agitar la mezcla con relación líquido/sólido de 10 a 1 durante dos horas.
6. Filtrar al vacío la mezcla agitada con relación líquido/sólido de 10 a 1, lavándola con 200 mL de soluciones carbonato amoniacales al 7 y 3 % y con agua destilada respectivamente.
7. Secar el sólido filtrado en la estufa a 150 °C durante un tiempo de dos horas.
8. Enfriar el sólido seco hasta que alcance la temperatura ambiente.
9. Triturar el sólido a temperatura ambiente hasta que toda la muestra presente una granulometría menor de 0,150 mm.
10. Envasar en cartuchos previamente codificados la muestra tamizada.
11. Determinar las extracciones de los elementos de interés a partir de la expresión 1.4.

2.4.4 Metodología para determinar la velocidad de sedimentación y densificación de la pulpa

Para la determinación de la velocidad de sedimentación con y sin la aplicación del tratamiento electromagnético su utilizo el método propuesto por Talmadge y Fitch (Alak, 2017).

En el caso de la densificación de la pulpa de la primera etapa de lixiviación se siguieron los pasos descritos en la Instrucción Puesto de Trabajo UPI-IPT-24 (Legrá, 2018), que a continuación se describen:

1. Determinar el peso de una probeta graduada con capacidad de dos litros.
2. Tomar y agitar moderadamente la muestra de pulpa en el fondo del sedimentador de la primera etapa de lixiviación.
3. Adicionar un volumen de dos litro de pulpa en la probeta.

2.6 Datos que se consideraron para la valoración económica

Para realizar la estimación económica se utilizaron los datos que se presentan a continuación:

- Precio del níquel: 26 911,33 USD/t (Suriz, 2022).
- Precio del cobalto: 79 133,93 USD/t (Suriz, 2022).
- Hornos en operación 22.
- Alimentación de mineral por horno 18 t/h.
- Tonelaje que procesará la planta de Hornos de Reducción en la ECG (t_{HR}): 3 037 478 t/a.
- Eficiencia Metalúrgica de la ECG (ξ): 70 %.
- % Ley de Ni o Co (% ley_(Ni o Co)): depende del valor obtenido en el experimento.
- % Extractables de Ni o Co (% Ext_(Ni o Co)): depende del valor obtenido en el experimento.
- Toneladas de (Ni o Co) alimentadas: $t_{(Ni\ o\ Co)al} = \frac{\% (ley_{(Ni\ o\ Co)})}{100} * t_{HR}$
- Toneladas de (Ni o Co) producidas: $t_{(Ni\ o\ Co)p} = \frac{\% (Ext_{(Ni\ o\ Co)})}{100} * t_{(Ni\ o\ Co)al} * \xi$

2.7 Conclusiones parciales del Capítulo II

- Los principales equipos y utensilios que se utilizaron en el estudio fueron el horno mufla, los reactores de lixiviación, la trituradora de mandíbula, el molino de bolas, la tamizadora con el juego de tamices de la serie Tyler, la balanza analítica, la estufa eléctrica, el cortador de rifles, el cronómetro digital, las probetas de 1 000 y 2 000 mL y el mortero de porcelana.
- Para realizar la investigación los materiales y soluciones imprescindibles que se utilizaron y obtuvieron fueron la mena laterítica, el petróleo tecnológico, el licor carbonato-amoniaco fuerte, el agua destilada la mena reducida y la pulpa amoniaco.

- Las técnicas analíticas que se emplearon fueron la espectrometría de absorción atómica (EAA) y la difracción de rayos X (DRX).
- Las metodologías propuestas en la investigación garantizan la representatividad y validez de los resultados.



CAPÍTULO III ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CAPÍTULO III ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En el presente capítulo se presentan y analizan los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio, auxiliándose de tablas y figuras, realizadas con la ayuda del software STATGRAPHICS Centurión XV y el Microsoft Excel, que muestran de un modo práctico los resultados.

3.1 Caracterización químico-físico-mineralógica de la mena laterítica bajo análisis

Las principales características químicas por fracciones de la muestra tecnológica *in situ* que se utilizó en la investigación se presentan la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Características químicas de la muestra tecnológica bajo análisis

Fracción (mm)	Muestra Mineral In Situ										
	Masa (gramos)	%	Acumulativo %		Ni	Co	Fe	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	Cr
			Ret.	Cer.							
150,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,459	0,013	6,23	28,17	31,22	1,41	0,298
100,00	1 219,30	0,50	0,50	100,00	1,340	0,013	6,060	27,31	30,31	0,951	0,258
75,00	3 478,40	1,42	1,92	99,50	0,736	0,012	18,57	21,66	22,36	2,91	0,541
50,00	15 553,30	6,35	8,27	98,08	0,597	0,026	26,06	16,02	15,07	4,85	0,815
25,00	2 684,80	1,10	9,36	91,73	0,846	0,032	24,18	19,38	9,87	4,26	0,617
20,00	1 802,40	0,74	10,10	90,64	0,825	0,057	28,72	15,96	12,15	6,06	0,858
16,00	2 280,20	0,93	11,03	89,90	0,991	0,071	33,15	10,47	8,21	7,42	1,00
12,50	3 926,30	1,60	12,63	88,97	1,05	0,085	35,20	9,25	7,41	7,65	1,19
10,00	5 057,9	2,06	14,69	87,37	1,07	0,09	36,78	7,37	5,21	7,94	1,17
8,00	659,29	0,27	14,96	85,31	0,92	0,096	36,95	10,92	3,90	7,525	1,495
6,30	3 878,54	1,58	16,55	85,04	0,93	0,082	36,20	10,10	3,37	7,695	1,51
4,00	6 891,97	2,81	19,36	83,45	1,17	0,095	37,72	9,76	2,75	7,805	1,51
3,15	5 020,23	2,05	21,41	80,64	0,99	0,108	37,49	9,54	2,67	7,87	1,535
2,38	7 112,59	2,90	24,31	78,59	1,00	0,108	37,64	9,44	2,71	7,845	1,55
1,00	8 415,08	3,43	27,75	75,69	0,94	0,149	35,79	8,95	3,08	7,87	1,57
0,71	6 248,12	2,55	30,30	72,25	1,04	0,161	36,17	8,64	2,64	7,8	1,67
0,50	5 249,86	2,14	32,44	69,70	1,11	0,193	37,14	8,59	2,24	7,76	1,705
0,40	4 303,06	1,76	34,20	67,56	1,09	0,211	34,76	8,67	2,31	7,8	1,62
0,315	5 583,04	2,28	36,48	65,80	1,03	0,212	35,28	8,96	2,44	7,82	1,6
0,250	3 922,92	1,60	38,08	63,52	1,09	0,189	34,69	8,76	2,43	7,69	1,68
0,150	7 367,94	3,01	41,08	61,92	1,19	0,177	35,21	9,01	2,24	7,705	1,705
0,090	8 436,95	3,44	44,53	58,92	1,21	0,248	36,10	10,62	2,13	7,35	1,6
0,075	1 667,84	0,68	45,21	55,47	1,27	0,224	36,73	9,29	2,79	7,435	1,64
0,045	8 945,73	3,65	48,86	54,79	1,24	0,176	38,73	10,25	1,88	7,11	1,715
0,037	3 577,00	1,46	50,31	51,15	1,25	0,085	41,02	9,17	1,49	7,495	1,565
-0,037	121 717,24	49,69		49,69	1,15	0,090	35,42	8,22	1,23	7,351	1,672
Total	245 000,00	100,00	Masa Mineral (gramos)		2 650	267	85 089	23 573	8 372	17 595	3 753

De los resultados mostrados en la tabla 3.1 se puede inferir que las fracciones de tamaño superiores a 20 mm no poseen características químicas adecuadas para ser alimentadas al proceso Caron ya que presentan altos valores de los elementos nocivos (SiO_2 y MgO promedios de 21,42 y 20,16% respectivamente) y bajos valores de los elementos útiles (Ni, Co y Fe promedios de 0,83, 0,026 y 18,30% respectivamente); razón que justificó la realización de los beneficios del rechazo de las fracciones superiores a 20 (R-20), diez (R-10), ocho (R-8) y 6,3 mm (R-6). Resulta importante significar que para todas las muestras que se evaluaron el contenido de Ni en el mineral que se rechazó estuvo por debajo del punto de corte (0,9%) establecido en la ECG.

La regularidad que presentaron los elementos Ni, Co y Fe fue de incrementarse a medida que disminuyó el tamaño de las fracciones, contrariamente a lo que ocurre con el SiO_2 y el MgO que se incrementaron con el aumento del grosor de las partículas; comportamiento lógico y característico de las menas lateríticas cubanas de acuerdo a los resultados que lograron Shoubao et al., 1999 y Oxley & Barcza, 2013. El Al_2O_3 y el Cr en las fracciones superiores a 20 mm mostraron sus contenidos más bajos, mientras que en las inferiores a 20 mm los valores prácticamente permanecieron constantes en las diferentes fracciones, promediando un porcentaje de 7,65 y 1,54% respectivamente.

A partir de los resultados del porcentaje del Retenido Acumulativo (% Ret.) en función del tamaño de las fracciones que se reportan en la tabla 3.1 se analizó el comportamiento granulométrico que presenta la muestra *in situ*, ver las figuras 3.1 y 3.2.

La forma cóncava que presenta la curva característica del comportamiento granulométrico que presenta la muestra tecnológica, ver figura 3.1, permite afirmar que existe un predominio de los granos finos de acuerdo a las tendencias explicadas por Namindo (2015).

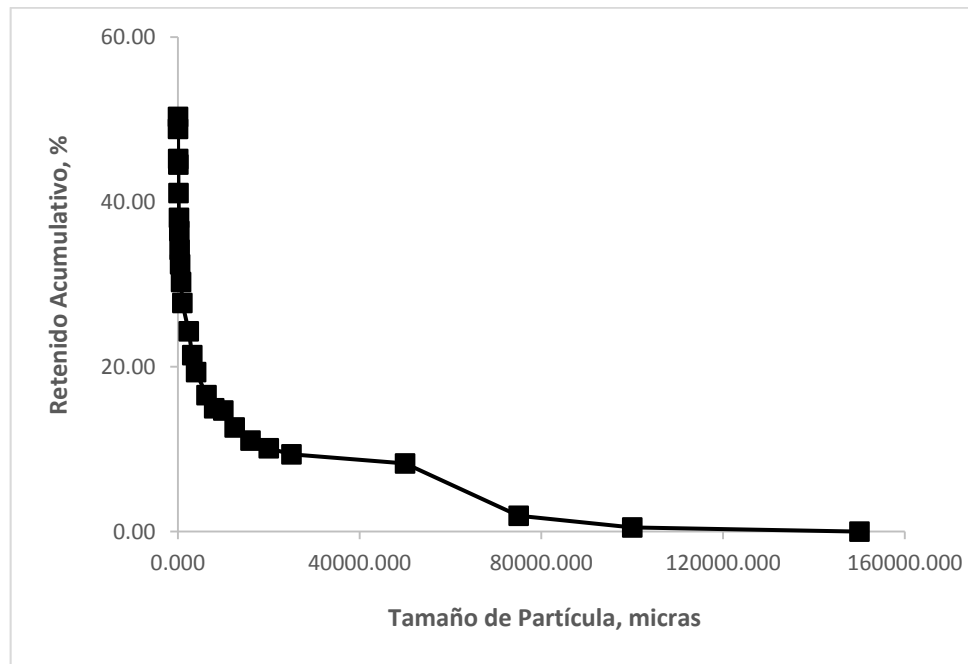


Figura 3.1. Comportamiento granulométrico de la muestra tecnológica

En la figura 3.2 se compara la determinación del Pasante Acumulativo (% P_x exp.) de la muestra tecnológica y los que se determinaron mediante la utilización de los modelos granulométricos de Gates–Gaudin–Schuhmann (GGs), Rosin–Rammler (RR) y la función Swebrec (SWEF).

