

**DETERMINACIÓN DE LA LÍNEA BASE OPERACIONAL DE LA PLANTA DE
TRITURACIÓN DE CERRO MATOSO S.A.**

YESENIA SAAVEDRA MORENO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA**

2011

**DETERMINACIÓN DE LA LÍNEA BASE OPERACIONAL DE LA PLANTA DE
TRITURACIÓN DE CERRO MATOSO S.A.**

YESENIA SAAVEDRA MORENO

**Trabajo de práctica para optar el título de
Ingeniero Metalúrgico**

Tutor

**Ing. Javier Fernando Soto Gutiérrez
Superintendente de Proceso de Refinería y Recuperación Fe-Ni
CERRO MATOSO S.A - BHP BILLITON**

Co-Tutor

**Ph.D. Ing. Gustavo Neira Arenas
Profesor de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA**

2011

AGRADECIMIENTOS

El Autor agradece a:

Cerro Matoso S.A bhp billiton y la Unidad de Negocios de Refinería y Recuperación de Ferroníquel.

Gustavo Neira Arenas, Ph.D. Ingeniero Metalúrgico, profesor de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, Co-Tutor de este proyecto de grado.

Javier Fernando Soto Gutiérrez, Ingeniero Metalúrgico, Superintendente de Proceso de refinería y Recuperación de Ferroníquel, Cerro Matoso S.A, Tutor de este proyecto de grado.

Silvia Juliana Tarazona Alvarado, Ingeniero Metalúrgico, Ingeniera de Proceso de la Planta de Recuperación de Ferroníquel de Cerro Matoso S.A.

Erik Marlón Hernandez Tavera, Estudiante de Ingeniería Electromecánica, Universidad Antonio Nariño.

Yuly Katerine Bueno, Isaías Andrés Rentería Rincón, Magredt Tatiana Durán, Fabio Abid Raysth Estudiantes de Ingeniería Metalúrgica, Universidad Industrial de Santander.

Alvaro Regino Regino, Antonio Aguirre, Jhon Guzman, Orlando Vasquez, Operadores de la Unidad de Negocios de Refinería y Recuperación de Ferroníquel de Cerro Matoso S.A

Gracias a DIOS por su apoyo incondicional en cada momento crucial de mi vida.

*A mis padres, Leonor Moreno fuentes y Omar Saavedra Godoy por ser parte de
mi crecimiento personal..*

*Al Ingeniero Julio Martín Saenz Quecho, por toda su enseñanza en el área de la
Metalurgia.*

Al profesor Gustavo Neira por toda su valiosa colaboración y enseñanza.

A mi Abuela Alcira Godoy Perez, por todo su apoyo moral..

A la Familia Moreno Fuentes por toda su colaboración.

*A Erik Marlon Hernández Tavera por estar siempre a mi lado, en momentos
inolvidables.*

*A mis amigos, Fuly Katherine, Magredt Tatiana, Isaias Andrés y Fabio
Abid, por estar en los momentos que más los necesitaba.*

*A mi hermana Erika Juliana Mantilla Moreno, por compartir momentos valiosos
en mi vida.*

Fesenia Saavedra Moreno

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	16
1. OBJETIVOS	18
1.1 GENERAL	18
1.2 ESPECIFICOS	18
2. MARCO REFERENCIAL	19
2.1 PROCESO DE RECUPERACIÓN DE FERRONÍQUEL MEDIANTE EL SISTEMA DE TRITURACIÓN, CLASIFICACIÓN Y SEPARACIÓN MAGNÉTICA	19
2.1.1 Productos residuales provenientes del proceso de producción	19
2.1.1.1 Escoria de la subfase de refinación	19
2.1.1.2 Pérdidas del proceso de colado y granulación	20
2.1.2 Sistema de Trituración, Clasificación y Separación Magnética	22
2.1.2.1 Trituración	23
2.1.2.2 Clasificación	25
2.1.2.3 Separación Magnética	25
2.1.2.4 Funcionamiento del Sistema de Trituración	28

