



**MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
UNIVERSIDAD DE MOA
FACULTAD DE GEOLOGÍA Y MINERÍA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA**

**TITULO: RECUPERACIÓN DE LA FRACCIÓN LIMONÍTICA EN EL
RECHAZO DE LA PLANTA DE PREPARACIÓN DE PULPA, EMPRESA
MOA NICKEL S.A.**

**Tesis presentada en opción al Título Académico de Máster en
Geología, 10ma Edición.**

Mención Geoquímica

Autor: Ing. Luis René Gendis Díaz

Moa, 2019



**MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
UNIVERSIDAD DE MOA
FACULTAD DE GEOLOGÍA Y MINERÍA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA**

**TITULO: RECUPERACIÓN DE LA FRACCIÓN LIMONÍTICA EN EL
RECHAZO DE LA PLANTA DE PREPARACIÓN DE PULPA, EMPRESA
MOA NICKEL S.A.**

**Tesis presentada en opción al Título Académico de Máster en
Geología, 10ma Edición.**

Mención Geoquímica

Autor: Ing. Luis René Gendis Díaz

Tutor: Dr. C. Alain Carballo Peña
Ms. C. Jorge Urra Abaira

Moa, 2019

PENSAMIENTO

Si puedes creer, al que cree todo le es posible.

Marcos 9:23

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Declaro que soy autor de este trabajo de tesis de Maestría. El diseño del presente proyecto y la información contenida en este documento, ha sido preparado por la Moa Nickel SA y por lo tanto, se considera información protegida.

Ninguna parte de la información referida aquí será proporcionada a una tercera parte, sin que Moa Nickel S.A. exprese su consentimiento por escrito.

Firma: _____



Luis René Gendis Díaz
lgendis@moanickel.com.cu

AGRADECIMIENTOS

Siempre que se concluye una obra, llega el momento de agradecer a todos aquellos que de forma directa o indirecta tuvieron mucho que ver con los resultados que hoy se ha logrado alcanzar. Quisiera agradecer a tantas personas, labor prácticamente imposible, ya que han sido muchos los que de manera desinteresada han dado de sí lo mejor en el momento indicado. Es por ello que especialmente agradezco:

- A Mi SEÑOR por estar siempre conmigo.
- A mi esposa Lisandra González e hijos Esther de Jesús y Lucas Abraham por ser parte del soporte de mi vida y el complemento que necesitaba para poder proseguir ante tanta dificultad.
- A mis Padres por ser parte importante de mi vida.
- A mi familia, en especial mi hermano, mi abuela y suegros por recordarme que no me encuentro solo.
- A mis Hermanos en Cristo y en especial a Jorge Urrea, Caridad Terrero, Yoel Garces Castro, Jose Antonio Poutriel Díaz, Edgardo, Yoscar por apoyarme en oración en los momentos decisivos de mi vida.
- A mis compañeros del Departamento de Tecnología de los Procesos de la empresa Moa Nickel SA. por contribuir en mi formación profesional, en especial a Eidier.
- A mis tutores y profesores en general por el esfuerzo aportado para contribuir en mi formación.
- A los especialistas de los centros de investigación CIPIMM y CEDINIQ que de una forma u otra aportaron su granito de arena para la conformación de este trabajo.

A todos muchas Gracias,

El autor

DEDICATORIA

Por el apoyo brindado para el logro de las metas trazadas es que empleo parte de este esfuerzo para dedicar este trabajo a quienes por su empeño tuvieron algo que ver con el mismo. Este trabajo va dedicado a:

- Dios por su grata presencia.
- Mi Esposa Lisandra por su dedicación para conmigo.
- Mis hijos Esther de Jesús y Lucas Abraham por su amor incalculable.
- Mi familia por su apoyo brindado.
- Mis Hermanos en Cristo por sus oraciones.
- Todos los que de una forma u otra han tenido que ver con mi desarrollo actual y futuro.

RESUMEN

Se presenta el nivel de participación de los yacimientos níquelíferos de Moa Occidental, Moa Oriental y Camarioca Norte en el alimentado a planta de Preparación de Pulpa de la empresa Moa Níquel SA, así como la influencia de la distribución de las menas principales en el proceso de beneficio de la limonita de balance, en los últimos 20 años.

El análisis de la distribución química – granulométrica en la fracción < 0.84 mm de las menas alimentadas a la planta de beneficio, corroboró el incremento hasta un 27 % como promedio anual del contenido de la fracción > 0.84 mm en la mezcla procesada. Con el incremento de las fracciones gruesas alimentadas al proceso, producto a la incorporación de mena limonítica fuera de balance y saprolítica, se identificó disminución de la composición química de los elementos útiles y en especial el contenido de níquel en un 0.188 %, Co en un 0.033 % y hierro en un 7.05 %. En cambio, los contenidos de Mg y SiO_2 , se incrementaron en 1.30 % y 2.45 % respectivamente.

La caracterización químico - granulométrica de las menas alimentadas a planta de preparación y el material de rechazo, permitió desarrollar a escala de laboratorio, tres propuestas nuevas para la modificación tecnológica, con el propósito de incrementar la recuperación de la mena limonítica con granulometría < 0.84 mm. Las variantes más favorables a escala de laboratorio para el incremento de la recuperación de la fracción útil, fueron la hidrominería para el lavado del rechazo con 59,495 t/año y el incremento de la abertura de tamiz hasta 1.18 mm con 97,090 t/año. A partir de estas propuestas se incrementa la recuperación de la fracción útil y se estima un aporte económico en el orden de los \$ 4.09 a \$ 6.6 millones de dólares al año.

PALABRAS CLAVES:

Mena limonítica de balance, recuperación, fracción < 0.84 mm.

SUMMARY

The level of contribution of nickel orebodies located in the west of Moa, Moa Oriental and Camarioca Norte in the ore fed to the Slurry Preparation plant of Moa Nickel S.A., is presented, as well as the influence of the distribution of the main ores on the balance limonite preparation process in the last 20 years.

The analysis of chemical – particle size distribution in the < 0.84 mm fraction of the ores fed to the preparation plant, corroborated the increase up to 27%, as annual average, of the > 0.84 mm fraction content in the processed mixture. With the increase of coarse fractions fed to the process, due to the incorporation of out of balance limonitic ore and saprolitic, a decrease of chemical composition of the elements was identified: nickel in 0.188%, Co in 0.033% and iron in a 7.05%. On the other hand, the Mg and SiO₂ contents increased in 1.30% and 2.45%, respectively.

The chemical – particle size characterization of the ores fed to the preparation plant and the reject material, allowed to develop three new proposals of technological modifications at lab scale with the purpose of increasing the recovery of the limonitic ore with particle size < 0.84 mm. The alternatives of better results at lab scale to increase the recovery of the useful fraction were the hydromining for the reject washing with 59,495 t / year and the processing of the lateritic ores with increase of the screen opening up to 1.18 mm with 97,090 t / year. From these values of useful fraction recovery, an economic contribution in the order of \$ 4.09 to \$ 6.6 million dollars per year is estimated.

KEYWORDS:

Balance limonitic ore, recovery, fraction < 0.84 mm.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I – CARACTERISTICAS GEOLÓGICAS DE LOS DEPOSITOS LATERÍTICOS DE LA BASE MINERA DE MOA NICKEL SA	5
1.1 Mineral	5
1.2 Menas	5
1.3 Clasificación de los horizontes mineros en Moa	6
1.3.1 Limonita fuera de balance	6
1.3.2 Limonita de balance	7
1.3.3 Saprolita descompuesta	7
1.3.4 Protolito (Roca Madre)	8
1.4 Yacimientos de menas lateríticas	9
1.5 Variabilidad de los perfiles lateríticos en los yacimientos ferroniquelíferos de Moa 9	
1.5.1 Perfil de intemperismo sobre rocas mantélicas	9
1.5.2 Perfil de intemperismo sobre rocas de la corteza oceánica	9
1.5.3 Perfil de intemperismo sobre rocas de la zona de transición manto–corteza oceánica	10
1.5.4 Perfil de intemperismo mixto y complejo	10
1.6 Características geológicas de los yacimientos lateríticos explotados por la Empresa Moa Nickel SA	11
1.6.1 Características geológicas de los yacimientos pertenecientes a la Concesión de Minera Moa Occidental.....	16
1.6.2 Características Geológicas del yacimiento de Moa Oriental	18
1.6.3 Características Geológicas del yacimiento de Camarioca Norte.....	19
1.7 Beneficio de los recursos minerales.....	21

1.8 Descripción del proceso de beneficio de las menas lateríticas	21
1.9 Características químicas, físicas y mineralógicas de la pulpa producto del proceso de beneficio de las menas lateríticas	26
1.10 Investigaciones precedentes sobre las pérdidas de menas con granulometría < 0.84 mm en la planta de Preparación de Pulpa	28
CAPÍTULO II - MATERIALES Y MÉTODOS	31
2.1 Materiales, equipos y utensilios empleados	31
2.1.1 Equipos utilizados	31
2.1.2 Utensilios empleados	32
2.2 Métodos y técnicas experimentales	32
2.2.1 Determinación de la masa de sólido	32
2.2.2 Análisis granulométrico de las muestras	33
2.2.3 Técnica de fluorescencia de rayos X para determinar la composición química	33
2.3 Diseño de experimentos	34
2.3.1 Diseño para la evaluación del “rechazo no conforme” en planta de Preparación de Pulpa	34
2.3.2 Diseño para la evaluación del procesamiento de las menas lateríticas con incremento de la abertura de tamiz hasta 1.18 mm	35
2.3.3 Diseño para la evaluación del lavado del rechazo, empleando técnicas de hidrominería	36
2.4 Fundamentos metodológicos del balance de materiales	37
CAPÍTULO III – EVALUACIÓN DE LA FRACCIÓN GRANULOMÉTRICA < 0.84 MM EN LAS MENAS ALIMENTADAS A LA PLANTA DE PREPARACIÓN DE PULPA	39
3.1 Descripción de la participación de los yacimientos en el proceso y su influencia en la variabilidad de las principales menas que conforman la mezcla alimentada	40

3.2	Análisis de la composición química y granulométrica de las menas procesadas por planta de Preparación de Pulpa con tamaño de partícula < 0.84 mm	42
3.2.1	Composición química básica de la fracción granulometría < 0.84 mm de las menas alimentadas	42
3.2.2	Distribución de la fracción granulometría < 0.84 mm de las menas alimentadas	48
3.3	Propuestas para la recuperación de la fracción útil < 0.84 mm contenida en el rechazo de la planta de Preparación de Pulpa	49
3.3.1	Procesamiento del “rechazo no conforme” en la planta de Preparación de Pulpa	50
3.3.2	Evaluación del procesamiento de las menas lateríticas con incremento de la abertura de tamiz hasta 1.18 mm	54
3.3.3	Evaluación de la técnica de hidrominería para el lavado del rechazo de la planta de Preparación de Pulpa	58
CONCLUSIONES		60
RECOMENDACIONES		62
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		63
ANEXOS		67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Clasificación de los horizontes lateríticos en Moa (Marsh, Anderson, & Gray, 2013).	6
Figura 2: Mena limonítica fuera de balance.	7
Figura 3: Mena limonítica de balance.	7
Figura 4: Mena serpentínica o saprolítica de balance.	8
Figura 5: Protolito (Roca Madre)	8
Figura 6: Vista superior de los yacimientos en Moa. Fuente: Plan Anual de Minería 2017.	12
Figura 7: Criba vibratoria.	22
Figura 8: Lavadoras de ejes y paletas.	22
Figura 9: Zaranda vibratoria.	23
Figura 10: Cilindro lavador de rechazo.	24
Figura 11: Transportador apilador CO-14.	24
Figura 12: Esquema tecnológico de la planta de Preparación de Pulpa. Fuente: Diagrama de Procesos de Moa Nickel S.A. (Modificado por el autor).	25
Figura 13: Esquema de preparación de muestras utilizado para la evaluación del “rechazo no conforme”.	35
Figura 14: Esquema de preparación de muestras utilizado para la evaluación de la variante de cambio de malla de 0.84 mm a 1.18 mm.	36
Figura 16: Recursos minados por yacimientos en el período de 1999 al 2018	40
Figura 16: Participación de los principales tipos de menas alimentadas a planta de Preparación de Pulpa.	41
Figura 17: Perfil geológico con más de 15 m de horizonte limonítico.	42
Figura 18: Perfil geológico con menos de 6 m de horizonte limonítico, con intercalaciones de rocas.	42

Figura 19: Distribución del contenido de Fe vs Mg en la fracción menor que 0.84 mm de las menas alimentadas a planta de Preparación de Pulpa.....	43
Figura 21: Distribución del contenido de Ni vs SiO ₂ en la fracción menor que 0.84 mm de las menas alimentadas a la planta de Preparación de Pulpa, en el período 1994 al 2018.	44
Figura 22: Distribución del contenido de Ni y Co en la fracción menor que 0.84 mm de las menas alimentadas a la planta de Preparación de Pulpa, en el período 1994 al 2018.	46
Figura 22: Distribución de fracción granulometría menor que 0.84 mm en las menas alimentadas y en el material de rechazo de la planta de Preparación de Pulpa.	48
Figura 24: Eficiencia de la planta de Preparación de Pulpa vs la fracción granulometría menor que 0.84 mm en el material de rechazo.	50
Figura 25: Histograma de distribución de la fracción granulométrica menor que 0.84 mm.	51
Figura 26 Histograma de frecuencia acumulativa del por ciento en peso de la fracción menor que 0.84 mm en el rechazo no conforme.....	51
Figura 27: Distribución del contenido de cobalto, fracción granulométrica menor que 1.18 mm y mayor que 0.84 mm.....	55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Composición litológica del mineral útil por variantes en el yacimiento Zona "A" (según Carballo, P.A. y Rodés, G.H. 1993).....	17
Tabla 2: Resultados de las principales investigaciones granulométricas realizadas en el yacimiento Zona "A" para establecer el % de pérdidas por rechazo en la planta de preparación de pulpa. (Carballo, P.A. et al; 1993).....	18
Tabla 3: Composición litológica del mineral por variantes en el yacimiento Moa Oriental (según Carballo, P.A. y Rodés, G.H. 1993).....	19
Tabla 4: Distribución de los elementos Ni, Co y Fe en las diferentes menas procesadas en la planta de Preparación de Pulpa en el período de 1999 al 2017.	20
Tabla 5: Contenido de níquel, hierro y cobalto promedio, de las menas alimentadas a la PPP según el "mineral minado", periodo 2000 al 2017.	46
Tabla 6: Composición granulométrica de 195 muestras de "rechazo no conforme"..	52
Tabla 7: Balance de material en planta de Preparación de Pulpa.....	52
Tabla 8: Composición química de los principales metales por fracción granulométrica.	53
Tabla 9: Composición química de los principales elementos presentes en el "rechazo no conforme".	54
Tabla 10: Resultados de la fracción granulométrica < 1.18 mm y < 0.84 mm, muestras de menas alimentadas a la planta de Preparación de Pulpa.	56
Tabla 11: Distribución de los principales elementos químicos de las pulpas, utilizando los tamices con abertura hasta 1.18 mm y 0.84 mm.	56
Tabla 12: Parámetros utilizados en el balance económico, tamiz con abertura hasta 1.18 mm.	57
Tabla 13: Fracción en peso retenidas a 0.84 mm de las muestras tomadas para la evaluación de la propuestas de hidrominería.....	58
Tabla 14: Estimado del beneficio económico de la implementación de las mallas de 1.18 mm.	59

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Contenido de los principales elementos químicos presente en la clase de tamaño menor que 0.84 mm de las menas procesadas por Moa Nickel SA.	67
Anexo 2: Composición granulométrica y quimismo de la clase de tamaño menor que 1.18 mm y mayor que 0.84 mm en las muestras de “rechazo no conforme”, %.	68
Anexo 3. Composición granulométrica y quimismo de la clase de tamaño menor que 0.84 mm en las muestras de “rechazo no conforme”, %.	74
Anexo 4: Composición granulométrica y quimismo de la clase de tamaño mayor que 4 mm en las muestras de “rechazo no conforme”, %.	80
Anexo 5: Composición granulométrica y quimismo de la clase de tamaño menor que 4 mm y mayor que 1.18 mm en las muestras de “rechazo no conforme”, %.	86
Anexo 6: Resultados de la primera corrida para la evaluación del cambio de malla de 0.84 mm a 1.18 mm.	92
Anexo 7: Resultados de la segunda corrida para la evaluación del cambio de malla de 0.84 mm a 1.18 mm.	93
Anexo 8: Resultados de la tercera corrida para la evaluación del cambio de malla de 0.84 mm a 1.18 mm.	94
Anexo 9: Resultados de la cuarta corrida para la evaluación del cambio de malla de 0.84 mm a 1.18 mm.	95
Anexo 10: Resultados de la quinta corrida para la evaluación del cambio de malla de 0.84 mm a 1.18 mm.	96
Anexo 11: Resultados de la sexta corrida para la evaluación del cambio de malla de 0.84 mm a 1.18 mm.	97
Anexo 12: Resultados de la séptima corrida para la evaluación del cambio de malla de 0.84 mm a 1.18 mm.	98
Anexo 13: Resultados de la primera corrida para la evaluación de la hidrominería. .	99
Anexo 14: Resultados de la segunda corrida para la evaluación de la hidrominería.	99
Anexo 15: Resultados de la tercera corrida para la evaluación de la hidrominería. .	99

Anexo 16: Representación del balance de materiales en la planta de Preparación de Pulpa.....	100
Anexo 17: Balanza Sartorius modelo Combics.	100
Anexo 18: Agitador IKA modelo RW 74 D.....	101
Anexo 19: Horno Felisa, con rango de temperatura de 0 a 300 °C.....	102
Anexo 20: Espectrómetro de Fluorescencia de rayos X.....	102
Anexo 21: Perfil geológico donde se visualizan los distintos horizontes lateríticos.	103
Anexo 22: Perfil geológico con predominio de mena saprolítica.	103
Anexo 23: Conversión de abertura de las mallas.....	104

INTRODUCCIÓN

Los yacimientos ubicados dentro de faja ofiolítica Mayarí - Sagua - Baracoa son parte de la asociación dislocadas en el norte del territorio cubano, con gran importancia para el país, entre otros factores, por presentar grandes extensiones de corteza de meteorización de lateritas níquelíferas. Estos yacimientos son la materia prima fundamental para la producción y exportación de compuestos de níquel y cobalto, con alto valor a nivel internacional.

Una de las empresas productora de estos compuestos es la Moa Nickel SA “Pedro Sotto Alba”, única en su tipo en el país por el empleo de la tecnología de lixiviación ácida a alta presión y temperatura. Para la producción de sulfuro de níquel y cobalto esta fábrica cuenta con siete plantas de proceso continuo, logrando altos estándares en eficiencia general de extracción de los metales de interés, ubicándola entre las primeras en el mundo por su competencia y rendimiento.

Las menas provenientes de los yacimientos lateríticos en explotación de la empresa Moa Nickel SA, son suministradas a la planta de Preparación de Pulpa. En esta planta, las menas son mezcladas con agua y pasadas por un sistema de desagregación-clasificación, permitiendo obtener la fracción granulométrica menor que 0.84 mm enriquecida en contenidos de níquel y cobalto.

En el proceso de beneficio de las menas, mediante la separación mecánica, se obtiene una pulpa producto con un contenido de sólido entre 20 y 25 %, la cual es enviada a los tanques de la planta de Espesadores de Pulpa para su posterior lixiviación.

El incremento de la capacidad de procesamiento y la modernización de las diferentes plantas metalúrgicas, a partir del año 2008, ha traído consigo cambios en algunas partes del proceso y un incremento de la alimentación de las menas en la planta de Preparación de Pulpa. Para mantener estabilidad ante el nuevo ritmo productivo de la empresa Moa Nickel SA, fue necesario realizar cambios en la planta de beneficio tales como: darle ángulo de inclinación de las lavadoras y zarandas vibratorias, así como la instalación de un cilindro lavador, modificaciones que hicieron posible incrementar la eficiencia de recuperación de la fracción menor que 0.84 mm desde el año 2003 hasta el 2014.

Con el progresivo agotamiento de los yacimientos lateríticos y la combinación de diferentes menas provenientes de los nuevos yacimientos en explotación, ha provocado la sobrecarga del equipamiento en la planta de Preparación de Pulpa, lo que genera arrastre del material útil con el rechazo. Con la disminución progresiva de la participación de las menas limoníticas extraídas en los frentes mineros, se incrementó hasta un 27 % la fracción mayor que 0.84 mm en la mezcla alimentada a la planta.

Las modificaciones tecnológicas realizadas en la planta de Preparación de Pulpa, no han permitido reducir en la actualidad, el incremento progresivo de la fracción limonítica de balance en el flujo de rechazo de esta planta, de manera que se plantea como **problema científico**: la necesidad de reducir las pérdidas de la fracción limonítica menor que 0.84 mm contenida en el rechazo de la planta de Preparación de Pulpa de la empresa Moa Nickel S.A., ante el agotamiento progresivo de los yacimientos lateríticos concesionados a esta empresa.

Sobre la base del problema científico, se establece como **objeto de la investigación**: las menas lateríticas procesadas en la planta de Preparación de Pulpa de la empresa Moa Nickel SA.

Se define como **campo de acción**: la composición granulométrica y química de las menas lateríticas.

El **objetivo general** del trabajo es: Evaluar a escala de laboratorio, posibles variantes para reducir las pérdidas de la fracción limonítica menor que 0.84 mm contenida en el rechazo de la planta de Preparación de Pulpa de la empresa Moa Nickel S.A.

Como **hipótesis** de solución del problema planteado, se establece: si se realiza la caracterización granulométrica y química del flujo de alimentación y del rechazo en la planta de Preparación de Pulpa, combinado con el análisis histórico de la participación de las menas alimentas, se podrán evaluar variantes de modificaciones para reducir las pérdidas de la fracción limonítica menor que 0.84 mm contenida en el rechazo de la empresa Moa Nickel S.A.

Los **objetivos específicos** son:

1. Correlacionar la distribución de las menas aportadas al proceso de beneficio en función de las características y participación de los yacimientos explotados.

-
2. Analizar la composición química y distribución granulométrica de la fracción menor que 0.84 mm en la mezcla de las menas alimentadas al proceso de beneficio.
 3. Experimentar propuestas de modificaciones tecnológicas en la planta de Preparación de Pulpa, para la recuperación de la fracción útil menor que 0.84 mm contenida en el rechazo.
 4. Seleccionar las variantes tecnológicas que permitan reducir las pérdidas de la mena limonítica de balance en el proceso de beneficio.

Las **tareas a desarrollar** para el cumplimiento de los objetivos específicos son:

1. Búsqueda bibliográfica para la sistematización del conocimiento sobre la distribución de las menas en la mezcla alimentada al proceso, a partir de la participación de los yacimientos
2. Determinación de los principales elementos químicos presente en la fracción granulométrica menor que 0.84 mm, así como la composición másica de esta fracción en las menas alimentadas a la planta de Preparación de Pulpa
3. Análisis de los resultados obtenidos en las pruebas realizadas a escala de laboratorio, para determinar cuáles de las propuestas evaluadas, resulta atractiva su implementación.

Los **métodos de investigación** empleados fueron:

1. Método de investigación documental y bibliográfica; para la sistematización del conjunto de conocimientos y teorías relacionadas con el objeto de estudio
2. Método histórico; para describir, caracterizar la evolución y desarrollo del objeto de estudio y establecer sus principales regularidades
3. Método de investigación experimental de las propuestas de modificación tecnológicas; para un mayor aprovechamiento del objeto de estudio.

De acuerdo a los objetivos propuestos, se presentan como **aportes metodológicos** de este trabajo:

1. Descripción histórica de la participación de las menas alimentadas a la planta de Preparación de Pulpa, en base a las características y participación de los

yacimientos explotados por la empresa Moa Nickel S.A. desde el inicio de las operaciones.

2. Caracterización de la fracción granulométrica menor que 0.84 mm, según la distribución de los elementos útiles y nocivos, lo que puede ser objeto de estudio en las carreras de Geología, Metalurgia e Ingeniería Química.

Se presenta como **valor práctico** de este trabajo: la recuperación de la mena limonítica que se pierde junto con el rechazo de la planta de Preparación de Pulpa, lo que representa un beneficio económico para la empresa Moa Nickel S.A.

CAPÍTULO I – CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS DE LOS DEPÓSITOS LATERÍTICOS DE LA BASE MINERA DE MOA NICKEL S.A.

La búsqueda bibliográfica se fundamentó en los conceptos que se utilizaron como base para el estudio del beneficio de las menas lateríticas, así como en la recopilación y exposición, siguiendo un orden lógico de los trabajos precedentes sobre la temática tratada. A continuación, se realizará el análisis del nivel de conocimiento existente sobre los estudios para la caracterización de las menas lateríticas procesadas por la empresa Moa Nickel SA y el análisis del aprovechamiento histórico de estas menas en la planta de Preparación de Pulpa.

1.1 Mineral

Un **mineral** es una sustancia natural, de composición química definida, normalmente sólido e inorgánico, y que tiene una cierta estructura cristalina. Es diferente de una roca, que puede ser un agregado de **minerales** o no **minerales** y que no tiene una composición química específica ("Concepto de Mineral,").

Los minerales se presentan en la naturaleza de forma muy variada y compleja, lo cual está determinado por los procesos físico-químicos a que se encuentran sometida la corteza terrestre. Estos pueden concentrarse en determinados lugares a los cuales se les denomina yacimientos y en cuya formación, se encuentran presentes leyes similares a las que posteriormente utiliza el hombre para la separación de componentes del mismo. Los componentes de los yacimientos minerales pueden ser clasificados en dos grandes grupos: útiles, los que el hombre utiliza para diferentes fines y estériles o ganga, los que en correspondencia con el desarrollo tecnológico no encuentran aún aplicación (Falcón, 2008).

1.2 Menas

Conjunto de rocas y minerales de los cuales, se pueden extraer componentes útiles, bien sean metales (oro, plata), o, materias primas no metálicas (calizas, azufre) de forma tal que su extracción y beneficio resulten económicamente rentables a las empresas mineras.

Como se conoce, en la explotación de una mena dada, se fijan límites mínimos de contenido para su explotación (cut off), los cuales se encuentran definidos por el

contenido mínimo en el cual su procesamiento resulta económico. De lo anterior surge el concepto de “mena o mineral útil”, que se define como aquel mineral con un contenido capaz de ser procesado por una tecnología dada con resultados económicos satisfactorios. Por tanto, la clasificación del material sólido extraído de la corteza terrestre en mineral útil o estéril depende del desarrollo de la tecnología para su procesamiento y las condiciones de mercado; es por tanto, variable en el tiempo por razones económicas y tecnológicas (Falcón, 2008).

1.3 Clasificación de los horizontes mineros en Moa

Para el estudio y mayor comprensión de los procesos geológicos que modifican la corteza terrestre, los yacimientos lateríticos se han clasificados en cuatro principales horizontes, como se muestra en la Figura 1.

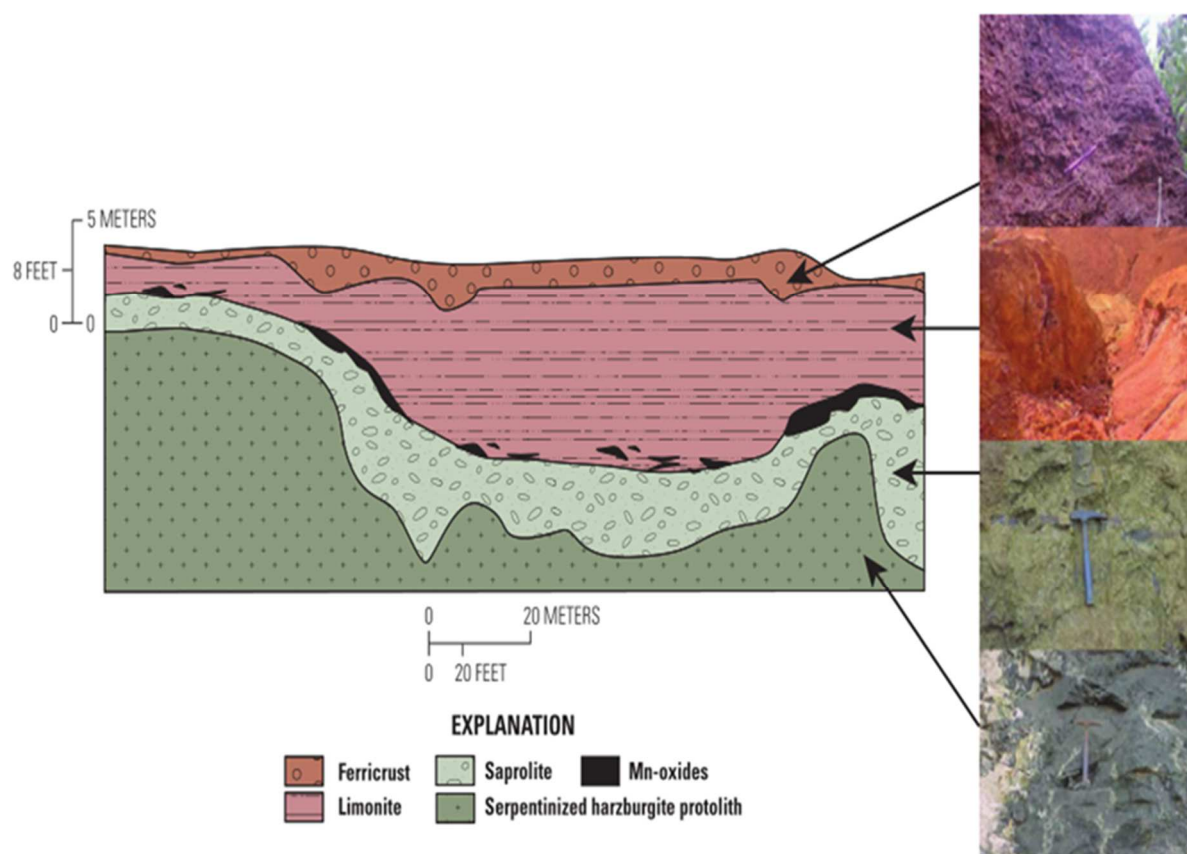


Figura 1: Clasificación de los horizontes lateríticos en Moa (Marsh, Anderson, & Gray, 2013).