El modelo granulométrico GGS, ver expresión 3.1, se caracterizó por ser el menos preciso con un coeficiente de determinación de 0,9806 y un error residual de 4.86; mientras que los resultados más exactos se lograron con los modelos granulométricos RR y SWEF, ver expresiones 3.2 y 3.3 respectivamente, con coeficientes de determinación superiores a 0,9850 y errores residuales inferiores a 1,95.

$$\%P_{(x)} = 100 \times \left(\frac{x}{150\,000} \right)^{0,084} \dots 3.1$$

$$\%P_{(x)} = 100 \times \left(1 - e^{-\left[\frac{x}{278,33} \right]^{0,1865}} \right) \dots 3.2$$

$$\%P(x) = 100 \times \left\{ \frac{1}{1 + \left[\frac{\ln\left(\frac{150\,000}{x}\right)}{\ln\left(\frac{150\,000}{38,0189}\right)} \right]^{1,5692}} \right\} \dots 3.3$$

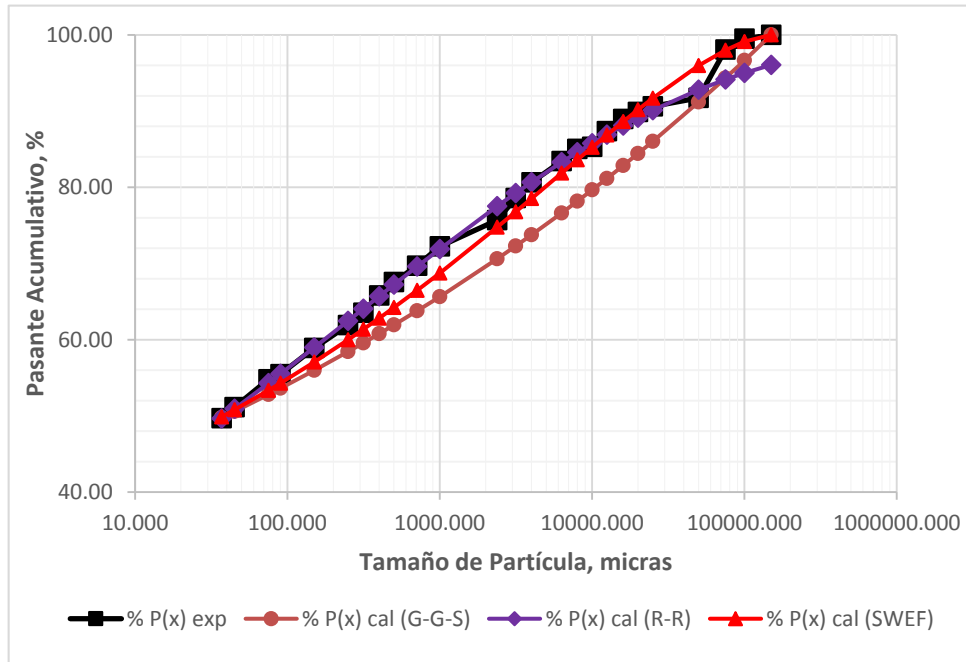


Figura 3.2. Comparación de los modelos granulométricos

Estos resultados coinciden con los que obtuvieron Coello et al. (2019) al evaluar el uso de la función SWEF en la mena laterítica cubana perteneciente al yacimiento de Punta Gorda.

Las principales fases mineralógicas que se identificaron en la muestra *in situ* se presentan en la figura 3.3.

El difractograma muestra compuestos característicos de muestras lateríticas con predominio de los óxidos y oxi-hidróxidos de minerales de hierro y aluminio (goethita, hematita, maghemita y gibbsita); mezclados con reflejos intensos de serpentinas en

forma de lizarditas, el cuarzo correspondiente fundamentalmente a la zona de transición y minerales arcillosos en forma de talco (hidróxido de silicato de magnesio) y cloritas (clinocloro).

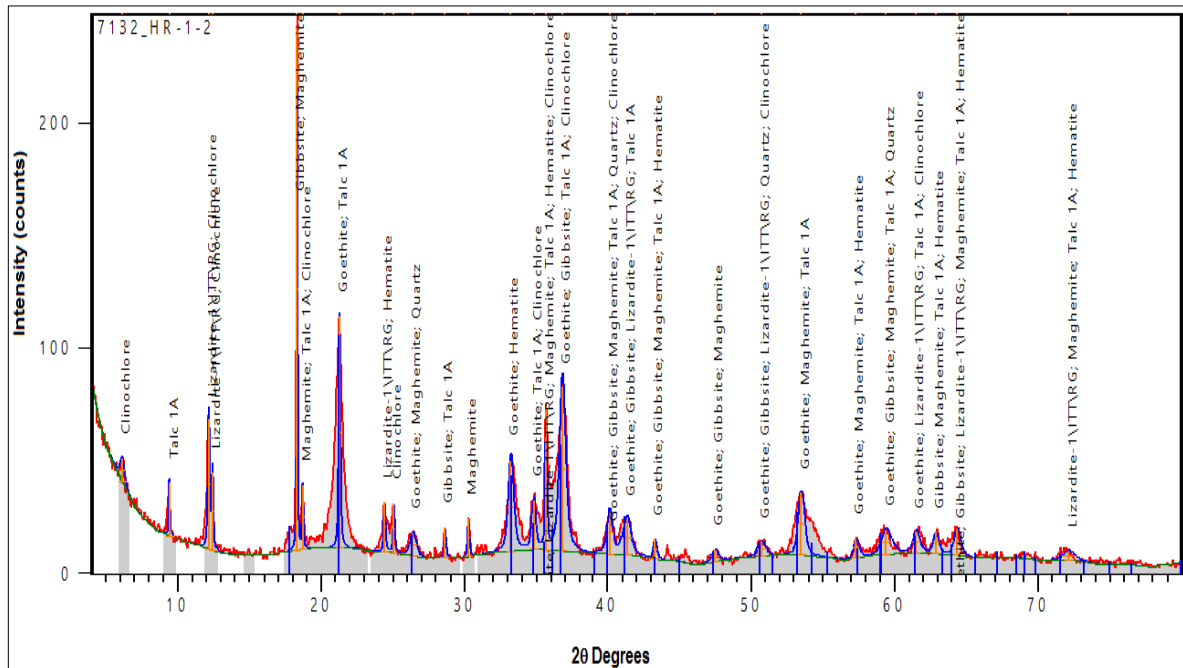


Figura 3.3. Fases mineralógicas identificadas en la muestra *in situ*.

A juzgar por el difractograma de la mena tecnológica y la clasificación propuesta por Gleeson, Butt y Elias (2003); se puede concluir que la muestra presentó una compleja mineralogía con considerable presencia de menas limoníticas y saprolíticas, minerales de las zonas de transición y escombros, mezclados con menas arcillosas.

Un estudio realizado por diferentes investigadores reconoce que en los yacimientos lateríticos cubanos están presentes las fases mineralógicas identificadas en este estudio. (Domènech et al., 2017)

Angulo, Legrá, Lamorú, Gálvez y Castillo (2021) reportaron el comportamiento mineralógico de una muestra tecnológica evaluada en la Planta Piloto del Centro de

Investigaciones del Níquel. La investigación corroboró en la mena de alimentación el predominio de minerales de hierro en la forma de óxidos y oxi-hidróxidos (goethita, maghemita y gibbsita), así como los elementos de silicio y magnesio expresado fundamentalmente en la fase de lizardita y el cuarzo. La principal diferencia que se mostró fue que no se identificaron las fases mineralógicas correspondientes a los escombros (hematita) y a los minerales arcillosos (talco y cloritas).

3.2 Caracterización químico-físico de las muestras alimentadas al horno de botella

En la tabla 3.2 se presentan los resultados promedios de la composición química del mineral alimentado a la ECG según la muestra SM-2 (R-150), y la composición química y granulométrica del mineral que se suministró al horno de botellas para las diferentes muestras conformadas al rechazar del mineral referido las fracciones R-20, R-10, R-8 y R-6.

Tabla 3.2. Características del mineral alimentado a ECG y al horno de botellas

Código	Composición química, %						ρ (t/m ³)	FM (%)	Granulometría, mm			
	Ni	Co	Fe	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃			0.150	0.074	-0.074	-0.044
R-150	1,090	0,093	28,000	18,473	10,877	4,567	-	-	-	-	-	-
R-20	1,153	0,117	40,127	9,553	2,613	7,710	3,710	21,023	7,190	7,643	85,210	78,333
R-10	1,170	0,115	39,883	8,975	4,249	7,715	3,520	22,715	5,022	9,833	84,754	77,224
R-8	1,173	0,121	40,090	9,567	2,275	7,813	4,050	30,805	5,510	10,083	84,170	76,660
R-6	1,237	0,121	41,367	8,900	2,837	7,830	4,135	31,865	3,247	9,687	87,667	79,867

El análisis integral de los valores que se reportan en la tabla 3.2 para cada muestra permite aseverar que todos los elementos de interés para el proceso Caron difieren de los valores planificados por la empresa en el mineral de alimentación a la ECG al aplicarle el rechazo de la fracción mayor de 150 mm; lo que ratifica que resulta prohibitivo alimentar mineral a proceso sin la aplicación del beneficio del *scalping* por vía seca.

Todas las muestras que se beneficiaron mediante el rechazo de las fracciones granulométrica (R-20, R-10, R-8 y R-6) presentaron como regularidad el incremento del porcentaje de la ley del Ni, Co y Fe en más 0,060, 0,020 y 11,88% respectivamente; así como la disminución de los elementos nocivos de SiO₂ y MgO en más de 8,90 y 6,62% respectivamente. Figura 3.4.

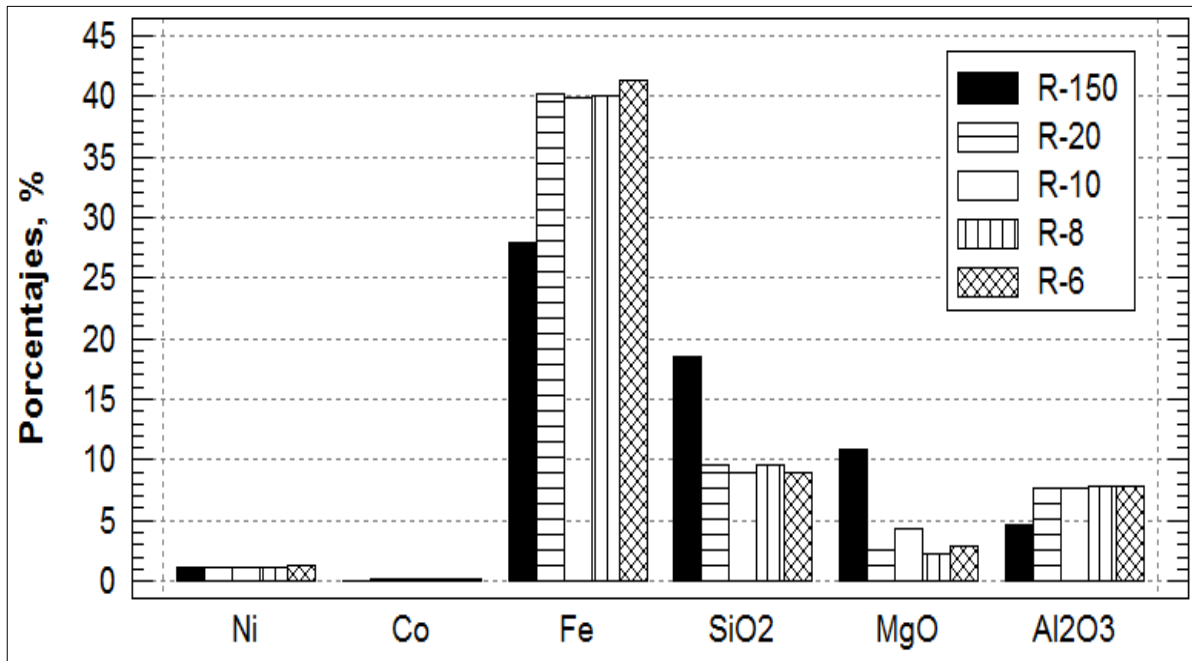


Figura 3.4. Comportamiento químico de las muestras que se beneficiaron.