2.2 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL PROCESADO EN LA PLANTA	31
2.2.1 Fracción Metálica	31
2.2.2 Análisis Químico	31
2.2.3 Análisis Granulométrico	32
3 DISEÑO METODOLOGICO	33
3.1 REVISIÓN Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO	34
3.2 IDENTIFICACIÓN DE CORRIENTES Y RECOPIACIÓN DE DATOS EN LA PLANTA	34
3.3. CARACTERIZACIÓN DE MUESTRAS	35
3.4 CÁLCULO DE LA RAZÓN DE REDUCCIÓN	36
3.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DETERMINACIÓN DE LA LÍNEA BASE OPERACIONAL	36
3.6 ELABORACIÓN Y PRESENTACIÓN DEL INFORME	36
4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	37
4.1 CÁLCULO DE LA RAZÓN DE REDUCCIÓN DE TAMAÑO PARA CADA ETAPA DE TRITURACIÓN Y RAZÓN DE REDUCCIÓN GLOBAL	37
4.1.1 Escoria de la subfase de refinación	37
4.1.2 Pérdidas del proceso de colado y granulación	38
4.1.3 Trituración del compartimiento 1 y 2	40

4.2 CÁLCULO DE LA FRACCIÓN METÁLICA PARA CADA CORRIENTE DETERMINANTE DEL PROCESO DE RECUPERACIÓN DE FERRONÍQUEL	42
4.2.1 Escoria de la Subfase de Refinación	42
4.2.2 Pérdidas del proceso de Colado y Granulación	43
4.2.3 Trituración del Compartimiento 1 y 2	45
4.3 ÍNDICES DE RECUPERACIÓN DE FERRONÍQUEL EN LA PLANTA DE TRITURACIÓN	47
5. CONCLUSIONES	51
6. RECOMENDACIONES	52
7. BIBLIOGRAFÍA	54
8. ANEXOS	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Procedimiento de almacenamiento, desintegración y Fragmentación de la Escoria de la subfase de refinación	20
Figura 2. Descripción del procedimiento de almacenamiento, desintegración y fragmentación de las Pérdidas del proceso de colado y granulación	21
Figura 3. Diagrama de entradas y salidas de la Planta de Trituración	22
Figura 4. Clasificación por estratificación	26
Figura 5. Separador magnético de baja intensidad	27
Figura 6. Diagrama de flujo de la operación de la planta de trituración	28
Figura 7. Esquema de la metodología empleada	33
Figura 8. Diagrama de Flujo de entradas y salidas a la planta de trituración.	47
Figura 9. Procedimiento de Fundición realizado a las muestras tomadas en los puntos de muestreo de la planta de trituración.	55

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Especificación de técnicas aplicadas a la Chatarra de Ferroníquel triturado por el Laboratorio de Cerro Matoso S.A y porcentaje de incertidumbre.	32
Tabla 2: Puntos de muestreo en la planta de trituración.	35
Tabla 3: Razón de reducción al 80% para cada etapa de trituración y razón de reducción global de la planta de trituración cuando se procesa Escoria de la subfase de refinación, y se tritura material depositado en el compartimiento 3.	38
Tabla 4: Razón de reducción al 80% para cada etapa de trituración y razón de reducción global de la planta de trituración cuando se procesa el material de Pérdidas el proceso de colado y granulación, y se tritura material depositado en el compartimiento 3.	39
Tabla 5: Razón de reducción al 80% para cada etapa de trituración y razón de reducción global de la planta de trituración cuando se procesa material de los Compartimientos 1 y 2.	41
Tabla 6: Fracción metálica para cada corriente determinante del proceso de recuperación de ferroníquel, cuando se procesa Escoria de la subfase de refinación, y trituración del material depositado en el compartimiento 3 de este material.	42

Tabla 7: Fracción metálica para cada corriente determinante del proceso de recuperación de ferroníquel, cuando se procesa Pérdidas del Proceso de Colado y Granulación, y trituración del material depositado en el compartimiento 3 de este material.	44
Tabla 8: Fracción metálica para cada corriente determinante del proceso de recuperación de ferroníquel, cuando se procesa material de los Compartimientos 1 y 2.	46
Tabla 9: Toneladas de níquel del material de entrada y productos obtenidos de la planta de trituración.	48
Tabla 10. Porcentaje pasante acumulado de las nueve corrientes del sistema de trituración cuando se procesa Escoria de la Subfase de Refinación.	58
Tabla 11. F80 y P80 para los puntos de muestreo del sistema de trituración, clasificación y separación magnética.	59
Tabla 12: Razón de reducción al 80% para cada etapa de trituración y razón de reducción global de la planta de trituración.	62
Tabla 13. Resultados de Fracción Metálica para cada punto de muestreo en la planta de trituración cuando se procesa escoria de la subfase de refinación.	64
Tabla 14: Composición química de los materiales de entrada y los productos obtenidos en la planta de trituración.	65
Tabla 15: Peso del material en toneladas y porcentaje de fracción metálica para los materiales procesados y los productos obtenidos en la planta de trituración.	66