1.3.1 Limonita fuera de balance

La limonita fuera de balance, es una mezcla de minerales de la clase IV (óxidos), según la clasificación de Strunz (Torrego Martín, 2013). El término se usa para

designar óxidos e hidróxidos masivos de hierro que presentan contenido de níquel $> 0.70\%$ y $< 1\%$ y contenido de hierro $> 35\%$, ver Figura 2.



Figura 2: Mena limonítica fuera de balance.

1.3.2 Limonita de balance

La limonita de balance es una mezcla de minerales de la clase IV (óxidos), según la clasificación de Strunz (Torrego Martín, 2013). Su fórmula general es $\text{FeO}(\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$. No obstante, en la actualidad el término se usa para designar óxidos e hidróxidos masivos de hierro sin identificar que carecen de cristales visibles y tienen raya parda amarillenta. La limonita de balance es normalmente el mineral goethita, pero puede consistir también en proporciones variables de magnetita, hematites, lepidocrocita, hisingerita, pitticita, jarosita. Esta mena se caracteriza por presentar contenido de níquel mayor que 1% y contenido de hierro mayor que 35% , ver Figura 3.



Figura 3: Mena limonítica de balance.

1.3.3 Saprolita descompuesta

La saprolita descompuesta está constituida por un grupo de minerales que se caracterizan por no presentarse en forma de cristales, excepto en el caso de pseudomorfismo. Son productos de alteración de ciertos silicatos magnésicos, especialmente olivino, piroxenos y anfíboles. Esta mena se caracteriza por presentar

contenido de níquel $> 1 \%$ y contenido de hierro en el rango de 12 a 35 %, ver Figura 4.



Figura 4: Mena serpentínica o saprolítica de balance.

1.3.4 Protolito (Roca Madre)

Las lateritas niquelíferas se pueden desarrollar a partir de rocas ultramáficas ricas en forsterita formadas en diferentes ambientes tectónicos (ofiolitas, complejos ígneos estratificados, komatitas, complejos tipo Alaska, complejos alcalinos). Estos protolitos tienen contenidos de níquel entre 0.2 y 0.4 % en peso. De todos ellos, el principal tipo de roca madre de los depósitos lateríticos de níquel son las peridotitas ofiolíticas, en las que predominan harzburgitas y dunitas con diferentes grados de serpentinización. El grado de serpentinización del protolito tiene un control importante sobre la formación de los yacimientos lateríticos de níquel y cobalto. A mayor grado de serpentinización del protolito, mayor es el espesor del horizonte saprolítico. En cambio, las peridotitas con menor grado de serpentinización tienden a formar depósitos tipo óxidos, con un horizonte saprolítico de escaso espesor (Gleeson, Herrington, Durango, Velázquez, & Koll, 2004; J. A. Proenza, 2015), ver Figura 5.



Figura 5: Protolito (Roca Madre)

1.4 Yacimientos de menas lateríticas

Es una formación en la que está presente una concentración estadísticamente anómala de menas (depósitos minerales) presentes en la corteza terrestre o litosfera. Un yacimiento minero es aquel depósito en el cual la calidad y cantidad de las menas presentes justifica un mayor estudio, el cual tiene por objetivo definir en cantidad, calidad, profundidad y dimensión del yacimiento, con el fin de desarrollar las actividades mineras para que la explotación del mismo sea económicamente rentable, con las tecnologías actuales (Falcón, 2008).

La mayoría de los elementos químicos naturales, incluso los menos abundantes, se encuentran en la corteza en cantidades considerables. Sin embargo, para que sean extraíbles, se necesitan concentraciones que sólo aparecen de manera excepcional, además de unas adecuadas condiciones de accesibilidad. Algunos procesos geológicos internos y externos pueden producir localmente concentraciones económicas de materiales como menas explotables de metales, carbón o hidrocarburos.

1.5 Variabilidad de los perfiles lateríticos en los yacimientos ferroniquelíferos de Moa

1.5.1 Perfil de intemperismo sobre rocas mantélicas

El predominio de las rocas mantélicas representadas por dunitas, harzburgitas, lherzolitas y en menor grado, wherlitas y websteritas, total o parcialmente serpentizadas, constituyen las rocas madres del basamento ofiolítico que originaron un perfil laterítico de menas ferro-niquelíferas y cobaltíferas, siendo el más distribuido en las cortezas de intemperismo de los yacimientos lateríticos del macizo Moa–Baracoa. Los agentes de intemperismo, en un clima tropical-subtropical y un relieve de montañas bajas de poca pendiente, crearon las condiciones óptimas para la desintegración de los minerales de las rocas ultramáficas, en particular del olivino y piroxenos (Donal, 2015; J. N. Muñoz, Rodríguez, & Barea, 2015).

1.5.2 Perfil de intemperismo sobre rocas de la corteza oceánica

En la región Moa–Baracoa existen áreas extensas donde afloran las rocas que representan la antigua corteza oceánica, en particular se destaca la existencia de las rocas máficas: gabros normales –bandeados, típicos de la base de la corteza

oceánica– gabros olivínicos, en menor grado gabro-noritas y troctolitas. Las relaciones espaciales con las rocas ultramáficas son tectónicas, con predominio de gabros isotrópicos (Donal, 2015).

En el perfil de las cortezas de intemperismo desarrolladas sobre las rocas máficas, en particular sobre los gabros, se desarrollaron cuatro horizontes muy similares a los formados por las rocas de la asociación mantélica, pero con un predominio de la formación de minerales del grupo de las arcillas, en particular de las arcillas caolínicas: dickita, nacrita, halloysita y montmorillonita, incrementando el contenido de aluminio en el perfil laterítico, sin llegar a constituir mena del metal, aportando además valores anómalos de sílice. El horizonte superior se caracteriza por concreciones de bauxitas y minerales arcillosos del grupo de la caolinita (Donal, 2015).

Las cortezas desarrolladas sobre las rocas de la antigua corteza oceánica no aportan valores de interés de níquel y cobalto, pero presentan contenidos de hierro entre 24.5 y 12.0 % y de alúmina entre 12.0 y 18.5 % (J. N. Muñoz, et al., 2015).

1.5.3 Perfil de intemperismo sobre rocas de la zona de transición manto– corteza oceánica

De acuerdo con los criterios de (J. Proenza, Gervilla, & Melgarejo, 1999) la denominada zona de transición, en los complejos ofiolíticos, representa la transformación física del manto a la corteza oceánica. Desde el punto de vista petrológico la zona de transición está compuesta por harzburgitas, como litología principal, dunitas, dunitas plagioclásicas, cromititas, wherlitas, troctolitas, piroxenitas, sills y diques de gabro-pegmatitas, entre otras (J. Proenza, et al., 1999). La zona de transición entre la porción superior del manto terrestre -astenosfera– y el nivel inferior de la corteza oceánica, constituye el contacto físico de las rocas mantélicas, representadas por ultramafitas tectonizadas y las rocas máficas del horizonte inferior de la corteza oceánica, representada por gabros normales, gabros olivínicos, noritas, troctolitas y sills de diabasas (J. N. Muñoz, et al., 2015).

1.5.4 Perfil de intemperismo mixto y complejo

Las cortezas de intemperismo originadas sobre las rocas afloradas del complejo ofiolítico no se desarrollaron de forma continua en el tiempo geológico ni bajo condiciones geodinámicas estables. Desde el punto de vista tectónico, diferentes

eventos condicionaron la posición espacial de las rocas e incluso, de las cortezas desarrolladas. El propio proceso de acreción de las rocas del complejo ofiolítico, determinó la disposición de escamas de diferentes litologías superpuestas, favoreciendo que en ocasiones se encuentren rocas mantélicas sobre rocas de la corteza oceánica, resultando una corteza de intemperismo donde el comportamiento geoquímico resulta totalmente caótico debido a la migración vertical de los elementos químicos. Bajo esas condiciones, altos contenidos de níquel pueden estar asociados a concentraciones anómalas de aluminio y sílice (J. N. Muñoz, et al., 2015).

1.6 Características geológicas de los yacimientos lateríticos explotados por la Empresa Moa Nickel SA

Los yacimientos de menas residuales de níquel desarrollados sobre litologías ultramáficas y máficas del complejo ofiolítico, constituyen las principales reservas de menas de hierro, níquel y cobalto, tal es el caso de Cuba. Las menas de níquel cubanas, se conocen prácticamente desde el mismo tiempo del descubrimiento de la isla en 1492 (G. J. N. Muñoz, 2004; Rodríguez, 2015).

Al estudiar las menas lateríticas residuales, es necesario analizar las condiciones geológicas de formación de estos yacimientos, además los factores climáticos, estructurales, hidrogeológicos, geomorfológicos; que originaron las potentes cortezas de intemperismo, de perfil laterítico, en las que se pueden establecer cuatro horizontes. Estos se diferencian en la composición mineralógica y química entre otros parámetros que se presentan en las condiciones exógenas del planeta como lo son: clima, geotectónica, geomorfología, hidrografía (G. J. N. Muñoz, 2004).

Dada su génesis, los yacimientos de cortezas ferro-niquelíferas existentes en el nordeste de Cuba oriental, son de tipo hipergénico, a partir del desarrollo y transformación de las litologías ultramáficas piroxénicas serpentinizadas en cortezas de intemperismo de hierro, níquel y cobalto, así como las litologías del complejo oceánico y las litologías que integran la zona de transición Manto-Corteza (Rodríguez, 2015).

Estos depósitos exógenos de corteza de intemperismo ferroniquelíferas, se presentan según un nivel evolutivo determinado, acorde con las condiciones geológicas y geoquímicas imperantes durante su desarrollo, no siendo la misma en los distintos sectores de explotación del yacimiento. Esto permite entender determinadas

diferencias entre el material laterítico de balance perteneciente a perfiles con distintos grados de alteración (P. A. Rojas, 1995).

Los yacimientos niquelíferos que aportan la materia prima para el proceso metalúrgico de la planta de Preparación de Pulpa, forman parte de las Cuchillas de Moa, del macizo Moa – Baracoa. En los últimos 20 años, las menas procesadas por la empresa Moa Nickel SA, provienen de los yacimientos Zona Sur, Zona A, Moa Oriental y Camarioca Norte, ver Figura 6.

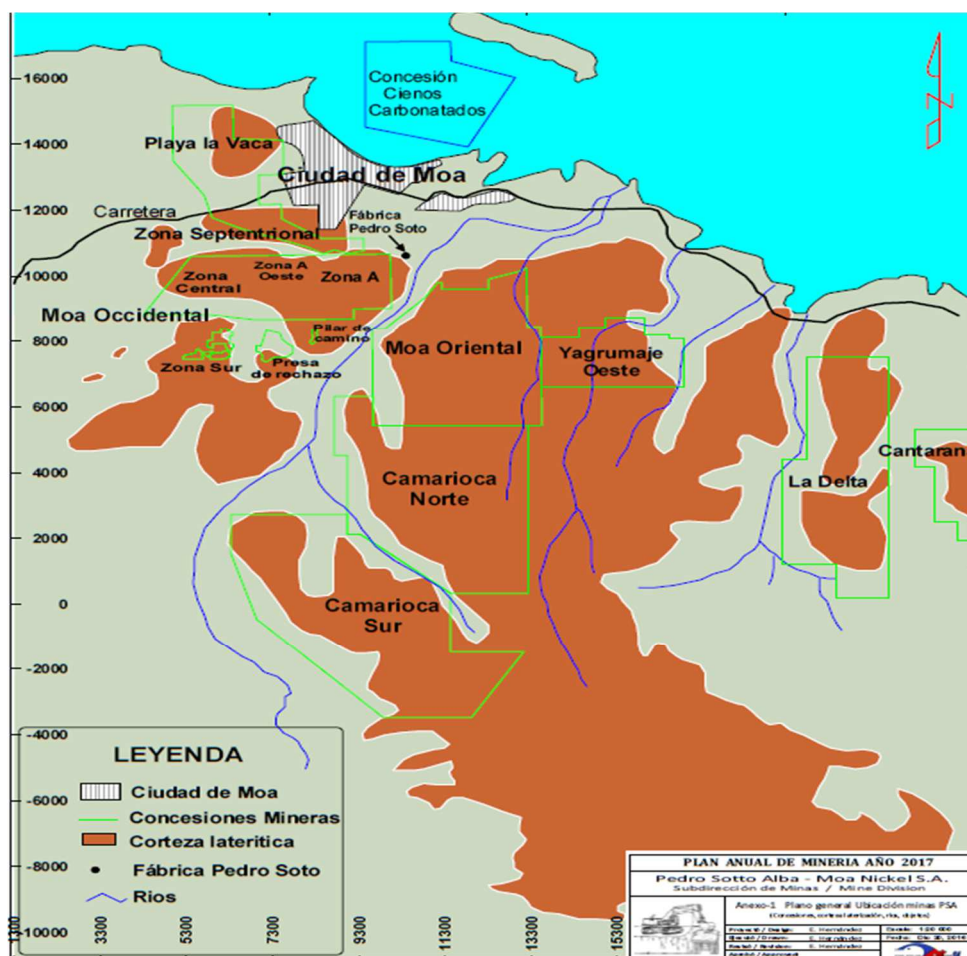


Figura 6: Vista superior de los yacimientos en Moa. Fuente: Plan Anual de Minería 2017.

Estos yacimientos se localizan en una región donde el clima de la zona es subtropical húmedo, distinguiéndose de acuerdo a la distribución de las precipitaciones en dos períodos de lluvia, desde mayo hasta junio y desde octubre-hasta enero. También se definen dos períodos de seca, comprendido entre los meses desde febrero a abril y desde junio hasta septiembre. Según análisis estadístico referente al comportamiento de las precipitaciones en Moa, el total anual varía entre 767 y 3560 mm. La cantidad de días con lluvias anuales que se registran en la serie analizada para cada

pluviómetro, manifiestan una regularidad cada cuatro años, en que existe un ascenso en la cantidad de días lluviosos. Ese comportamiento, corrobora la existencia de períodos húmedos, comprendidos entre los meses octubre – enero, con un promedio de lluvia que oscila entre 155 – 336 mm y el mes de mayo con un promedio de 169.7 mm; y períodos secos que se dividen entre los meses de febrero, marzo, abril, con un promedio de lluvia entre 113 - 151 mm y el que abarca los meses junio, julio, agosto con un acumulado promedio entre 120 - 122 mm de precipitaciones.

La temperatura media anual oscila entre 22.26 y 30.5 °C, con los meses más calurosos desde julio hasta septiembre y los más fríos enero y febrero. Los meses más lluviosos son noviembre y diciembre y los meses más secos marzo, julio y agosto.

En cuanto a la constitución geológica, estos yacimientos se han desarrollado sobre las ultramafitas del denominado macizo Moa - Baracoa, en el que se destacan dos unidades principales:

- Complejo ultramáfico (tectonitas)
- Complejo cumulativo de gabroides

El primero tiene un espesor considerable, estando constituido por harzburgitas, dunitas, lherzolitas, wehrlitas y piroxenitas, relacionadas entre sí por cambios transicionales. El complejo cumulativo está representado por grandes cuerpos de gabros normales y olivínicos, lherzolitas, troctolitas y anortositas asociadas a ultramafitas (Fonseca & et al, 1984). Los gabros están en algunos casos incluidos completamente en el macizo ultrabásico y en otros casos en sus extremos; el contacto entre ambos es tectónico. Los gabroides están separados de las rocas encajantes de composición vulcanógeno-sedimentarias por una zona estrecha de 100 a 200 metros de melange serpentinitico (Carballo, 1997).

Según la clasificación de (Smirnov, 1982); los yacimientos objetos de estudio se clasifican como de corteza de meteorización, tipo residual. La corteza tiene forma de manto y su composición y desarrollo está controlado por varios factores relacionados entre sí, como el tipo de rocas del basamento, el clima, relieve, condiciones geomorfológicas y tectónicas imperantes en la región.

De acuerdo a la intensidad del proceso de intemperismo, se pueden distinguir varios tipos de perfiles lateríticos con diferentes características, que muestran una

determinada regularidad en cuanto al espesor de la corteza, granulometría, distribución geoquímica de los principales elementos químicos y mineralogía del material constituyente (Carballo, 1997).

Estas regularidades han permitido a varios autores su descripción por zonas u horizontes bien definidos, aunque el paso de un horizonte a otro es generalmente gradual y en ocasiones no queda bien expresado.

En este sentido, (P. A. Rojas, 1995) aplica el término grado de madurez de la corteza de intemperismo, para reflejar los diferentes niveles evolutivos del perfil laterítico, según el desarrollo geológico e influenciado por las características mineralógicas y rasgos tectónicos de la roca madre, condiciones climáticas y geomorfológicas en los sectores de estudio, lo que predetermina las características físicas, químicas y mineralógicas del material laterítico.

(Lavaut, 1987) describió una zonalidad litológica, basada en tres perfiles de alteración:

- Perfiles estructurales completos (con todas las zonas litológicas).
- Perfiles estructurales incompletos (con un desarrollo hasta la zona de ocre estructural inicial).
- Perfiles inestructurales (con un desarrollo hasta la zona de ocre inestructural sin perdigones).

Las diferentes zonas u horizontes para un perfil de alteración completo, son las siguientes (Lavaut, 1987):

1. Zona u horizonte de ocres inestructurales con concreciones ferruginosas (OICC).
Presenta una coloración parda oscura, con abundantes concreciones de óxidos e hidróxidos de hierro. La potencia de esta zona varía de algunos centímetros a metros, estando constituida por hidróxidos muy estables de hierro y aluminio, que forman las concreciones y bloques cementados. Hacia la parte inferior las concreciones van disminuyendo de tamaño, prevaleciendo el material terroso de similar composición. El contacto con la zona subyacente es gradual, predominando progresivamente el material ocreoso.
2. Zona u horizonte de ocres inestructurales sin perdigones (OI). Es el horizonte que subyace a la de concreciones ferruginosas, formado por materiales terrosos, con

alta humedad, con predominio del color pardo-amarillento. Su potencia es variable, alcanzando hasta algunas decenas de metros. El material ocreo se caracteriza por presentar una granulometría medianamente gruesa (entre 0.83 mm y 0.417 mm) muy significativa (P. A. Rojas, 1995), con buen contenido del componente hematítico, espinelas y una densidad mayor que el material ocreo subyacente.

3. Zona u horizonte de ocres estructurales sin perdigones (OE). Constituye el material ocreo principal con una típica coloración amarilla pardusca, de fina granulometría (< 0.045 mm). En este horizonte predomina el componente goethítico.
4. Zona de ocre estructural inicial. Esta zona limita directamente con las serpentinitas alteradas o lixiviadas. El carácter ocreo de este material depende del grado de intemperismo de la roca madre y su potencia es variable, pero de poco espesor (no mayor de 3 a 5 metros).
5. Zona de Lixiviación. Se corresponde con la zona de serpentinitas alteradas, la que algunos autores extranjeros la denominan como zona de saprolita, estando constituida fundamentalmente por serpentinitas descompuestas y altamente lixiviadas, con una coloración y consistencia variable, en dependencia del grado de alteración; en ocasiones están presentes grietas y bolsones de material laterítico. Por lo regular, en esta zona existe una concentración anómala del níquel, mientras que el cobalto presenta valores muy bajos. Su potencia es muy irregular, desde centímetros hasta algunos metros. Esta zona transicional en profundidad a las serpentinitas duras o compactas, de las que se derivaron; además, ocasionalmente pueden presentar diversas grietas rellenas de silicatos de magnesio de color blanco a verdoso.
6. Zona de la roca madre agrietada o de serpentinitas duras. Corresponde con el horizonte inferior observable del perfil laterítico, constituido por rocas máficas y ultramáficas (serpentinitas, peridotitas y piroxenitas serpentinizadas). Son rocas de color verde grisáceo, compactas y agrietadas, con un contenido predominante de minerales del grupo de la serpentina, ocasionalmente piroxenos y olivinos (Fonseca & et al, 1984).

1.6.1 Características geológicas de los yacimientos pertenecientes a la Concesión de Minera Moa Occidental

Zona Sur

En este sector, debido a la actividad minera pretérita, se localizan remanentes de menas lateríticas en forma dispersa que pueden ser incorporados en la mezcla con las áreas que se tienen en cuenta en el plan de minería. El yacimiento se caracteriza por la presencia de numerosas escombreras, el volumen de escombros “in situ” es bajo y la mayor parte de los recursos son remanentes. Otras de las características es que presenta una alta concentración de elementos nocivos, tanto en el horizonte laterítico como saprolítico, sobre todo de sílice, según los resultados de quimismo (Urra, Hernández, & Hernández, 2015).

Zona A

El yacimiento Zona A limita al norte con el río Cabañas, al sur con Zona B, al este con el río Moa y al oeste con arroyo Cayo Chiquito. Para la caracterización de este yacimiento se elaboraron cuatro perfiles; lo cual permitió estudiar la morfología de los tipos litológicos presentes y del horizonte industrial de laterita de balance (LB); así como la relación de la litología con los principales tipos de menas. Adicionalmente, se realizó un estudio de la variabilidad de los principales parámetros geólogo-industriales a través de dichos perfiles. Como resultado de estos trabajos, se arribaron a las conclusiones siguientes (Alvarez, 1990):

- Las rocas que forman el substrato de la corteza de intemperismo del yacimiento Zona A, están representadas por el complejo ultramáfico compuestos por peridotitas y serpentinitas. Hacia la parte oeste del yacimiento se evidencia la presencia de cuerpos pequeños de gabro, por la existencia de minerales arcillosos y algunas zonas silicificadas que han sido detectadas en las muestras de perforación.
- La capa de laterita de balance se relaciona preferentemente con los ocreos estructurales, ocasionalmente con los ocreos inestructurales sin concreciones y esporádicamente con los OICC. La misma es discontinua en la parte septentrional y meridional del yacimiento.

- El parámetro más variable es la potencia de la capa de limonita de balance (LB); aunque con un grado de variabilidad inferior a la mayoría de los sectores del yacimiento Moa Occidental.
- El yacimiento se caracteriza por poseer altos contenidos de hierro, elevados valores de cobalto, sobre todo en la porción central; y contenidos moderados de níquel en toda el área.

En el yacimiento Zona A, la corteza de intemperismo tiene una extensión de 3.23 Km²; con un área explorada de 2.14 Km²; y un espesor medio 15.25 m; en un rango de variación desde 1 a 40 m. En este sentido, se destacan dos zonas de mayores espesores situadas al este y oeste del yacimiento y separadas por un área central que se ensancha hacia el norte y sur, donde los espesores de la corteza son menores que el promedio del yacimiento, con valores que oscilan entre 5.5 a 15.0 m (Carballo & Rodés, 1993).

En general, la corteza de intemperismo está bien desarrollada, con una altimetría del terreno, pendientes del relieve y régimen de intercambio de agua que han generado un perfil completo, con fenómenos de redeposición local y un predominio de las menas constituyentes del escombros: laterita ferruginosa de balance (FB); laterita ferruginosa fuera de balance (FF); lo que provoca una relación escombros-mineral desfavorable y superior a 1.0 m³/t (Carballo, 1997).

En este yacimiento, el horizonte de ocre estructurales predomina dentro de la composición de la mena limonítica de balance, independientemente de la variante de cálculo de reservas, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1: Composición litológica del mineral útil por variantes en el yacimiento Zona "A" (según Carballo, P.A. y Rodés, G.H. 1993).

TIPOS LITOLOGICOS	VARIANTES				
	1.0% Ni	0.9% Ni	0.8% Ni	0.7% Ni	0.100% Co
OICC + OI	5.8	9.3	15.0	20.7	11.7
OE	94.2	90.7	85.0	79.3	88.3

Por la importancia e influencia particular de la granulometría en la fase de procesamiento industrial, se muestran algunas de estas investigaciones realizadas, las que son expuestas de forma resumida en la Tabla 2.

Tabla 2: Resultados de las principales investigaciones granulométricas realizadas en el yacimiento Zona "A" para establecer el % de pérdidas por rechazo en la planta de preparación de pulpa. (Carballo, P.A. et al; 1993)

	VARIANTES				
	1.0% Ni	0.9% Ni	0.8% Ni	0.7% Ni	0.100% Co
Revilla, D. 1991					
> 0.83 mm	8.63	11.96	12.18	12.62	11.86
< 0.83 mm	91.37	88.04	87.82	87.38	88.14
Guevara, J. 1992					
> 0.83 mm	7.48	7.73	8.37	10.56	10.19
< 0.83 mm	92.52	92.27	91.63	89.44	89.81
Promedio:					
> 0.83 mm	8.06	9.85	10.28	11.59	11.03
< 0.83 mm	91.44	90.15	89.72	88.41	88.97
Base 12 %					
> 0.83 mm	12.0	14.67	15.31	17.26	16.42
< 0.83 mm	88.0	85.33	84.69	82.74	83.58

El cálculo en base al 12 % se realizó considerando la elevación perspectiva de la eficiencia de la planta de Preparación de Pulpa para alcanzar un índice de rechazo real de esta magnitud, según el proyecto correspondiente, ya que frecuentemente supera el 20 % (Carballo, 1997).

1.6.2 Características Geológicas del yacimiento de Moa Oriental

Las rocas que componen el substrato del yacimiento Moa Oriental están representadas por las variedades litológicas siguientes: serpentinitas apoharzburgíticas y harzburgitas serpentinizadas. Ambos tipos de rocas cubren casi

la totalidad del área del yacimiento, siendo las primeras las más abundantes. Estas rocas son por lo general estériles y presentan colores gris-verdoso, con tonalidades gris, verde y negro (Pinel & et al, 1992).

Con una localización más restringida, aparecen también otras variedades como serpentinitas apoduníticas, serpentinitas crisotílicas y una zona de intensa carbonatización metasomática de las serpentinitas. En el área del yacimiento, la corteza de intemperismo tiene una extensión de 8.30 Km² con un espesor variable de la misma de 1 a 42 m y un valor promedio de 8.2 m. La relación escombro-mineral en el yacimiento es de 0.48 m³/t, lo cual es muy favorable para la explotación del mismo.

En cuanto a la constitución litológica de la mena limonítica de balance; los ocre estructurales predominan, aunque es característico en este yacimiento un incremento atípico de los ocre inestructurales (OICP + OI), lo cual pudiera ocasionar una elevación de las pérdidas por rechazo, durante el proceso de beneficio. A continuación, se muestra la composición litológica de la mena limonítica de balance por variantes de cálculo de reservas:

Tabla 3: Composición litológica del mineral por variantes en el yacimiento Moa Oriental (según Carballo, P.A. y Rodés, G.H. 1993).

TIPOS LITOLOGICOS	VARIANTES				
	1.0 %Ni	0.9 %Ni	0.8 %Ni	0.7 %Ni	0.100 %Co
OICP + OI	35.3	39.6	45.9	52.1	42.2
OE	64.7	60.4	54.1	47.9	57.8

1.6.3 Características Geológicas del yacimiento de Camarioca Norte

Este yacimiento se caracteriza por tener un relieve montañoso, con cotas que oscilan entre 200 y 950 m; lo que dificulta el acceso al mismo. Está limitado al norte por el yacimiento Moa Oriental, al sur por el yacimiento Piloto, al oeste por el Río Moa y al este por el yacimiento Punta Gorda.

El yacimiento Camarioca Norte ha sido explorado en diferentes etapas junto con los yacimientos Camarioca Este y Sur (Ivanov & et al, 1985); siendo referido comúnmente en estos trabajos como el Sector V del Yacimiento Las Camariocas, mientras que a Camarioca Este se refiere como el Sector IV; y a Camarioca Sur como el Sector VI.

El yacimiento Camarioca Norte está constituido por dos cuerpos minerales o depósitos espacialmente bien definidos, con su correspondiente distribución de reservas. Las rocas del basamento están constituidas fundamentalmente por serpentinitas apoharzburgíticas y harzburgitas serpentinizadas y en menor escala por dunitas serpentinizadas. De forma aislada aparecen también peridotitas anfibolitizadas y serpentinitas antigoritas. Todas estas rocas han sufrido fuertes procesos de alteración, principalmente de serpentización, así como procesos metasomáticos que han dado lugar a la formación de anfíboles, talcos, carbonatos. Los cúmulos máficos de composición básica aparecen de forma aislada y su influencia en la formación de la corteza es muy pobre, estando representados por gabros y plagioclasitas (Urra, Mallea, Navarro, & Hernández, 2010).