Significativo son los resultados que se obtienen al separar las clases de tamaño superiores a 6,3 mm (R-6); pues respecto a las R-150 y R-10 la ley del níquel aumenta en 0,147 y 0,067% respectivamente.

Respecto a las características físicas se puede afirmar que la densidad y la fracción magnética tienen un comportamiento similar a pruebas anteriores efectuadas con minerales de los mismos yacimientos a escala piloto (Legrá, 2015; Legrá et al., 2022). En el caso de la granulometría del mineral alimentado al horno de botellas, las fracciones de interés están en el rango de valores que emplea actualmente la industria.

Los resultados de cada uno de los beneficios se reportan en el Anexo B.

3.3 Régimen térmico de trabajo

En la figura 3.5 se presenta el perfil térmico promedio que se utilizó durante la ejecución de los diferentes experimentos.

Se observa que las curvas correspondientes a cada uno de los experimentos bajo estudio presentaron un comportamiento ideal, perfil típico que se puede lograr en los hornos de soleras múltiples a escala piloto e industrial sin el suministro del aire de postcombustión en los hogares cuatro y seis. Sus formas permiten visualizar las zonas de secado-calentamiento, calentamiento-reducción parcial y la de reducción.

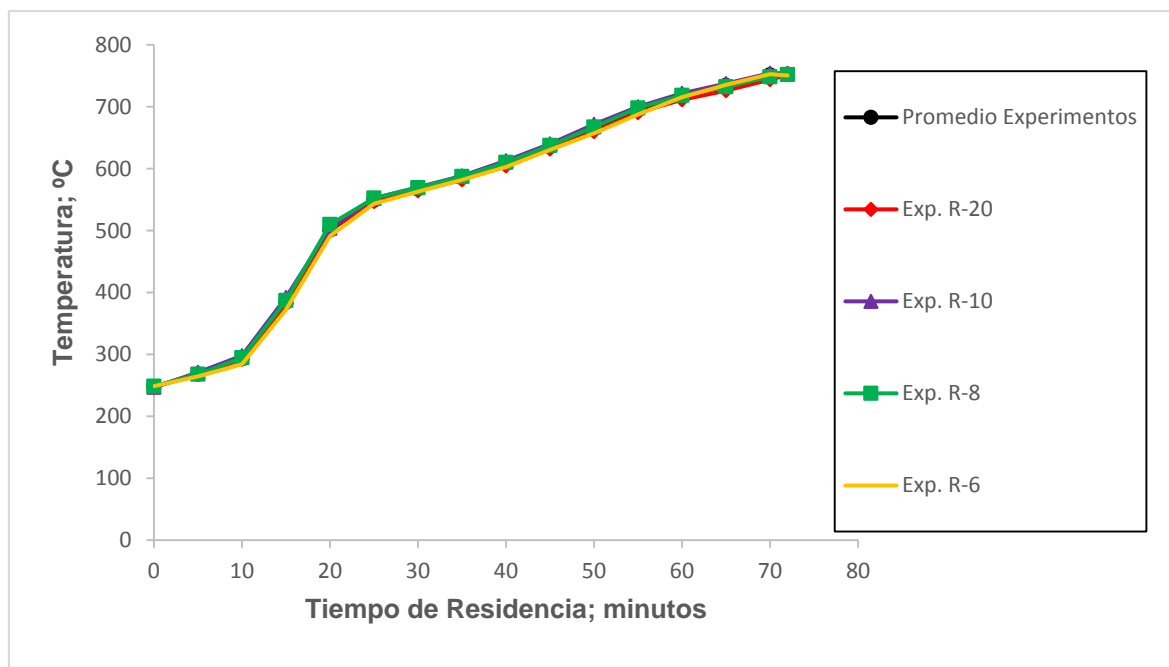


Figura 3.5. Perfil Térmico promedio que se utilizó en los experimentos.

La similitud que se logró en las curvas térmicas del horno de botellas para todas las muestras que se evaluaron permite la validación comparativa de los resultados

obtenidos durante el proceso de reducción química, ya que los experimentos se realizaron manteniendo condiciones análogas de operación.

El tiempo de residencia y la temperatura final de trabajo oscilaron en los rangos de 70-72 minutos y 750-761 °C respectivamente.

Angulo et al. (2017) realizaron una investigación a escala piloto en las que se demostró que el tiempo de residencia oscila en el rango de 70 a 80 minutos, identificándose las tres zonas que se observaron en las curvas del perfil térmico.

Caron (1924) recomienda utilizar el rango de temperatura de 750 a 800 °C en la zona de reducción para procesar menas lateríticas. Canterford (1983) y Rodríguez (2004) reportan el uso de este rango de temperatura en la zona de reducción del proceso Caron en las plantas de Yabulu-Greenvale y Punta Gorda-Cuba respectivamente.

Las curvas térmicas características de cada experimento se muestran en el Anexo C.

3.4 Caracterización químico-física del mineral reducido

Durante todo el periodo de realización de los experimentos se tomaron muestras de mineral reducido con la precaución de suministrar una atmósfera inerte de argón en el para evitar el proceso de reoxidación del mineral. Sus características químico-físicas se muestran en la tabla 3.3.

Tabla 3.3. Características químico-físicas del mineral reducido

Código	Características Químicas, %								ρ (t/m ³)	FM (%)
	Ni _{total}	Co _{total}	Fe _{total}	Ni°	Co°	Fe°	FeO	Fe ²⁺		
R-20	1,343	0,132	46,702	0,904	0,092	3,608	18,898	25,297	3,640	62,425
R-10	1,344	0,131	45,786	0,943	0,080	3,482	17,973	27,737	4,448	67,038
R-8	1,338	0,149	44,766	0,966	0,082	3,660	24,870	29,148	4,384	62,348
R-6	1,455	0,258	49,692	1,101	0,054	3,993	22,550	26,834	4,382	73,230

Los resultados que se muestran en la tabla 3.3 se corresponden a un proceso adecuado de tostación-reducción selectiva en el que se maximiza la conversión del NiO y CoO en Ni^o y Co^o respectivamente, al garantizar un estricto control de la formación del Fe^o para que no supere el un porcentaje superior a cinco.

Los valores de Ni, Co y Fe total presentaron como regularidad el incremento de sus porcentajes en los rangos promedios de 0,17-0,22%, 0,02-0,14% y 4,68-8,33% respectivamente; siendo el rechazo de la fracciones superiores a 6,3 mm la que presentó los niveles más significativos.

Los porcentajes de Fe^o, FeO y Fe²⁺ se relacionaron directamente con la cantidad de Fe_{total} que se reporta en cada una de las fracciones de rechazo bajo análisis.

En el caso de las características físicas se observa que la densidad de la mena que se redujeron, para todos los experimentos que se efectuaron, presentaron un comportamiento similar con valores promedios que oscilaron en el rango 3,6 a 4,5 t/m³. Los resultados de la fracción magnética fueron superiores en 2,56 veces promedio respecto a la mena que se alimentó, con valores que oscilaron en el rango de 56 a 85%.

A partir de los resultados que se reportan en la tabla 3.3 se determinaron los porcentajes de metalización del Fe y el Ni, ver figura 3.6.

La tendencia que muestra el grado de metalización del Ni es de disminuir a medida que se incorporan mayor número de fracciones granulométricas al proceso reducción, mediante un modelo matemático polinomio de segundo orden con un coeficiente de determinación superior a 0,99 y un error residual inferior a 0,11. En el caso del porcentaje de metalización del Fe el comportamiento fue similar independientemente de la fracción granulométrica de rechazo con valores que oscilaron en el rango de 5,14 a 10,11%.

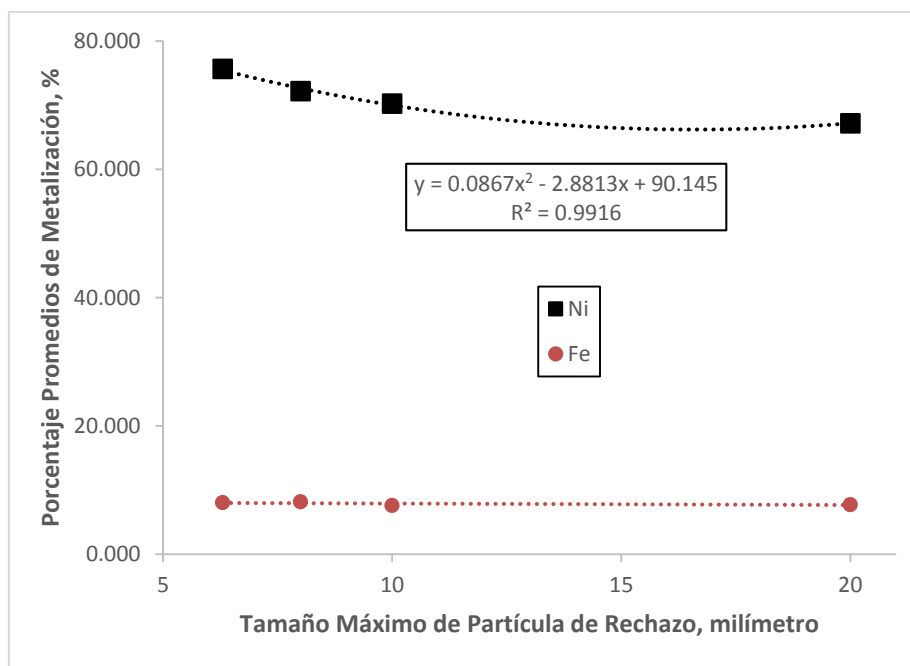


Figura 3.6. Porcentajes promedios de metalización del hierro y el níquel.

Chang y Rojas (2013, 2014) reportan características químicas del Ni_{total} , Co_{total} , Fe_{total} , Ni° , Fe° y Fe^{2+} del mineral reducido por el proceso Caron en un rango de valores similares al que se logró en esta investigación, al analizar la optimización del flujo de aire específico para las condiciones de la prueba QT mediante el control del Fe^{2+} en el mineral reducido.

Legrá, Angulo y Lamorú (2017) determinaron a escala piloto que el FeO en el mineral reducido para el rechazo de las fracciones granulométricas superiores a 10 mm se encuentra en el rango de 15,12 a 22,70%, muy cercano al que se alcanzó en este estudio.

Legrá, Angulo y Lamorú (2022) evaluaron los procesos de reducción, lixiviación y sedimentación de una muestra tecnológica a escala piloto conformada por los yacimientos de Camarioca Este, Yagrumaje Norte y Sur y Punta Gorda. Los rangos de valores que reportaron de densidad y fracción magnética para el mineral reducido luego

de ser beneficiado con el rechazo de las fracciones granulométricas superiores a 10 mm fueron de 4,13-4,62 t/m³ y 58,03-66,58%, muy cercanos a los que se lograron en este estudio.

En el Anexo D se muestran las características químico-físicas del mineral reducido para cada uno de los experimentos bajo análisis.

3.5 Caracterización química del mineral reducido/lixiviado

En la tabla 3.4 se presentan las características químicas de la mena laterítica luego de los procesos de reducción y lixiviación.

Tabla 3.4. Características químicas del mineral reducido/lixiviado

Código	Mineral Reducido y Lixiviado; %		
	Ni	Co	Fe
R-20	0,153	0,054	46,476
R-10	0,144	0,052	45,386
R-8	0,110	0,052	43,406
R-6	0,115	0,045	47,749

Las características químicas del mena laterítica luego de los procesos de reducción y lixiviación demuestran que todos los beneficios realizados garantizan eficiencias metalúrgicas superior e igual a la de diseño de la ECG.