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1: Procedimiento de Fundición realizado a las muestras de material tomadas en cada punto de muestreo de la planta de trituración.	55
ANEXO 2: Cálculo de la razón de reducción al 80% para cada etapa de trituración y razón de reducción global.	57
ANEXO 3: Cálculo de la fracción metálica para cada punto de muestreo en la planta de trituración cuando se procesa escoria de la subfase de refinación	63
ANEXO 4: Cálculo de Toneladas de níquel de la escoria de la subfase de refinación.	65

RESUMEN

TÍTULO:

DETERMINACIÓN DE LA LÍNEA BASE OPERACIONAL DE LA PLANTA DE TRITURACIÓN DE CERRO MATOSO S.A*.

AUTOR:

Yesenia Saavedra Moreno **.

PALABRA CLAVES:

Sistema de Trituración, Clasificación y Separación Magnética, Razón de Reducción de Tamaño, Índice de recuperación de ferroníquel de Cerro Matoso S.A.

DESCRIPCIÓN DEL CONTENIDO:

Debido a la comercialización de los productos alternos de níquel, se vio la necesidad de optimizar los procesos de producción de estos productos, estableciendo las condiciones actuales de operación de la planta de trituración, y determinando el nivel de desempeño actual de cada una de las etapas del proceso. Durante la ejecución de este proyecto, se caracterizó por fracción metálica, granulometría y composición química las diversas materias primas que ingresan al sistema de trituración, clasificación y separación magnética, y por consiguiente, los productos obtenidos con el procesamiento de estas; en general, el 86,32% de lo procesado mensualmente en la planta de trituración corresponde a Escoria de la Subfase de Refinación, y el 13,67% restante corresponde a las Pérdidas en el Proceso de Colado y Granulación. Una vez caracterizada todas las corrientes determinantes del proceso en la planta de trituración, se calculó el porcentaje de recuperación de níquel de la planta, donde el 58,27% corresponde al porcentaje global de recuperación de níquel obtenido en los productos comercializados como Chatarra de Ferroníquel Triturado y los Finos con Bajo Contenido Metálico, y el 37,1% corresponde al porcentaje global de pérdidas del proceso de trituración, clasificación y separación magnética; según los resultados, el estéril tiene un tamaño de partícula de 4,6mm, a este tamaño de partícula, es difícil recuperar las especies metálicas por el sistema de trituración, por lo tanto, se recomienda realizar pruebas de concentración por molienda en el molino de bolas de la planta de MNR de Cerro Matoso S.A.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales

Tutor: Ing. Javier Fernando Soto Gutiérrez. Co-Tutor: Ph.D. Ing. Gustavo Neira Arenas

ABSTRACT

TITLE:

DETERMINATION OF THE BASE LINE OPERATIONAL OF CRUSHING PLANT CERRO MATOSO S.A.

AUTHOR:

Yesenia Saavedra Moreno **.

KEYWORDS:

System of Crushing, Screening and Magnetic Separation, Size Reduction Ratio, Rate of Recovery of Ferronickel of Cerro Matoso S.A.