La corteza de intemperismo superficial tiene forma de manto, con un área de 10 Km² y un espesor de 6.9 m; en ocasiones interrumpida por afloramientos, con pendientes suaves e inclinaciones bruscas en los límites de la misma. En cuanto a su composición, predominan los ocres deleznales de granulometría variable, de color pardo rojizo hacia los horizontes superiores, que van aclarando su tonalidad en profundidad hasta un color pardo amarillento y pardo-verdoso, con una fuerte presencia de las estructuras de la roca original y relictos de piroxenos alterados y otros minerales (Ortiz, 1994).

En la Tabla 4 se presenta el por ciento de participación de las menas alimentadas a planta de Preparación de Pulpa desde el año 1994 hasta el 2017 y la composición química promedio del níquel, cobalto y el hierro de los yacimientos pertenecientes a Moa Occidental, yacimiento Moa Oriental y Camarioca Norte.

Tabla 4: Distribución de los elementos Ni, Co y Fe en las diferentes menas procesadas en la planta de Preparación de Pulpa en el período de 1999 al 2017.

Año	Parámetros	Moa Occidental			Moa Oriental			Camarioca Norte		
		LFB	LB	SB	LFB	LB	SB	LFB	LB	SB
1999-2017	Participación, %	9.69	24.07	4.92	9.42	34.73	3.84	2.14	10.55	0.66
	Ni, %	0.829	1.187	1.391	0.859	1.302	1.312	0.861	1.292	1.145
	Co, %	0.099	0.114	0.066	0.100	0.147	0.075	0.100	0.133	0.058
	Fe, %	44.22	44.03	28.35	45.52	46.19	26.75	45.56	45.09	16.10

1.7 Beneficio de los recursos minerales

Se le denomina beneficio o preparación de minerales, al conjunto de operaciones y procesos primarios de elaboración de la materia prima mineral, sin transformación química de los minerales en volumen, que tienen el objetivo de separar todos los componentes útiles de la roca y los componentes estériles que le acompañan. Para ello se cuenta con un considerable grupo de tecnologías que se inician su aplicación desde el mismo momento en que estos son extraídos de la corteza terrestre. Las tecnologías de beneficio se fundamentan en la utilización de diferencias de propiedades físicas, o, físico químicas de los componentes minerales y la roca. La mayoría de los componentes minerales tienen que ser sometidos a beneficio previo, debido a que su estado natural no satisface las complejas condiciones que exige su procesamiento industrial. Por cuanto, los minerales que se explotan presentan cada vez más complejidad y menor contenido, no solo se hace más necesario el beneficio, sino que requiere también de su perfeccionamiento. Una ventaja del beneficio es que el mismo no solo concentra determinado componente, sino que puede eliminar la presencia de los componentes dañinos que lo acompañan. (Falcón, 2008).

1.8 Descripción del proceso de beneficio de las menas lateríticas

El objetivo de la planta de Preparación de Pulpa de la empresa Moa Nickel SA, se basa en la obtención de un producto concentrado de mena limonítica. En este proceso ocurre la separación de las fracciones limoníticas de balance de la limoníticas fuera de balance y saprolítica, aunque una parte de estas últimas (serpentinita de balance) pasa al producto concentrado (Camacho, 2018).

La mena se alimenta a la planta a través de camiones desde los yacimientos o desde los depósitos intermedios. El tiempo de retención en la tolva, depende de la capacidad de la planta. La tolva posee nueve martillos para mantener uniforme y compacto un volumen definido de menas alimentadas, así como un juego de cadenas para romper los terrones grandes y amortiguar el golpe de las rocas al caer.

Las menas dentro de las tolvas, son transportadas por esteras de velocidad variable, donde se controla la capacidad del mineral alimentado a la planta. Estas esteras conducen las menas hacia dos transportadores de banda. La velocidad de estos transportadores de banda es constante, presentando una inclinación de 15 grados cada uno. Por estos transportadores no deben de pasar rocas mayores de 457 mm

(18 pulgadas); si sobrepasan este tamaño el operador debe romper las mismas en fracciones más pequeñas utilizando para ello los martillos neumáticos.

Las menas lateríticas son conducido a las cribas vibratorias, la cual poseen barras situadas paralelamente a una distancia de 100 mm (4 pulgadas). En estos equipos de clasificación de tamaño de partículas, es donde por primera vez se le añade agua en forma atomizada, a una presión de 80 lb/pulg², con el objetivo de romper los aglomerados de menas que pasaron a través del embudo y lavar las fracciones útiles que vienen adheridas a las rocas serpentínicas, ver Figura 7.



Figura 7: Criba vibratoria.

La pulpa con partículas de mineral < 100 mm (4 pulgadas) cae por gravedad de las cribas vibratorias a las lavadoras de ejes y paletas, las cuales desagregan los aglomerados de menas. Las rocas de mayor tamaño quedan en las lavadoras, formando una cama y la pulpa de aproximadamente 30 % de sólidos, cae por gravedad a las zarandas primarias, ver Figura 8.



Figura 8: Lavadoras de ejes y paletas.

Las zarandas primarias están inclinadas 10 grado para lograr menor tiempo de retención del mineral en su interior, y poseen mallas de 6,5 mm ver Figura 9.



Figura 9: Zaranda vibratoria.

Las partículas mayores de 6.5 mm, que son en su mayoría de carácter serpentínico, son rechazadas por las zarandas primarias y van al transportador de rechazo y las menores de 6.5 mm se descarga en una zaranda secundaria.

Las zarandas secundarias separan las partículas menores que 0,84 mm, formando una pulpa de aproximadamente 20 % de sólidos, alimentándose por gravedad a la planta de Espesadores de Pulpa a través de una tubería de concreto de 610 mm de diámetro (24 pulgadas).

En el proceso de beneficio del mineral se denomina rechazo a las fracciones mayores que 0,84 mm, no consideradas como útiles en el proceso actual de lixiviación ácida a alta presión y temperatura. El contenido de fracciones útiles en el rechazo está relacionado con las características de las menas y la eficiencia de la planta de Preparación de Pulpa.

El rechazo de las zarandas secundarias, se une al de las primarias, y es enviado al circuito de rechazo mediante un transportador (CO-11), el cual descarga a un cilindro lavador que es el encargado de desmenuzar y lavar los aglomerados de mineral que no fueron recuperados durante el proceso de clasificación, ver Figura 10.



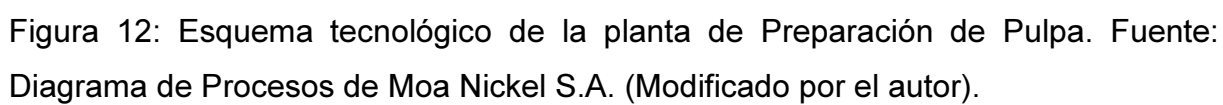
Figura 10: Cilindro lavador de rechazo.

Este producto es descargado a una zaranda (SN-06) en la cual ocurre el último proceso de clasificación. La pulpa producto de la zaranda SN-06 es recolectada en un foso y luego recirculada al proceso. Las partículas de mayor tamaño ($> 0,84$ mm) son trasladadas a través de la banda transportadora CO-12, la cual descarga en el transportador apilador CO-14, ver Figura 11.



Figura 11: Transportador apilador CO-14.

El agua que se utiliza en los rociadores para lavar el mineral, es extraída del reboso de los tanques espesadores de pulpa y se bombea a través de una tubería de 460 mm de diámetro (18 pulgadas) hasta la planta de Preparación de Pulpa. En la Figura 12 se muestra el esquema general de esta planta de beneficio.



1.9 Características químicas, físicas y mineralógicas de la pulpa producto del proceso de beneficio de las menas lateríticas

En los estudios de beneficios desarrollados anteriormente, se observa la tendencia de los metales (Ni, Co, Fe, Al, Mg) a concentrarse en determinados productos; el níquel lo hace hacia los productos finos y débilmente magnéticos, el aluminio y el magnesio se concentran en los productos gruesos (Agyei, 2006; Hernández, Legrá, Trujillo, & Toirac, 2010). Resulta de mucha importancia conocer las fases minerales en las que se encuentran, porque en dependencia de ello, así serán los resultados del proceso de beneficio (Li et al., 2009).

Las diferentes clases granulométricas de las cortezas de intemperismo presentan contrastes significativos en cuanto al porcentaje en peso de la fracción, contenido químico y mineralógico que resulta de interés desde el punto de vista tecnológico. La meteorización consiste en un grupo de procesos mediante los cuales las rocas y minerales expuestos a la acción de factores atmosféricos son destruidos físicamente o desintegrados químicamente, pudiendo cambiar su color, coherencia, forma, textura y composición (Ariosa, W., Borgues, & Díaz, 2003; Hernández, et al., 2010; Manceau et al., 2000).

Las principales fases mineralógicas que constituyen las menas lateríticas son: goethita que contiene del 58 al 78 % del níquel presente en las lateritas (Agyei, 2006; Hernández, et al., 2010; Luo, Feng, Ou, Zhang, & Lu, 2009; Madigan, Leong, & Ong, 2009; P.A. Rojas, 2001), en la maghemita y magnetita se distribuye del 15 al 25 % y en las asbolanas la presencia de níquel está entre 12 y 17 %. El cobalto se distribuye del 80 al 90 % en las asbolanas, del 10 al 20 % en la maghemita y magnetita, encontrándose menor porcentaje en la goethita, pero en los reactores del proceso de lixiviación en la tecnología ácida a presión, el níquel y cobalto presente en la fracción magnética prácticamente no se lixivian, creando dificultades tecnológicas y ocasionando pérdidas en las colas del proceso.

Con anterioridad se hacía referencia al comportamiento de las fases de acuerdo al diámetro de las partículas y se aprecia la tendencia de la goethita a concentrarse en las clases de tamaño finas, la cromita y gibbsita lo hacen en las clases intermedias, los minerales del grupo de la serpentina, se concentra en las partículas de mayor diámetro y la magnetita no ofrece una regularidad en su concentración (Hernández, et

al., 2010; Wilson, Savage, Cuadros, Shibata, & Vala Ragnarsdottir, 2006). Según (Cerpa A. et al., 1999), las lateritas cubanas están compuestas fundamentalmente por minerales del grupo de la serpentina y goethita en diferentes proporciones.

El índice de sedimentación surge como necesidad de diferenciar los frentes de minerales durante su sedimentación, basados en las características de los elementos químicos principales que controlan el proceso. Cada frente tiene características químicas diferentes, por lo que así será su comportamiento durante la sedimentación y su índice en cada caso. Este parámetro se propone para la homogenización de los minerales lateríticos y está dado por la ecuación siguiente:

$$I_{sed} = \frac{\sum \text{contenido de metales ligeros}}{\sum \text{contenido de metales pesados}} = \frac{\%Mg + \%Al + \%SiO_2}{\%Fe + \%Ni + \%Co + \%Mn + \%Cr}$$

Se ha comprobado que el proceso de sedimentación se favorece si el $I_{sed} < 0,22$ (Beyris, 1997).

Las menas lateríticas que presentan buena velocidad de sedimentación, están compuestos mineralógicamente por fases de óxidos e hidróxidos de hierro: goethita, hematina y magnetita, con cierta cantidad de gibbsita. Estos minerales están presentes tanto en la fracción fina como en la gruesa, pues ambas fracciones poseen prácticamente la misma composición mineralógica, predominando los minerales de metales más pesados (ferrosos), lo cual explica la elevada densidad de estos materiales (Perez, 2010).

En la composición mineralógica de las menas con baja velocidad de sedimentación, se detecta una marcada diferencia entre la fracción gruesa y la fina, pues mientras que la fracción $< 0,074$ mm está constituida por fases mineralógicas tradicionalmente conocidas en las lateritas como son: goethita, hematita y magnetita, en la clase granulométrica gruesa están presentes los silicatos de magnesio y la sílice: clorita, olivino y cuarzo, que son minerales de elementos ligeros que le proporcionan una baja densidad; constituyendo su presencia en la pulpa un factor desfavorable para la sedimentación (P. A. Rojas & Beyris, 1994).

1.10 Investigaciones precedentes sobre las pérdidas de menas con granulometría < 0.84 mm en la planta de Preparación de Pulpa

La evaluación de la planta de Preparación de Pulpa, desde el enfoque del aprovechamiento de los recursos minerales, es un tema que ha sido tratado con anterioridad por varios investigadores, a partir de la importancia que representa para el ámbito económico, social y ambiental el uso racional de las menas lateríticas.

En el Primer Encuentro Científico-Técnico del Níquel efectuado en Moa (Sanchez, 1981) propone dos modificaciones tecnológicas para la recuperación de la fracción útil < 0.84 mm que se perdía junto con el rechazo. La implementación de una de estas variantes permitiría incrementar la eficiencia de la planta de 88 % a 95 %.

(P. A. Rojas & Carballo, 1993), realizan una caracterización del rechazo de esta planta, determinando que estaba compuesto por óxidos e hidróxidos de hierro (goethita), además de silicatos de magnesio (lizardita) e hidróxidos de aluminio (gibbsita), con granulometría de un 60 % de las partículas < 0.83 mm, lo que expresa que existen ciertas pérdidas durante el proceso de lavado y preparación de la pulpa limonítica. La eficiencia de la planta era de 88 %, teniendo en cuenta que en ese período el rechazo de la planta oscilaba entre 12 % y 15 %, con respecto al flujo de menas alimentado.

(Falcón & Hernández, 1993) proponen varios esquemas de procesamiento de las menas lateríticas, en ampliación del proceso actual, donde combinando operaciones unitarias tales como reducción de tamaño, lavado, separación magnética y beneficio gravitacional, lograba la separación y concentración de fases minerales a escala de laboratorio, con lo que se puede mejorar la extracción de diferentes componentes y regular la homogenización de las menas alimentadas al proceso.

(Hernández, Falcón, & Toirac, 2001), demuestra partiendo de los resultados de ensayos de procesamiento de menas lateríticas de los yacimientos de Moa, a escala de laboratorio y de banco, que la eficiencia de la planta pudiera incrementarse por encima de 90 %, si se implementa la trituración previa de las menas antes del proceso de lavado.

A partir del año 2003, quedó implementado en la planta de Preparación de Pulpa, el circuito de rechazo, variante similar a una de las propuestas realizadas por (Sanchez, 1981). (Sanchez, Iglesias, & Calzada, 2012) en la revista Tecnología Química, publica

la implementación de esta modificación tecnológica, donde demuestra que la eficiencia de la planta se incrementó de 88 % a 97 %.

Al determinar los parámetros técnicos de los principales equipos que componen la planta de beneficio, (Legrá, 2012) realiza un análisis crítico de los resultados, con el objetivo de aumentar la eficiencia de la planta en dependencia del volumen que se procesa. También efectúa una valoración técnico-económica, teniendo en cuenta el mejor aprovechamiento de las capacidades instaladas y una valoración ambiental del proceso para mejorar las condiciones de trabajo y del territorio.

En el estudio realizado al rechazo de la planta de Preparación de Pulpa, depositado en la nueva Presa de Rechazo, (Urrea, 2015) demostró la existencia de contenido relativo de fracciones limoníticas útiles menor que 0.84 mm, que alcanzaban un 68 % en peso de la masa total muestreada. En la caracterización realizada a los principales flujos del esquema tecnológico de esta planta, (Cuenca, 2017) comprobó mediante balance de materiales, que el incremento de la fracción gruesa alimentada, influye en la disminución de la eficiencia de obtención de la fracción menor que 0.84 mm. También demostró que la causa del incremento del rechazo en la planta, está condicionado por la incorporación al proceso de otras menas que no constituyen la limonita de balance (LB). Estas menas aportan al proceso prácticamente la mitad del material que se rechaza, comprendidas en la clase de tamaño menor que 100 mm y mayor que 0,84 mm.

(Herrera, 2018), determina que el 64.54 % del material de rechazo de la planta de Preparación de Pulpa, está compuesto por la fracción granulométrica menor que 4 mm y mayor que 1.98 mm. Esta fracción granulométrica está constituida mayoritariamente por óxido de silicio, aluminio, magnesio e hierro, lo que justifica el predominio de fases mineralógicas serpentina, gibbsita y cuarzo, con tres etapas de descomposición térmica relacionados con la pérdida de humedad y la reestructuración de los minerales de serpentina.

En los estudios más actuales sobre el beneficio de la mena limonítica, (Gendis & Mosqueda, 2018a) propusieron modificar el diseño del cilindro lavador de rechazo de la planta de Preparación de Pulpa, a partir los resultados a escala de laboratorio, donde recuperaron entre un 25 % a un 50 % de la fracción menor que 084 mm que se rechaza. (Gendis & Mosqueda, 2018b) realizaron además a escala de laboratorio, los

primeros estudios de evaluación del incremento del orificio en las mallas de la planta, demostrando que con el empleo de un tamiz de 1.18 mm, se recupera el 6 % de la fracción menor que 0.84 mm que se rechaza en la planta.

La información obtenida por los distintos investigadores que abordaron el tema de aprovechamiento de los recursos minerales que se procesan en la empresa Moa Nickel SA, indican que existe la posibilidad de recuperar las menas lateríticas que se pierden junto con el rechazo de esta planta. De manera que en la investigación fueron evaluadas propuestas de modificaciones tecnológicas, dirigidas a reducir la fracción útil que se pierde en el rechazo de la planta de beneficio.

CAPÍTULO II - MATERIALES Y MÉTODOS

En el presente capítulo se describen los métodos y las técnicas empleadas para dar cumplimiento a los objetivos trazados. El procesamiento y caracterización de las muestras tanto de las menas lateríticas alimentadas, como del material de rechazo de la planta de Preparación de Pulpa, se ejecutó según el diseño de experimento elaborado para cada propuesta tecnológica evaluada.

2.1 Materiales, equipos y utensilios empleados

Se ha detectado que la planta de Preparación de Pulpa de la empresa Moa Nickel SA opera con cierta ineficiencia, teniendo en cuenta que el flujo de rechazo de esta planta presenta partículas de mena útil para la obtención de contenido de sulfuro de Ni y Co comerciable. Con el propósito de obtener datos del proceso de beneficio de las menas lateríticas, para esclarecer y dar solución más acabada a esta problemática, fue muestreado el material alimentado y de rechazo de la planta de Preparación de Pulpa.

Fueron tomadas manualmente 217 muestras en total; 195 de material de rechazo acumulado en depósitos diferenciado, a las cuales se le realizó la caracterización granulométrica empleado los juegos de tamices que siguen la Serie de Tyler con módulo $\sqrt{2}$: 5 mesh, 14 mesh, 20 mesh y caracterización química a 4 clases de tamaños de partículas. Además, fueron tomadas 8 muestras en las pilas de rechazo que se generan a la salida de la planta, a las cuales se le realizó la caracterización granulométrica empleando un tamiz de 20 mesh.

En el caso de las menas alimentadas, fueron tomadas 14 muestras, a las cuales se le realizó la caracterización granulométrica, empleando los juegos de tamices 14 mesh, 20 mesh y caracterización química a las clases de tamaños < 1.18 mm y 0.84 mm. Para la descripción de la distribución granulométrica y química de las menas alimentadas, se utilizaron reportes de cierre contable geológicos y metalúrgicos de los últimos 20 años.

2.1.1 Equipos utilizados

- Balanza: Sartorius modelo Combics, ver Anexo 17
- Agitador: IKA modelo RW 47 D, ver Anexo 18
- Horno: Felisa con rango de temperatura de 0 a 300 °C, ver Anexo 19.

2.1.2 Utensilios empleados

- Tanquetas plásticas de 20 l
- Pomos plásticos de 1 l
- Nylon de 5 l
- Probetas graduadas de 1,000 ml
- Juego de tamices Tyler (5, 14, 20 mesh), ver Anexo 23.

2.2 Métodos y técnicas experimentales

Los ensayos analíticos y granulométricos de todas las muestras, se realizaron en los laboratorios de la empresa Moa Nickel SA y en el Centro de Investigaciones del Níquel (CEDINIQU). El tamizado para la determinación granulométrica se realizó en base húmeda.

2.2.1 Determinación de la masa de sólido

La masa seca de cada muestra se determinó mediante el método convencional de pesado y secado del material. Para ello cada muestra fue homogeneizada, separando alrededor de 1 kg de material (sub-muestra).

A la sub-muestra se le determina su peso húmedo y luego se secó en el horno por 72 horas, a una temperatura de $107^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$. Una vez seca la sub-muestra en el horno, se dejó enfriar hasta alcanzar la temperatura ambiente y luego fue pesada para determinar su masa seca.

La fracción seca de la muestra se determinó mediante el siguiente cálculo:

$$X_{\text{seca}} = \frac{m_{\text{seca}}(\text{sub})}{m_{\text{húmeda}}(\text{sub})} * 100 \quad (1)$$

Donde:

X_{seca} , es la fracción que representa la composición de la masa seca en la muestra, expresada en %.

$m_{\text{seca}}(\text{sub})$, es la masa de la sub-muestra seca, expresada en kg.

$m_{\text{húmeda}}(\text{sub})$, es la masa inicial de la sub-muestra húmeda, expresada en kg.

2.2.2 Análisis granulométrico de las muestras

La determinación de las distribuciones granulométricas, se realizó cribando en húmedo las muestras estudiadas, mediante el empleo de juegos de tamices que siguen la Serie de Tyler, con módulo $\sqrt{2}$.

Cada retenido en los tamices, se secó según se describe en el epígrafe 2.2.1. Para la determinación de la fracción granulométrica se empleó la siguiente expresión matemática:

$$X_{\text{retenida}} = \frac{m_{\text{retenida}}}{m_{\text{húmeda}} * X_{\text{seca}}} * 100 \quad (2)$$

Donde:

X_{retenida} , es la fracción que representa la composición de la masa retenida en la muestra, expresada en %.

m_{retenida} , es la masa retenida seca en cada tamiz, expresada en kg.

$m_{\text{húmeda}}$, es la masa inicial húmeda de la muestra procesada, expresada en kg.

X_{seca} , es la fracción que representa la composición de la masa seca en la muestra, expresada en %.

2.2.3 Técnica de fluorescencia de rayos X para determinar la composición química

La composición química de las muestras estudiadas fue determinada por el método de fluorescencia de rayos X, también conocido como Método FRX en un Espectrómetro de Fluorescencia de rayos – X PW 1480 (Philips). Este espectrómetro secuencial automático de rayos es un instrumento compacto y de alta velocidad el cual se usa para el análisis de los elementos desde Bromo hasta Uranio. Es de alta flexibilidad, controlado por el microprocesador, ver Anexo 20.

Para excitar la muestra se utiliza como fuente de radiaciones el tubo de rayos X Philips con una ventana Rh de 3 kW de potencia.

El sistema completo permite operar hasta 60 kV.

2.3 Diseño de experimentos

En este trabajo se evaluaron tres propuestas de modificación tecnológica del esquema de planta de Preparación de Pulpa, dirigidas a un mejor aprovechamiento de los recursos minerales que se procesan en la empresa Moa Nickel SA. A continuación se describe el diseño de cada una de estas propuestas tecnológicas.

2.3.1 Diseño para la evaluación del “rechazo no conforme” en planta de Preparación de Pulpa

En el proceso de beneficio de las menas lateríticas, diariamente se separan entre 2,000 t a 3,500 t de material de rechazo como promedio. A partir del año 2017, se realiza un proceso de selección en la operación de recogida del rechazo, debido al incremento de la fracción granulométrica < 0.84 mm en este material.

El rechazo que presenta contenido de fracción < 0.84 mm recuperable, es almacenado en depósitos diferenciados, para su posible reincorporación al proceso y aprovechamiento de la fracción útil. La decisión de reprocesamiento de este rechazo, está condicionado a los resultados de la evaluación físico-química, obtenidos de las muestras tomadas de este material, denominado “rechazo no conforme”.

Para la caracterización del rechazo no conforme, se realizó muestreo a este material, durante un período de 10 meses. Fueron tomadas 195 muestras en total, con peso individual entre 10 a 15 kg de material de rechazo. A estas muestras se le realizó caracterización granulométrica, atendiendo a los juegos de tamices de la serie Tyler, 5 mesh, 14 mesh, 20 mesh. También se le determinó la composición química de los cinco elementos de mayor interés para el proceso de lixiviación ácida a alta temperatura y presión, a cada clase de tamaño evaluada, ver Anexo 1, Anexo 2, Anexo 3, Anexo 4 y Anexo 5.

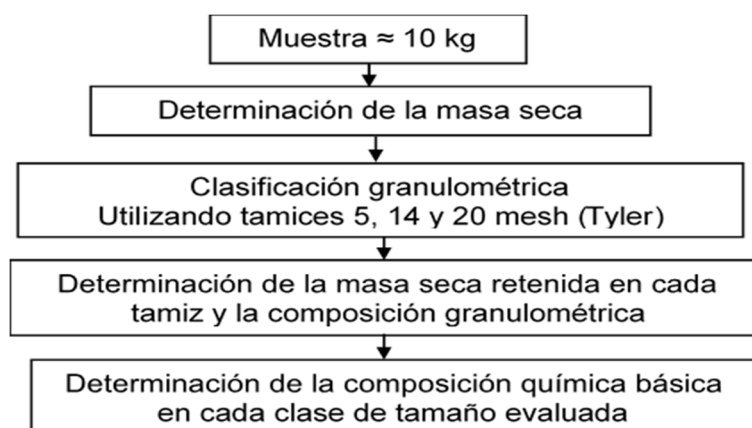


Figura 13: Esquema de preparación de muestras utilizado para la evaluación del “rechazo no conforme”.

2.3.2 Diseño para la evaluación del procesamiento de las menas lateríticas con incremento de la abertura de tamiz hasta 1.18 mm

La sustitución del sistema de clasificación granulométrica de 0.84 mm por 1.18 mm, es una variante tecnológica concebida fundamentalmente para la recuperación de la fracción limonítica < 0.84 mm, que se arrastra junto con el material de rechazo de la planta de Preparación de Pulpa. Para la evaluación de esta propuesta, se tomaron siete muestras de menas alimentadas a la planta de Preparación de Pulpa, con peso individual entre 15 y 25 kg. El objetivo de estos muestreos desarrollados en días aleatorios, fue evaluar el efecto químico-granulométrico de la incorporación al proceso de la clase de tamaño de partículas comprendida entre 1.18 mm y 0.84 mm, en la pulpa producto de esta planta.

En estas corridas de laboratorio, cada muestra tomada se homogenizó en su estado natural y se dividió en dos partes uniformes. Luego de conformadas las pulpas con una composición de sólido entre 20 y 25 por ciento, una parte fue tamizada a 1.18 mm y la otra a 0.84 mm, ver Anexo 6, Anexo 7, Anexo 8, Anexo 9, Anexo 10, Anexo 11 y Anexo 12.

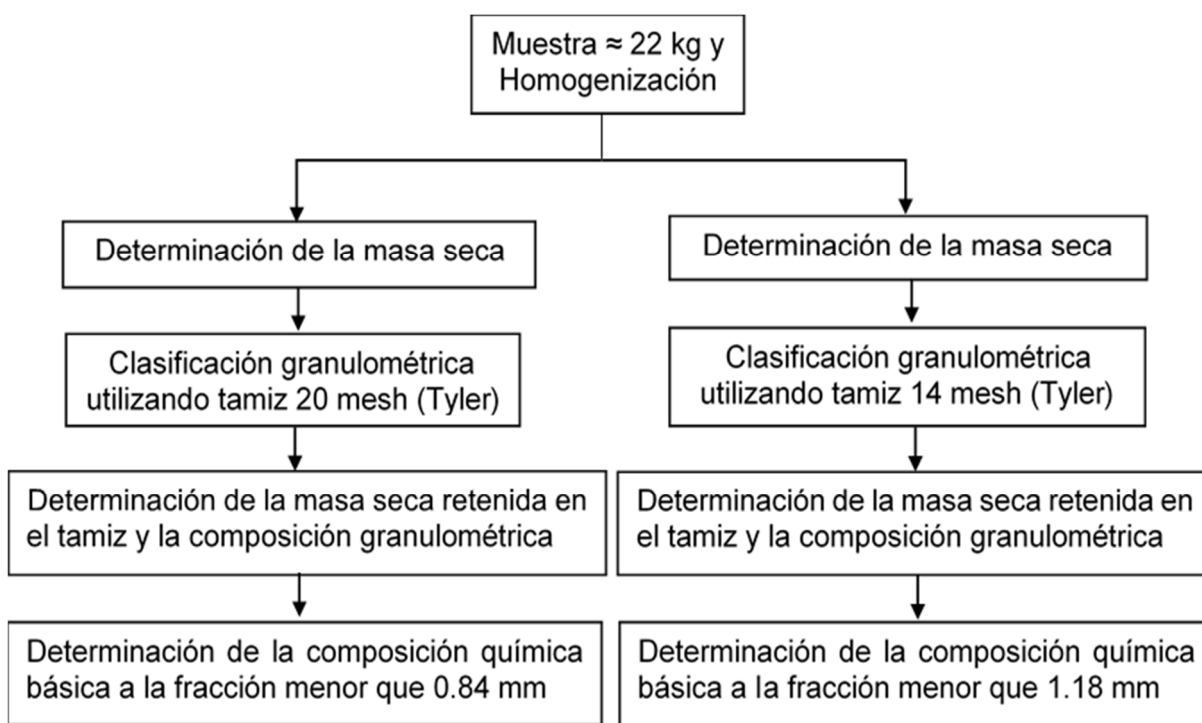


Figura 14: Esquema de preparación de muestras utilizado para la evaluación de la variante de cambio de malla de 0.84 mm a 1.18 mm.