González (2019) realizó pruebas de reducción-lixiviación para una mena laterítica formulada por los yacimientos de Camarioca Este, Yagrumaje Norte y Sur y Punta Gorda para evaluar el efecto de la sustitución del petróleo aditivo por diferentes porcentajes de carbón bituminoso en el proceso de sedimentación. Los valores de Ni, Co y Fe en el mena laterítica reducida y lixiviada por el proceso Caron al rechazar las fracciones granulométricas superiores a 10 mm fueron muy cercanos (0,167, 0,045 y 45,64% para el Ni, Co y el Fe respectivamente) a los que obtuvieron en esta investigación bajo el uso de condiciones similares de operación.

A partir de las características químicas de la mena laterítica alimentada y reducida/lixiviada que se reportaron en las tablas 3.2 y 3.4 se determinaron el comportamiento de los extractables de Ni y Co en función de las fracciones granulométricas que se rechazaron, ver figura 3.7.

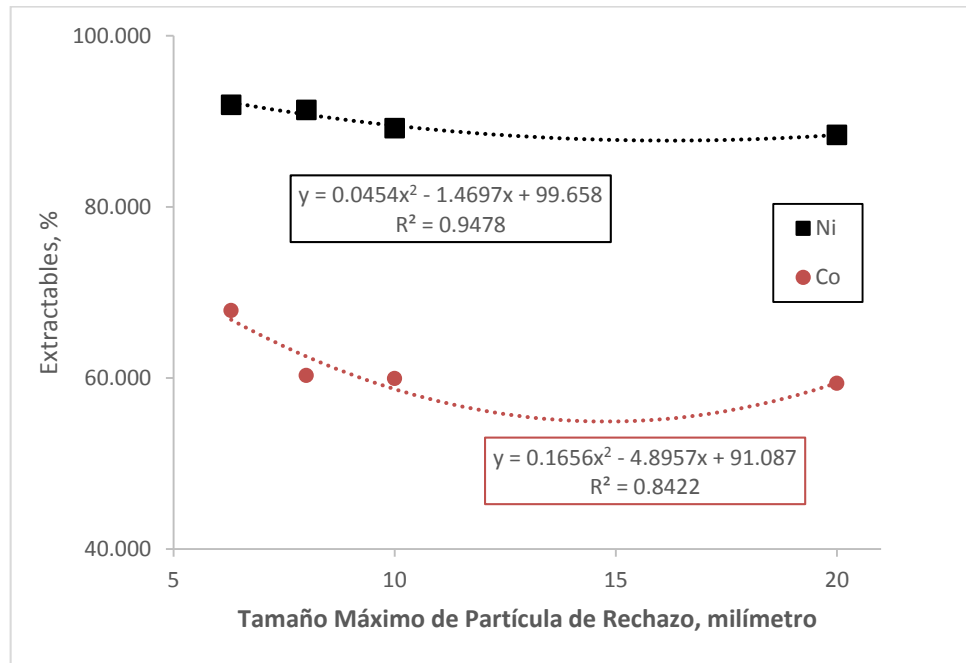


Figura 3.7. Comportamiento de los Extractables promedios del níquel y cobalto

Se observa que los extractables de Ni y Co promedios oscilaron en los rangos de 88-92% y de 59-68% respectivamente, relacionándose directamente con las características químicas que presentaron la mena alimentada, reducida y lixiviada que se lograron en esta investigación.

Ambos extractables se caracterizaron por el incremento a medida que se aumentaron las fracciones granulométricas como rechazo, similar al comportamiento que presentó el porcentaje de metalización del Ni que obtuvo en este estudio. El modelo matemático que mejor se ajustó a ambos extractables promedios fue un polinomio de segundo

orden con coeficiente de determinación superior a 0,84 y errores residuales inferiores a 2,6.

De Graaf (1979) reconoce que las menas saprolíticas y limonítica pueden alcanzar extracciones de Ni de 65 y 95% respectivamente en la reducción del proceso Caron, por lo que valores que se obtuvieron se corresponden a los extractables posibles de conseguir al procesar mezclas de estos tipos de menas.

Chang, Rojas y Arce (2014) identifican porcentajes de extractables de Ni escala industrial en la Planta de Punta Gorda que oscilaron en el rango de 76,56-88,07%, aspecto que confirma los resultados que se alcanzaron en esta investigación.

Kawahara, Toguri and Bergman (1988) y Chang et al. (2005) reportan extracciones de Co en el rango de 40 a 75%, dependiendo del contenido de Fe y la mineralogía en la mena que se alimenta al proceso Caron, así como la temperatura de reducción.

Angulo et al. (2021) determinaron porcentajes de extractable de Ni y Co similares a lo que se obtuvieron en este estudio al analizar el efecto de la alimentación del aire de postcombustión en los hornos de solera múltiple de la tecnología carbonato-amoniaco a escala de planta piloto.

Los valores de extracciones de Ni y Co reportados por Legrá, Angulo y Lamorú (2022) a escala piloto confirman los valores que se alcanzaron durante el procesamiento de una muestra tecnológica con características químicas- físicas-mineralógicas análogas.

En el Anexo E se presentan la totalidad de los valores que se lograron durante la evaluación de los diferentes beneficios granulométricos que se realizaron.

3.6 Velocidad de sedimentación y densificación de las pulpas lixiviadas

La velocidad de sedimentación y densificación de la pulpa lixiviada se determinó a partir de la metodología descrita en el acápite 2.4.4, los valores promedios para cada

fracción de rechazo bajo análisis antes y después de la aplicación del tratamiento electromagnético se presentan en la tabla 3.5.

Tabla 3.5. Velocidad de sedimentación y densificación de la pulpa lixiviada

Código	Corriente Eléctrica (A)	Velocidad de sedimentación, m/h		Densificación, kg/m ³	
		A. Electroimán	D. Electroimán	A. Electroimán	D. Electroimán
R-20	5,00	0,44	0,92	1 552,59	1 771, 23
R-10		0,45	0,96	1 548,12	1 747,45
R-8		0,47	0,95	1 538,32	1 760,34
R-6		0,47	1,02	1 542,42	1 822,68

Se observa que al evaluar la velocidad de sedimentación y la densificación de la pulpa presentan un comportamiento similar, mostrando la tendencia de incrementarse luego de la aplicación del tratamiento electromagnético con una diferencia promedio de 0,505 m/h y 234,81 kg/m³ respectivamente.

Los valores promedios de velocidad de sedimentación luego del tratamiento electromagnético fueron moderados y cercanos al metro por hora independientemente de la fracción de rechazo bajo análisis, mientras que la densificación de la pulpa fue superior a 1 747 kg/m³ característico de un proceso adecuado de compactación.

Resulta importante señalar que al rechazar las fracciones superiores a 6,3 mm se alcanzaron los valores más elevados de velocidad de sedimentación y densificación de la pulpa, comportamiento lógico que se atribuye al incremento considerable de las fases mineralógicas vinculadas a los óxidos de hierro presentes en el mineral reducido.

Las pruebas a escala de laboratorio y piloto que se realizaron para procesar menas lateríticas con predominio del yacimiento de Camarioca Este y la utilización del aditivo reductor PT-25 en los últimos años (González, 2019; Legrá, 2015; Legrá et al., 2017; 2022), confirman las velocidades de sedimentación que se obtuvieron en este estudio al reportar valores que oscilaron en los rangos de 0,90-1,20 m/h después del

tratamiento electromagnético, con datos de densificación de la pulpa en la primera etapa de lixiviación entre 1 650 y 1 850 kg/m³.

En el Anexo F se presentan todos los resultados que se relacionan con este epígrafe.

3.7 Valoración técnico-económica-medio ambiental

La valoración técnico-económica-medio ambiental se realizó a partir de los resultados obtenidos durante el procesamiento metalúrgico de las diferentes fracciones granulométricas que se rechazaron durante la investigación.

En la tabla 3.6 se presentan los resultados de la valoración económica, tomando como referencia lo obtenido al rechazar las fracciones superiores a 10 mm, fracción de rechazo implementada en la ECG. Para su determinación se utilizaron los datos reportados en el epígrafe 2.6.

Tabla 3.6. Estimación económica

Variables	Fracciones de Rechazo		
	R-10 y R-20	R-8	R-6
t _{Ni al.} (t/a)	35 538	35 630	37 574
t _{Co al.} (t/a)	3 493	3 675	3 675
t _{Ni p.} (t/a)	22 190	22 781	24 183
t _{Co p.} (t/a)	1 465	1 551	1 746
Diferencia t p. Ni (t/a)		591	1992
Diferencia t p. Co (t/a)	-	85	281
Ingresos (M USD/a)		18,21	61,18

*M USD/a: millones de USD/a

El análisis económico preliminar permite valorar que respecto al rechazo de la fracciones mayores de 10 mm, al rechazar la fracciones R-8 y R-6 se incrementan los ingresos en 18,21 y 61,18 millones de USD/a respectivamente.

A juzgar por los resultados obtenidos se observa que la ECG presenta dos alternativas viables para la ejecución de sus operaciones, que dependerán de sus condiciones tecnológicas y financieras.

La primera alternativa constituye la implementación del rechazo granulométrico de las fracciones superiores a 6,3 mm.

Las principales ventajas que se identifican de su implementación son:

- Disminución del consumo de energía en el circuito de molienda en más de 10 kW-h/t.
- Disminución del consumo de energía en la etapa de reducción por concepto de disminución de la temperatura de reducción (cercana a los 650 °C para menas limoníticas).
- Incremento de ingresos económicos en más de 61 millones de USD/a debido al aumento a las extracciones durante el proceso de reducción.

Las principales desventajas que se identifican al aplicar a escala industrial el beneficio del rechazo de las fracciones granulométricas R-6 son:

- Necesidad de un volumen considerable de inversión monetaria inicial para ejecutar las modificaciones tecnológicas al proceso metalúrgico de la ECG.
- Incremento del consumo de combustible por concepto de trasportación de la mena y el rechazo granulométrico.
- Agotamiento acelerado de las capas limoníticas de los yacimientos lateríticos concebidos a la ECG.

La segunda alternativa constituye la implementación del rechazo granulométrico de las fracciones superiores a 20 mm.

Las principales ventajas que se identifican de su aplicación a escala industrial son:

- Incremento del aprovechamiento integral de los recursos minerales.
- Disminución del consumo de combustible por concepto de trasportación de la mena y el rechazo granulométrico.
- Incremento de la eficacia del proceso de beneficio del rechazo de las fracciones granulométricas.

La principal desventaja que presenta esta alternativa es que se dejarían de ingresar alrededor de 61 millones de USD/a por concepto de las extracciones del Ni y el Co durante el proceso de reducción.

3.8 Conclusiones parciales del Capítulo III

- La mena laterítica in situ se caracterizó por el predominio las fases mineralógicas de los óxidos y oxi-hidróxidos, con un quimismo inadecuado en las fracciones granulométricas superiores a 20 mm para su procesamiento por la tecnología carbonato-amoniaco.
- Las fracciones granulométricas que se evaluaron fueron los rechazos de tamaños superiores a 20, diez, ocho y 6,3 mm.
- Las curvas térmicas de trabajo se caracterizaron por presentar un comportamiento ideal, donde el tiempo de residencia y la temperatura final de trabajo oscilaron en los rangos de 70-72 minutos y 750-761 °C respectivamente para cada uno de los experimentos bajo estudio.
- Los resultados obtenidos indicaron que los rechazos de las fracciones granulométricas que se analizaron garantizan un adecuado comportamiento de los indicadores técnico-económicos en los procesos de reducción-lixiviación-sedimentación de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.



CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

1. La mena laterítica *in situ* se caracterizó por el predominio de las fases mineralógicas de los óxidos y oxi-hidróxidos de minerales de hierro y aluminio mezclados con reflejos intensos de serpentinas, descrita granulométricamente por los modelos Rosin–Rammler y la función Swebrec con errores residuales inferiores a 1,95 y características químicas inadecuadas en las fracciones granulométricas superiores a 20 mm para ser alimentadas al proceso Caron.
2. Las muestras que se beneficiaron presentaron características químico-físicas ideales para ser procesadas por la tecnología carbonato-amoniaco con porcentajes de Ni, Co y Fe superiores a 1,15, 0,11 y 39% respectivamente; mientras que los compuestos nocivos de SiO₂ y MgO fueron inferiores a 9,6 y 4,3% respectivamente.
3. Las características químico-físicas del mineral reducido se correspondieron a un proceso adecuado de reducción con valores de Ni, Co y Fe total que presentaron como regularidad el incremento de sus porcentajes en los rangos promedios de 0,17-0,22%, 0,02-0,14% y 4,68-8,33% respectivamente; siendo el rechazo de la fracciones superiores a 6,3 mm la que presentó los niveles más significativos.
4. Las características químicas del mena laterítica luego de los procesos de reducción y lixiviación demuestran que todos los beneficios realizados garantizan eficiencias metalúrgicas superior e iguales a la de diseño de la empresa, con valores de extractables de Ni y Co promedios que oscilaron en los rangos de 88-92% y de 59-68% respectivamente.
5. La velocidad de sedimentación y la densificación de la pulpa lixiviadas presentaron un comportamiento similar, independientemente de la fracción granulométrica rechazada, observándose como regularidad el incremento luego de la aplicación del tratamiento electromagnético con una diferencia promedio de 0,505 m/h y 234,81 kg/m³ respectivamente.

6. La valoración técnico-económica-medio ambiental mostró que las alternativas tecnológicas más viables para la ejecución de las operaciones de la empresa son el rechazo de las fracciones granulométricas superiores a 6.3 mm con un incremento de las utilidades en alrededor de 61 millones de USD/a y el rechazo de las fracciones superiores a 20 mm con un incremento del aprovechamiento integral de las menas lateríticas.



RECOMENDACIONES

RECOMENDACIONES

1. Evaluar a escala piloto e industrial el efecto que tiene el rechazo de las fracciones granulométricas superiores a 20 y 6,3 mm en los principales indicadores técnico-económicos de la tecnología carbonato-amoniaco.
2. Determinar la prefactibilidad técnica-económica-medio ambiental del rechazo de las fracciones granulométricas superiores a 20 y 6,3 mm.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alak De. (2017). Design of Thickeners. *In Sedimentation Process and Design of Settling Systems*. Springer: pp. 309-327.
- Al-Khribash, S. A. (2020). Mineralogical characterization of low-grade nickel laterites from the North Oman Mountains: Using mineral liberation analyses–Scanning electron microscopy-based automated quantitative mineralogy. *Ore Geology Reviews*, 120, 103429. doi: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103429>.
- Angulo-Palma, H. J., Legrá-Legrá, A., Lamorú-Urgellés, A., Gálvez, E., & Castillo, J. (2021). Post-combustion Effect on Nickel and Cobalt Extractions from the Caron Process. *In: Bindhu V., R. S. Tavares J.M., Tãlu Ş. (eds) Proceedings of Fourth International Conference on Inventive Material Science Applications. Advances in Sustainability Science and Technology*. Springer, Singapore, 515-527. doi: https://doi.org/10.1007/978-981-16-4321-7_43.
- Angulo Palma, H. J. (2018). *Efecto de la sustitución del petróleo aditivo por carbón bituminoso en los procesos de reducción y molienda de lateritas*. Tesis presentada en opción al título académico de Máster en Ingeniería de Procesos Químicos, Universidad de Oriente. Facultad de Ingeniería Química y Agronomía.
- Angulo Palma, H. J., Legrá Legrá, A., & Coello Velázquez, A. L. (2020). Efecto de la sustitución del petróleo aditivo por el carbón bituminoso en el proceso de molienda de los minerales lateríticos. *Sinergia Académica*, 3(2), 22-31.
- Angulo Palma, H. J., Legrá Legrá, A., & Hernández Pedrera, C. (2021). Modelos para determinar variables importantes en el proceso caron. Parte I: consumo específico de energía en molienda. *Opuntia Brava*, 13(3), 149-157.

- Angulo-Palma, H. J., Legrá-Legrá, A., Hernández-Pedrera, C., Lamorú-Urgellés, A., & Toro-Villarroel, N. (2020). Reducción de menas lateríticas utilizando como aditivo mezclas de carbón bituminoso y petróleo. *Tecnología Química*, 40(1), 91-101.
- Angulo-Palma, H. J., Merencio-Guevara, P. L., Legrá-Legrá, A., & Videaux-Arcia, L. (2017). Análisis especiales en un horno de reducción de níquel a escala de Planta Piloto. *Tecnología Química*, 37(3), 445-460.
- Arias Pérez, H. (2013). *Evaluación de las extracciones de níquel y cobalto en el proceso de reducción cuando solo se muelen las partículas menores de 6.3 mm*. Tesis en opción al título de Ingeniero Metalúrgico, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa ``Dr. Antonio Núñez Jiménez``. Facultad de Metalurgia y Electromecánica.
- Basulto Ramírez, S., Alepuz Llansana, H., Majendíé Cemitier, R., Legrá Legrá, A., García Peña, E., Ramírez Pérez, I. M. & Rivero Piña, B. (2005). *Estudio del comportamiento en Planta Piloto del mineral de Yagrumaje Norte a procesar por la Empresa Che Guevara. Etapa 02: Evaluación del rechazo (scalping) clase # 5*. Documento Inédito, Centro de Investigaciones del Níquel ``Capitán Alberto Fernández Montes de Oca``. Moa, Holguín-Cuba.
- Campos Hernández, Raiza Cecilia. (2012). *Impacto de la adición directa del petróleo aditivo sobre los parámetros técnico-económicos de los hornos de reducción*. Tesis en opción al título de Ingeniero Metalúrgico, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa ``Dr. Antonio Núñez Jiménez``. Facultad de Metalurgia y Electromecánica.
- Canterford, J. (1983). Oxide Ores of Nickel—The Australian Situation. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 1(1-2), 85-109. doi: <http://dx.doi.org/10.1080/08827508308952590>.

- Carballo, O. (2014). Manual de Operaciones de la Unidad Básica de Producción Preparación del Mineral. Código 218-MOP. Documento Inédito, *Empresa Ernesto Che Guevara*, pp. 1-101.
- Chang-Cardona, A. R. (2004). Tecnología carbonato-amoniaco de menas lateríticas. Programa de Acreditación de Operadores de Planta. *Instituto Superior Minero Metalúrgico Dr. "Antonio Núñez Jiménez"*. 1-10.
- Chang-Cardona, A. R., Arce-Molina, J., & Toirac-Suárez, M. M. (2005). Modelos multivariados para predecir el extractable de níquel por la composición mineralógica de la mena tecnológica en el proceso Caron. *Minería & Geología*, 21(1), 32.
- Chang-Cardona, A. R., & Rojas-Vargas, A. (2013). Optimización del flujo de aire específico para la lixiviación estándar QT del mineral reducido en el proceso Caron. *Minería y Geología*, 29(1), 1-16.
- Chang-Cardona, A. R., Rojas-Purón, A. L., & Arce-Molina, J. (2014). Influencia sobre el extractable de níquel de los minerales oxidados del yacimiento Punta Gorda. *Minería y Geología*, 30(4), 70-88.
- Chang-Cardona, A. R., & Rojas-Vargas, A. (2014). Comportamiento electroquímico del Fe y sus iones durante la lixiviación estándar QT de minerales reducidos en el proceso "Caron" con diferentes aireaciones. *Tecnología Química*, 34(2), 117-127.
- Coello-Velázquez, A. L. (2015). Procedimiento para la determinación de la carga circulante en circuitos cerrados de trituración y molienda. *Minería y Geología*, 31(2), 66-79.
- Coello Velázquez, A. L., Llorente Arce, L., & García, A. (2020). Efecto del petróleo aditivo en los indicadores energo-tecnológicos en los circuitos cerrados de

- molienda del mineral laterítico a nivel industrial. *Minería y Geología*, 36(3), 316-327.
- Coello Velázquez, A. L., Menéndez Aguado, J. M., & Laborde Brown, R. (2008). Grindability of lateritic nickel ores in Cuba. *Powder technology*, 182(1), 113-115. doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2007.05.027>.
- Coello-Velázquez, A. L., Quijano Arteaga, V., Menéndez-Aguado, J. M., Pole, F. M., & Llorente, L. (2019). Use of the Swebrec Function to Model Particle Size Distribution in an Industrial-Scale Ni-Co Ore Grinding Circuit. *Metals*, 9(8), 882. doi: <http://dx.doi.org/10.3390/met9080882>.
- Crundwell, F., Moats, M., Ramachandran, V., Robinson, T. & Davenport, W. (2011). Extractive Metallurgy of Nickel, Cobalt and Platinum-Group Metals. Elsevier, pp.1-21. ISBN: 978-0-08-096809-4.
- De Graaf, J. (1979). The treatment of lateritic nickel ores—A further study of the Caron process and other possible improvements. Part I. Effect of reduction conditions. *Hydrometallurgy*, 5(1), 47-65.
- Díaz Bello, S. C. (2016). *Modelamiento cinético del procesamiento de minerales lateríticos de níquel por vía pirometalúrgica*. Doctorado en Ingeniería- Ciencia y Tecnología de los Materiales, Universidad Nacional de Colombia. Retrieved from <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/57494/35261639.2016.pdf?sequence=1>.
- Domènech, C., Galí, S., Villanova-de-Benavent, C., Soler, J. M., & Proenza, J. A. (2017). Reactive transport model of the formation of oxide-type Ni-laterite profiles (Punta Gorda, Moa Bay, Cuba). *Mineralium Deposita*, 52(7), 993-1010. doi: <https://doi.org/10.1007/s00126-017-0713-0>.
-

- Fernández Periche, Francisco. 2008. *Aproximación funcional mediante redes de funciones de base radial, una alternativa para la predicción en el proceso de reducción de mineral de la tecnología Caron de producción de níquel*. Tesis Doctoral, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Informática Universidad de Granada. Departamento de Arquitectura y Tecnología de Computadoras.
- Fu, W., et al. (2018). Garnierite mineralization from a serpentinite-derived lateritic regolith, Sulawesi Island, Indonesia: Mineralogy, geochemistry and link to hydrologic flow regime. *Journal of Geochemical Exploration*, 188, 240-256. doi: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2018.01.022>.
- Gleeson, S. A., Butt, C., & Elias, M. (2003). Nickel laterites: a review. *SEG Discovery*(54), 1-18. doi: <https://doi.org/10.5382/SEGnews.2003-54.fea>.
- González Peña, N. D. (2019). *Evaluación del Proceso de Sedimentación al Sustituir el Petróleo Aditivo por Carbón Bituminoso en la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara*. Tesis en opción al título de Ingeniero en Metalurgia y Materiales, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez". Facultad de Metalurgia y Electromecánica.
- Guillén Perales, Alberto. 2007. *Diseño de Sistemas Inteligentes en Plataformas de Computo Paralelas*. Tesis Doctoral, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Informática Universidad de Granada. Departamento de Arquitectura y Tecnología de Computadoras.
- Hendricus Caron, M. (1924). Process of recovering values from nickel and cobalt-nickel ores. U.S. Patent No. 1,487,145.