DESCRIPTION:

Due to the marketing of alternative products of nickel, was the need to optimize the production processes of these products, establishing the current operating conditions of the crushing plant, and determining the level of actual performance for each stage of the process. During the execution of this project is characterized by metal fraction, particle size and chemical composition of different source materials entering the system of crushing, screening and magnetic separation, therefore, the products obtained with the processing of these; in overall, 86,32% of the monthly processing of the crushing plant corresponds slag sub-phase of refining, and the remaining 13,67% correspond to loss in the process of casting and granulation. Once characterized all currents determinants of the process in the crushing plant, calculated the percentage of nickel recovery plant, where the percentage 58,27% overall recovery of nickel found in products sold as crushed ferronickel scrap and fine with low metal content, and 37,1% for the overall rate of loss of crushing, screening and magnetic separation, according to the results, sterile has a particle size of 4,6 mm, the particle size is difficult to recover the metal species by system crushing, therefore testing is recommended concentration by grinding in ball mill of plant MNR of Cerro Matoso S.A.

* Degree work

** Faculty of Physical Chemistry Engineering, School of Metallurgical Engineering and Materials Science.

Tutor: Ing. Javier Fernando Soto Gutiérrez. Co-Tutor: Ph.D. Ing. Gustavo Neira Arenas

INTRODUCCIÓN

La creciente participación en el mercado de productos alternos de níquel ha promovido que el grupo comercial de Cerro Matoso S.A explore alternativas de venta de productos alternos que históricamente se han retornado al proceso de Calcinación-Fundición. Durante el año 2010 se consolidó la comercialización de chatarra triturada de ferroníquel Medio y Fino, dando origen a la necesidad de optimizar los procesos de producción de estos productos.

El sistema de trituración es una sección funcional de la Subfase de Recuperación de Ferroníquel de Cerro Matoso S.A que tiene como objetivo recuperar material residual del proceso de producción con alto contenido de ferroníquel. Las pérdidas de los procesos de colado, refinación y granulación son enviados a la Subfase de Recuperación de Ferroníquel e ingresan a la Planta de Trituración obteniéndose cinco salidas: Chatarra de Ferroníquel Triturada Fino en compartimiento 1, Chatarra de Ferroníquel Triturada Medio en compartimiento 2, Chatarra de Ferroníquel Triturada Grueso en compartimiento 3, material Estéril y Finos con bajo contenido metálico.

El material alimentado a la Planta de Trituración es procesado varias veces por el sistema de trituración, clasificación y separación magnética con el fin de aumentar su concentración en fracción metálica para obtener finalmente el producto con las características de comercialización. Los tres productos de la planta son comercializados mientras el material estéril es dispuesto en botaderos, y los finos con bajo contenido metálico se adicionan al proceso de Fundición-Calcinación.

En este proyecto de grado, se establecieron las condiciones actuales de operación en la Planta de Trituración, determinando el nivel de desempeño actual de cada una de las etapas del proceso. Los resultados obtenidos en este trabajo son cruciales para que la empresa pueda definir alternativas de mejoramiento del proceso de Recuperación de Ferroníquel, el cual tiene un impacto muy positivo en todo el proceso productivo de la empresa.

1. OBJETIVOS

1.1 GENERAL

- Establecer la línea base operacional para las condiciones actuales de operación y determinar los rangos de recuperación de acuerdo con las características de los materiales alimentados al proceso en la Planta de Trituración de ferroníquel de Cerro Matoso S.A.

1.2 ESPECÍFICOS

- Establecer cuáles son las corrientes determinantes del proceso de recuperación de ferroníquel en la planta y hacer su caracterización por granulometría, fracción metálica y composición química.
- Determinar la razón de reducción de tamaño para cada etapa de trituración y la razón de reducción global de la Planta de Trituración de ferroníquel.
- Realizar un diagnóstico general operacional del desempeño de la planta con base en la razón de reducción y los índices de recuperación de níquel.

2. MARCO REFERENCIAL

2.1 PROCESO DE RECUPERACIÓN DE FERRÓNQUEL MEDIANTE EL SISTEMA DE TRITURACIÓN, CLASIFICACIÓN Y SEPARACIÓN MAGNÉTICA

El proceso de Recuperación de Ferrónquel recibe productos residuales provenientes del proceso de producción, que se describen posteriormente. Este material llega a la planta de recuperación y es sometido a limpieza mecánica y reducción de tamaño para la conformación de lotes para la venta; los remanentes de este material son triturados, clasificados y separados magnéticamente, obteniéndose Chatarra de Ferrónquel Triturada, Estéril y Finos con bajo contenido metálico.