2.3.3 Diseño para la evaluación del lavado del rechazo, empleando técnicas de hidrominería

La utilización de técnicas de hidrominería para la recuperación de las fracciones minerales, consiste en lavar con agua a presión las pilas de rechazo de la planta, para lograr que se desprenda las partículas finas que fueron arrastradas con el flujo de rechazo. Como consecuencia de este lavado, se genera una pulpa, la cual debe de ser canalizada y reincorporada al proceso. Para la evaluación de esta propuesta se realizaron tres corridas, según se describe a continuación:

1. Se tomó, en varios puntos de la pila de rechazo de la planta de Preparación de Pulpa, una muestra de alrededor de 10 kg
2. Se lavó con agua atomizada a una presión de 551,580 Pa (80 lb/in²), la sección de la pila donde se había tomado la muestra inicial, con el objetivo de separar las partículas limoníticas que traen las rocas serpentínicas
3. Se tomó, en varios puntos de la sección lavada de la pila de rechazo, una muestra de alrededor de 10 kg

4. Ambas muestras se cribaron en base húmeda, empleando tamiz de 20 mesh, para determinar la cantidad de fracción recuperada < 0.84 mm, ver Anexo 13, Anexo 14 y Anexo 15.

2.4 Fundamentos metodológicos del balance de materiales

El balance de masa o balance de materia puede comprenderse como una determinación de las cantidades de los diferentes materiales que intervienen en el proceso, basándose en la ley de conservación de masa, de manera que se puede contabilizar las cantidades de diversos materiales que entran y salen del sistema; es una forma de la contabilidad para un proceso, ver Anexo 16. Según esta ley, la cantidad de sustancias que se alimentan (εG_{sum}) deben ser igual a la cantidad de sustancias que se obtengan (εG_{obt}) (Kasatkin, 1971).

$$\varepsilon G_{sum} = \varepsilon G_{obt} \quad (3)$$

Balance de masa general por corriente

$$F_1 = F_2 + F_3 + F_4 \quad (4)$$

Dónde:

- F_1 – flujo de menas alimentadas a la planta (se expresa en t/20h).
- F_2 – flujo productivo (se expresa en t/20h).
- F_3 – flujo a la salida de la criba (se expresa en t/20h).
- F_4 – flujo a la salida del circuito de rechazo (se expresa en t/20h).

Balance de masa por componentes.

$$F_1 \cdot x_{limonita\ 1} = F_2 \cdot x_{limonita\ 2} + F_3 \cdot x_{limonita\ 3} + F_4 \cdot x_{limonita\ 4} \quad (5)$$

Dónde:

$x_{limonita\ 1}$ – contenido de la fracción limonítica alimentado a la planta.

$x_{limonita\ 2}$ – contenido de la fracción limonítica en el producto de la planta.

$x_{limonita\ 3}$ – contenido de la fracción limonítica a la salida de la criba.

$x_{limonita\ 4}$ – contenido de la fracción limonítica a la salida del circuito de rechazo.

Planteadas las dos ecuaciones primarias del balance de masa, se procede a identificar los datos, detectándose como incógnitas el flujo de productividad (F_2) y el flujo a la salida del circuito de rechazo (F_4). Luego se despeja de la ecuación (4) la productividad (F_2) generando la ecuación (6), la que será posteriormente sustituida en la ecuación (5).

$$F_2 = F_1 - F_3 - F_4 \quad (6)$$

Sustituyendo F_2 en la ecuación (5)

$$F_1 \cdot x_{limonita\ 1} = (F_1 - F_3 - F_4) \cdot x_{limonita\ 2} + F_3 \cdot x_{limonita\ 3} + F_4 \cdot x_{limonita\ 4}$$

Despejando F_4 de la ecuación (5) se obtiene el flujo a la salida del circuito de rechazo.

$$F_4 = \frac{F_1 - F_1 \cdot x_{limonita\ 1} - F_3 + F_3 \cdot x_{limonita\ 3}}{1 - x_{limonita\ 4}}$$

Para determinar la productividad de la planta, se calcula F_2 empleando la ecuación (6).

$$F_2 = F_1 - F_3 - F_4$$

Luego de determinado todos los flujos, se calcula el contenido de rechazo mediante la siguiente ecuación:

$$\% R = \frac{F_3 + F_4}{F_1} \cdot 100 \quad (7)$$

Dónde:

%R– contenido de rechazo (se expresa en %)

La eficiencia se determina según fórmula siguiente:

$$\% Efic = \frac{F_1 \cdot x_{limonita\ 1} - F_3 \cdot x_{limonita\ 3} - F_4 \cdot x_{limonita\ 4}}{F_1 \cdot x_{limonita\ 1}} \cdot 100 \quad (8)$$

Dónde:

%Efic – eficiencia de recuperación de la mena limonítica, (se expresa en %)

CAPÍTULO III – EVALUACIÓN DE LA FRACCIÓN GRANULOMÉTRICA MENOR QUE 0.84 MM EN LAS MENAS ALIMENTADAS A LA PLANTA DE PREPARACIÓN DE PULPA

La planta de Preparación de Pulpa de Moa Nickel SA, fue diseñada para obtener una fracción granulométrica menor que 0.84 mm de mena limonítica de balance, enriquecidas en níquel y cobalto, a partir de los yacimientos lateríticos.

El agotamiento de los recursos limoníticos de balance ubicados en Moa Occidental, ha propiciado la necesidad de incorporar en la alimentación de la planta de Preparación de Pulpa, menas de los nuevos yacimientos concesionados. En los últimos diez años, la participación de estas menas ha sido predominante en la alimentación a este proceso.

Los espesores de mena limonítica de balance en los yacimientos incorporados (ver Anexo 22), por lo general son bajos en relación a los agotados en Moa Occidental (ver Anexo 21). Estos bajos espesores, dificultan la extracción selectiva de la mena limonítica de balance, incrementando la participación de otros horizontes del perfil laterítico. La incorporación de mena limonítica fuera de balance y saprolítica, ha influido en el incremento de la variabilidad granulométrica y geoquímica de la mezcla alimentada a la planta de Preparación de Pulpa.

Las nuevas menas incorporadas aportan mayor contenido de fracciones granulométricas mayor que 0.84 mm (fracción gruesa), incrementando el contenido de rechazo de 18 % hasta un 27 % como promedio anual. La desviación en el contenido de fracción gruesa de las menas alimentadas al proceso, sobrecarga los equipos de la planta de beneficio, ocasionando arrastre de la fracción limonítica menor que 0.84 mm. Las mejoras tecnológicas introducidas en esta planta, no han garantizado mantener los niveles de recuperación de la fracción menor que 0.84 mm, influenciado por el incremento y variabilidad de la fracción mayor que 0.84 mm alimentadas.

Las pruebas realizadas en la presente investigación han permitido evaluar, a escala de laboratorio, el grado de recuperación de la fracción menor que 0.84 mm contenidas en el rechazo de la planta de Preparación de Pulpa.

3.1 Descripción de la participación de los yacimientos en el proceso y su influencia en la variabilidad de las principales menas que conforman la mezcla alimentada

Las menas lateríticas alimentadas a la planta de Preparación de Pulpa, por más de tres décadas, fueron obtenidas de los yacimientos de Atlantic, Yamanigüey, Zona Sur, Pronóstico y Zona A, considerados como sectores de Moa Occidental. La incorporación de las menas de los yacimientos de Moa Oriental y Camarioca Norte, comenzó a partir del agotamiento de los recursos de Moa Occidental.

La participación de Moa Oriental estuvo acentuada en el período del 2001 al 2012, donde alcanzó una participación de 50 % de las menas minadas, según se muestra en la Figura 15. Entre el año 2013 y 2018, la minería en Moa Oriental disminuye a valores inferiores al 40 %, alcanzando el valor más bajo de este período en año 2014, con 14 %.

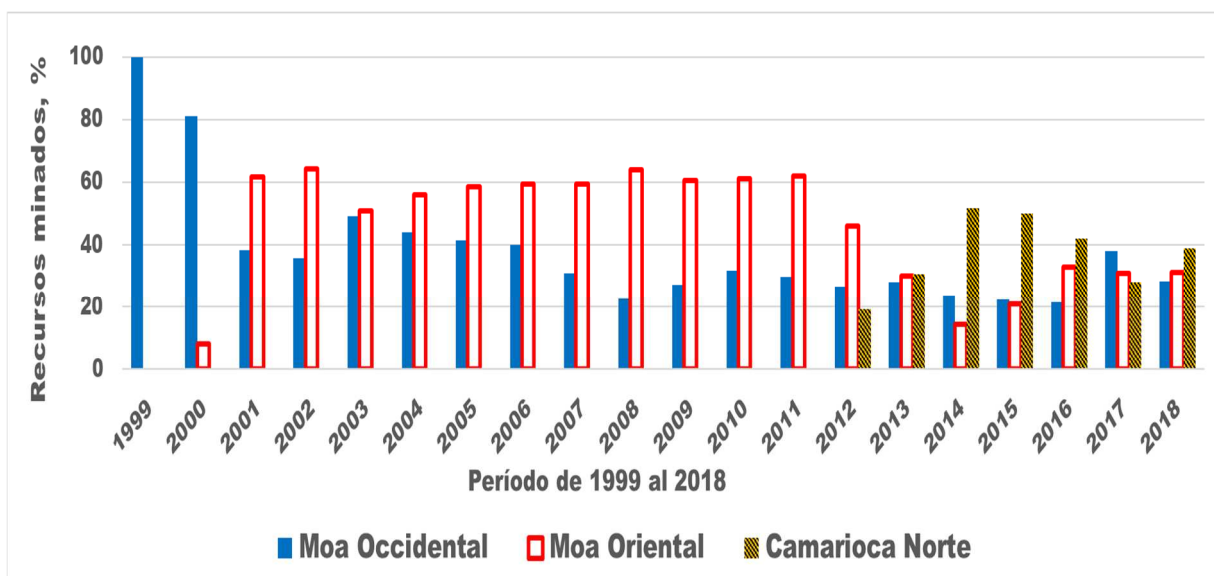


Figura 15: Recursos minados por yacimientos en el período de 1999 al 2018

El incremento de la participación de Camarioca Norte comienza a partir del año 2012, con un 20 % inicial, hasta alcanzar valores de 38 % como promedio entre el período 2014 y el 2018. En los años 2014 y 2015, la participación de este yacimiento, contribuyó con más del 50 % de las menas alimentadas a la planta de Preparación de Pulpa.

Los yacimientos minados hasta el año 2000, presentaron altos espesores de la corteza y del horizonte laterítico, permitiendo un predominio de la mena limonítica de

balance en el minado, superior al 85 %, ver Figura 16. En el año 2000, estuvo marcado por la entrada en explotación del yacimiento de Moa Oriental, con la extracción de los sectores de mayores espesores de mena limonítica de balance, alcanzando un 20 % de participación; estando representado el 80 % por la mena limonítica de Moa Occidental.

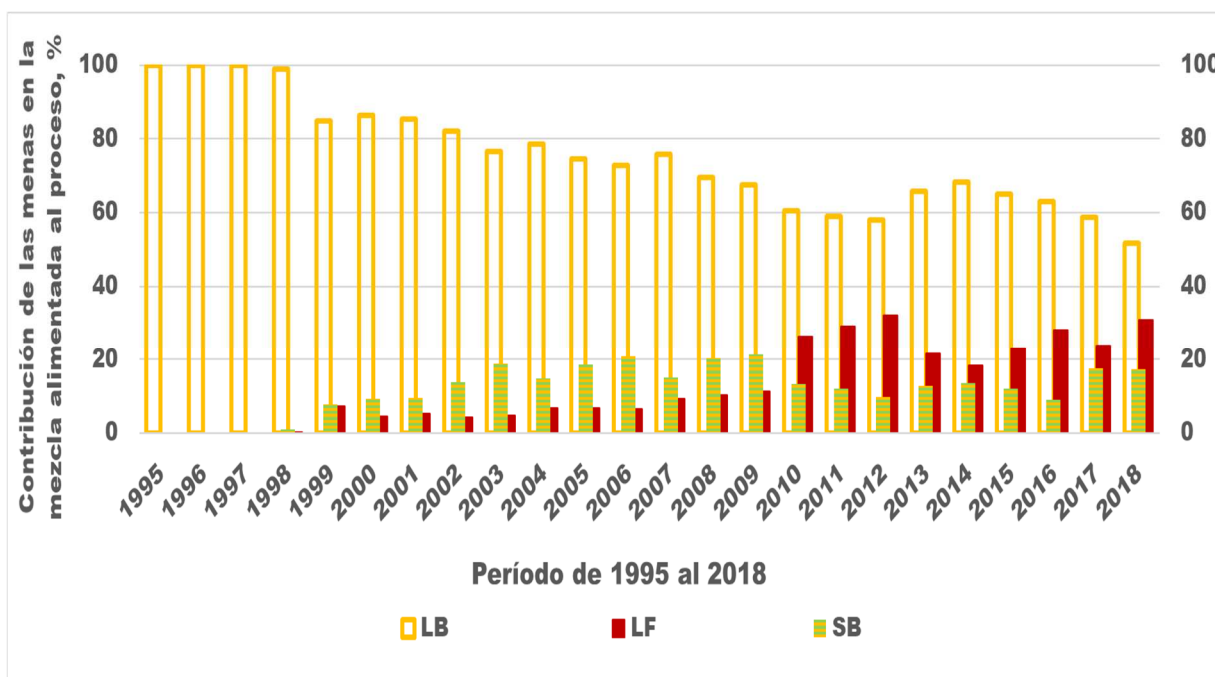


Figura 16: Participación de los principales tipos de menas alimentadas a planta de Preparación de Pulpa.

En la medida que se fueron agotando los recursos de Moa Oriental, existió un descenso de la participación de la mena limonítica de balance en el minado, quedando por debajo del 80 % a partir del año 2003. En este período se incorporó mena SB, entre 15 % y 20 % y mena LF entre 5 % y 10 %.

Entre los años 2010 y 2012, la participación de la LB no alcanzó el 60 % en el minado, incrementándose de forma significativa la mena LF, oscilando entre el 30 y el 35 %. En el año 2013, la entrada en explotación del yacimiento de Camarioca Norte, permitió incrementar los niveles de participación de la mena LB en el mineral minado, alcanzando hasta un 68 %. No obstante, se muestra una tendencia general a la incorporación de mena SB y mena LF, influenciado entre otros aspectos, por la disminución de los espesores de corteza laterítica en los nuevos yacimientos en explotación, ver Figura 17 y Figura 18.



Figura 17: Perfil geológico con más de 15 m de horizonte limonítico.



Figura 18: Perfil geológico con menos de 6 m de horizonte limonítico, con intercalaciones de rocas.

3.2 Análisis de la composición química y granulométrica de las menas procesadas por planta de Preparación de Pulpa con tamaño de partícula < 0.84 mm

3.2.1 Composición química básica de la fracción granulometría < 0.84 mm de las menas alimentadas

El contenido de hierro (Fe), en la fracción menor que 0.84 mm, de las menas alimentadas a la planta de Preparación de Pulpa, desde 1994 hasta del 2018, ha sido como promedio 44.9%. Los mayores valores de hierro se obtuvieron en el período 2000 hasta el 2005, influenciado por el incremento del alimentado de las menas del yacimiento Moa Oriental.

A partir del año 2006, los valores promedios obtenidos en las menas alimentadas no alcanzan el 44.0 % del hierro, presentando una tendencia a la disminución del contenido de este elemento; ver Figura 19. La disminución del contenido de este elemento, se relaciona con una menor participación de Moa Oriental, la entrada en explotación del yacimiento Camarioca Norte, con un promedio de hierro de 43.0 % y un incremento de la participación de la mena saprolítica (Urra, 2018).

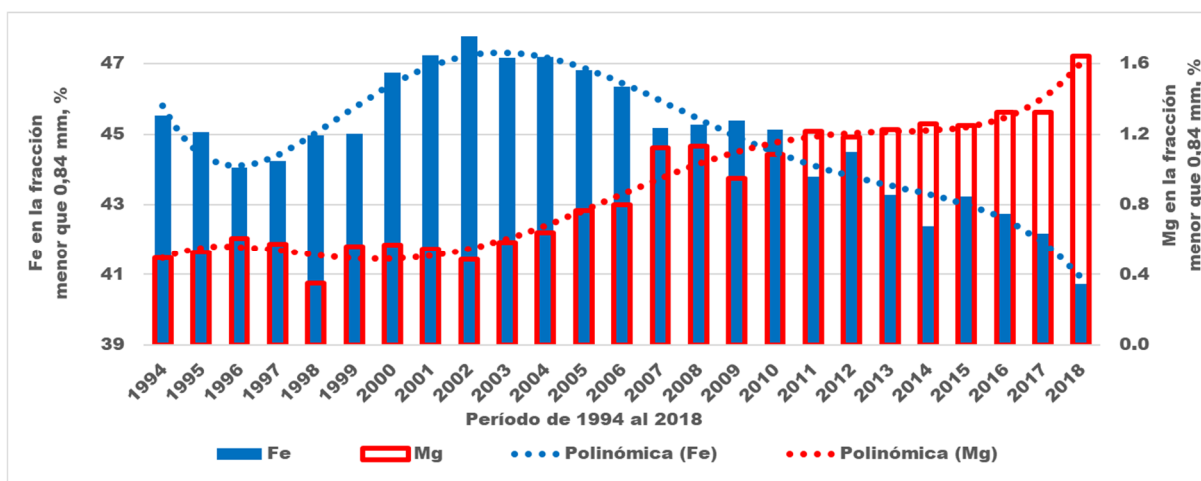


Figura 19: Distribución del contenido de Fe vs Mg en la fracción menor que 0.84 mm de las menas alimentadas a planta de Preparación de Pulpa.

La combinación de diferentes menas del horizonte laterítico durante la explotación, ha influido en la disminución del contenido de hierro a partir del año 2017, llegando a valores de 40.2 % como promedio en los dos últimos años. Esta tendencia está asociada al incremento en la participación de la mena saprolítica y a los bajos contenidos de hierro en la mena limonítica de Camarioca Norte, en relación a los yacimientos Moa Oriental y Zona A.

La mena LB incorporada al proceso, ha presentado una media histórica de 45 % de hierro, en cambio el 59 % de la mena limonítica de los nuevos yacimientos presentan una media de 43 %, sin considerar la mena SB que puedan ser incorporadas con contenidos de hierro de 28 %, (Urra, 2018).

En los yacimientos de Moa Occidental, la explotación estuvo restringida a contenidos de magnesio (Mg) inferiores a 1.0 %. Caracterizando el período de 1994 al 2009 por presentar bajos contenidos de este elemento en la fracción granulométrica < 0.84 mm, con un promedio de 0.70 %.

A partir del año 2009 se muestra una tendencia al incremento del contenido de magnesio, desde 1.24 % hasta 1.65 % en el año 2018. Esta tendencia se relaciona directamente con la incorporación al proceso de la mena saprolítica y de mena limonítica con mayor contenido de este elemento, como es el caso del yacimiento de Camarioca Norte, donde el promedio es de 1.52 %. La combinación de estas menas en la mezcla alimentada al proceso, propicia una disminución sistemática del contenido de hierro, ver Figura 19.

La disminución a 4 m como promedio de espesor del horizonte limonítico remanente de los yacimientos de Camarioca Norte y Moa Oriental, ha complicado el proceso de explotación en la zona de contacto entre el horizonte limonítico y el horizonte saprolítico, lo cual se refleja en el incremento del contenido de magnesio alimentado a la planta de Preparación de Pulpa.

En relación al contenido de níquel (Ni), este elemento presentó una tendencia a la disminución de 1.29 % a 1.25 %, en el período de 1994 al año 2000. La incorporación en la mezcla alimentada a la planta de las menas del yacimiento Moa Oriental, a partir del año 2001, permitió incrementar el contenido de níquel por encima de 1.28 % hasta el año 2005; ver Figura 20.

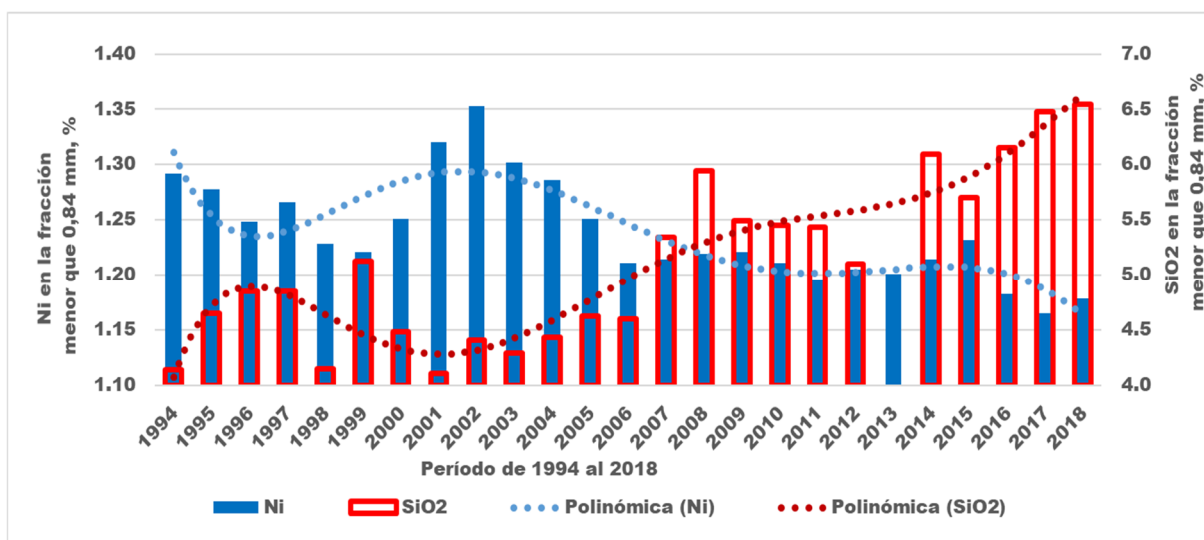


Figura 20: Distribución del contenido de Ni vs SiO₂ en la fracción menor que 0.84 mm de las menas alimentadas a la planta de Preparación de Pulpa, en el período 1994 al 2018.

Entre los años 2000 al 2005 se mantuvo un 78 % de la mena limonítica en la mezcla alimentada al proceso. En este período se incrementó el contenido de níquel influenciado por la explotación en el yacimiento Moa Oriental de horizontes limoníticos con promedio 10 m de espesor; además del incremento hasta un 20 % de participación de la mena saprolítica alimentada a la planta.

A partir del año 2008, el contenido de níquel disminuyó hasta un 1.20 % en la mezcla de menas procesada, motivado por el agotamiento de las áreas con mayores espesores de mena LB. La mezcla alimentada se caracterizó por una menor participación de la mena limonítica, siendo inferior al 60 % y un incremento hasta un 20 % de la mena LF, con valores de níquel por debajo del 1.00 %.

La entrada del yacimiento Camarioca Norte a partir del 2012, permitió un ligero incremento de la participación de la mena limonítica de balance, hasta 62 %, en la mezcla alimentada a la planta. El contenido de níquel se mantuvo oscilando en 1.20 %, aun cuando en este período inicia la entrada de las áreas de Camarioca Norte, con mayor concentración de níquel en los horizontes explotados. El incremento hasta un 25 % de la limonita fuera de balance, a partir del año 2016, influyó en la disminución del contenido de níquel hasta 1.17 % en el año 2017.

De forma general, el descenso del contenido de níquel, a partir del año 2008, concuerda con la disminución progresiva desde 78 % a 60 % de la mena la limonítica de balance, en la mezcla procesada por la planta. El incremento entre 20 y 30 por ciento de la mena limonítica fuera de balance, no sólo favoreció el descenso del contenido de níquel en la mezcla procesada, también influyó en el incremento de un 10 % de la fracción granulométrica menor que 0.84 mm en el material de rechazo.

El contenido de sílice (SiO_2) desde el año 1994 hasta el 2000 presentó un promedio de 4.60 %. Este valor bajo, estuvo influenciado por la alimentación selectiva de la mena limonítica en los frentes de explotación. No obstante, el contenido de sílice en las menas alimentadas al proceso, ha presentado una tendencia general al incremento, alcanzando 6.55 % como valor máximo anual en el año 2018.

Las menas alimentadas, a partir del año 2007, muestran un aumento acentuado, alcanzando como promedio 5.80 % de sílice en los próximos 11 años; para un valor óptimo de este compuesto en la planta metalúrgica de 5.00 %, ver Figura 20.

El contenido de sílice en las menas alimentadas con granulometría menor que 0.84 mm, en todo el período evaluado (1994-2018), ha mostrado tendencia ascendente y totalmente opuesta al presentado por el contenido de níquel en similar etapa. El incremento del contenido de sílice en la fracción menor que 0.84 mm alimentado a la planta, está asociado con el incremento en la participación de las menas saprolíticas remanentes de los yacimientos de Moa Occidental y en menor medida a Moa Oriental y Camarioca Norte.

En relación al contenido cobalto (Co), se puede observar que presentó un ligero incremento desde el año 1999 hasta el año 2003 en las menas alimentadas al proceso; ver Figura 21. A partir del año 2004, se muestra una disminución de la concentración

de este elemento, manteniendo la misma tendencia hasta el año 2018. El valor promedio general de este elemento en el período 1994 al 2018, fue de 0.126 %, con un valor máximo de 0.141 % y valor mínimo de 0.108 %. La disminución del contenido de cobalto está asociado a la incorporación de la mena SB, las cuales se caracterizan por presentar bajos valores de este elemento.

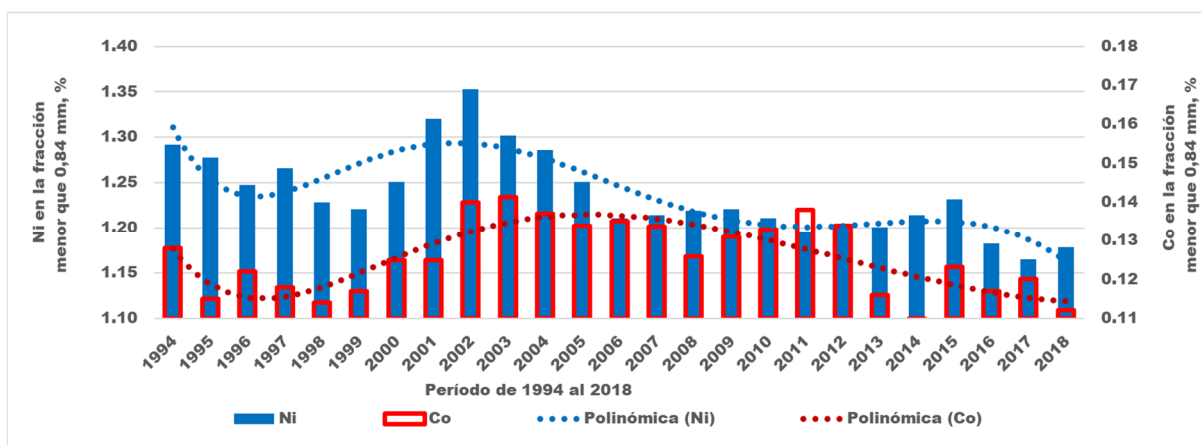


Figura 21: Distribución del contenido de Ni y Co en la fracción menor que 0.84 mm de las menas alimentadas a la planta de Preparación de Pulpa, en el período 1994 al 2018.

La participación de las menas LF, LB y SB en el alimentado a la planta de Preparación de Pulpa y su composición química básica (Ni, Co, Fe), se muestra en la Tabla 5. Estos valores han sido estimados a partir de la estadística del “mineral minado” reportado por la Subdirección de Minas (Urrea, 2018). En el período evaluado se evidencia una disminución gradual de la participación de la mena LB alimentada al proceso de 85 % a 57 %, así como de los contenidos químicos básicos.

Tabla 5: Contenido de níquel, hierro y cobalto promedio en las menas alimentadas a la planta de Preparación de Pulpa según el “mineral minado”, periodo 2000 al 2017.

Año	Parámetros	Menas lateríticas alimentadas a planta de Preparación de Pulpa.		
		LF	LB	SB
		%		
1999	Participación en fracción másica	7.81	84.91	7.28
	Ni	0.87	1.21	1.63
	Co	0.074	0.118	0.068
	Fe	42.21	44.49	27.53
2000	Participación en fracción másica	10.71	84.26	5.03
	Ni	0.82	1.26	1.56
	Co	0.100	0.114	0.069
	Fe	45.23	46.81	28.18
2001	Participación en fracción másica	9.38	85.29	5.33
	Ni	0.97	1.26	1.79
	Co	0.071	0.133	0.058
	Fe	47.54	46.90	29.68

Evaluación de la recuperación de la fracción limonítica en el rechazo.