- Hendricus Caron, M. (1950). Fundamental and practical factors in ammonia leaching of nickel and cobalt ores. *JOM-Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*, 2, 67-90. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/BF03398981>.
- Ilyas, S., Srivastava, R. R., Kim, H., Ilyas, N., & Sattar, R. (2020). Extraction of nickel and cobalt from a laterite ore using the carbothermic reduction roasting-ammoniacal leaching process. *Separation and Purification Technology*, 232, 115971. doi: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.115971>.
- Ito, A., Otake, T., Maulana, A., Sanematsu, K., & Sato, T. (2021). Geochemical constraints on the mobilization of Ni and critical metals in laterite deposits, Sulawesi, Indonesia: A mass-balance approach. *Resource Geology*, 71, 255-282. doi: <https://doi.org/10.1111/rge.12266>.
- Kawahara M, Toguri JM, Bergman RA (1988) Reducibility of laterite ores. *Metall Trans B* 19(2):181–186.
- Lamorú Urgelles, A. (2012). *Determinación del índice de Bond de las menas de los yacimientos Yagrumaje Norte y Sur en la Empresa Ernesto Che Guevara*. Tesis en opción al título de Ingeniero Metalúrgico, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez". Facultad de Metalurgia y Electromecánica.
- Legrá Legrá, A. (2015). *Evaluación del comportamiento durante el proceso de reducción y lixiviación de los minerales del yacimiento Camarioca Este*. Documento Inédito, Centro de Investigaciones del Níquel "Capitán Alberto Fernández Montes de Oca". Moa, Holguín-Cuba.
- Legrá Legrá, A. (2018). *Procedimiento Específico UPI-PE-16: Pruebas de reducción en el horno de botellas*. Versión 03. Documento Inédito, Centro de Investigaciones del Níquel "Capitán Alberto Fernández Montes de Oca". Moa, Holguín-Cuba.
-

- Legrá Legrá, A. (2018). *Instrucción del Puesto de Trabajo UPI-IPT-16: Realización de la QT. Muestra Sólida*. Versión 05. Documento Inédito, Centro de Investigaciones del Níquel ``Capitán Alberto Fernández Montes de Oca``. Moa, Holguín-Cuba.
- Legrá Legrá, A. (2018). *Instrucción del Puesto de Trabajo UPI-IPT-24: Brigada de Análisis Especiales*. Versión 06. Documento Inédito, Centro de Investigaciones del Níquel ``Capitán Alberto Fernández Montes de Oca``. Moa, Holguín-Cuba.
- Legrá Legrá, A., Angulo Palma, H. J., & Lamorú Urgellés, A. (2017). *Proyecto 600193 Sustitución de petróleo aditivo por carbón bituminoso. Etapa 05 Evaluación a escala piloto*. Documento Inédito, Centro de Investigaciones del Níquel ``Capitán Alberto Fernández Montes de Oca``. Moa, Holguín-Cuba.
- Legrá Legrá, A., Angulo Palma, H. J., & Lamorú Urgellés, A. (2022). *Evaluar el comportamiento durante el proceso de reducción y lixiviación de una mezcla de los minerales de los yacimientos Camarioca Este (CE), Punta Gorda (PG), Yagrumaje Norte (YN) y Yagrumaje Sur (YS) previstos a alimentar al proceso productivo de la ECG durante el año 2022*. Documento Inédito, Centro de Investigaciones del Níquel ``Capitán Alberto Fernández Montes de Oca``. Moa, Holguín-Cuba.
- Liranza Barallobre, X. (2010). *Impacto del beneficio de la mena en los principales indicadores técnico-económico de la empresa Comandante Ernesto Guevara*. Tesis en opción al título de Ingeniero Metalúrgico, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa ``Dr. Antonio Núñez Jiménez``. Facultad de Metalurgia y Electromecánica.
- Meriño Cesar, L. (2010). *Disponibilidad de cámaras en la planta de Hornos de Reducción de la Empresa Ernesto Guevara*. Tesis en opción al título de Ingeniero

Metalúrgico, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa ``Dr. Antonio Núñez Jiménez``. Facultad de Metalurgia y Electromecánica.

Mestre Mestre, C. M. (2010). *Impacto del beneficio de la mena en los procesos de molienda y hornos de reducción de la Empresa Comandante Ernesto Guevara*. Tesis en opción al título de Ingeniero Metalúrgico, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa ``Dr. Antonio Núñez Jiménez``. Facultad de Metalurgia y Electromecánica.

Miranda, J. L. (2014). Breve historia del surgimiento de la tecnología hidrometalúrgica del proceso de lixiviación carbonato-amoniaco del Ni y Co. *Tecnología Química*, 34(3), 262-265.

Montero Góngora, D. (2016). Modelación de la postcombustión en un horno de múltiples hogares utilizando redes neuronales artificiales. Tesis presentada en opción al título de Master en Ciencias Técnicas, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa ``Dr. Antonio Núñez Jiménez``. Facultad de Metalurgia y Electromecánica.

Namindo Namindo, M. (2015). *Cinética de la molienda del carbón bituminoso*. Tesis en opción al título de Ingeniero en Metalurgia y Materiales, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa ``Dr. Antonio Núñez Jiménez``. Facultad de Metalurgia y Electromecánica.

Oxley, A., & Barcza, N. (2013). Hydro-pyro integration in the processing of nickel laterites. *Minerals Engineering*, 54, 2-13. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.02.012>.

- Pickles, C. A., & Anthony, W. (2018). A Thermodynamic Study of the Reduction of a Limonitic Laterite Ore by Methane. *High Temp. Mater. Proc.* doi: <https://doi.org/10.1515/htmp-2017-0106>.
- Pickles, C. A., & Anthony, W. (2018). Thermodynamic modelling of the reduction of a saprolitic laterite ore by methane. *Minerals Engineering*, 120, 47-59. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.02.006>.
- Pickles, C. A., & Elliott, R. (2015). Thermodynamic analysis of selective reduction of nickeliferous limonitic laterite ore by carbon monoxide. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy (Trans. Inst. Min Metall. C)* 124(4), 208-216. doi: 10.1179/1743285515Y.0000000009.
- Pickles, C. A., Forster, J., & Elliott, R. (2014). Thermodynamic analysis of the carbothermic reduction roasting of a nickeliferous limonitic laterite ore. *Minerals Engineering*, 65, 33-40. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2014.05.006>.
- Putzolu, F. et al. (2018). Mineralogical association and Ni-Co department in the Wingellina oxide-type laterite deposit (Western Australia). *Ore Geology Reviews*, 97, 21-34. doi: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.05.005>.
- Rodriguez R (2004) Reduction in energy cost in cuban Caron process plants. In: Imrie W, Lane D, International laterite nickel symposium 2004 (as held during the 2004 TMS Annual Meeting). The Minerals, Metals & Materials Society, pp 657–664. ISBN: 0-87339-550-6.
- Rodríguez Reyes, Yoandry. (2008). *Influencia de la Homogenización del Mineral en el Proceso de Reducción*. Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Metalúrgico, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa ``Dr. Antonio Núñez Jiménez``. Facultad de Metalurgia y Electromecánica.

- Shoubao, L., B. Eng, & M. Eng. (1999). *Study of nickeliferous laterite reduction*. A Thesis Submitted to the School of Graduate Studies in Partial Fulfilment of the Requirements for the Degree of Master Engineering, University of Science and Technology, Beijing.
- Suriz Martínez, Y. (2022). Boletín Minero. Noticias del Mercado Internacional. Documento Inédito. *MITSA*, (27), 1-3.
- Toirac-Leyva, V., & Rojas-Purón, A. (2021). Caracterización mineralógica de perfiles lateríticos del sector 048 en el yacimiento Punta Gorda, Holguín, Cuba. *Ciencia & Futuro*, 11(4), 23-37.
- Tupaz, C. A. J., et al. (2020). Ni-Co Mineralization in the Intex Laterite Deposit, Mindoro, Philippines. *Minerals*, 10(7), 579. doi: <http://dx.doi.org/10.3390/min10070579>.



ANEXOS

ANEXOS

ANEXO A. Características del petróleo tecnológico

Tabla A1. Características del petróleo tecnológico utilizado

Índice	Unidad	Método analítico	Especificación contratada	Certificación laboratorio químico ECG
Visc. a 50 °C	CSTOK	D-445	450 Máx.	680,76
Visc. a 80 °C	CSTOK		69 Máx.	113,36
Densidad API		D-1298	10,5 Mín.	13,66
Pto. Inflamación	°C	D-93	65 Mín.	68,00
Agua	%	D-95	1 Máx.	0,54
Azufre	%	D-197	3,5 Máx.	2,90
Valor Calórico	kcal/kg	D-4698	9 600 Mín.	10 204,79
Densidad	kg/m ³	-	0,9846 Máx.	970,00

Tabla A2. Características del licor carbonato-amoniaco fuerte

Compuestos	% máxico	Propiedades	Unidad	Rango
NH ₃	13,0-14,0	Temperatura	°C	30,0-40,0
CO ₂	6,0-7,0	pH	-	8,0-9,0
H ₂ O	79,0-81,0	Viscosidad	cP	~1,0-1,1

ANEXO B. Caracterización químico-granulométrica de la mena que se alimentó al horno de botella

Tabla B1. Caracterización química de la muestra R-150

Estadígrafo	Composición Química, %					
	Ni	Co	Fe	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃
1	1,09	0,093	28,00	18,37	10,74	4,60
2	1,09	0,094	28,00	18,48	10,89	4,56
3	1,09	0,093	28,00	18,57	11,00	4,54
Promedio	1,090	0,093	28,000	18,473	10,877	4,567
Máximo	1,090	0,094	28,000	18,570	11,000	4,600
Mínimo	1,090	0,093	28,000	18,370	10,740	4,540
Desv. Est.	0,000	0,001	0,000	0,100	0,131	0,031

Tabla B2. Caracterización química y granulométrica de la muestra R-20

Estadígrafo	Composición Química, %						Dens. (t/m ³)	FM (%)	Granulometría, mm			
	Ni	Co	Fe	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃			0.150	0.074	-0.074	-0.044
1	1,150	0,115	40,350	9,350	2,630	7,680	3,790	21,090	7,270	7,400	85,330	78,630
2	1,160	0,116	40,220	9,740	2,630	7,770	3,800	20,320	6,670	8,330	85,130	78,430
3	1,150	0,119	39,810	9,570	2,580	7,680	3,540	21,660	7,630	7,200	85,170	77,940
Promedio	1,153	0,117	40,127	9,553	2,613	7,710	3,710	21,023	7,190	7,643	85,210	78,333
Máximo	1,160	0,119	40,350	9,740	2,630	7,770	3,800	21,660	7,630	8,330	85,330	78,630
Mínimo	1,150	0,115	39,810	9,350	2,580	7,680	3,540	20,320	6,670	7,200	85,130	77,940
Desv. Est.	0,006	0,002	0,282	0,196	0,029	0,052	0,147	0,672	0,485	0,603	0,106	0,355

Tabla B3. Caracterización química y granulométrica de la muestra R-10

Estadígrafo	Composición Química, %						Dens. (t/m ³)	FM (%)	Granulometría, mm			
	Ni	Co	Fe	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃			0.150	0.074	-0.074	-0.044
1	1,170	0,115	39,260	7,200	4,880	7,420	3,370	24,480	-	-	-	-
2	1,180	0,113	39,900	9,21	4,78	7,57	3,670	20,950	4,267	10,300	85,433	77,903
3	1,170	0,116	40,370	9,75	3,25	8,01	-	-	5,433	9,400	84,497	76,967
4	1,160	0,114	40,000	9,74	4,086	7,86	-	-	5,367	9,800	84,333	76,803
Promedio	1,170	0,115	39,883	8,975	4,249	7,715	3,520	22,715	5,022	9,833	84,754	77,224
Máximo	1,180	0,116	40,370	9,750	4,880	8,010	3,670	24,480	5,433	10,300	85,433	77,903
Mínimo	1,160	0,113	39,260	7,200	3,250	7,420	3,370	20,950	4,267	9,400	84,333	76,803
Desv. Est.	0,008	0,001	0,462	1,210	0,754	0,268	0,212	2,496	0,655	0,451	0,593	0,593