2.1.1 Productos residuales provenientes del proceso de producción. Hay dos tipos de productos residuales provenientes del proceso de producción que ingresan al sistema de trituración, clasificación y separación magnética para ser procesados por separado:

2.1.1.1 Escoria de la subfase de refinación. En el proceso de refinación se retira la escoria producida con el fin de dejar limpio el baño metálico, pero durante el arrastre de la escoria también se retira una parte de metal. Este material retirado, se acumula en una olla donde se aglomera formando botones que se desintegran durante el volteo de ollas y la exposición al agua.

Posteriormente, los fragmentos se golpean con una retroexcavadora con martillo para separar los fragmentos metálicos del material estéril y reducir su tamaño. Los fragmentos metálicos se estiban para la conformación de lotes para la venta, y el

material remanente se transporta al sistema de trituración, clasificación y separación magnética con el cargador, para ser descargado en el Grizzly. En la Figura 1 se ilustra este procedimiento.

Figura 1. Procedimiento de almacenamiento, desintegración y fragmentación de la Escoria de la subfase de refinación.



Fuente: Autor de este documento.

2.1.1.2 Pérdidas del proceso de colado y granulación. Es el segundo producto residual que ingresa al sistema de trituración, clasificación y separación magnética proveniente de dos etapas del proceso de producción. En la Figura 2 se ilustra el procedimiento que se describe a continuación.

Pérdidas del proceso de colado: En el proceso de colado del Horno Eléctrico se utilizan canales para guiar y transportar el flujo de metal líquido de la piquera al crisol, al final de los cuales queda un remanente de metal colado (Ferróniquel de alto azufre). Este material junto con las salpicaduras es recuperado, se lleva a Planta de Recuperación, donde se golpea con una

retroexcavadora con martillo para reducir su tamaño. Los fragmentos metálicos se estiban para la conformación de lotes para la venta, y el material remanente se transporta al sistema de trituración, clasificación y separación magnética.

Pérdidas del proceso de granulación: Posterior a la refinación del ferróníquel para llevarlo a especificaciones de composición química preestablecidas para la venta, es sometido al proceso de granulación en el cual se utilizan canales para guiar y transportar el flujo de metal líquido del crisol al tundish donde se acumula el metal para controlar la salida de flujo de metal que cae en la piedra de granulación. Al finalizar el proceso de granulación, en las canales, piedra y tundish queda un remanente del metal refinado. Este material, junto con las salpicaduras, es llevado a la Planta de Recuperación, donde se golpea con una retroexcavadora con martillo para reducir su tamaño. Los fragmentos metálicos se estiban para la conformación de lotes para la venta, y el material remanente se transporta al sistema de trituración, clasificación y separación magnética.

Figura 2. Descripción del procedimiento de almacenamiento, desintegración y fragmentación de las Pérdidas del proceso de colado y granulación.



Fuente: Autor de este documento.

2.1.2 Sistema de Trituración, Clasificación y Separación Magnética.

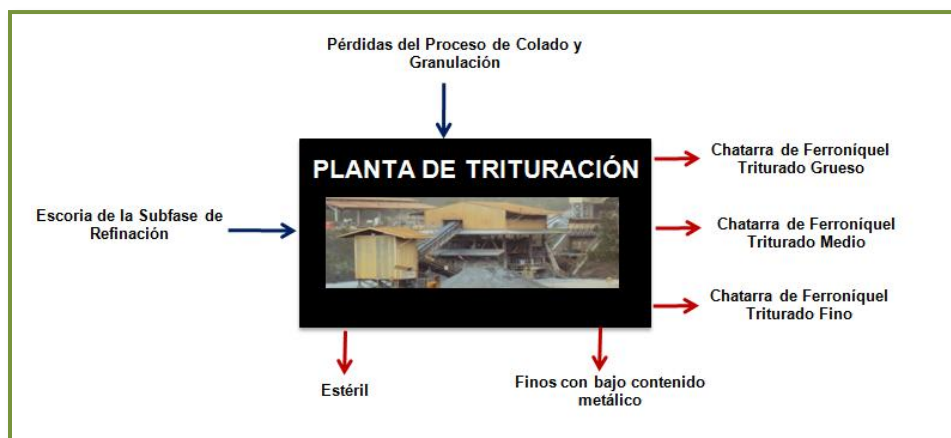
El sistema de trituración, clasificación y separación magnética es una sección funcional de la Subfase de Recuperación de Ferróníquel que recibe los siguientes productos residuales provenientes del proceso de producción:

- Pérdidas del Proceso de Colado y de Granulación.
- Escoria de la Subfase de Refinación.