Capítulo III

2002	Participación en fracción másica	13.73	82.17	4.10
	Ni	0.87	1.37	1.53
	Co	0.088	0.145	0.063
	Fe	44.17	46.83	29.55
2003	Participación en fracción másica	18.71	76.64	4.64
	Ni	0.86	1.36	1.54
	Co	0.085	0.138	0.087
	Fe	45.30	44.98	30.70
2004	Participación en fracción másica	14.64	78.57	6.79
	Ni	0.65	1.33	1.57
	Co	0.085	0.133	0.077
	Fe	44.11	45.16	30.83
2005	Participación en fracción másica	18.61	74.68	6.71
	Ni	0.96	1.34	1.51
	Co	0.124	0.114	0.078
	Fe	44.26	44.79	31.70
2006	Participación en fracción másica	21.01	72.53	6.47
	Ni	0.85	1.29	1.40
	Co	0.082	0.128	0.085
	Fe	45.33	44.79	31.20
2007	Participación en fracción másica	16.54	73.34	10.12
	Ni	0.88	1.28	1.45
	Co	0.110	0.139	0.089
	Fe	43.22	44.82	27.52
2008	Participación en fracción másica	22.94	65.62	11.43
	Ni	0.86	1.29	1.41
	Co	0.104	0.135	0.082
	Fe	42.24	44.04	29.50
2009	Participación en fracción másica	24.37	62.75	12.87
	Ni	0.88	1.24	1.28
	Co	0.100	0.138	0.087
	Fe	40.70	44.84	29.79
2010	Participación en fracción másica	28.43	63.15	8.42
	Ni	0.86	1.31	1.40
	Co	0.108	0.141	0.075
	Fe	46.09	45.34	28.37
2011	Participación en fracción másica	31.54	55.58	12.87
	Ni	0.85	1.27	1.08
	Co	0.111	0.145	0.078
	Fe	45.94	45.04	25.48
2012	Participación en fracción másica	34.65	54.85	10.50
	Ni	0.79	1.30	1.17
	Co	0.113	0.148	0.063
	Fe	46.75	46.30	24.12
2013	Participación en fracción másica	31.08	53.89	15.03
	Ni	0.83	1.30	1.16
	Co	0.090	0.130	0.061
	Fe	45.59	45.58	24.16
2014	Participación en fracción másica	20.52	64.27	15.22
	Ni	0.84	1.25	1.43
	Co	0.087	0.125	0.057
	Fe	45.48	44.60	24.00
2015	Participación en fracción másica	25.59	65.29	9.12
	Ni	0.83	1.27	1.29
	Co	0.099	0.151	0.060
	Fe	45.32	45.00	24.05

2016	Participación en fracción másica	28.88	61.93	9.19
	Ni	0.84	1.23	1.25
	Co	0.101	0.137	0.050
	Fe	45.05	44.64	29.57
2017	Participación en fracción másica	24.40	57.76	17.84
	Ni	0.85	1.22	1.12
	Co	0.106	0.136	0.052
	Fe	46.36	44.41	21.02
1999- 2017	Participación en fracción másica	21.24	69.34	9.42
	Ni	0.85	1.28	1.34
	Co	0.099	0.133	0.069
	Fe	44.93	45.27	26.83

3.2.2 Distribución de la fracción granulometría menor que 0.84 mm de las menas alimentadas

La planta de Preparación de Pulpa está diseñada para alcanzar un 97 % de eficiencia de recuperación de menas limoníticas con granulometría menor que 0.84 mm. Esta eficiencia está condicionada, entre otros aspectos, a una participación estable de más del 80 % de esta fracción granulométrica.

La variabilidad de los diferentes tipos de menas alimentadas a esta planta, en los últimos 25 años, ha provocado cambios en las características granulométricas del material rechazado. En la Figura 22, se muestra la tendencia decreciente de la participación de la fracción menor que 0.84 mm en el alimentado, en el período desde el 2009 hasta el 2018.

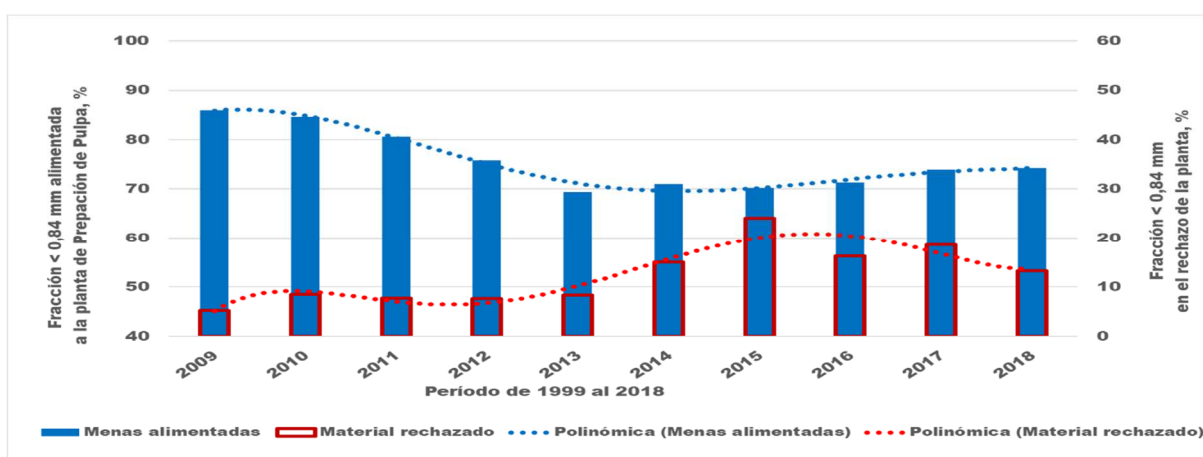


Figura 22: Distribución de fracción granulometría menor que 0.84 mm en las menas alimentadas y en el material de rechazo de la planta de Preparación de Pulpa.

La fracción granulométrica menor que 0.84 mm, en el período del 2009 y el 2011, constituyó entre el 80 % y 86 % de las menas alimentadas a la planta. En esta etapa,

el yacimiento de Moa Oriental aportaba a este proceso alrededor del 60 % de las menas, completándose el balance con los yacimientos ubicados en Moa Occidental.

En el año 2012, el contenido de la fracción menor que 0.84 mm en las menas procesadas descendió a un 77 %, disminuyendo un año después hasta 69 %. En este período, se incorpora el yacimiento de Camarioca Norte, percibiéndose un incremento superior al 35 % del contenido de limonita fuera de balance, en las menas alimentadas a la planta.

A partir del año 2014 hasta el 2018, la fracción menor que 0.84 mm en las menas alimentadas a este proceso, presenta una ligera tendencia a aumentar con relación al valor alcanzado en el año 2013, oscilando entre 70 % y 75 %. En este período, la participación de la mena LF estuvo por debajo del 20 %, osciló entre 9 y 17 %, mientras que hubo un incremento de la mena SB, oscilando entre 23 % a 31 %.

En general, con el aumento de la fracción gruesa > 0.84 alimentadas al proceso, atribuibles a una mayor incorporación de menas LF y SB de las nuevas áreas mineras, se incrementa el rechazo de la planta de Preparación de Pulpa las pérdidas de la fracción limonítica menor que 0.84 mm, como resultado de sobrecarga de los equipos de beneficios, ver Figura 22. La pérdida de las fracciones finas junto con el material de rechazo, ha propiciado que se evalúen a escala de laboratorio, variantes tecnológicas, dirigidas a la recuperación de la eficiencia de recuperación del material limonítico en la planta de Preparación de Pulpa.

3.3 Propuestas para la recuperación de la fracción útil menor que 0.84 mm contenida en el rechazo de la planta de Preparación de Pulpa

Las variantes de mejoras que se proponen están orientadas a incrementar la recuperación de la fracción útil menor que 0.84 mm que es arrastrada con el rechazo durante el proceso de beneficio de las menas lateríticas.

Las mejoras tecnológicas implementadas en la planta de Preparación de Pulpa tales como la instalación del circuito de reprocesamiento de rechazo, los cambios del ángulo de inclinación en las lavadoras y zarandas vibratorias, permitió incrementar la recuperación de la fracción útil < 0.84 mm arrastrado con el rechazo en el período del 2003 al 2012. No obstante, con la disminución de la participación de la mena limonítica de balance en el proceso a partir del 2013, nuevamente se incrementó la fracción

útiles en el rechazo, relacionado con el incremento de las fracciones gruesas en el alimentado.

La eficiencia de recuperación de la fracción granulometría útil menor que 0.84 mm en la planta, ha presentado una tendencia a disminuir, siendo los años más críticos el 2015 y el 2017, como se observa en la Figura 23.

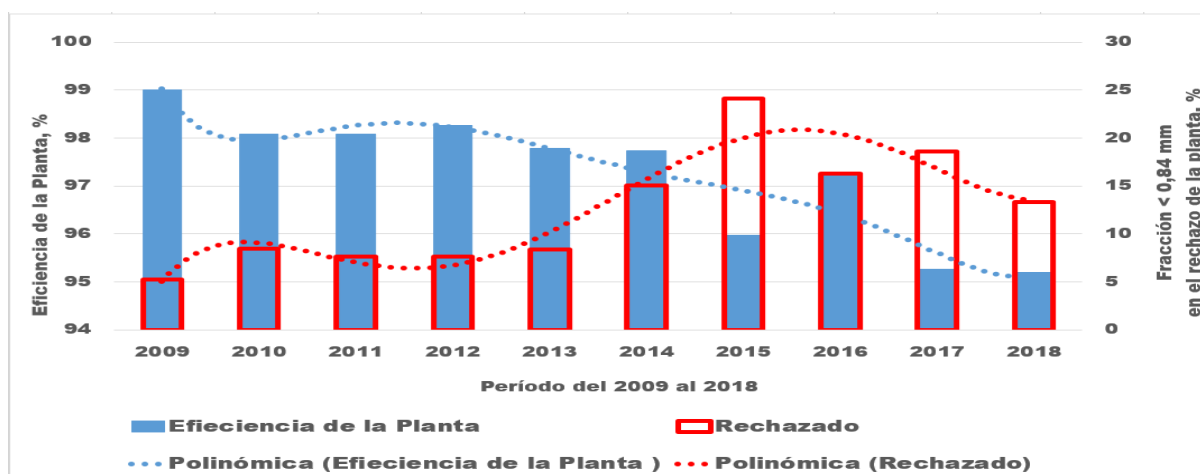


Figura 23: Eficiencia de la planta de Preparación de Pulpa vs la fracción granulometría menor que 0.84 mm en el material de rechazo.

Las evaluaciones actuales para la recuperación de la fracción útil se han centrado en tres propuestas: el procesamiento del material de rechazo, incremento de la apertura del orificio de las mallas y el empleo de técnicas de hidrominería.

La construcción de una nueva planta de beneficio con un nuevo proceso tecnológico, se analizó como otra alternativa de mejora, pero los bajos precios del níquel y el cobalto en el mercado internacional, han limitado la continuidad de la ejecución del proyecto de construcción en su totalidad.

3.3.1 Procesamiento del “rechazo no conforme” en la planta de Preparación de Pulpa

El esquema actual de la planta de la planta de Preparación de Pulpa tiene como base de alimentación las menas lateríticas provenientes de los yacimientos en explotación. La variante de recuperación de la fracción útil en el “rechazo no conforme”, considera el procesamiento de este material nuevamente por la planta, según el diseño de experimento descrito en el epígrafe 2.3.1.

Las muestras (195) de “rechazo no conforme” se caracterizaron en cuatro fracciones granulométricas, atendiendo a las clases de tamaño de partículas: $> 4 \text{ mm}$, $< 4 \text{ mm}$ y $> 1.18 \text{ mm}$, $< 1.18 \text{ mm}$ y $> 0.84 \text{ mm}$, $< 0.84 \text{ mm}$.

Los resultados del procesamiento de las muestras revelan que como promedio el 30.77 % en peso corresponde con la fracción granulométrica menor que 0.84 mm , indicando un valor alto de esta fracción útil en el rechazo. El histograma de distribución muestra que los mayores valores de por ciento en peso de la fracción útil se encuentran entre 28 % y 35 %, siendo el valor esperado de esta fracción para el rechazo de la planta de hasta un 20 % del rechazo, ver Figura 24.

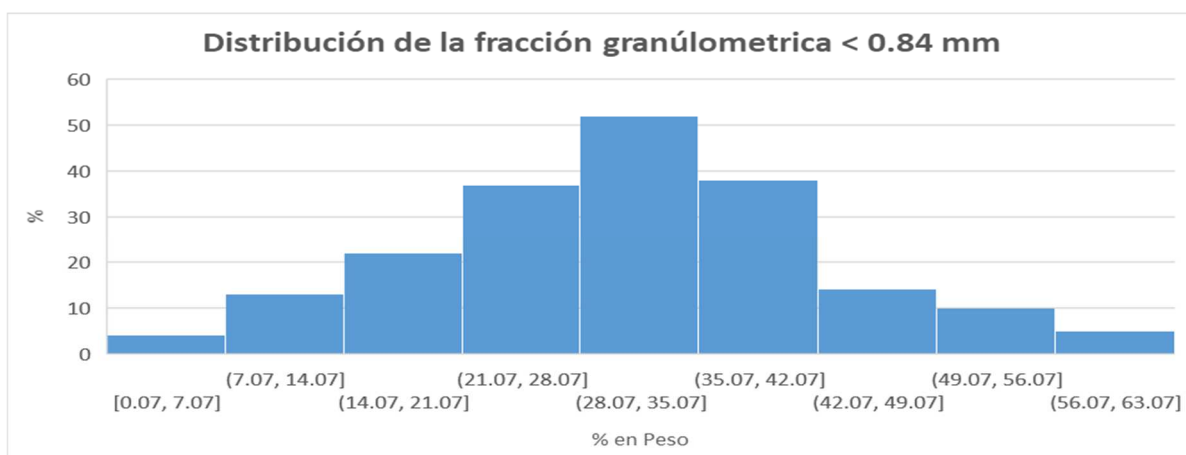


Figura 24: Histograma de distribución de la fracción granulométrica menor que 0.84 mm .

El histograma de frecuencia acumulativa de la fracción útil arroja que el 40 % de las muestras presenta un por ciento en peso mayor de 30 %, lo que evidencia una alta variabilidad de esta fracción dentro del “rechazo no conforme”, ver Figura 25.

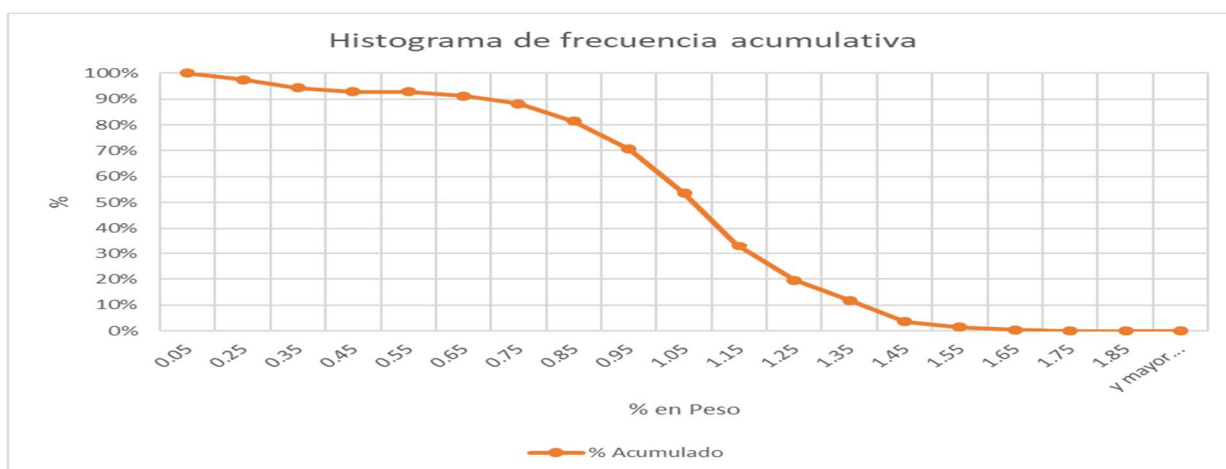


Figura 25 Histograma de frecuencia acumulativa del por ciento en peso de la fracción menor que 0.84 mm en el rechazo no conforme.

Los resultados para las diferentes fracciones granulométricas se muestran en la Tabla 6. La fracción granulométrica mayor que 4 mm representó como promedio el 46 % del “rechazo no conforme”, influenciado por el proceso de clasificación de la planta.

Tabla 6: Composición granulométrica de 195 muestras de “rechazo no conforme”.

	> 4 mm	< 4 mm y > 1.18 mm	< 1.18 y > 0.84 mm	<0.84 mm
Media	46.01	22.15	1.05	30.77
Mediana	46.15	21.64	0.85	30.89
Moda	53.16	23.88	0.69	24.39
Desviación estándar	13.07	7.55	0.60	11.58
Varianza de la muestra	170.83	57.02	0.36	134.21
Coeficiente de asimetría	0.33	1.63	1.64	0.07
Rango	65.69	61.91	3.82	60.93
Mínimo	14.27	6.65	0.01	0.07
Máximo	79.96	68.56	3.83	61.00
Suma	8972.31	4319.21	203.97	6000.73
Cuenta	195	195	195	195

La fracción granulométrica menor que 1.18 mm y mayor que 0.84 mm representó 1.05 % en peso, siendo el valor más bajo en el “rechazo no conforme”.

A partir de los resultados generales del estudio granulométrico, se realizó un balance de masa, para evaluar la influencia en la planta de Preparación de Pulpa del procesamiento del “rechazo no conforme”, ver Tabla 7.

Tabla 7: Balance de material en planta de Preparación de Pulpa.

Variante	Alimentado seco		Rechazo > 100 mm		Rechazo del circuito < 100 mm y > 0.84 mm			Eficiencia de obtención de la fracción < 0.84 mm
	Flujo total	Fracción < 0.84 mm	Flujo total	Fracción < 0.84 mm	t/día (total)	Fracción < 0.84 mm	Fracción < 0.84 mm en el rechazo	
	t/d	%	t/d	%	t/d	%	t/d	
1	12,500	78	313	5	3,222	15	472	95
2	12,500	76	313	5	3,413	30	1,024	89

En la variante 1 se realizó el balance de material en la planta de Preparación de Pulpa teniendo en cuenta solamente la alimentación directa de menas desde los yacimientos. El valor de eficiencia utilizado para el cálculo del balance de 95 %,

demuestra que existe un total de 472 t/d de fracción menor que 0.84 mm que se pierden junto con el rechazo.

En el caso de la variante 2, se evaluó con una incorporación de “rechazo no conforme” de un 5 % con respecto a las menas alimentadas a la planta. Los resultados indicaron una mayor pérdida de fracción menor que 0.84 mm en el rechazo, alcanzando un valor de 1,024 t/d, excediendo el doble del valor determinado en la variante 1. El incremento de las fracciones gruesas, con granulometría menor que 100 mm y mayor que 0.84 mm en el alimentado, provoca un aumento de las pérdidas de fracción menor que 0.84 mm.

El resultado del análisis químico de los elementos principales para cada fracción granulométrica estudiada, se exponen en la Tabla 8. Los valores de la fracción granulométrica menor que 0.84 mm presentó contenidos de níquel superior a 1 % y de hierro de 32 %, correspondiendo con una mena de saprolítica de alto hierro; esto evidencia el incremento de participación de esta mena en la alimentación.

Tabla 8: Composición química de los principales metales por fracción granulométrica.

Rechazo no conforme	Ni	Co	Fe	Mg	SiO₂
	%				
> 4 mm	0.79	0.040	22.90	8.15	22.63
< 4 mm y > 1.18 mm	0.64	0.059	36.33	4.45	14.27
< 1.18 y > 0.84	0.68	0.093	29.36	5.03	15.79
< 0.84	1.03	0.081	32.05	4.56	14.85

En relación a los contenidos de cobalto, el mayor valor se presenta en la fracción granulométrica menor que 1.18 mm y mayor que 0.84 mm, con un 0.093 %. El mayor contenido de hierro, se encuentra en la clase de tamaño de partícula menor que 4 mm y mayor que 1.18 mm, con un 36.33 %. Se puede notar en las fracciones evaluadas que el contenido de níquel no supera el 1 %. Además, el contenido de sílice es superior a 14.27 % y el del magnesio a 4.45 % en todas las clases granulométricas. Estos resultados indican que existe predominio de mena saprolítica en el “rechazo no conforme”, atendiendo principalmente a los valores de los elementos nocivos para el proceso de lixiviación ácida a alta presión y temperatura, sílice y magnesio.

En la Tabla 9, se muestra la composición global de los principales elementos químicos presentes en el “rechazo no conforme”, a partir de la ponderación de los resultados

químicos y los por ciento en peso de cada una de las clases granulométricas evaluadas.

Tabla 9: Composición química de los principales elementos presentes en el “rechazo no conforme”.

Rechazo no conforme por año	Ni	Co	Fe	Mg	SiO₂
	%				
2017	0.84	0.059	27.87	6.23	19.99
2018	0.81	0.055	30.15	6.07	15.67
Global	0.83	0.058	28.76	6.19	18.31

Los resultados químicos muestran que el contenido global de níquel y cobalto son relativamente bajos, siendo de 0.83 % y 0.058 % respectivamente, así como el contenido de hierro que solo alcanza el 28.76 %; revelando una baja participación de la mena limonítica en el rechazo. Los altos contenidos de magnesio y sílice, con promedio de 6.19 y 18.31 % respectivamente, indica una alta participación de mena saprolítica en la mezcla alimentada a planta de Preparación de Pulpa; siendo de 17 % en el 2017 y 30 % en el 2018 según las estadísticas del “mineral minado”.

La evaluación de procesamiento realizada a escala de laboratorio del “rechazo no conforme”, muestra que no es factible su implementación industrial. La mezcla de mena laterítica con un 5 % de “rechazo no conforme” evidenció que se duplican las pérdidas de fracción menor que 0.84 mm en el rechazo, por sobrecarga del equipamiento. Los resultados de la caracterización físico-química realizada al “rechazo no conforme”, indican un alto contenido de fracción granulométrica mayor que 0.84 mm, 70 % como promedio; y valores de níquel y cobalto por debajo del valor límite industrial procesado actualmente.

3.3.2 Evaluación del procesamiento de las menas lateríticas con incremento de la abertura de tamiz hasta 1.18 mm

El sistema de procesamiento de la planta de Preparación de Pulpa actual, admite solo fracciones granulométricas menor que 0.84 mm, permitiendo beneficiar las concentraciones de níquel y cobalto contenidas en las menas limoníticas. La propuesta del cambio del tamaño hasta 1.18 mm en la abertura de las mallas, persigue incorporar las fracciones limoníticas menor que 0.84 mm que se arrastra junto con el material de rechazo.

En la evaluación del “rechazo no conforme” se pudo determinar que el 1.05 % de este material estaba representado por la fracción granulométrica menor que 1.18 mm y mayor que 0.84 mm, con contenidos promedios de níquel de 0.68 % y 0.093 % de cobalto. En este último, el 50 % de los datos alcanzaron valores entre 0.093 % y 0.104 %, ver Figura 26.

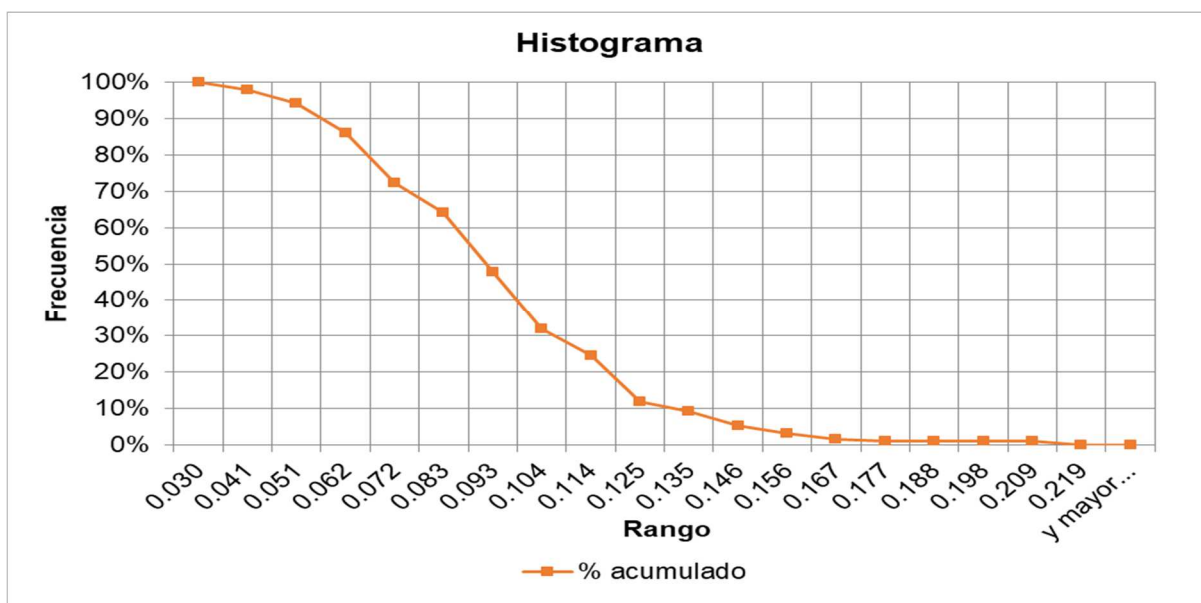


Figura 26: Distribución del contenido de cobalto, fracción granulométrica menor que 1.18 mm y mayor que 0.84 mm.

Los contenidos de cobalto de la fracción granulométrica menor que 1.18 mm y mayor que 0.84 mm del “rechazo no conforme”, por lo general mostraron valores altos; por lo que se consideró como una posibilidad para incrementar el aprovechamiento de estas menas en el proceso. El contenido de la fracción granulométrica menor que 1.18 mm y mayor que 0.84 mm en peso es bajo (1.05 %), por lo que su incorporación al proceso no representa un cambio sustancial en la granulometría de la pulpa producto a lixiviar.

A partir del diseño de experimento propuesto en el epígrafe 2.3.2., se realizó un muestreo aleatorio (7 muestras) de las menas alimentadas a la planta de Preparación de Pulpa. Estas muestras, de forma independiente, se homogenizaron y se dividieron en dos, obteniendo un total de 14 muestras, las cuales fueron procesadas por una abertura de tamiz de 0.84 mm y 1.18 mm, ver Tabla 10.

Tabla 10: Resultados de la fracción granulométrica menor que 1.18 mm y menor que 0.84 mm en muestras de menas alimentadas a la planta de Preparación de Pulpa.

Muestra	Fracción granulométrica		Incorporación por fracción granulométrica en la pulpa tamizada a 1.18 mm	
	< 1.18 mm	< 0.84 mm	< 1.18 mm	< 0.84 mm
	(%)			
1	85.31	78.85	6.46	6.20
2	86.48	71.59	14.90	14.62
3	86.38	80.46	5.92	5.63
4	82.68	80.18	2.50	2.20
5	86.31	78.47	7.84	7.56
6	88.03	78.10	9.93	9.63
7	83.40	81.82	1.58	1.32
Promedio	85.51	78.50	7.02	6.74
Máximo	88.03	81.82	14.90	14.62
Mínimo	82.68	71.59	1.58	1.32

Los resultados obtenidos del tamizado (7 muestras), con abertura de las mallas hasta 1.18 mm, promedió 7.02 % de fracción granulométrica menor que 1.18 mm. El 0.28 % de este valor pertenece a la clase comprendida entre menor que 1.18 mm y mayor que 0.84 mm, y el 6.74 % restante a la fracción menor que 0.84 mm.

En la Tabla 11, se muestra la composición química de las pulpas tamizadas utilizando los tamices con abertura de 1.18 mm y 0.84 mm.

Tabla 11: Distribución de los principales elementos químicos de las pulpas, utilizando los tamices con abertura hasta 1.18 mm y 0.84 mm.

Muestra	Fracciones granulométricas	%					
		Ni	Co	Ni+Co	Fe	Mg	SiO ₂
1	< 0.84 mm	1.14	0.107	1.247	36.99	1.93	5.89
	< 1.18 mm	1.21	0.095	1.305	38.06	2.08	5.54
2	< 0.84 mm	0.95	0.155	1.100	44.89	1.04	2.01
	< 1.18 mm	0.95	0.189	1.134	42.82	0.78	1.97
3	< 0.84 mm	1.21	0.137	1.347	46.05	1.19	4.10
	< 1.18 mm	1.30	0.140	1.440	48.81	1.28	5.71
4	< 0.84 mm	1.24	0.115	1.355	43.64	0.40	3.39
	< 1.18 mm	1.23	0.123	1.353	44.98	1.60	3.22
5	< 0.84 mm	1.19	0.133	1.323	42.23	0.27	8.52
	< 1.18 mm	1.26	0.132	1.392	48.12	1.30	10.31
6	< 0.84 mm	1.02	0.115	1.130	41.21	1.97	5.15
	< 1.18 mm	1.01	0.114	1.120	35.40	1.88	5.28
7	< 0.84 mm	1.27	0.144	1.410	43.70	0.76	6.21
	< 1.18 mm	1.28	0.145	1.420	45.06	0.74	6.54
Promedio < 0.84 mm		1.14	0.129	1.273	42.67	1.08	5.04
Promedio < 1.18 mm		1.18	0.134	1.309	43.32	1.38	5.51

Los valores promedio de níquel para ambas fracciones superan el contenido mínimo industrial, siendo superior en la fracción menor que 1.18 mm, con 1.18 % en relación a la fracción menor que 0.84 mm, con 1.14 %. Los contenidos de cobalto para ambas fracciones se muestran atractivos para ser procesado por la industria, siendo de 0.134 % en la fracción menor que 1.18 mm y 0.129 % en la fracción menor que 0.84 mm.

Las pulpas tamizadas utilizando el tamiz con abertura de 1.18 mm mostro un incremento de 0.036 % del contenido de níquel más cobalto, aunque en algunos casos los valores fueron igual o inferiores en relación al tamiz con abertura de 0.84 mm.