Tabla B4. Caracterización química y granulométrica de la muestra R-8

Estadígrafo	Composición Química, %						Dens. (t/m ³)	FM (%)	Granulometría, mm			
	Ni	Co	Fe	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃			0.150	0.074	-0.074	-0.044
1	1,170	0,135	40,000	9,740	2,490	7,860	4,010	29,360	4,830	10,550	84,620	77,110
2	1,180	0,113	39,900	9,210	2,060	7,570	4,090	32,250	5,267	10,300	84,413	76,903
3	1,170	0,116	40,370	9,750	-	8,010	-	-	6,433	9,400	83,477	75,967
Promedio	1,173	0,121	40,090	9,567	2,275	7,813	4,050	30,805	5,510	10,083	84,170	76,660
Máximo	1,180	0,135	40,370	9,750	2,490	8,010	4,090	32,250	6,433	10,550	84,620	77,110
Mínimo	1,170	0,113	39,900	9,210	2,060	7,570	4,010	29,360	4,830	9,400	83,477	75,967
Desv. Est.	0,006	0,012	0,248	0,309	0,304	0,224	0,057	2,044	0,829	0,605	0,609	0,609

Tabla B5. Caracterización química y granulométrica de la muestra R-6

Estadígrafo	Composición Química, %						Dens. (t/m ³)	FM (%)	Granulometría, mm			
	Ni	Co	Fe	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃			0.150	0.074	-0.074	-0.044
1	1,250	0,121	41,300	8,880	2,840	7,830	4,110	30,580	3,100	9,300	87,600	79,800
2	1,230	0,121	41,400	8,890	2,860	7,830	4,160	33,150	3,250	10,150	87,700	79,900
3	1,230	0,121	41,400	8,930	2,810	7,830	-	-	3,390	9,610	87,700	79,900
Promedio	1,237	0,121	41,367	8,900	2,837	7,830	4,135	31,865	3,247	9,687	87,667	79,867
Máximo	1,250	0,121	41,400	8,930	2,860	7,830	4,160	33,150	3,390	10,150	87,700	79,900
Mínimo	1,230	0,121	41,300	8,880	2,810	7,830	4,110	30,580	3,100	9,300	87,600	79,800
Desv. Est.	0,012	0,000	0,058	0,026	0,025	0,000	0,035	1,817	0,145	0,430	0,058	0,058

ANEXO C. Perfiles de temperatura que se utilizaron

Tabla C1. Perfil térmico utilizado en el experimento R-20

Tiempo (min)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	72
Temperatura (°C)	250	265	298	394	515	548	564	582	606	635	664	695	714	728	746	751
	243	266	297	387	506	544	560	577	600	627	654	686	706	721	737	750
	246	269	290	369	492	549	566	584	607	633	662	693	715	729	747	752
	250	272	291	377	500	550	567	584	607	632	662	692	714	727	744	750
	244	265	288	363	480	543	562	580	603	628	657	687	710	727	745	752
	250	269	295	382	506	546	563	578	601	628	654	683	703	718	735	750
	250	267	287	399	519	549	568	589	608	638	666	698	717	732	752	755
Promedio	248	268	292	382	503	547	564	582	605	632	660	691	711	726	744	751
Máximo	250	272	298	399	519	550	568	589	608	638	666	698	717	732	752	755
Mínimo	243	265	287	363	480	543	560	577	600	627	654	683	703	718	735	750
Desv. Est.	3,16	2,57	4,39	12,99	13,39	2,71	2,87	4,12	3,21	4,12	4,85	5,38	5,16	4,83	5,88	1,81

Tabla C2. Perfil térmico utilizado en el experimento R-10

Tiempo (min)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	72
Temperatura (°C)	250	271	309	416	527	556	577	595	622	652	680	711	730	743	761	-
	250	269	308	419	526	553	576	594	621	651	679	710	727	740	758	-
	250	269	317	437	526	554	572	592	624	648	680	708	724	742	759	-
	243	265	317	436	520	544	563	587	620	644	677	705	722	740	757	-
	250	273	298	392	509	554	572	589	615	642	675	703	724	741	759	-
	249	271	295	392	509	552	572	589	614	640	672	701	722	739	757	-
	250	274	288	360	475	544	565	584	604	636	665	694	722	737	754	-
	243	263	280	355	474	544	565	584	603	634	664	692	719	733	750	-
	250	280	299	393	504	555	572	590	614	640	673	700	724	740	755	-
	243	271	293	391	504	556	572	590	613	639	672	699	723	738	754	-
	250	278	299	394	507	550	569	587	612	640	670	701	723	739	755	-
	240	268	294	389	507	546	568	585	609	636	666	697	719	735	754	-
	250	278	296	373	497	556	569	587	610	636	668	695	719	735	750	754
	244	271	292	381	498	556	569	587	610	635	667	694	717	732	747	754
	250	276	297	382	493	553	568	588	610	638	669	697	720	737	752	757
	241	267	290	374	491	552	567	585	607	633	666	695	715	730	745	750
	250	271	296	381	498	556	571	588	610	638	671	697	719	735	756	-
242	264	293	389	502	558	572	589	611	638	671	696	719	734	752	-	
Promedio	247	271	298	392	504	552	570	588	613	640	671	700	722	737	754	754
Máximo	250	280	317	437	527	558	577	595	624	652	680	711	730	743	761	757
Mínimo	240	263	280	355	474	544	563	584	603	633	664	692	715	730	745	750
Desv. Est.	3,92	4,84	9,56	22,64	15,29	4,64	3,67	3,11	5,91	5,53	5,12	5,69	3,62	3,62	4,26	2,87

Tabla C3. Perfil térmico utilizado en el experimento R-8

Tiempo (min)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	72
Temperatura (°C)	249	271	299	388	509	550	569	586	609	637	666	697	718	731	748	755
	250	268	293	386	507	549	566	583	606	632	661	692	713	726	742	750
	249	263	290	383	510	560	571	593	610	640	670	703	721	735	750	-
	250	273	298	385	509	552	569	586	611	637	668	696	717	732	746	750
	245	264	292	393	513	550	570	588	614	641	670	701	722	736	755	-
Promedio	249	268	294	387	510	552	569	587	610	637	667	698	718	732	748	752
Máximo	250	273	299	393	513	560	571	593	614	641	670	703	722	736	755	755
Mínimo	245	263	290	383	507	549	566	583	606	632	661	692	713	726	742	750
Desv. Est.	2,07	4,32	3,91	3,81	2,19	4,49	1,87	3,70	2,92	3,51	3,74	4,32	3,56	3,94	4,82	2,89

Tabla C4. Perfil térmico utilizado en el experimento R-6

Tiempo (min)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	72
Temperatura (°C)	249	265	284	378	480	535	559	576	595	622	648	678	708	728	750	-
	250	269	283	374	479	535	559	575	593	618	645	674	703	724	745	751
	250	261	287	380	505	543	562	582	607	635	664	697	722	742	758	-
	246	257	287	384	513	546	566	584	609	637	665	697	722	741	756	-
	243	258	296	396	518	552	570	589	615	642	668	699	723	741	755	-
	250	260	294	391	519	554	572	591	615	644	669	700	725	744	757	-
	246	264	284	361	481	547	563	583	603	630	659	688	715	735	754	-
	250	268	283	356	472	542	558	577	596	622	651	680	708	727	745	750
	250	264	278	364	482	546	567	585	606	637	658	690	719	740	752	-
	250	264	274	370	486	542	562	581	601	625	652	682	712	731	750	-
	250	273	282	350	476	539	560	581	599	628	655	685	717	738	757	-
	250	270	276	364	482	539	558	577	593	623	650	679	710	732	752	-
Promedio	249	264	284	372	491	543	563	582	603	630	657	687	715	735	753	751
Máximo	250	273	296	396	519	554	572	591	615	644	669	700	725	744	758	751
Mínimo	243	257	274	350	472	535	558	575	593	618	645	674	703	724	745	750
Desv. Est.	2,35	4,93	6,52	14,07	17,40	6,01	4,75	5,05	7,87	8,59	8,10	9,11	7,11	6,70	4,44	0,71

ANEXO D. Caracterización químico-física del mineral reducido

Tabla D1. Características física-químicas del mineral reducido de la muestra R-20

Estadígrafo	Características Químicas, %								Dens. (t/m ³)	FM (%)	Met. Ni (%)	Met. Fe (%)
	Ni	Co	Fe	Ni°	Co°	Fe°	FeO	Fe ²⁺				
1	1,350	0,130	46,220	1,030	0,111	4,490	18,840	25,300	3,700	62,520	76,296	9,714
2	1,390	0,138	47,260	1,080	0,116	3,120	19,880	25,610	3,580	62,330	77,698	6,602
3	1,280	0,134	46,200	0,726	0,074	3,340	18,640	25,430	-	-	56,719	7,229
4	1,310	0,137	46,250	0,875	0,087	3,110	19,120	23,540	-	-	66,794	6,724
5	1,380	0,138	47,180	0,828	0,082	3,660	18,330	25,810	-	-	60,000	7,758
6	1,350	0,114	47,100	0,885	0,083	3,930	18,580	26,090	-	-	65,556	8,344
Promedio	1,343	0,132	46,702	0,904	0,092	3,608	18,898	25,297	3,640	62,425	67,177	7,729
Máximo	1,390	0,138	47,260	1,080	0,116	4,490	19,880	26,090	3,700	62,520	77,698	9,714
Mínimo	1,280	0,114	46,200	0,726	0,074	3,110	18,330	23,540	3,580	62,330	56,719	6,602
Desv. Est.	0,042	0,009	0,527	0,131	0,017	0,537	0,549	0,905	0,085	0,134	8,456	1,171

Tabla D2. Características física-químicas del mineral reducido de la muestra R-8

Estadígrafo	Características Químicas, %								Dens. (t/m ³)	FM (%)	Met. Ni (%)	Met. Fe (%)
	Ni	Co	Fe	Ni°	Co°	Fe°	FeO	Fe ²⁺				
1	1,330	0,154	45,320	0,956	0,080	3,740	26,710	30,070	4,530	59,330	71,880	8,252
2	1,340	0,153	44,540	0,972	0,083	3,780	24,200	28,540	4,080	61,120	72,537	8,487
3	1,320	0,154	44,450	0,930	0,085	3,710	25,530	29,150	4,330	55,260	70,455	8,346
4	1,340	0,153	44,940	0,962	0,086	3,720	24,790	28,940	4,830	58,690	71,791	8,278
5	1,360	0,129	44,580	1,010	0,078	3,350	23,120	29,040	4,150	77,340	74,265	7,515
Promedio	1,338	0,149	44,766	0,966	0,082	3,660	24,870	29,148	4,384	62,348	72,185	8,176
Máximo	1,360	0,154	45,320	1,010	0,086	3,780	26,710	30,070	4,830	77,340	74,265	8,487
Mínimo	1,320	0,129	44,450	0,930	0,078	3,350	23,120	28,540	4,080	55,260	70,455	7,515
Desv. Est.	0,015	0,011	0,361	0,029	0,003	0,175	1,355	0,565	0,304	8,646	1,387	0,381

Tabla D3. Características física-químicas del mineral reducido de la muestra R-10