Estos dos tipos de materiales se procesan (por separado) en la planta de trituración obteniendo cinco salidas (ver Figura 3):

- Chatarra de Ferróníquel Triturado Grueso.
- Chatarra de Ferróníquel Triturado Medio.
- Chatarra de Ferróníquel Triturado Fino.
- Estéril.
- Finos con bajo contenido metálico.

Figura 3. Diagrama de entradas y salidas de la Planta de Trituración.



Fuente: Autor de este documento.

La chatarra de Ferroníquel Triturado Grueso, Medio y Fino son comercializados actualmente por Cerro Matoso S.A. Los Finos con bajo contenido metálico son adicionados a la fase de Calcinación- Fundición, y el Estéril es dispuesto en botadero.

2.1.2.1 Trituración. Es la primera etapa mecánica en el proceso de conminución, cuyo principal objetivo es la liberación de los minerales de valor presentes en la ganga¹.

Generalmente la trituración es una operación en seco, usualmente ejecutada en dos o tres etapas. La cantidad de etapas de trituración está determinada por la razón de reducción. Así, las rocas de un mineral que ingresan a una trituración primaria pueden ser de 1.5m y reducidas hasta 10 ó 20cm. Luego, pasan a una trituración secundaria y son reducidas hasta 2 ó 0.5 cm¹.

- *Razón de Reducción de tamaño:* Es la relación entre el tamaño de alimentación y el tamaño de descarga de cualquier equipo de trituración, que se calcula mediante la siguiente relación ²:

$$\text{Razón de Reducción (R) al 80\%} = \frac{F80}{P80} \quad (1)$$

Donde:

F80: Es el tamaño de material de alimentación correspondiente al 80% del peso del material pasante.

P80: Es el tamaño de material de salida correspondiente al 80% del peso del material pasante.

¹ Wills Barry A. Crushers. En: Mineral processing technology. 2 ed. Great Britain, 1981. 116 p.

² PORTAL MINERO S.A. En: Manual General de Minería y Metalurgia. 1 ed, 2006. p. 94-95.

- *Cálculo del **F80***: para realizar este cálculo se emplea la siguiente ecuación:

$$F80 = M1 - ((F1 - 80) * \left(\frac{M1-M2}{F1-F2}\right)) \quad (2)$$

Donde:

F80: Es el tamaño del material de alimentación correspondiente al 80% del peso de material pasante, en mm.

F1: Es el porcentaje en peso del material de alimentación pasante mayor ó igual al 80%.

M1: Es el tamaño del material de alimentación pasante mayor ó igual al 80%, en mm.

F2: Es el porcentaje en peso del material de alimentación pasante menor ó igual al 80%.

M2: Es el tamaño del material de alimentación pasante menor ó igual al 80%, en mm.

- *Cálculo del **P80***: para realizar este cálculo se emplea la siguiente ecuación:

$$P80 = M1 - ((P1 - 80) * \left(\frac{M1-M2}{P1-P2}\right)) \quad (3)$$

Donde:

P80: Es el tamaño de material de salida correspondiente al 80% del peso del material pasante, en mm.

P1: Es el porcentaje en peso del material de salida pasante mayor ó igual al 80%.

M1: Es el tamaño de material de salida pasante mayor ó igual al 80%, en mm.

P2: Es el porcentaje en peso del material de salida pasante menor ó igual al 80%.

M2: Es el tamaño de material de salida pasante menor ó igual al 80%, en mm.

La razón de reducción global, se calculó con base al tamaño de material de entrada y el de salida en cada uno de los compartimientos. Existe un límite de tamaño de las partículas de mineral hasta el cual la trituración es eficiente; pasado este límite, se realiza muy poco trabajo en comparación con la energía consumida. En este caso, para los tamaños más finos, se emplean los molinos que realizan la reducción de tamaño de mineral con un rendimiento mucho mejor que las trituradoras².