El contenido de magnesio en la fracción menor que 1.18 mm mostró un incremento de 1.38 % como promedio, comparado con el 1.08 % en la fracción menor que 0.84 mm. El contenido de sílice para ambas fracciones estuvo por debajo del 6 %, indicando un ligero incremento en la fracción menor que 1.18 mm. Los valores obtenidos para estos elementos, magnesio y sílice, no representan un incremento significativo para una mayor abertura de tamiz, en relación a las pulpas tamizadas a 0.84 mm.

La evaluación económica se basó en la propuesta definida en el epígrafe 2.4 para el balance de materiales de la planta de Preparación de Pulpa, ver Anexo 16. La utilización de tamiz con abertura hasta 1.18 mm muestra que existe una recuperación promedio de 266 t/día de menas. El aporte económico de la implementación de esta variante se estima en \$ 6,6 millones de dólares al año, Tabla 12.

Tabla 12 Parámetros utilizados en el balance económico, tamiz con abertura hasta 1.18 mm.

Parámetro	UM	
fracción < 0.84 mm recuperada	t/d	266
Contenido de Ni	%	1.169
Contenido de Co	%	0.119
Eficiencia metalúrgica de Ni	%	87
Eficiencia metalúrgica de Co	%	88
Producción de Ni	t/d	2.7
Producción de Co	t/d	0.3
Precio del Ni	\$/lb	6
Precio del Co	\$/lb	20
Ingresos de Ni	\$/d	35,746
ingresos de Co	\$/d	12,298
Costo de producción	\$/t	10,000
Aporte económico	\$/día	18,231
	\$/año	6,654,434

La evaluación del procesamiento de las menas lateríticas con incremento de la abertura de tamiz hasta 1.18 mm muestra perspectiva desde el punto de vista tecnológico y económico, tomando en consideración la recuperación de la fracción limonítica con altos contenidos de níquel y cobalto.

3.3.3 Evaluación de la técnica de hidrominería para el lavado del rechazo de la planta de Preparación de Pulpa

La utilización de técnicas de hidrominería para la recuperación de la fracción menor que 0.84 mm que se pierde en el desecho de la planta de Preparación de Pulpa, consiste en lavar con agua a presión las pilas de rechazo. De este lavado se obtiene una pulpa, la cual debe de ser canalizada y reincorporada al proceso de clasificación granulométrica de la planta. Para la evaluación de esta propuesta se siguió diseño de experimento descrito en el epígrafe 2.3.3.

En la Tabla 13 se muestra los principales resultados del análisis por tamizado realizado a escala de laboratorio, para la evaluación de la variante de hidrominería.

Tabla 13: Por ciento en peso de la fracción granulométrica menor que 0.84 mm en la pila de rechazo de la planta de Preparación de Pulpa.

Corrida	fracción < 0.84 mm en la pila de rechazo de la planta de Preparación de Pulpa		
	%		
	muestra sin lavar	muestra lavada	recuperación
1	32.49	23.80	8.69
		30.24	2.25
2	7.52	2.21	5.31
		5.22	2.30
3	17.85	16.20	1.65
Promedio	19.29	15.53	3.75

En la evaluación de la hidrominería, para la recuperación de la fracción fina rechazada, se observa que:

- las muestras tomadas antes del lavado de la sección de la pila de rechazo, presentaron como promedio 19.29 % de fracción retenida
- las muestras tomadas después del lavado de la sección de la pila de rechazo, presentaron como promedio 15.53 % de fracción retenida

- existe una recuperación de 3.75 % de la fracción menor que 0.84 mm con el lavado de la pila de rechazo de la planta de Preparación de Pulpa.

Con relación a las pérdidas de la fracción menor que 0.84 mm contenida en el rechazo, se ha considerado que el empleo de técnicas de hidrominería para el lavado del material de rechazo, constituye una variante atractiva para su implementación. Los resultados alcanzados a escala de laboratorio, indican que se recupera un 3.75 % de la fracción < 0.84 mm como promedio, con la implementación de esta variante. Teniendo en cuenta los criterios generados de la evaluación del empleo de técnicas de hidrominería para el lavado del rechazo, se realizó evaluación técnico-económica, para determinar los benéficos que aportaría la ejecución de esta variante.

Para la evaluación económica fue necesario determinar mediante el balance de material, la cantidad de fracción menor que 0.84 mm que se incorpora a la cadena productiva. Con los datos obtenidos en la evaluación granulométrica, se determina mediante el balance de materiales en la planta, que existe una recuperación promedio de 163 t/día de menas con granulometría menor que 0.84 mm, según epígrafe 2.4.

Partiendo del valor recuperado de la fracción menor que 0.84 mm y teniendo en cuenta los componentes de costo-beneficio general del proceso ácido a alta presión y temperatura, se estima un beneficio al año de \$ 4,09 millones. En la Tabla 14, se muestran los elementos que se tuvieron en cuenta en esta evaluación económica.

Tabla 14: Estimado del beneficio económico de la implementación de las mallas de 1.18 mm.

Parámetro	UM	valores
Fracción < 0.84 mm recuperada	t/d	163
Contenido de Ni	%	1.169
Contenido de Co	%	0.119
Eficiencia metalúrgica de Ni	%	87
Eficiencia metalúrgica de Co	%	88
Producción de Ni	t/d	1.7
Producción de Co	t/d	0.2
Precio del Ni	\$/lb	6
Precio del Co	\$/lb	20
Ingresos por Ni	\$/d	21,955.08
Ingresos por Co	\$/d	7,553.55
Costo de producción	\$/t	10,000.00
Aporte económico	\$/día	11,197.56
	\$/año	4,087,110.57

CONCLUSIONES

1. Se demostró que a partir del agotamiento de los yacimientos de Moa Occidental y la entrada de nuevos yacimientos, en particular de Camarioca Norte, con pequeños espesores del horizonte laterítico, se ha originado un incremento de la incorporación al proceso de la mena saprolítica (SB) y laterítica fuera de balance (LF), con una disminución de la mena limonítica de balance (LB) desde un 84 % a un 57 %
2. En el período evaluado, la fracción granulométrica menor que 0.84 mm en las menas alimentadas disminuyó desde un 86 % a un 74 % y los contenidos de componentes útiles de níquel, cobalto y hierro en la fracción menor que 0.84 mm mostraron una tendencia descendente, en un 0.188 %, un 0.03 % y un 7.05 % respectivamente. En cambio, los contenidos de sílice y magnesio han presentado una tendencia general al incremento, en 2.45 % y 1.30 % respectivamente
3. La evaluación de las propuestas para incrementar el aprovechamiento de las menas con granulometría menor que 0.84 mm, ha permitido concluir que:
 - La incorporación del “rechazo no conforme” al proceso no resultó atractiva, debido a que presenta un 46.01 % de fracción granulométrica mayor que 4 mm, implicando mayor pérdida de eficiencia por sobrecargar el sistema de beneficio. Además de poseer alto contenido de magnesio (6.19 %) y sílice (18.31 %), generando una pérdida económica para el proceso ácido
 - El incremento de la abertura de mallas hasta a 1.18 mm resultó atractiva, con una recuperación de la fracción menor que 0.84 mm en el orden del 7 %. El contenido de níquel se incrementó en un 0.031 % y el del cobalto en un 0.005 %, sin existir incrementos significativos de los contenidos de magnesio y sílice
 - La técnica de hidrominería para la recuperación de la fracción menor que 0.84 mm que se pierde junto con el rechazo, arrojó resultados satisfactorios, al recuperarse alrededor de un 3.75 % del material que se rechaza; lo que equivale a 163 t/día de menas limonítica de balance.
4. El análisis económico mostró que existe un beneficio de 6,5 millones de dólares al año con el cambio de abertura de tamiz hasta 1.18 mm, en relación a la

utilización de la técnica de hidrominería en el lavado del rechazo de 4.09 millones de dólares al año.

RECOMENDACIONES

1. Implementar las modificaciones tecnológicas relacionadas con el incremento del orificio de las mallas y la hidrominería, para incrementar la recuperación de la fracción limonítica menor que 0.84 mm que se pierde junto con el material de rechazo
2. Incorporar en los estudios e investigaciones geológicas de los yacimientos concesionados a Moa Nickel S.A. la caracterización granulométrica de las menas, según las exigencias del proceso de lixiviación ácida a presión
3. Evaluar la factibilidad de la aplicación de las técnicas de ultrasonido para la desagregación de la fracción limonítica que se pierde en el material de rechazo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguei, G. (2006). Distribución fraccional de las especies metálicas y mineralógicas de la MENA níquelífera de un perfil del yacimiento Punta Gorda, Moa, Holguín, Cuba, Tesis doctoral. Departamento de Metalurgia. Instituto Superior Minero Metalúrgico "Dr. Antonio Núñez Jiménez".
- Alvarez, D. B. (1990). Estudio de los principales parámetros geólogo-industriales del sector Zona "A" del yacimiento Moa. Trabajo de Diploma. ISMM-Moa.
- Ariosa, J. D., W., L. C., Borgues, G. P. S., & Díaz, M. R. (2003). Modelo geológico descriptivo para los yacimientos lateríticos de Fe-Ni-Co en la faja ofiolítica Mayarí – Baracoa de Cuba Oriental. *Minería y Geología. Vol. (1-2)*.
- Beyris, P. E. (1997). Mejoramiento del proceso de sedimentación de la pulpa de mineral laterítico de la Empresa Comandante "Pedro Sotto Alba" (Moa Níkel SA.). Tesis doctoral. Departamento de Metalurgia. Instituto Superior Minero Metalúrgico "Dr. Antonio Núñez Jiménez", Moa, Holguín.
- Camacho, R. L. (2018). Manual de operaciones de planta de Preparación de Pulpa.
- Carballo, P. A. (1997). Metodología para la Evaluación Geológico-Económica de los Yacimientos Lateríticos de Níquel y Cobalto de la región de Moa. Tesis Doctoral.
- Carballo, P. A., & Rodés, G. H. (1993). Incremento de las reservas minerales y de metal por la utilización de un cut-off óptimo en los yacimientos lateríticos de la Empresa Cmdte. Pedro Soto Alba. Perspectiva de la base minera. Archivo Técnico. Unión del Níquel, Moa.
- Cerpa A., Tartaj, P., García-González, M. T., Requena, J., Garcell, L. R., & Serna, C. J. (1999). Mineral-content and particle-size effect on the colloidal properties of concentrated lateritic suspensions. *Clays and Clay Minerals*. 47 (4) 515-521.
- . Concepto de Mineral. from <https://es.wikipedia.org/wiki/Mineral>
- Cuenca, T. F. (2017). Evaluación del material de rechazo en la planta de preparación de pulpa, empresa Comandante Petro Sotto Alba. Trabajo de Diploma.
- Donal, S. L. (2015). Rasgos geoquímicos de la corteza de intemperismo de sector Cantarrana, Moa, Holguín. Tesis de Maestría 9^{na} Edición.
- Falcón, H. J. (2008). Curso de Tratamiento de Minerales. Facultad de Ingeniería Química. Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba.
- Falcón, H. J., & Hernández, F. A. (1993). Preparación y beneficio de minerales lateríticos en el proceso ácido a presión. *Minería y Geología, Vol. II, No.2*, 51-53.
- Fonseca, E., & et al. (1984). Particularidades de la estructura de la asociación ofiolítica de Cuba. *Ciencias de la tierra y del espacio, No. 9* 3-46.
- Gendis, D. L. R., & Mosqueda, M. A. (2018a). Incremento de la recuperación de Limonita en el cilindro lavador de rechazo. Evento GEOMOA 2018.

- Gendis, D. L. R., & Mosqueda, M. A. (2018b). Incremento de la recuperación de Limonita en la zaranda del Circuito de Rechazo. Evento Internacional Minemetal 2018.
- Gleeson, S. A., Herrington, R. J., Durango, J., Velázquez, C. A., & Koll, G. (2004). The Mineralogy and Geochemistry of the Cerro Matoso S.A. Ni Laterite Deposit, Montelíbano, Colombia. *Economic Geology*, 99, 1197–1213.
- Hernández, F. A., Falcón, H. J., & Toirac, S. M. (2001). La eficiencia en la preparación húmeda de la laterita. *Minería y Geología*, Vol. XVIII, Nos. 3-4,, 77-81.
- Hernández, F. A., Legrá, A., Trujillo, C. R., & Toirac, S. M. (2010). Beneficio de la mena laterítica. Actualidad y perspectivas. *Minería y Geología*, 26, No. 1.
- Herrera, C. S. S. (2018). Caracterización del rechazo de la planta de preparación mineral del yacimiento Moa Oriental, para su posible uso industrial.
- Ivanov, V., & et al. (1985). Informe geológico final de la exploración detallada del yacimiento de menas niquelíferas “Las Camariocas”; realizado durante los años 1976-1978 con cálculo de reservas actualizado al 1/1/1984. Oficina Territorial de Recursos Minerales. Santiago de Cuba.
- Kasatkin, A. (1971). Basic processes and apparatus of chemical technology. *Chimiya, Moscow*, 784.
- Lavaut, C. W. (1987). Control litológico-mineralógico de la mineralización en la corteza de intemperismo de ultramafitas del campo mineral yacimientos: Punta Gorda-Camariocas-Piloto. Tesis de Doctorado.
- Legrá, C. D. (2012). Análisis de la explotación de la línea de rechazo de la planta de pulpa de la Empresa Pedro Sotto Alba. Trabajo de Diploma.
- Li, J., Li, X., Hu, Q., Wang, Z., Zhou, Y., Zheng, J., . . . Li, L. (2009). Effect of pre-roasting on leaching of laterite. *Hydrometallurgy*, 99, 84–88, .
- Luo, W., Feng, Q., Ou, L., Zhang, G., & Lu, Y. (2009). Fast dissolution of nickel from a lizardite-rich saprolitic laterite by sulphuric acid at atmospheric pressure. *Hydrometallurgy*, 96, 171–175.
- Madigan, C., Leong, Y. K., & Ong, B. C. (2009). Surface and rheological properties of as-received colloidal goethite (α -FeOOH) suspensions: pH and polyethylenimine effects. *Int. J. Miner. Process*, 93, 41–47.
- Manceau, A., Schlegel, M. L., Musso, M., Sole, V. A., Gauthier, C., Petit, P. E., & Trolard, F. (2000). Crystal chemistry of trace elements in natural and synthetic goethite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 64 (21) 3643–3661.
- Marsh, E., Anderson, E., & Gray, F. (2013). Nickel-Cobalt Laterites—A Deposit Model. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia.
- Muñoz, G. J. N. (2004). Geología y mineralogía de yacimientos residuales de menas lateríticas de Fe-Ni-Co.
- Muñoz, J. N., Rodríguez, A., & Barea, I. (2015). Variabilidad de los perfiles lateríticos en los yacimientos ferroniquelíferos de Moa. Publicación Minería y Geología. Vol. 31 No.2, p.21-33.

- Ortiz, M. (1994). Estudio petrográfico y petroquímico del substrato y de la composición sustancial de la corteza de intemperismo de los sectores norte, este y sur del yacimiento "Las Camariocas", según la exploración orientativa (Tomo III). Oficina Territorial de Recursos Minerales. Santiago de Cuba.
- Perez, G. L. (2010). Modelo matemático que correlaciona los principales factores de influencia sobre el comportamiento reológico de las pulpas lateríticas. Empresa Moa Nickel SA. Tesis doctoral Ing. Química. Facultad de Química-Universidad de Oriente, Cuba.
- Pinel, A., & et al. (1992). Informe de la exploración orientativa y detallada del yacimiento Moa Oriental. Archivos. Empresa Geólogo-Minera de Oriente. Santiago de Cuba.
- Proenza, J., Gervilla, F., & Melgarejo, J. C. (1999). La Moho Transition Zone en el Macizo Ofiolítico Moa-Baracoa: un ejemplo de interacción magma/peridotita. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 12(3-4), 309-327.
- Proenza, J. A. (2015). Mineralogía y Geoquímica de Ni, Co, EGP, Sc, REE en Yacimientos Lateríticos.
- Rodríguez, S. A. Y. (2015). Evaluación de los parámetros geólogo-industriales del yacimiento Camarioca Este. Tesis de Maestría 9^{na} Edición.
- Rojas, P. A. (1995). Principales fases minerales portadoras de níquel en los horizontes lateríticos del yacimiento Moa. Tesis Doctoral. *Centro de Información. I.S.M.M.-Moa*.
- Rojas, P. A. (2001). Evidencias a favor de que la goethita es la principal portadora de níquel en los horizontes lateríticos de las cortezas ferroniquelíferas. *Minería y Geología*, XVIII, 21-31.
- Rojas, P. A., & Beyris, P. E. (1994). Influencia de la composición mineralógica en la sedimentación del material limonítico de frentes de explotación de la industria "Pedro Sotto Alba". *Revista Minería y Geología*, Vol XI, 1/94.
- Rojas, P. A., & Carballo, P. A. (1993). Valoración mineralógica-económica del material de rechazo de la planta de preparación de pulpa del yacimiento Moa. *Minería y Geología*, No 3/93, 11-19.
- Sanchez, J. D. (1981). Influencia de la variación de capacidad de la planta de Preparación de Pulpa en el % de rechazo y mejoramiento de su tecnología. Primer Ecuentero Científico Técnico del Níquel en Moa.
- Sanchez, J. D., Iglesias, F. C., & Calzada, L. A. (2012). Recuperación de la fracción – 20 mesh (0.84 mm) en el rechazo de la planta de preparación de pulpa de la empresa Moanickel S.A. Pedro Sotto Alba. *Tecnología Química*, XXXII, No. 3,, 275-284.
- Smirnov, V. I. (1982). Geología de yacimientos minerales. (edición en español). (Editorial MIR, Moscú. Rusia), 654.
- Torrego Martín, C. (2013). La evolución de la clasificación de los minerales.
- Urra, A. J. (2015). Modelación 3D de elementos químicos de la limonita en la presa de rechazo nueva, empresa pedro sotto alba. Tesis de Maestría en Geología.
- Urra, A. J. (2018). Reporte de cierre de minería.

- Urra, A. J., Hernández, C. T., & Hernández, V. E. (2015). Plan de Minería.
- Urra, A. J., Mallea, R. R., Navarro, N. J., & Hernández, V. E. (2010). Proyecto de Explotación Camarioca Norte.
- Wilson, J., Savage, D., Cuadros, J., Shibata, M., & Vala Ragnarsdottir, K. (2006). The effect of iron on montmorillonite stability. (I) Background and thermodynamic considerations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70, 306–322.

ANEXOS

Anexo 1: Contenido de los principales elementos químicos presente en la clase de tamaño < 0.84 mm de las menas procesadas por Moa Nickel SA.

Fecha	Ni+Co	Ni	Co	Fe	Mg	SiO ₂
1994	1.420	1.292	0.128	45.52	0.50	4.14
1995	1.393	1.278	0.115	45.05	0.53	4.65
1996	1.370	1.248	0.122	44.05	0.61	4.85
1997	1.384	1.266	0.118	44.24	0.57	4.85
1998	1.342	1.228	0.114	44.98	0.35	4.15
1999	1.338	1.221	0.117	45.02	0.56	5.12
2000	1.376	1.181	0.125	46.75	0.57	4.48
2001	1.445	1.320	0.125	47.23	0.55	4.10
2002	1.493	1.353	0.140	47.77	0.49	4.40
2003	1.443	1.302	0.141	47.18	0.58	4.29
2004	1.423	1.286	0.137	47.20	0.64	4.43
2005	1.385	1.181	0.134	46.83	0.77	4.63
2006	1.346	1.211	0.135	46.36	0.80	4.60
2007	1.348	1.214	0.134	45.17	1.12	5.34
2008	1.345	1.219	0.126	45.27	1.13	5.94
2009	1.352	1.221	0.131	45.39	0.95	5.50
2010	1.344	1.211	0.133	45.13	1.09	5.45
2011	1.334	1.196	0.138	43.79	1.22	5.43
2012	1.339	1.205	0.134	44.49	1.18	5.10
2013	1.317	1.201	0.116	43.28	1.23	
2014	1.322	1.214	0.108	42.40	1.26	6.09
2015	1.355	1.232	0.123	43.24	1.18	5.70
2016	1.300	1.183	0.117	42.75	1.32	6.15
2017	1.285	1.165	0.120	42.18	1.32	6.48
2018	1.290	1.178	0.112	40.72	1.65	6.55
Promedio	1.364	1.238	0.126	44.88	0.89	5.10
Máximo	1.493	1.353	0.141	47.77	1.65	6.55
Mínimo	1.285	1.165	0.108	40.72	0.35	4.10

Evaluación de la recuperación de la fracción limonítica en el rechazo.

Anexos

Anexo 2: Composición granulométrica y quimismo de la clase de tamaño < 1.18 mm y > 0.84 mm en las muestras de "rechazo no conforme", %.

Muestra	Contenido en peso	Ni	Co	Fe	Mg	SiO₂
1	1.09	0.598	0.098	28.95	5.37	9.29
2	0.78	0.574	0.094	30.23	5.89	9.63
3	0.76	0.543	0.093	30.27	5.16	6.80
4	0.73	0.587	0.070	25.59	5.78	14.01
5	0.74	0.485	0.056	18.84	5.62	13.90
6	0.59	0.549	0.112	27.68	3.73	10.70
7	0.84	0.803	0.122	30.09	4.56	12.11
8	0.82	0.615	0.075	31.06	4.35	12.21
9	1.06	0.606	0.124	29.05	3.99	10.97
10	0.91	0.774	0.082	33.91	7.01	12.20
11	0.66	0.734	0.079	31.76	1.39	19.31
12	0.69	0.624	0.062	34.95	0.74	17.31
13	0.66	0.678	0.094	33.35	1.32	17.02
14	0.69	0.798	0.096	31.76	1.37	13.83
15	0.12	0.651	0.074	30.33	1.37	17.36
16	1.19	0.564	0.071	34.62	5.89	12.19
17	1.23	0.604	0.094	31.36	5.71	13.28
18	1.07	0.569	0.123	29.10	5.45	12.93
19	1.31	0.632	0.108	19.95	10.17	23.13
20	0.82	0.740	0.110	17.91	8.89	27.23
21	0.71	0.713	0.138	23.36	9.53	21.62
22	0.81	0.835	0.110	19.14	2.53	20.06
23	0.69	0.915	0.217	23.06	2.13	17.93
24	0.66	0.724	0.101	21.99	5.53	14.85
25	0.37	0.756	0.090	28.20	4.71	15.67
26	0.69	0.642	0.100	25.71	6.02	15.27
27	0.48	0.739	0.114	27.01	5.48	14.72
28	0.75	0.653	0.116	26.24	6.30	15.77
29	0.63	0.786	0.110	24.61	3.35	16.82
30	0.80	0.674	0.096	23.40	4.19	15.07
31	0.42	0.559	0.070	37.52	2.53	12.88

Evaluación de la recuperación de la fracción limonítica en el rechazo.

Anexos

32	0.93	0.844	0.088	34.22	6.14	17.97
33	0.85	0.731	0.097	25.02	6.38	18.14
34	0.65	0.609	0.140	26.63	2.61	16.04
35	0.73	0.593	0.137	30.38	2.59	15.22
36	0.78	0.871	0.057	26.58	4.51	18.73
37	1.35	0.986	0.091	23.15	4.19	22.19
38	0.96	0.731	0.097	27.30	2.93	16.77
39	0.43	0.794	0.093	23.72	4.76	19.25
40	0.38	0.921	0.047	20.21	5.76	23.84
41	3.83	0.530	0.122	28.78	5.19	14.78
42	1.85	0.500	0.125	25.66	4.39	13.53
43	2.43	0.450	0.124	24.13	3.84	10.25
44	0.82	0.710	0.057	19.27	12.31	26.03
45	0.99	0.550	0.084	22.54	9.25	20.31
46	3.40	0.516	0.124	40.39	0.18	15.50
47	2.21	0.481	0.118	41.78	1.72	19.43
48	1.10	0.414	0.135	35.69	2.29	15.75
49	0.73	0.516	0.091	37.91	3.08	21.07
50	1.08	0.613	0.062	32.53	2.75	10.01
51	1.69	0.612	0.131	40.21	0.61	15.07
52	1.48	0.680	0.138	33.24	1.50	17.63
53	1.67	0.616	0.118	28.78	0.43	20.38
54	0.64	0.686	0.094	29.92	0.86	21.31
55	0.52	0.683	0.087	21.77	0.76	31.20
56	1.29	0.525	0.097	31.09	5.47	24.68
57	1.04	0.582	0.119	28.75	6.41	20.52
58	1.44	0.594	0.106	28.81	6.23	19.32
59	0.85	0.619	0.097	33.41	5.36	16.62
60	1.24	0.643	0.104	31.46	5.19	17.91
61	1.45	0.557	0.126	28.03	9.03	16.80
62	1.06	0.536	0.093	31.03	3.41	15.47
63	2.31	0.545	0.147	39.64	6.74	13.18
64	1.76	0.611	0.166	42.29	4.21	9.37
65	1.65	0.530	0.158	38.23	4.23	8.36
66	2.78	0.536	0.040	42.42	4.80	9.13

Evaluación de la recuperación de la fracción limonítica en el rechazo.

Anexos

67	2.38	0.499	0.031	37.36	5.37	10.07
68	2.42	0.578	0.043	40.38	4.02	9.15
69	0.65	0.955	0.034	28.69	10.34	22.12
70	0.74	1.122	0.034	29.47	10.15	20.13
71	1.57	0.970	0.097	32.76	3.59	10.70
72	1.53	0.920	0.070	30.78	3.57	12.24
73	2.53	0.960	0.096	33.33	3.66	12.09
74	1.76	0.940	0.079	33.78	4.50	15.17
75	1.62	0.960	0.081	31.26	5.37	17.26
76	1.64	0.766	0.085	32.29	3.88	12.98
77	2.15	0.576	0.054	32.13	3.96	14.72
78	1.65	0.691	0.087	28.21	4.86	17.59
79	0.79	0.744	0.209	28.40	4.58	14.99
80	1.07	0.750	0.126	25.10	5.93	17.41
81	1.46	0.605	0.070	27.96	5.00	23.14
82	1.44	0.991	0.087	28.27	4.64	21.69
83	1.55	0.557	0.098	29.79	5.23	19.15
84	0.53	0.708	0.098	24.01	6.05	24.77
85	0.59	0.789	0.096	22.66	4.99	24.13
86	2.78	0.611	0.079	43.27	6.67	17.01
87	2.38	0.702	0.087	24.25	6.18	18.89
88	2.42	0.816	0.100	39.95	7.56	21.48
89	0.65	0.603	0.087	30.31	5.42	19.75
90	0.74	0.637	0.081	43.12	4.23	14.94
91	1.44	0.690	0.079	22.13	3.71	15.60
92	1.34	0.870	0.129	36.19	2.50	10.88
93	1.39	0.790	0.091	27.01	3.81	16.86
94	1.31	0.770	0.112	43.97	4.10	17.37
95	1.22	0.630	0.111	34.82	3.04	13.93
96	1.53	0.653	0.085	35.89	4.53	9.47
97	0.86	0.741	0.167	35.74	4.24	10.70
98	2.82	0.706	0.076	40.16	2.31	8.73
99	1.48	0.752	0.081	31.51	5.06	17.90
100	1.52	0.463	0.066	38.22	4.13	15.34
101	0.69	0.351	0.067	23.81	6.95	26.86

Evaluación de la recuperación de la fracción limonítica en el rechazo.

Anexos

102	1.27	0.369	0.071	24.22	6.80	24.97
103	0.89	0.434	0.084	25.76	6.01	22.95
104	0.60	0.390	0.075	28.61	5.23	22.00
105	0.59	0.363	0.070	31.07	4.85	18.00
106	0.53	0.706	0.139	21.70	7.23	20.05
107	1.18	0.699	0.137	21.16	7.45	20.96
108	0.77	0.744	0.146	21.93	7.47	20.75
109	0.48	0.374	0.072	22.33	6.84	24.56
110	0.70	0.341	0.065	22.00	7.41	24.98
111	0.74	0.620	0.091	23.22	5.96	20.48
112	0.46	0.579	0.085	22.20	5.12	21.76
113	0.52	0.616	0.069	23.70	6.03	20.22
114	0.44	0.613	0.080	26.00	5.13	21.31
115	0.50	0.564	0.098	30.42	4.01	15.01
116	2,38	0.544	0.083	22.13	6.80	15.41
117	1,13	0.619	0.096	15.14	11.44	22.63
118	1,14	0.607	0.092	15.62	9.71	26.71
119	0,42	1.020	0.066	13.56	11.49	24.23
120	0,30	0.826	0.062	12.62	11.87	22.09
121	2,21	0.690	0.066	28.21	7.49	15.76
122	1.89	0.690	0.095	24.44	8.76	14.61
123	1.47	0.841	0.063	21.71	11.48	18.66
124	0.50	0.724	0.109	16.55	10.31	20.81
125	0.71	0.699	0.114	16.77	9.48	18.31
126	0.71	0.786	0.049	19.88	10.99	20.40
127	0.99	0.724	0.050	16.20	10.42	20.13
128	0.84	0.831	0.053	23.42	9.16	19.62
129	0.64	0.503	0.059	34.52	5.93	11.75
130	0.90	0.491	0.123	33.43	4.99	10.38
131	1.01	0.688	0.064	31.58	7.91	14.98
132	0.99	1.200	0.044	23.95	9.41	18.39
133	1.00	0.740	0.085	29.81	7.21	15.30
134	0.84	0.721	0.065	23.62	9.57	17.16
135	0.01	0.688	0.055	25.65	8.69	17.63
136	1.41	0.707	0.085	25.41	8.08	18.29

Evaluación de la recuperación de la fracción limonítica en el rechazo.