Estadígrafo	Características Químicas, %								Dens. (t/m ³)	FM (%)	Met. Ni (%)	Met. Fe (%)
	Ni	Co	Fe	Ni°	Co°	Fe°	FeO	Fe ²⁺				
1	1,300	0,124	44,520	0,994	0,077	3,510	17,650	26,300	-	66,170	76,462	7,884
2	1,290	0,127	45,600	1,010	0,065	3,470	17,350	25,990	-	62,760	78,295	7,610
3	1,310	0,123	45,260	0,992	0,092	2,330	17,060	25,680	-	65,780	75,725	5,148
4	1,300	0,127	45,440	0,890	0,090	3,130	15,350	25,680	-	64,540	68,462	6,888
5	1,350	0,125	45,470	1,010	0,095	3,100	17,600	29,560	4,600	77,900	74,815	6,818
6	1,370	0,124	44,430	1,030	0,086	3,890	19,400	29,660	4,520	72,600	75,182	8,755
7	1,370	0,129	45,140	0,836	0,084	3,580	13,710	27,820	4,770	76,940	61,022	7,931
8	1,360	0,127	45,050	0,830	0,097	3,850	14,410	27,720	4,870	69,350	61,029	8,546
9	1,380	0,129	47,940	0,907	0,097	3,970	18,250	27,720	5,210	75,080	65,725	8,281
10	1,410	0,134	47,400	0,954	0,085	3,330	18,960	27,820	5,260	64,920	67,660	7,025
11	1,330	0,125	44,400	1,130	0,082	3,710	20,380	27,820	5,110	71,980	84,962	8,356
12	1,360	0,140	46,540	0,837	0,069	3,280	19,170	27,610	4,370	65,350	61,544	7,048
13	1,330	0,140	46,320	0,832	0,051	4,280	18,430	27,820	3,750	63,130	62,556	9,240
14	1,330	0,140	45,790	0,896	0,052	3,010	18,830	27,000	3,740	63,940	67,368	6,573
15	1,340	0,142	46,030	1,030	0,052	3,090	19,160	27,310	3,980	52,990	76,866	6,713
16	1,320	0,138	46,600	0,861	0,094	3,110	18,190	29,560	3,770	68,100	65,227	6,674
17	1,360	0,135	46,320	0,978	0,081	3,550	19,610	29,560	3,880	58,110	71,912	7,664
18	1,380	0,137	45,900	0,962	0,097	4,490	20,000	28,630	-	-	69,710	9,782
Promedio	1,344	0,131	45,786	0,943	0,080	3,482	17,973	27,737	4,448	67,038	70,251	7,608
Máximo	1,410	0,142	47,940	1,130	0,097	4,490	20,380	29,660	5,260	77,900	84,962	9,782
Mínimo	1,290	0,123	44,400	0,830	0,051	2,330	13,710	25,680	3,740	52,990	61,022	5,148
Desv. Est.	0,033	0,007	0,969	0,086	0,016	0,511	1,858	1,302	0,576	6,513	6,906	1,121

Tabla D4. Características física-químicas del mineral reducido de la muestra R-6

Estadígrafo	Características Químicas, %								Dens. (t/m ³)	FM (%)	Met. Ni (%)	Met. Fe (%)
	Ni	Co	Fe	Ni°	Co°	Fe°	FeO	Fe ²⁺				
1	1,410	0,132	49,640	1,090	0,052	3,190	21,250	24,490	4,080	69,100	77,305	6,426
2	1,500	0,141	50,080	1,180	0,050	3,380	21,570	24,000	4,860	77,000	78,667	6,749
3	1,400	0,139	50,950	1,061	0,059	4,080	22,990	27,650	4,590	65,200	75,786	8,008
4	1,420	1,370	50,550	1,088	0,052	3,520	24,140	25,990	4,440	68,700	76,620	6,963
5	1,420	0,138	50,790	1,068	0,051	3,680	22,290	26,920	4,460	67,900	75,211	7,246
6	1,410	0,130	50,050	1,065	0,051	3,760	23,390	29,410	3,860	64,300	75,532	7,512
7	1,431	0,133	50,770	1,063	0,053	4,790	23,190	29,500	4,480	79,600	74,284	9,435
8	1,550	0,128	50,880	1,230	0,056	5,140	23,970	28,000	4,320	80,100	79,355	10,102
9	1,550	0,140	46,360	1,110	0,057	3,880	21,330	28,000	4,420	82,600	71,613	8,369
10	1,460	0,133	46,850	1,053	0,057	4,510	21,380	24,380	4,310	77,800	72,123	9,626
Promedio	1,455	0,258	49,692	1,101	0,054	3,993	22,550	26,834	4,382	73,230	75,649	8,044
Máximo	1,550	1,370	50,950	1,230	0,059	5,140	24,140	29,500	4,860	82,600	79,355	10,102
Mínimo	1,400	0,128	46,360	1,053	0,050	3,190	21,250	24,000	3,860	64,300	71,613	6,426
Desv. Est.	0,058	0,391	1,685	0,059	0,003	0,636	1,127	2,038	0,272	6,838	2,524	1,298

ANEXO E. Extractables del níquel y cobalto y características del mineral reducido y lixiviado

Tabla E1. Composición química del mineral reducido y lixiviado de la muestra R-20

Estadígrafos	Mineral Reducido y Lixiviado				
	Ni	Co	Fe	Extractables, %	
				Ni	Co
1	0,151	0,048	45,49	88,35	62,98
2	0,160	0,050	46,37	87,89	62,17
3	0,145	0,056	46,77	89,12	57,99
4	0,155	0,055	46,35	88,27	58,36
5	0,144	0,06	47,47	89,36	55,65
6	0,153	0,055	46,80	88,53	58,77
7	0,165	0,053	46,08	87,44	59,64
Promedio	0,153	0,054	46,476	88,422	59,365
Máximo	0,165	0,060	47,470	89,356	62,977
Mínimo	0,144	0,048	45,490	87,436	55,652
Desv. Est.	0,008	0,004	0,624	0,665	2,517

Tabla E2. Composición química del mineral reducido y lixiviado de la muestra R-8

Estadígrafos	Mineral Reducido y Lixiviado				
	Ni	Co	Fe	Extractables, %	
				Ni	Co
1	0,106	0,048	42,230	91,42	62,44
2	0,121	0,053	44,260	90,66	60,43
3	0,107	0,055	44,680	91,82	59,33
4	0,109	0,054	42,970	91,33	58,48
5	0,107	0,051	42,890	91,48	60,71
Promedio	0,110	0,052	43,406	91,342	60,279
Máximo	0,121	0,055	44,680	91,818	62,444
Mínimo	0,106	0,048	42,230	90,659	58,477
Desv. Est.	0,006	0,003	1,024	0,423	1,504

Tabla E3. Composición química del mineral reducido y lixiviado de la muestra R-6

Estadígrafos	Mineral Reducido y Lixiviado				
	Ni	Co	Fe	Extractables, %	
				Ni	Co
1	0,119	0,048	47,360	91,60	65,35
2	0,121	0,041	47,650	91,51	70,58
3	0,117	0,043	48,580	91,94	69,74
4	0,113	0,042	47,050	91,97	69,48
5	0,109	0,048	47,800	92,37	65,67
6	0,105	0,049	46,080	92,38	63,65
7	0,116	0,046	47,950	91,91	67,20
8	0,113	0,041	48,690	92,24	71,21
9	0,119	0,048	47,970	91,70	65,79
10	0,118	0,047	47,800	91,74	66,38
11	0,116	0,041	48,240	91,96	70,94
12	0,114	0,044	47,820	92,03	68,54
Promedio	0,115	0,045	47,749	91,944	67,879
Máximo	0,121	0,049	48,690	92,378	71,212
Mínimo	0,105	0,041	46,080	91,506	63,646
Desv. Est.	0,005	0,003	0,698	0,283	2,532

Tabla E4. Composición química del mineral reducido y lixiviado de la muestra R-10

Estadígrafos	Mineral Reducido y Lixiviado				
	Ni	Co	Fe	Extractables, %	
				Ni	Co
1	0,152	0,057	45,72	88,667	56,574
2	0,15	0,057	45,98	88,880	56,857
3	0,1432	0,0481	44,87	89,121	62,756
4	0,147	0,0492	45,02	88,870	60,923
5	0,139	0,05	44,17	89,273	60,571
6	0,138	0,047	44,46	89,420	63,178
7	0,142	0,049	44,55	89,135	61,689
8	0,138	0,051	44,18	89,352	59,791
9	0,1535	0,0567	45,82	88,580	56,897
10	0,1593	0,0569	45,05	87,946	56,006
11	0,156	0,057	47,98	88,917	58,620
12	0,14	0,056	45,35	89,477	56,988
13	0,132	0,049	46,45	90,313	63,256
14	0,137	0,051	45,36	89,705	60,837
15	0,147	0,04	46,07	89,123	69,757
16	0,133	0,057	46,04	90,153	56,876
17	0,135	0,057	45,7	89,930	56,555
18	0,146	0,05	44,18	88,735	60,580
Promedio	0,144	0,052	45,386	89,200	59,928
Máximo	0,159	0,057	47,980	90,313	69,757
Mínimo	0,132	0,040	44,170	87,946	56,006
Desv. Est.	0,008	0,005	0,969	0,587	3,501

ANEXO F. Velocidad de sedimentación y densificación de la pulpa lixiviada

Tabla F1. Sedimentación y densificación da la pulpa lixiviada, muestra R-20

Estadígrafos	Corriente Eléctrica (A)	Velocidad de sedimentación. (m/h)		Densificación (kg/m ³)	
		A. Electroimán	D. Electroimán	A. Electroimán	D. Electroimán
1	5,00	0,45	0,92	1 526,42	1 790,44
2	5,00	0,41	0,94	1 547,40	1 701,50
3	5,00	0,44	0,93	1 557,59	1 783,21
4	5,00	0,41	0,90	1 554,38	1 786,73
5	5,00	0,52	0,89	1 591,08	1 780,00
6	5,00	0,41	0,92	1 538,67	1 785,50
Promedio	5,00	0,44	0,92	1 552,59	1 771,23
Máximo	5,00	0,52	0,94	1 591,08	1 790,44
Mínimo	5,00	0,41	0,89	1 526,42	1 701,50
Desv. Est.	0,00	0,04	0,02	21,98	34,34

Tabla F2. Sedimentación y densificación da la pulpa lixiviada, muestra R-10

Estadígrafos	Corriente eléctrica (A)	Velocidad de sedimentación. (m/h)		Densificación (kg/m ³)	
		A. Electroimán	D. Electroimán	A. Electroimán	D. Electroimán
1	5,00	0,41	0,94	1 560,28	1 780,31
2	5,00	0,44	0,96	1 539,16	1 722,65
3	5,00	0,48	0,97	1 510,00	1 730,00
4	5,00	0,50	1,00	1 577,14	1 795,10
5	5,00	0,43	0,95	1 590,00	1 721,89
6	5,00	0,42	0,92	1 512,14	1 734,72
Promedio	5,00	0,45	0,96	1 548,12	1 747,45
Máximo	5,00	0,50	1,00	1 590,00	1 795,10
Mínimo	5,00	0,41	0,92	1 510,00	1 721,89
Desv. Est.	0,00	0,03	0,03	33,38	31,89

Tabla F3. Sedimentación y densificación da la pulpa lixiviada, muestra R-8

Estadígrafos	Corriente eléctrica (A)	Velocidad de sedimentación. (m/h)		Densificación (kg/m ³)	
		A. Electroimán	D. Electroimán	A. Electroimán	D. Electroimán
1	5,00	0,51	0,99	1 526,42	1 780,36
2	5,00	0,45	0,93	1 506,52	1 748,58
3	5,00	0,41	0,94	1 524,57	1 750,11
4	5,00	0,43	0,9	1 539,53	1 745,00
5	5,00	0,55	0,97	1 594,21	1 764,30
6	5,00	0,49	0,96	1 538,67	1 773,69
Promedio	5,00	0,47	0,95	1 538,32	1 760,34
Máximo	5,00	0,55	0,99	1 594,21	1 780,36
Mínimo	5,00	0,41	0,90	1 506,52	1 745,00
Desv. Est.	0,00	0,05	0,03	29,89	14,65

Tabla F4. Sedimentación y densificación da la pulpa lixiviada, muestra R-6

Estadígrafos	Corriente eléctrica (A)	Velocidad de sedimentación. (m/h)		Densificación (kg/m ³)	
		A. Electroimán	D. Electroimán	A. Electroimán	D. Electroimán
1	5,00	0,50	1,05	1 558,94	1 832,8
2	5,00	0,54	1,17	1 519,29	1 841,33
3	5,00	0,43	0,95	1 592,26	1 811,69
4	5,00	0,49	1,00	1 556,67	1 825,6
5	5,00	0,45	0,94	1 525,83	1 809,47
6	5,00	0,44	0,99	1 501,54	1 815,2
Promedio	5,00	0,47	1,02	1 542,42	1 822,68
Máximo	5,00	0,54	1,17	1 592,26	1 841,33
Mínimo	5,00	0,43	0,94	1 501,54	1 809,47
Desv. Est.	0,00	0,04	0,08	32,99	12,73