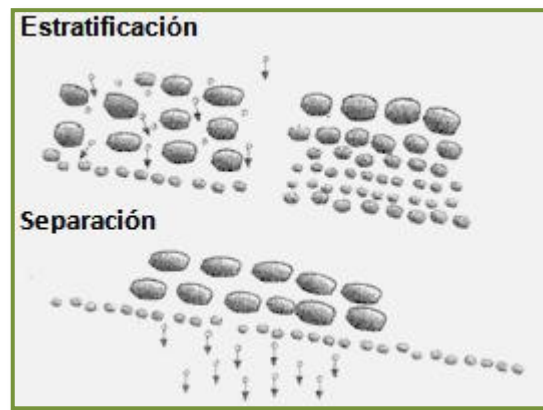
2.1.2.2 Clasificación: Consiste en la separación por tamaños de un conjunto de partículas para obtener dos ó más fracciones. Es una etapa esencial en los procesos de concentración de minerales, especialmente durante la trituración, donde actúa como etapa controlante para la separación de material menor a cierta dimensión, que no requiere de una reducción adicional y se encuentra preparado en tamaño para una etapa siguiente³.

Durante la clasificación, la separación por tamaño se produce por la acción de superficies planas o curvas, con aberturas de un tamaño definido, sobre las cuales se alimenta el material que se desea clasificar.

³ Currie, J.M., Screening. En: Unit operation in mineral processing. 1 ed. British Columbia, 1973.91p.

La inclinación de la superficie ó su movimiento, hará que el material fluya y al mismo tiempo sufra una estratificación (Figura 4) en la que las partículas grandes se sitúan en la parte superior, mientras que las finas pasarán el lecho de partículas gruesas por los espacios vacíos y llegarán a la superficie del tamiz atravesándola si las aberturas son mayores a ellas³.

Figura 4: Clasificación por estratificación



Fuente: PORTAL MINERO S.A. En: Manual General de Minería y Metalurgia. 1 ed, 2006. 101p.

2.1.2.3 Separación Magnética. Es una etapa de mayor importancia en el proceso de concentración de minerales, en la cual los separadores magnéticos aprovechan las diferentes propiedades magnéticas en el mineral, sirviendo para separar las especies de valor del mineral de la ganga no magnética, es decir, la magnetita del cuarzo, ó contaminantes magnéticos⁴.

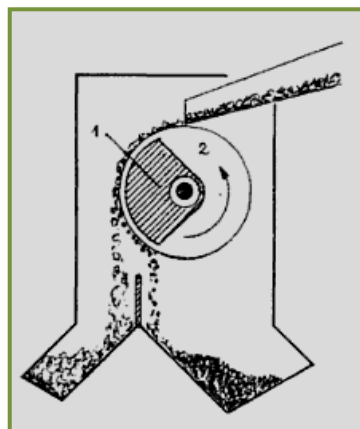
⁴ Wills Barry A. Magnetic and High-Tension Separation. En: Mineral processing technology. 2 ed. Great Britain, 1981. p. 389-398.

Todos los materiales son afectados en alguna manera cuando se le aplica un campo magnético, aunque en la mayoría de las sustancias este efecto es muy leve para ser detectado. Los materiales pueden ser clasificados en dos grandes grupos en función de lo que se detecte, esto es, atraído o rechazado por el magneto.

- **Materiales diamagnéticos:** Son rechazados a lo largo de las líneas de campo magnético hasta el punto donde la intensidad del campo es muy leve. Las fuerzas involucradas ahí son muy pequeñas y las sustancias diamagnéticas no pueden ser concentradas magnéticamente.
- **Materiales paramagnéticos:** Son atraídos a lo largo de las líneas de campo magnético hasta los puntos de mayor intensidad del campo.

Algunos elementos son paramagnéticos en sí mismos, como el Ni, Co, Mn, Cr, Ce, Ti, O, y el grupo de metales del platino, pero en muchos casos, las propiedades de los minerales paramagnéticos se deben a la presencia de hierro en algunas formas ferromagnéticas. Los materiales ferromagnéticos se pueden concentrar en separadores magnéticos de baja intensidad (Figura 5) ⁴.