Anexos

137	1.66	0.426	0.092	24.69	9.35	18.44
138	1.30	0.525	0.095	27.54	8.15	16.63
139	0.78	0.708	0.111	28.01	5.70	14.49
140	0.52	0.784	0.105	29.29	6.36	13.91
141	1.15	0.426	0.092	24.69	9.35	18.44
142	1.42	0.410	0.101	20.93	8.81	23.38
143	0.40	0.558	0.106	32.56	5.49	13.65
144	0.91	0.555	0.115	27.10	8.07	18.25
145	0.30	0.517	0.124	17.48	9.74	21.12
146	0.91	0.875	0.121	29.46	0.74	7.88
147	0.49	0.966	0.103	27.45	0.62	9.34
148	0.73	0.954	0.114	30.56	0.73	8.39
149	0.76	0.671	0.117	34.23	0.78	4.54
150	1.00	0.707	0.118	35.06	0.70	5.36
151	0.71	0.966	0.103	27.45	0.62	9.34
152	0.85	0.598	0.102	31.38	0.65	5.69
153	0.67	0.733	0.068	38.88	0.44	1.55
154	0.67	0.707	0.118	35.06	0.70	5.36
155	0.68	0.918	0.076	25.64	0.49	2.91
156	0.89	0.954	0.114	30.56	0.73	8.39
157	0.64	0.524	0.117	31.79	0.65	6.29
158	1.30	0.823	0.087	29.18	0.55	2.84
159	0.92	0.716	0.089	29.86	2.08	11.29
160	0.59	0.918	0.076	25.64	2.91	18.46
161	0.89	0.746	0.060	28.66	4.30	5.11
162	1.14	0.711	0.053	24.63	7.73	8.68
163	0.69	0.656	0.063	24.68	4.96	6.91
164	0.72	0.746	0.074	29.63	4.58	6.44
165	0.80	0.643	0.072	29.21	3.67	4.56
166	0.63	0.633	0.058	35.55	2.51	10.97
167	0.72	0.665	0.052	34.49	2.59	11.89
168	0.69	0.658	0.056	33.91	2.93	14.06
169	0.62	0.553	0.085	37.17	1.44	9.96
170	0.23	0.602	0.116	31.74	1.55	17.70
171	0.45	0.658	0.056	33.91	2.93	14.06

Evaluación de la recuperación de la fracción limonítica en el rechazo.

Anexos

172	0.71	0.578	0.088	34.84	1.32	12.74
173	0.70	0.665	0.052	34.49	2.59	11.89
174	0.32	0.555	0.069	32.30	1.67	12.59
175	0.29	0.617	0.066	34.83	1.71	13.21
176	1.03	0.618	0.160	28.63	5.20	13.27
177	1.31	0.594	0.154	29.73	4.55	12.50
178	0.70	0.646	0.153	27.00	5.54	13.55
179	1.22	0.573	0.143	24.96	6.83	16.84
180	0.93	0.715	0.111	28.26	7.29	16.60
181	0.76	0.661	0.096	28.03	4.83	16.90
182	0.24	0.729	0.069	32.43	5.26	16.41
183	0.65	0.562	0.102	30.80	5.01	16.49
184	0.76	0.788	0.064	30.61	5.72	18.05
185	1.07	0.716	0.059	29.80	5.34	17.18
186	1.28	0.743	0.118	40.90	3.74	14.19
187	1.20	0.899	0.044	20.04	9.15	28.54
188	0.98	0.823	0.118	39.64	4.26	14.87
189	0.63	0.811	0.092	32.11	5.49	19.14
190	0.82	0.700	0.085	45.17	3.14	12.66
191	1.26	0.802	0.103	43.31	3.51	12.36
192	0.83	0.803	0.094	45.54	3.49	12.52
193	0.87	0.897	0.085	40.98	4.33	14.28
194	0.92	0.833	0.059	36.09	4.16	12.62
195	0.65	0.895	0.047	35.69	5.81	19.69
Mínimo	0.01	0.341	0.031	12.62	0.18	1.55
Máximo	3.83	1.200	0.217	45.54	12.31	31.20
Promedio	1.04	0.680	0.093	29.36	5.03	15.79

*Evaluación de la recuperación de la fracción limonítica en el rechazo.**Anexos*

Anexo 3. Composición granulométrica y quimismo de la clase de tamaño < 0.84 mm en las muestras de "rechazo no conforme", %.

Muestra	Contenido en peso	Ni	Co	Fe	Mg	SiO₂
1	40.99	0.879	0.081	38.18	4.09	6.51
2	32.26	0.862	0.065	27.49	3.08	5.08
3	40.32	0.743	0.062	25.84	2.28	5.15
4	29.11	0.929	0.074	29.29	4.56	8.28
5	31.34	0.999	0.066	26.66	6.02	10.42
6	59.54	1.028	0.130	41.18	1.18	5.06
7	53.68	1.023	0.109	33.22	3.24	10.15
8	43.61	1.317	0.103	29.12	6.18	16.94
9	50.20	1.136	0.099	36.76	2.70	9.64
10	49.46	1.135	0.064	19.78	8.19	20.14
11	51.14	1.203	0.109	33.26	0.40	16.39
12	49.48	0.733	0.068	35.82	0.71	14.17
13	48.13	1.365	0.098	34.41	1.07	14.19
14	17.19	1.383	0.072	28.96	1.34	21.58
15	18.84	1.414	0.057	23.95	1.44	26.77
16	56.86	1.053	0.099	35.46	4.83	14.29
17	49.66	1.006	0.095	33.06	4.76	16.75
18	41.76	0.994	0.080	26.19	5.98	22.22
19	61.00	1.145	0.062	26.64	8.60	23.17
20	39.53	1.516	0.034	17.04	12.29	23.04
21	50.39	1.050	0.089	35.36	1.66	12.27
22	57.51	0.956	0.100	37.90	0.59	7.53
23	44.19	1.220	0.053	41.99	0.63	7.98
24	26.80	1.290	0.097	31.16	2.01	6.70
25	21.18	1.220	0.072	34.27	2.06	6.29
26	33.04	1.160	0.106	25.85	5.93	24.12
27	22.73	1.260	0.078	38.16	1.90	5.23
28	21.28	1.170	0.094	28.52	5.70	26.40
29	24.63	1.390	0.075	36.29	1.96	6.93
30	33.49	1.150	0.133	40.64	1.98	7.23
31	25.36	0.992	0.123	28.48	3.21	16.40
32	31.12	0.995	0.089	29.39	3.40	18.31

Evaluación de la recuperación de la fracción limonítica en el rechazo.

Anexos

33	23.14	1.120	0.106	31.13	1.73	6.42
34	13.09	1.160	0.092	37.38	1.80	7.46
35	41.20	1.160	0.076	41.15	2.41	9.26
36	27.14	1.374	0.073	30.70	3.95	15.40
37	46.62	1.393	0.100	28.58	3.63	16.85
38	50.56	1.184	0.094	33.59	2.33	9.43
39	35.71	1.648	0.050	30.45	4.73	16.50
40	28.71	1.503	0.074	31.34	4.08	16.73
41	41.78	0.730	0.072	27.35	4.68	15.52
42	42.72	0.910	0.085	35.30	4.61	16.11
43	38.38	0.900	0.081	38.76	2.61	11.09
44	31.00	0.430	0.039	17.51	8.19	8.76
45	32.66	1.010	0.077	27.09	9.00	21.35
46	35.10	1.050	0.087	43.09	0.06	17.09
47	44.73	0.843	0.080	37.48	2.27	24.14
48	28.37	0.666	0.076	39.36	0.88	13.98
49	31.96	1.110	0.072	36.64	2.90	19.63
50	31.97	1.120	0.070	45.64	0.18	13.01
51	35.76	1.040	0.087	43.63	2.45	9.18
52	28.79	1.060	0.073	30.24	0.14	19.72
53	37.44	0.996	0.082	32.64	2.62	19.29
54	27.65	1.080	0.063	36.63	1.30	16.81
55	28.25	1.310	0.063	25.94	0.50	32.91
56	43.23	0.949	0.078	36.23	3.86	13.98
57	37.59	0.948	0.087	27.70	7.94	22.59
58	35.12	1.065	0.088	34.49	6.60	19.09
59	14.67	1.035	0.052	27.33	7.16	22.30
60	14.87	1.059	0.053	23.85	7.41	23.37
61	36.04	0.996	0.137	28.20	9.71	21.71
62	35.59	1.020	0.125	32.69	9.14	17.45
63	37.86	0.928	0.121	36.84	6.81	13.32
64	38.48	0.821	0.117	41.78	3.74	7.87
65	43.86	0.214	0.149	37.44	4.59	8.44
66	24.39	0.791	0.062	32.39	8.46	16.54
67	41.12	0.989	0.058	38.89	6.20	13.32

Evaluación de la recuperación de la fracción limonítica en el rechazo.

Anexos

68	38.32	0.957	0.075	39.70	3.96	10.67
69	31.74	1.280	0.079	30.11	7.92	16.65
70	25.90	1.219	0.052	33.20	8.21	17.04
71	36.94	0.940	0.096	33.12	3.65	12.48
72	38.21	0.970	0.079	28.88	6.05	17.73
73	36.06	0.990	0.070	28.71	3.76	12.94
74	32.08	1.000	0.086	32.93	3.66	12.49
75	36.64	0.990	0.082	31.19	6.45	18.19
76	41.04	1.122	0.109	34.47	2.76	11.98
77	39.00	1.210	0.064	31.18	4.66	16.37
78	42.18	1.170	0.081	32.75	3.73	15.26
79	17.15	1.200	0.075	27.00	7.49	20.11
80	18.27	1.240	0.045	20.72	6.39	25.25
81	38.26	1.130	0.091	31.28	5.74	21.60
82	40.41	1.010	0.130	30.21	3.84	15.24
83	37.54	1.130	0.095	35.86	3.56	15.04
84	15.93	1.310	0.149	16.11	6.78	27.18
85	16.12	1.290	0.045	15.52	9.04	33.60
86	24.39	0.916	0.057	41.02	5.12	12.62
87	41.12	1.190	0.098	39.19	5.34	17.63
88	38.32	1.150	0.084	39.76	4.57	13.09
89	31.74	1.220	0.064	30.67	5.68	12.63
90	25.90	1.320	0.067	40.85	6.29	11.85
91	36.72	0.890	0.079	25.54	6.85	20.62
92	32.85	0.740	0.095	36.36	2.01	9.69
93	29.29	1.120	0.087	29.37	3.74	17.04
94	32.33	0.800	0.136	36.81	4.90	21.13
95	33.53	0.730	0.124	33.63	4.21	17.89
96	28.96	0.911	0.080	29.59	5.74	11.43
97	34.35	1.050	0.075	28.27	6.80	17.87
98	38.69	1.140	0.085	37.06	2.95	9.90
99	30.71	1.170	0.051	27.46	6.55	21.71
100	15.64	0.784	0.084	29.77	6.59	18.44
101	27.28	0.347	0.067	24.80	6.86	24.57
102	24.52	0.391	0.076	26.06	6.64	24.30

Evaluación de la recuperación de la fracción limonítica en el rechazo.

Anexos

103	27.86	0.386	0.074	32.01	5.42	13.82
104	13.04	0.294	0.056	31.83	4.87	18.34
105	14.94	0.281	0.054	28.36	5.49	20.00
106	42.51	0.272	0.052	40.32	2.42	7.27
107	45.51	0.269	0.051	33.34	4.38	11.50
108	47.10	0.289	0.055	43.13	1.89	4.80
109	26.02	0.194	0.036	29.36	5.37	24.67
110	19.56	0.161	0.030	31.71	4.66	25.08
111	0.07	1.080	0.067	27.42	4.32	16.80
112	31.65	1.040	0.068	27.20	5.31	18.11
113	31.91	1.040	0.069	28.76	5.12	16.80
114	12.90	1.440	0.075	28.07	5.42	21.83
115	44.84	0.843	0.072	35.82	1.88	8.22
116	25.59	1.010	0.064	24.03	7.13	14.91
117	29.25	0.831	0.055	22.33	6.11	16.14
118	33.47	1.050	0.065	23.93	7.14	17.89
119	10.18	1.430	0.064	14.81	13.09	26.59
120	10.01	1.540	0.068	15.93	11.81	23.17
121	8.96	1.287	0.077	30.18	7.53	27.61
122	13.99	1.083	0.081	32.98	7.36	13.11
123	5.21	1.315	0.073	28.13	7.88	14.97
124	0.79	1.220	0.055	27.73	8.13	17.17
125	3.54	1.126	0.071	31.24	7.01	13.41
126	30.89	1.240	0.066	24.65	7.24	17.81
127	29.49	1.230	0.071	20.19	8.74	21.94
128	31.59	1.180	0.047	25.92	8.10	18.58
129	18.57	0.761	0.082	43.03	1.36	5.40
130	19.63	0.761	0.082	43.03	1.36	5.40
131	30.03	0.949	0.071	24.21	5.94	15.19
132	26.57	1.100	0.074	24.84	7.03	18.16
133	36.21	1.020	0.116	30.46	5.81	14.26
134	18.09	1.010	0.062	24.93	6.71	16.66
135	26.91	1.060	0.076	29.54	8.81	18.86
136	17.30	1.070	0.062	16.79	12.08	28.06
137	57.07	0.788	0.089	27.33	8.87	20.14

Evaluación de la recuperación de la fracción limonítica en el rechazo.

Anexos

138	53.20	0.847	0.085	27.99	6.56	19.34
139	20.60	1.280	0.090	32.98	6.24	14.72
140	22.25	1.280	0.080	35.81	5.83	13.21
141	55.52	0.788	0.089	27.33	8.87	20.14
142	48.92	0.618	0.060	16.46	12.41	29.31
143	30.14	1.100	0.088	30.41	6.58	15.54
144	28.05	0.874	0.121	32.93	7.06	14.98
145	21.09	0.929	0.079	21.78	10.28	21.44
146	31.27	1.210	0.106	35.08	0.59	6.84
147	30.31	1.360	0.109	32.64	0.58	8.01
148	30.62	1.380	0.093	28.32	0.51	9.42
149	27.54	1.080	0.094	41.81	0.56	4.00
150	30.33	1.070	0.094	39.23	0.56	5.22
151	31.87	1.360	0.109	32.64	0.58	8.01
152	33.28	0.876	0.085	37.41	0.53	5.75
153	32.20	1.390	0.113	26.74	0.49	1.66
154	30.26	1.070	0.094	39.23	0.56	5.22
155	30.32	0.144	0.084	27.16	0.42	2.88
156	32.19	1.380	0.093	28.32	0.51	9.42
157	26.22	0.603	0.110	30.08	0.56	5.03
158	30.78	1.670	0.071	28.88	0.38	3.58
159	27.28	1.360	0.089	38.88	1.54	7.76
160	26.97	0.144	0.084	27.16	2.88	17.16
161	25.86	1.220	0.052	39.98	3.58	4.66
162	34.67	1.050	0.062	26.32	7.58	9.14
163	24.87	1.220	0.067	30.06	5.41	7.40
164	25.09	1.260	0.072	30.68	4.77	6.52
165	27.12	1.150	0.070	30.67	3.60	4.85
166	30.79	1.100	0.072	34.26	2.54	12.54
167	35.52	0.901	0.074	32.08	2.86	13.27
168	32.07	1.030	0.065	33.98	2.23	12.75
169	13.34	0.922	0.056	35.54	2.35	11.99
170	13.23	0.596	0.081	32.33	1.88	16.40
171	27.47	1.030	0.065	33.98	2.23	12.75
172	30.20	1.050	0.064	29.86	2.04	16.83

Evaluación de la recuperación de la fracción limonítica en el rechazo.

Anexos

173	31.95	0.901	0.074	32.08	2.86	13.27
174	22.85	1.030	0.074	33.23	1.40	13.33
175	14.70	0.988	0.086	28.57	1.90	16.69
176	23.38	0.904	0.133	32.55	3.36	10.19
177	20.88	0.865	0.132	37.64	2.70	9.11
178	17.24	0.952	0.136	36.55	3.27	11.20
179	14.02	1.360	0.107	23.73	9.61	20.44
180	14.07	1.410	0.098	19.61	11.30	17.90
181	21.34	0.988	0.085	28.08	5.23	18.26
182	17.10	1.070	0.102	26.89	5.94	20.95
183	18.09	0.923	0.093	32.83	4.59	16.33
184	13.64	1.540	0.049	25.30	7.82	25.18
185	13.07	1.600	0.049	21.84	8.42	27.19
186	26.73	1.120	0.105	46.41	2.85	10.78
187	35.99	0.821	0.112	38.33	4.66	13.64
188	36.54	1.100	0.095	49.25	2.43	9.12
189	21.04	1.240	0.093	43.12	3.74	13.42
190	30.12	0.983	0.092	56.71	1.33	6.53
191	24.41	1.190	0.098	53.89	2.32	8.76
192	31.83	1.230	0.072	45.19	3.48	11.92
193	38.78	1.170	0.063	48.78	2.78	9.21
194	35.64	1.150	0.068	56.04	2.20	9.92
195	35.06	1.340	0.057	41.15	4.96	17.36
Mínimo	0.07	0.144	0.030	14.81	0.06	1.66
Máximo	61.00	1.670	0.149	56.71	13.09	33.60
Promedio	30.77	1.033	0.081	32.05	4.56	14.85

Anexo 4: Composición granulométrica y quimismo de la clase de tamaño > 4 mm en las muestras de "rechazo no conforme", %.

Muestra	Contenido en peso	Ni	Co	Fe	Mg	SiO₂
1	31.16	0.450	0.023	24.67	7.63	9.83
2	47.86	0.612	0.021	20.56	10.78	12.20
3	35.19	0.644	0.033	18.12	8.42	11.13
4	46.49	0.586	0.023	11.88	8.64	12.99
5	47.25	0.574	0.021	11.11	9.38	19.89
6	28.90	1.004	0.046	21.09	10.78	21.45
7	25.14	0.853	0.077	24.93	7.28	16.49
8	36.34	1.088	0.052	20.46	12.36	27.44
9	25.44	0.804	0.065	32.38	9.24	16.39
10	35.42	1.103	0.056	18.29	12.49	28.29
11	30.22	0.796	0.051	23.79	10.88	25.77
12	30.72	0.981	0.055	28.87	12.04	32.48
13	29.99	0.895	0.060	23.72	10.04	23.07
14	69.81	1.049	0.058	28.33	10.43	24.62
15	64.85	0.975	0.055	24.83	10.53	23.06
16	25.16	0.570	0.027	27.58	9.16	20.08
17	28.47	0.474	0.030	26.37	8.51	18.14
18	34.94	0.500	0.038	26.46	9.22	18.62
19	23.45	0.731	0.028	17.71	12.33	28.87
20	40.26	0.900	0.026	17.81	12.29	27.89
21	28.80	0.651	0.082	26.79	7.21	19.19
22	25.76	1.310	0.037	13.93	2.05	29.39
23	42.25	1.190	0.027	12.09	2.16	37.28
24	48.66	1.149	0.065	30.49	9.94	24.98
25	54.44	0.753	0.036	26.40	6.33	18.83
26	39.64	0.672	0.041	26.66	7.88	19.95
27	61.21	0.884	0.049	28.19	6.55	20.00
28	52.84	0.762	0.040	22.86	8.64	19.66
29	54.00	1.096	0.043	20.80	8.92	29.58
30	46.68	0.860	0.037	24.76	7.78	24.42

Evaluación de la recuperación de la fracción limonítica en el rechazo.

Anexos

31	61.38	0.867	0.033	26.49	8.38	22.17
32	53.33	1.061	0.026	20.41	11.53	28.22
33	53.16	0.936	0.025	24.08	7.66	22.75
34	57.53	0.573	0.025	38.61	3.02	12.93
35	41.57	0.549	0.027	33.14	2.86	19.85
36	53.88	1.057	0.025	18.78	7.44	29.70
37	25.50	1.688	0.035	12.94	8.94	37.86
38	32.61	1.411	0.034	17.01	7.11	31.31
39	37.91	1.401	0.025	12.77	9.07	37.39
40	58.03	1.408	0.018	11.93	2.82	37.37
41	21.41	0.800	0.037	17.81	10.94	29.07
42	33.41	0.920	0.042	17.62	12.88	31.37
43	31.13	0.390	0.055	23.43	7.81	22.96
44	57.76	0.890	0.031	16.53	10.75	25.08
45	43.65	0.830	0.020	14.66	17.00	33.32
46	20.01	0.774	0.048	33.18	2.81	29.03
47	25.56	0.513	0.047	36.63	3.58	25.27
48	52.38	0.405	0.044	32.69	2.77	21.89
49	48.23	0.598	0.067	30.13	3.08	28.98
50	43.07	0.823	0.040	33.15	1.58	25.72
51	33.45	0.637	0.029	31.73	2.26	24.48
52	38.95	0.783	0.032	29.67	0.48	27.19
53	36.70	0.899	0.035	30.20	2.34	24.36
54	50.07	0.755	0.029	23.07	2.00	28.49
55	54.85	0.663	0.025	12.17	2.45	37.78
56	36.66	0.596	0.035	17.92	10.23	38.74
57	37.96	0.831	0.038	25.89	9.95	27.06
58	37.78	0.827	0.032	24.78	10.36	29.61
59	58.82	0.754	0.018	21.88	10.62	26.63
60	51.76	0.566	0.026	32.19	6.76	20.05
61	41.33	0.769	0.059	22.43	14.19	26.92
62	41.26	0.729	0.132	20.46	15.16	28.41
63	31.70	0.793	0.138	16.47	19.71	32.96
64	24.38	0.471	0.070	35.70	7.96	17.29
65	24.40	0.611	0.070	29.02	10.13	19.44

Evaluación de la recuperación de la fracción limonítica en el rechazo.

Anexos

66	31.86	0.639	0.028	19.02	15.44	32.53
67	32.62	0.882	0.022	15.16	16.82	35.11
68	29.74	1.379	0.027	16.31	13.44	27.93
69	56.10	1.500	0.019	12.48	10.13	39.40
70	59.48	1.449	0.017	13.35	15.04	35.97
71	37.41	1.240	0.021	19.50	12.29	31.10
72	35.58	1.210	0.036	24.83	7.69	20.95
73	37.34	1.160	0.037	24.08	8.37	23.61
74	42.83	1.160	0.044	21.89	10.36	25.29
75	39.85	1.260	0.041	24.53	10.49	25.34
76	39.11	1.231	0.020	17.69	12.84	32.38
77	35.03	1.390	0.008	14.75	14.95	37.19
78	42.20	1.230	0.010	14.71	13.48	33.69
79	62.05	0.752	0.013	23.24	8.61	22.44
80	61.08	0.795	0.013	22.80	10.68	25.55
81	35.17	0.845	0.035	16.90	8.33	31.06
82	36.27	0.986	0.016	15.64	8.56	33.71
83	39.11	0.587	0.016	12.80	9.11	37.61
84	71.54	0.860	0.032	17.40	8.22	30.09
85	71.58	0.776	0.034	23.14	6.94	27.31
86	31.86	0.971	0.047	34.82	10.20	13.16
87	32.62	0.670	0.042	22.10	8.99	14.15
88	29.74	0.859	0.066	18.19	10.65	19.20
89	56.10	0.720	0.045	40.69	7.56	16.89
90	59.48	0.898	0.059	41.48	6.78	14.89
91	40.18	1.050	0.030	37.34	3.50	14.46
92	37.91	0.770	0.050	20.63	3.91	14.09
93	49.70	0.980	0.038	13.15	6.91	32.40
94	44.38	0.610	0.133	24.82	3.90	16.96
95	43.66	1.000	0.110	36.45	2.30	10.06
96	40.55	0.839	0.121	26.76	9.50	21.42
97	38.99	0.884	0.034	20.64	11.83	27.00
98	30.77	0.686	0.039	31.46	6.45	14.75
99	35.92	0.877	0.033	22.72	9.94	27.59
100	14.27	0.454	0.031	18.83	12.31	32.23

Evaluación de la recuperación de la fracción limonítica en el rechazo.

Anexos

101	53.16	0.149	0.027	13.87	9.25	35.28
102	44.44	0.128	0.023	13.19	7.45	33.60
103	53.11	0.950	0.016	14.46	8.72	32.02
104	71.60	0.119	0.021	11.86	8.59	33.58
105	64.87	0.134	0.024	11.21	9.45	36.43
106	43.80	0.169	0.031	16.08	8.57	25.18
107	35.15	0.113	0.020	15.39	8.58	24.33
108	42.39	0.141	0.025	21.06	7.44	21.09
109	63.76	0.950	0.016	14.14	7.80	24.88
110	67.44	0.116	0.020	14.72	8.87	24.77
111	74.14	0.528	0.027	13.93	6.01	25.82
112	46.04	0.596	0.030	18.07	5.90	26.02
113	43.21	0.567	0.072	23.38	6.08	25.44
114	73.05	0.628	0.025	11.04	6.06	26.30
115	38.51	0.463	0.034	29.47	4.22	18.12
116	47.61	0.528	0.042	12.41	11.95	22.65
117	43.43	0.940	0.027	10.73	11.96	26.79
118	42.20	0.764	0.028	11.91	10.31	26.44
119	74.34	0.906	0.032	12.93	12.80	26.19
120	76.55	0.894	0.046	13.96	10.89	24.46
121	65.51	0.918	0.025	12.04	14.63	30.07
122	58.87	0.873	0.041	13.61	14.29	12.73
123	77.52	0.967	0.024	9.96	15.34	26.59
124	79.96	0.951	0.028	12.22	14.54	30.12
125	79.41	0.993	0.032	10.45	14.93	28.94
126	54.35	0.941	0.028	11.74	14.67	27.99
127	51.57	0.816	0.022	11.76	14.66	27.57
128	49.43	1.050	0.028	13.79	13.79	27.22
129	52.37	0.815	0.054	12.84	14.69	27.06
130	50.55	0.515	0.024	30.11	8.85	18.04
131	45.28	0.718	0.029	15.94	13.59	26.60
132	46.71	0.828	0.019	14.23	14.49	28.13
133	44.16	1.040	0.018	15.63	13.26	27.17
134	60.17	0.516	0.022	28.70	8.83	16.81
135	45.73	0.662	0.020	17.70	12.76	23.03

Evaluación de la recuperación de la fracción limonítica en el rechazo.

Anexos

136	51.48	0.727	0.030	19.08	11.08	25.10
137	23.35	0.370	0.044	22.39	12.09	23.52
138	26.37	0.539	0.037	22.55	8.39	23.63
139	58.95	0.683	0.064	25.08	8.12	16.78
140	59.62	0.831	0.045	28.72	7.27	14.65
141	24.71	0.370	0.044	22.39	12.09	23.52
142	19.85	0.930	0.041	17.71	12.28	27.20
143	39.60	0.563	0.042	34.19	5.85	12.71
144	53.11	0.381	0.053	29.09	7.13	16.91
145	56.71	0.448	0.046	17.56	12.47	28.06
146	48.02	0.914	0.054	29.63	0.32	9.26
147	48.05	0.819	0.057	25.33	0.35	10.93
148	48.72	0.819	0.037	32.26	0.24	8.18
149	50.69	0.552	0.038	34.54	0.21	5.66
150	47.80	0.490	0.042	34.43	0.35	5.08
151	47.49	0.819	0.057	25.33	0.35	10.93
152	49.34	0.613	0.048	29.51	0.25	8.16
153	47.12	0.901	0.046	24.30	0.20	3.29
154	51.16	0.490	0.042	34.43	0.35	5.08
155	46.86	0.865	0.032	19.45	0.31	3.77
156	45.12	0.819	0.037	32.26	0.24	8.18
157	46.86	0.466	0.061	34.19	0.37	5.17
158	44.70	0.885	0.037	36.74	0.24	3.47
159	49.50	0.896	0.047	28.34	3.47	16.61
160	54.42	0.865	0.032	19.45	3.77	19.54
161	50.56	0.853	0.021	30.31	6.56	7.32
162	44.65	0.955	0.050	11.41	12.21	2.69
163	52.54	0.874	0.045	27.89	6.93	8.47
164	43.49	0.891	0.022	20.44	8.04	10.27
165	48.14	0.769	0.022	28.58	6.42	7.28
166	49.76	0.425	0.019	24.24	2.73	10.19
167	44.63	0.649	0.020	27.66	4.18	18.81
168	49.25	0.565	0.010	33.92	3.48	15.27
169	56.07	0.497	0.030	42.04	1.20	7.39
170	79.89	0.543	0.054	32.38	1.54	14.00

Evaluación de la recuperación de la fracción limonítica en el rechazo.

Anexos

171	50.02	0.565	0.010	33.92	3.48	15.27
172	51.85	0.448	0.066	40.67	1.05	8.66
173	49.06	0.649	0.020	27.66	4.18	18.81
174	64.61	0.448	0.034	29.37	1.59	15.79
175	76.25	0.493	0.041	35.50	1.97	12.75
176	44.44	0.856	0.089	19.74	11.37	18.10
177	49.95	0.601	0.103	27.51	7.88	17.32
178	54.48	0.591	0.107	20.46	10.91	16.87
179	39.28	0.702	0.081	25.78	9.11	18.50
180	46.85	0.816	0.084	23.55	9.74	20.59
181	46.06	0.591	0.039	23.32	7.97	24.50
182	50.33	0.702	0.031	17.38	10.43	35.51
183	47.09	0.515	0.047	23.08	8.69	25.81
184	53.09	0.769	0.028	18.89	7.21	22.48
185	44.59	0.623	0.039	23.99	7.70	21.90
186	36.35	1.090	0.043	23.76	7.44	24.44
187	46.47	1.120	0.040	16.18	9.04	31.40
188	46.15	1.110	0.101	45.41	3.78	13.22
189	56.24	0.983	0.048	20.39	12.16	27.55
190	54.36	1.130	0.042	27.66	7.47	25.97
191	36.91	0.916	0.034	37.92	5.04	17.28
192	44.65	1.290	0.032	30.30	7.48	23.75
193	41.24	1.060	0.046	36.41	5.93	21.98
194	49.67	1.100	0.039	13.79	9.54	29.97
195	48.35	0.966	0.036	22.38	8.90	28.13
Mínimo	14.27	0.113	0.008	9.96	0.20	2.69
Máximo	79.96	1.688	0.138	45.41	19.71	39.40
Promedio	46.01	0.788	0.040	22.90	8.15	22.63

Evaluación de la recuperación de la fracción limonítica en el rechazo.

Anexos

Anexo 5: Composición granulométrica y quimismo de la clase de tamaño < 4 mm y > 1.18 mm en las muestras de "rechazo no conforme", %.

Muestras	Contenido en peso	Ni	Co	Fe	Mg	SiO₂
1	23.75	0.471	0.057	38.91	3.89	8.15
2	19.11	0.448	0.044	32.61	4.99	8.39
3	23.73	0.367	0.048	32.69	3.51	5.36
4	23.67	0.543	0.043	30.23	5.39	14.51
5	20.67	0.380	0.028	18.18	3.32	9.34
6	10.97	0.521	0.061	32.32	3.28	9.50
7	20.34	0.543	0.075	27.84	3.96	8.36
8	19.23	0.718	0.061	34.64	5.63	14.01
9	23.30	0.549	0.067	34.10	3.28	9.93
10	14.21	0.126	0.057	32.16	5.68	14.60
11	17.99	0.784	0.065	31.12	1.18	19.48
12	19.12	0.709	0.097	35.65	1.35	19.10
13	21.22	0.662	0.070	34.65	0.46	16.20
14	12.31	0.726	0.073	35.82	1.38	15.33
15	16.19	0.778	0.071	35.12	1.35	14.72
16	16.79	0.460	0.045	35.26	4.07	10.36
17	20.64	0.416	0.048	38.23	3.91	9.72
18	22.24	0.404	0.056	38.84	3.83	8.49
19	14.25	0.682	0.051	24.64	8.71	20.85
20	19.39	0.631	0.043	26.53	7.13	19.00
21	20.11	1.080	0.028	14.46	2.13	33.85
22	15.91	0.702	0.097	29.61	1.49	11.88
23	12.88	1.240	0.110	31.11	5.99	13.85
24	23.88	0.628	0.048	26.61	4.64	12.70
25	23.94	0.615	0.062	31.17	3.55	12.73
26	26.63	0.579	0.071	34.22	4.37	12.29
27	15.58	0.726	0.055	28.55	4.87	16.70
28	25.13	0.611	0.055	28.92	5.98	15.18
29	20.73	0.851	0.052	25.65	5.57	19.93
30	19.03	0.912	0.045	23.74	6.14	20.51
31	12.84	0.646	0.049	34.25	3.94	15.61

Evaluación de la recuperación de la fracción limonítica en el rechazo.

Anexos

32	14.62	0.728	0.056	31.03	5.99	16.19
33	22.85	0.609	0.060	32.86	5.18	13.86
34	28.73	0.559	0.065	36.93	2.10	13.14
35	16.50	0.764	0.095	24.56	7.19	20.32
36	18.21	0.850	0.047	25.56	4.97	20.29
37	26.53	0.934	0.056	25.98	4.15	19.47
38	15.87	0.848	0.061	29.33	3.49	17.73
39	25.95	0.958	0.027	25.98	4.83	22.57
40	12.89	1.056	0.034	18.15	6.61	28.21
41	32.98	0.430	0.064	27.56	2.86	9.44
42	22.02	0.440	0.069	27.49	3.75	12.51
43	28.06	0.400	0.072	30.46	2.86	10.89
44	10.42	0.730	0.053	20.04	11.13	26.53
45	22.70	0.480	0.037	25.15	7.56	16.11
46	41.49	0.469	0.077	48.68	2.11	13.42
47	27.51	0.357	0.064	51.87	1.23	13.24
48	18.16	0.374	0.078	40.99	1.68	14.22
49	19.08	0.388	0.053	45.08	0.81	14.44
50	23.87	0.548	0.059	43.03	2.38	14.27
51	29.10	0.512	0.067	44.96	0.92	13.31
52	30.79	0.651	0.076	41.18	0.23	16.61
53	24.20	0.554	0.068	37.98	2.43	16.38
54	21.64	0.573	0.067	40.14	1.36	17.53
55	16.38	0.753	0.058	26.64	2.74	33.76
56	18.82	0.516	0.053	30.44	5.10	24.06
57	23.40	0.635	0.064	32.74	6.51	20.05
58	25.66	0.534	0.074	33.62	5.39	16.10
59	25.66	0.602	0.063	37.17	4.97	13.45
60	32.13	0.594	0.060	36.91	4.56	18.50
61	21.18	0.492	0.084	39.02	6.84	13.93
62	22.09	0.449	0.066	36.70	7.44	12.85
63	28.13	0.893	0.088	42.07	5.17	10.89
64	35.38	0.639	0.098	42.75	4.31	9.03
65	30.09	0.468	0.095	41.18	4.81	9.02
66	40.97	0.576	0.066	41.88	5.12	10.80

Evaluación de la recuperación de la fracción limonítica en el rechazo.

Anexos

67	23.88	0.653	0.061	40.81	3.08	5.83
68	29.52	0.575	0.067	39.59	5.21	11.29
69	11.51	0.910	0.046	28.06	10.10	22.39
70	13.88	1.032	0.054	29.17	10.01	19.79
71	24.08	1.150	0.055	34.03	3.61	9.89
72	24.68	1.100	0.054	35.11	3.47	11.06
73	24.07	1.000	0.053	37.46.	3.27	10.24
74	23.33	1.090	0.057	26.26	3.60	11.86
75	21.90	1.050	0.060	33.63	4.69	15.23
76	18.21	0.582	0.021	35.80	3.60	12.74
77	23.82	6.360	0.075	32.11	5.10	15.98
78	13.97	0.567	0.035	34.13	3.96	14.24
79	20.01	0.623	0.049	31.27	4.15	13.38
80	19.57	0.585	0.148	33.79	3.69	12.92
81	25.11	0.532	0.106	33.85	4.38	20.80
82	21.88	0.638	0.051	35.80	4.82	16.18
83	21.80	0.654	0.052	32.78	5.07	19.16
84	12.00	0.712	0.070	27.14	4.00	17.27
85	11.71	0.636	0.069	28.78	4.65	20.56
86	40.97	0.572	0.055	33.88	4.32	16.72
87	23.88	0.618	0.067	39.60	5.34	16.47
88	29.52	0.655	0.055	31.40	5.17	15.51
89	11.51	0.546	0.084	38.51	3.83	19.92
90	13.88	0.545	0.054	37.80	3.48	13.77
91	21.66	1.070	0.046	18.98	4.60	20.43
92	27.90	0.660	0.135	37.06	4.61	19.83
93	19.62	0.600	0.057	29.60	3.96	16.79
94	21.98	0.950	0.043	19.46	7.76	33.08
95	21.60	1.060	0.112	22.64	7.12	30.55
96	28.96	0.599	0.050	41.46	3.68	7.97
97	25.81	0.564	0.046	41.58	3.43	7.97
98	27.72	0.661	0.047	42.30	2.10	5.68
99	31.89	0.744	0.047	31.53	6.47	19.69
100	68.56	0.421	0.044	38.50	4.49	13.08
101	18.87	0.239	0.045	29.87	5.78	19.75

Evaluación de la recuperación de la fracción limonítica en el rechazo.

Anexos

102	29.76	0.224	0.042	27.30	5.33	21.41
103	18.15	0.340	0.065	31.27	4.36	16.59
104	14.76	0.236	0.044	30.36	5.01	17.12
105	19.60	0.211	0.039	30.98	4.69	18.31
106	13.16	0.371	0.072	24.63	7.36	18.78
107	18.09	0.412	0.080	25.42	6.49	18.44
108	9.74	0.418	0.081	29.32	5.29	14.98
109	9.75	0.194	0.036	25.49	6.06	24.46
110	12.30	0.189	0.035	24.47	7.14	24.87
111	25.05	0.581	0.055	23.53	6.04	22.09
112	21.85	0.518	0.063	26.34	5.00	19.16
113	24.36	0.588	0.094	26.84	6.01	19.29
114	13.61	0.593	0.045	28.66	5.90	20.49
115	16.15	0.484	0.063	31.22	3.04	13.37
116	24.42	0.638	0.059	26.21	6.75	16.17
117	26.19	0.660	0.069	18.44	7.85	19.74
118	23.19	0.724	0.073	18.63	8.13	24.71
119	15.07	0.853	0.036	18.07	10.23	22.00
120	13.14	0.725	0.040	14.03	9.56	21.17
121	23.32	0.636	0.048	35.13	6.74	14.07
122	25.24	0.610	0.070	37.06	5.81	17.55
123	15.80	0.674	0.043	32.16	7.72	15.05
124	18.75	0.713	0.078	22.79	9.45	18.76
125	16.34	0.689	0.072	20.23	9.43	18.49
126	14.06	0.706	0.037	37.48	9.30	17.01
127	17.95	0.840	0.035	24.09	10.14	19.02
128	18.14	0.688	0.030	29.52	7.76	16.58
129	28.42	0.453	0.024	36.83	6.28	11.72
130	28.91	0.484	0.057	38.14	5.33	10.31
131	23.69	0.678	0.033	28.17	8.13	16.47
132	25.73	0.762	0.029	25.27	10.71	18.27
133	18.63	0.720	0.051	30.51	6.94	14.08
134	20.91	0.704	0.031	23.01	10.38	19.07
135	26.35	0.673	0.038	29.67	8.24	16.38
136	29.81	0.541	0.065	29.42	7.11	17.36

Evaluación de la recuperación de la fracción limonítica en el rechazo.

Anexos

137	17.93	0.336	0.061	34.74	5.87	11.36
138	19.12	0.451	0.062	32.09	6.21	12.97
139	19.68	0.562	0.056	32.41	4.83	11.95
140	17.60	0.565	0.051	33.65	4.38	10.12
141	18.62	0.336	0.061	34.74	5.87	11.36
142	29.81	0.680	0.062	26.84	5.74	16.59
143	29.87	0.410	0.070	36.01	4.25	9.38
144	17.93	0.426	0.093	32.97	5.79	13.97
145	21.90	0.491	0.099	23.29	8.98	21.92
146	19.80	0.574	0.065	37.34	0.44	5.07
147	21.15	0.669	0.065	33.37	0.44	7.26
148	19.93	0.739	0.061	34.46	0.47	6.69
149	21.01	0.504	0.057	40.13	0.39	3.34
150	20.87	0.496	0.056	39.92	0.39	3.46
151	19.93	0.669	0.065	33.37	0.44	7.26
152	16.53	0.344	0.060	37.88	0.43	5.34
153	20.01	0.619	0.066	28.67	0.32	1.59
154	17.91	0.496	0.056	39.92	0.39	3.46
155	22.15	0.631	0.045	32.71	0.43	1.66
156	21.80	0.739	0.061	34.46	0.47	6.69
157	26.28	0.293	0.058	35.36	0.38	5.41
158	23.23	0.624	0.045	28.16	0.35	0.72
159	22.30	0.511	0.047	36.81	0.74	5.90
160	18.02	0.631	0.045	32.71	1.66	11.35
161	22.70	0.591	0.033	30.95	2.93	3.53
162	19.55	0.577	0.028	30.04	6.08	6.88
163	21.90	0.581	0.040	31.03	3.55	5.54
164	30.70	0.542	0.041	30.96	2.49	3.58
165	23.94	0.559	0.036	30.94	2.87	3.71
166	18.82	0.559	0.037	42.24	1.48	8.27
167	19.14	0.570	0.034	41.72	1.56	8.50
168	17.98	0.476	0.024	368.22	1.65	9.38
169	29.97	0.433	0.030	40.79	0.89	5.97
170	6.65	0.448	0.063	38.25	1.06	12.20
171	22.06	0.476	0.024	368.22	1.65	9.38

Evaluación de la recuperación de la fracción limonítica en el rechazo.

Anexos

172	17.25	0.454	0.075	40.02	0.81	9.23
173	18.29	0.570	0.034	41.72	1.56	8.50
174	12.23	0.484	0.043	34.65	1.56	10.85
175	8.76	0.473	0.050	37.81	1.87	10.42
176	31.15	0.463	0.111	34.02	4.16	10.70
177	27.86	0.454	0.102	30.73	4.29	10.26
178	27.58	0.523	0.108	29.93	4.55	11.57
179	45.49	0.528	0.088	29.73	5.39	12.30
180	38.15	0.525	0.086	28.43	5.39	12.58
181	31.83	0.589	0.071	29.81	4.41	15.04
182	32.33	0.584	0.064	31.65	4.70	16.26
183	34.17	0.461	0.063	32.24	4.61	14.97
184	32.52	0.695	0.044	32.16	5.20	16.57
185	41.28	0.631	0.049	34.85	4.75	14.59
186	35.65	0.676	0.073	44.74	3.57	11.87
187	16.35	0.820	0.080	38.37	5.59	18.66
188	16.34	0.701	0.074	44.76	3.38	12.07
189	22.08	0.763	0.059	36.63	5.19	16.99
190	14.69	0.568	0.060	52.03	2.76	10.12
191	37.42	0.658	0.054	49.42	2.94	10.75
192	22.69	0.704	0.050	50.26	2.87	9.58
193	19.11	0.683	0.034	48.23	3.24	11.57
194	13.77	0.742	0.050	47.61	3.79	12.09
195	15.94	0.799	0.027	42.25	4.86	17.49
Mínimo	6.65	0.126	0.021	14.03	0.23	0.72
Máximo	68.56	6.360	0.148	368.22	11.13	33.85
Promedio	22.15	0.639	0.059	36.33	4.45	14.27

Evaluación de la recuperación de la fracción limonítica en el rechazo.

Anexos

Anexo 6: Resultados de la primera corrida para la evaluación del cambio de malla de 0.84 mm a 1.18 mm.

Parámetros determinados	UM	20 mesh	14 mesh
Masa inicial muestra Húmeda	kg	25.378	22.773
Contenido de sólido seco	%	64.55	62.41
Masa seca Inicial	kg	16.381	14.213
Masa de minerales cernido total	kg	14.922	12.470

Primera etapa de lavado y clasificación

Tiempo de operación en el 1er mezclado	min	8	8
Velocidad del 1er mezclado	rpm	700	700
Masa húmeda retenida (mineral + Rechazo)	kg	5.972	4.517
Contenido de sólido en retenido 1	%	77.29	79.12
Masa seca retenida 1	kg	4.616	3.574
Masa de limonita retenida en 1	kg	3.156	1.832
Eficiencia de la primera etapa.	%	78.85	85.31

Segunda etapa de lavado y clasificación

Tiempo de operación en el 2do mezclado	min	8	8
Velocidad del 2do mezclado	rpm	700	700
Masa húmeda retenida 2 (mineral + Rechazo)	kg	1.620	1.963
Contenido de sólido en retenido 2	%	90.10	88.75
Masa seca retenida 2	kg	1.460	1.742
Contenido de rechazo	%	28.18	25.15
Recuperación del fino retenido en la primera etapa	%	21.15	14.69

Anexo 7: Resultados de la segunda corrida para la evaluación del cambio de malla de 0.84 mm a 1.18 mm.

Parámetros determinados	UM	20 mesh	14 mesh
Masa inicial muestra Húmeda	kg	20.641	23.486
Contenido de sólido seco	%	66.59	66.02
Masa seca Inicial	kg	13.745	15.505
Masa de minerales cernido total	kg	11.144	13.167

Primera etapa de lavado y clasificación

Tiempo de operación en el 1er mezclado	min	8	8
Velocidad del 1er mezclado	rpm	700	700
Masa húmeda retenida (mineral + Rechazo)	kg	7.760	5.807
Contenido de sólido en retenido 1	%	74.32	70.92
Masa seca retenida 1	kg	5.767	4.118
Masa de limonita retenida en 1	kg	3.166	1.780
Eficiencia de la primera etapa.	%	71.59	86.48

Segunda etapa de lavado y clasificación

Tiempo de operación en el 2do mezclado	min	8	8
Velocidad del 2do mezclado	rpm	700	700
Masa húmeda retenida 2 (mineral + Rechazo)	kg	2.988	2.669
Contenido de sólido en retenido 2	%	87.05	87.62
Masa seca retenida 2	kg	2.601	2.339
Contenido de rechazo	%	41.96	26.56
Recuperación del fino retenido en la primera etapa	%	28.41	13.52

Evaluación de la recuperación de la fracción limonítica en el rechazo.

Anexos

Anexo 8: Resultados de la tercera corrida para la evaluación del cambio de malla de 0.84 mm a 1.18 mm.

Parámetros determinados	UM	20 mesh	14 mesh
Masa inicial muestra Húmeda	kg	18.059	20.457
Contenido de sólido seco	%	63.03	64.02
Masa seca Inicial	kg	11.383	13.097
Masa de minerales cernido total	kg	9.565	10.790

Primera etapa de lavado y clasificación

Tiempo de operación en el 1er mezclado	min	8	8
Velocidad del 1er mezclado	rpm	700	700
Masa húmeda retenida (mineral + Rechazo)	kg	4.923	4.884
Contenido de sólido en retenido 1	%	74.89	77.32
Masa seca retenida 1	kg	3.687	3.776
Masa de limonita retenida en 1	kg	1.869	1.470
Eficiencia de la primera etapa.	%	80.46	86.38

Segunda etapa de lavado y clasificación

Tiempo de operación en el 2do mezclado	min	8	8
Velocidad del 2do mezclado	rpm	700	700
Masa húmeda retenida 2 (mineral + Rechazo)	kg	2.205	2.875
Contenido de sólido en retenido 2	%	82.45	80.23
Masa seca retenida 2	kg	1.818	2.307
Contenido de rechazo	%	32.39	28.83
Recuperación del fino retenido en la primera etapa	%	19.54	13.62

Evaluación de la recuperación de la fracción limonítica en el rechazo.

Anexos

Anexo 9: Resultados de la cuarta corrida para la evaluación del cambio de malla de 0.84 mm a 1.18 mm.

Parámetros determinados	UM	20 mesh	14 mesh
Masa inicial muestra Húmeda	kg	19.478	20.657
Contenido de sólido seco	%	64.45	64.04
Masa seca Inicial	kg	12.554	13.229
Masa de minerales cernido total	kg	9.732	10.187

Primera etapa de lavado y clasificación

Tiempo de operación en el 1er mezclado	min	8	8
Velocidad del 1er mezclado	rpm	700	700
Masa húmeda retenida (mineral + Rechazo)	kg	6.742	6.562
Contenido de sólido en retenido 1	%	70.47	73.24
Masa seca retenida 1	kg	4.751	4.806
Masa de limonita retenida en 1	kg	1.929	1.765
Eficiencia de la primera etapa.	%	80.18	82.68

Segunda etapa de lavado y clasificación

Tiempo de operación en el 2do mezclado	min	8	8
Velocidad del 2do mezclado	rpm	700	700
Masa húmeda retenida 2 (mineral + Rechazo)	kg	3.476	3.637
Contenido de sólido en retenido 2	%	81.18	83.62
Masa seca retenida 2	kg	2.822	3.041
Contenido de rechazo	%	37.85	36.33
Recuperación del fino retenido en la primera etapa	%	19.82	17.32

Evaluación de la recuperación de la fracción limonítica en el rechazo.

Anexos

Anexo 10: Resultados de la quinta corrida para la evaluación del cambio de malla de 0.84 mm a 1.18 mm.

Parámetros determinados	UM	20 mesh	14 mesh
Masa inicial muestra Húmeda	kg	22.954	21.892
Contenido de sólido seco	%	66.81	66.45
Masa seca Inicial	kg	15.336	14.547
Masa de minerales cernido total	kg	13.607	12.059

Primera etapa de lavado y clasificación

Tiempo de operación en el 1er mezclado	min	8	8
Velocidad del 1er mezclado	rpm	700	700
Masa húmeda retenida (mineral + Rechazo)	kg	6.441	5.904
Contenido de sólido en retenido 1	%	72.32	70.11
Masa seca retenida 1	kg	4.658	4.139
Masa de limonita retenida en 1	kg	2.930	1.651
Eficiencia de la primera etapa.	%	78.47	86.31

Segunda etapa de lavado y clasificación

Tiempo de operación en el 2do mezclado	min	8	8
Velocidad del 2do mezclado	rpm	700	700
Masa húmeda retenida 2 (mineral + Rechazo)	kg	2.072	2.998
Contenido de sólido en retenido 2	%	83.42	82.99
Masa seca retenida 2	kg	1.728	2.488
Contenido de rechazo	%	30.37	28.45
Recuperación del fino retenido en la primera etapa	%	21.53	13.69

Evaluación de la recuperación de la fracción limonítica en el rechazo.

Anexos

Anexo 11: Resultados de la sexta corrida para la evaluación del cambio de malla de 0.84 mm a 1.18 mm.

Parámetros determinados	UM	20 mesh	14 mesh
Masa inicial muestra Húmeda	kg	21.951	23.007
Contenido de sólido seco	%	65.14	64.89
Masa seca Inicial	kg	14.299	14.929
Masa de minerales cernido total	kg	11.408	12.086

Primera etapa de lavado y clasificación

Tiempo de operación en el 1er mezclado	min	8	8
Velocidad del 1er mezclado	rpm	700	700
Masa húmeda retenida (mineral + Rechazo)	kg	7.585	6.056
Contenido de sólido en retenido 1	%	71.05	70.84
Masa seca retenida 1	kg	5.389	4.290
Masa de limonita retenida en 1	kg	2.498	1.447
Eficiencia de la primera etapa.	%	78.10	88.03

Segunda etapa de lavado y clasificación

Tiempo de operación en el 2do mezclado	min	8	8
Velocidad del 2do mezclado	rpm	700	700
Masa húmeda retenida 2 (mineral + Rechazo)	kg	3.687	3.496
Contenido de sólido en retenido 2	%	78.42	81.32
Masa seca retenida 2	kg	2.891	2.843
Contenido de rechazo	%	37.69	28.74
Recuperación del fino retenido en la primera etapa	%	21.90	11.97

Evaluación de la recuperación de la fracción limonítica en el rechazo.

Anexos

Anexo 12: Resultados de la séptima corrida para la evaluación del cambio de malla de 0.84 mm a 1.18 mm.

Parámetros determinados	UM	20 mesh	14 mesh
Masa inicial muestra Húmeda	kg	24.426	23.598
Contenido de sólido seco	%	63.75	62.49
Masa seca Inicial	kg	15.572	14.746
Masa de minerales cernido total	kg	13.989	13.464

Primera etapa de lavado y clasificación

Tiempo de operación en el 1er mezclado	min	8	8
Velocidad del 1er mezclado	rpm	700	700
Masa húmeda retenida (mineral + Rechazo)	kg	5.762	4.857
Contenido de sólido en retenido 1	%	71.60	72.42
Masa seca retenida 1	kg	4.126	3.517
Masa de limonita retenida en 1	kg	2.543	2.235
Eficiencia de la primera etapa.	%	81.82	83.40

Segunda etapa de lavado y clasificación

Tiempo de operación en el 2do mezclado	min	8	8
Velocidad del 2do mezclado	rpm	700	700
Masa húmeda retenida 2 (mineral + Rechazo)	kg	1.992	1.543
Contenido de sólido en retenido 2	%	79.46	83.13
Masa seca retenida 2	kg	1.583	1.283
Contenido de rechazo	%	26.49	23.85
Recuperación del fino retenido en la primera etapa	%	18.18	16.60

Evaluación de la recuperación de la fracción limonítica en el rechazo.

Anexos

Anexo 13: Resultados de la primera corrida para la evaluación de la hidrominería.

Parámetros determinados	Sin lavar	Lavado	Lavado
Peso Inicial húmedo	10513	9892	6759
Contenido de sólidos	67.51	71.99	71.99
Masa inicial seca	7097	7121	4866
<u>Retenido</u>			
Masa retenida en 20 mesh húmeda	5989	6783	4243
Contenido de sólidos	80	80	80
Masa retenida seca en 20 mesh	4791	5426	3394
<u>Contenido de mineral en rechazo</u>	<u>32.49</u>	<u>23.80</u>	<u>30.24</u>

Anexo 14: Resultados de la segunda corrida para la evaluación de la hidrominería.

Parámetros determinados	Sin lavar	Lavado	Lavado
Peso Inicial húmedo	10432	9101	7333
Contenido de sólidos	81.62	82.04	79.86
Masa inicial seca	8515	7466	5856
<u>Retenido</u>			
Masa retenida en 20 mesh húmeda	9843	9127	6938
Contenido de sólidos	80	80	80
Masa retenida seca en 20 mesh	7874	7302	5550
<u>Contenido de mineral en rechazo</u>	<u>7.52</u>	<u>2.21</u>	<u>5.22</u>

Anexo 15: Resultados de la tercera corrida para la evaluación de la hidrominería.

Parámetros determinados	Sin lavar	Lavado
Peso Inicial húmedo	8845	6714
Contenido de sólidos	85.55	82.13
Masa inicial seca	7567	5514
<u>Retenido</u>		
Masa retenida en 20 mesh húmeda	7770	5776
Contenido de sólidos	80	80
Masa retenida seca en 20 mesh	6216	4621
<u>Contenido de mineral en rechazo</u>	<u>17.85</u>	<u>16.20</u>

Anexos

Anexo 16: Representación del balance de materiales en la planta de Preparación de Pulpa.





Anexo 18: Agitador IKA modelo RW 74 D.



Anexo 19: Horno Felisa, con rango de temperatura de 0 a 300 °C.



Anexo 20: Espectrómetro de Fluorescencia de rayos X.



Anexo 21: Perfil geológico donde se visualizan los distintos horizontes lateríticos.



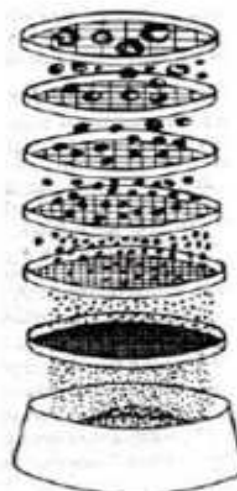
Anexo 22: Perfil geológico con predominio de mena saprolítica.

Evaluación de la recuperación de la fracción limonítica en el rechazo.

Anexos

Anexo 23: Conversión de abertura de las mallas.

CLASIFICACIÓN DE TAMICES		
ISO	ASTM	TYLER
100mm	4"	---
90 mm	3-1/2"	---
75 mm	3"	---
63 mm	2-1/2"	---
53 mm	2.12"	---
50 mm	2"	---
40 mm	1-3/4"	---
37.5 mm	1-1/2"	---
31.5 mm	1-1/4"	---
26.5 mm	1.06"	1.05" opg
25.0 mm	1.0"	---
22.4 mm	7/8"	0.883" opg
19.0 mm	3/4"	0.742" opg
16.0 mm	5/8"	0.624" opg
13.2 mm	0.530"	0.525" opg
12.5 mm	1/2"	---
11.2 mm	7/16"	0.441" opg
9.5 mm	3/8"	.371" opg
8.0 mm	5/16"	2-1/2 mesh
6.7 mm	0.265"	3 mesh
6.3 mm	1/4"	---
5.6 mm	No 0.3-1/2	3-1/2 mesh
4.75 mm	No. 4	4 mesh
4.00 mm	No. 5	5 mesh
3.35 mm	No. 6	6 mesh
2.80 mm	No. 7	7 mesh
2.36 mm	No. 8	8 mesh
2.00 mm	No. 10	9 mesh
1.70 mm	No. 12	10 mesh
1.40 mm	No. 14	12 mesh
1.18 mm	No. 16	14 mesh
1.00 mm	No. 18	16 mesh
850 µm	No. 20	20 mesh
710 µm	No. 25	24 mesh
600 µm	No. 30	28 mesh
500 µm	No. 35	32 mesh
425 µm	No. 40	35 mesh
355 µm	No. 45	42 mesh
300 µm	No. 50	48 mesh
250 µm	No. 60	60 mesh
212 µm	No. 70	65 mesh
180 µm	No. 80	80 mesh
150 µm	No. 100	100 mesh
125 µm	No. 120	115 mesh
106 µm	No. 140	150 mesh
90 µm	No. 170	170 mesh
75 µm	No. 200	200 mesh
63 µm	No. 230	250 mesh
53 µm	No. 270	270 mesh
45 µm	No. 325	325 mesh
38 µm	No. 400	400 mesh
32 µm	No. 450	450 mesh
25 µm	No. 500	500 mesh
20 µm	No. 635	635 mesh



El N° de Tamiz ASTM o TYLER indica la cantidad de aperturas por pulgada lineal.