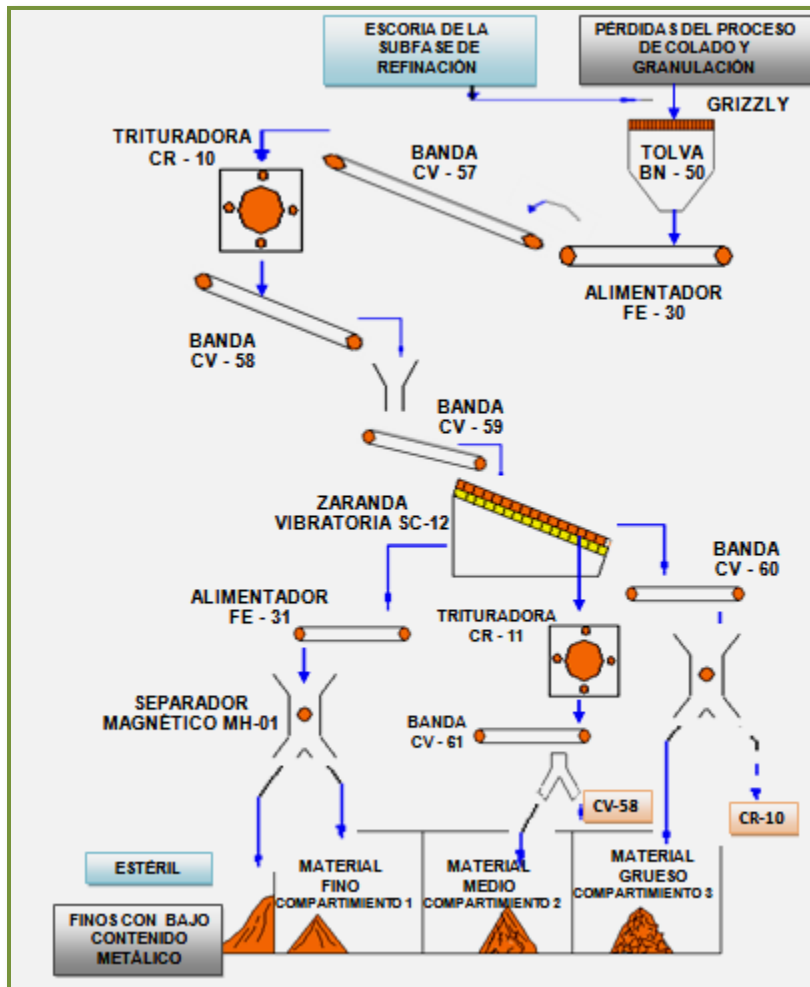
Figura 5: Separador magnético de baja intensidad.



Fuente: PASCUAL, T.J. Trituración: Fundamentos de Tecnología Química. Barcelona: Universidad de Salamanca, 2005. 412p.

2.1.2.4 Funcionamiento del Sistema de Trituración. En la Figura 6 se presenta un diagrama de flujo de la operación de la planta de trituración, que se describirá a continuación. El sistema de trituración inicia en el Grizzly, el cual es alimentado mediante un cargador frontal. El material que pasa través de los orificios del Grizzly cae por gravedad a la Tolva BN-50, que lo transfiere al Alimentador FE-30, y este, a la banda CV-57, la cual descarga el material a la Trituradora de martillos CR-10, donde se lleva a cabo la primera etapa de trituración.

Figura 6: Diagrama de flujo de la operación de la planta de trituración.



Fuente: Autor de este documento.

La Trituradora CR-10 descarga el material en la Banda CV-58, que transfiere el material a la banda CV-59 para alimentar la Zaranda Vibratoria SC-12, la cual, clasifica y distribuye el material según su tamaño, así:

1. Material Grueso > 53mm es transferido a la banda con rodillo magnético CV-60, que retiene los fragmentos con metal y los deposita en el Compartimiento 3. El resto de material regresa a la Trituradora CR-10, donde repite el proceso de Trituración Primaria.

2. Material Medio 6,30mm > medio < 53mm es transferido a la Trituradora CR-11, donde se realiza la segunda etapa de trituración. La CR-11 descarga el material triturado a la banda con Rodillo Magnético CV-61, que retiene los fragmentos semigruesos con metal y los deposita en el Compartimiento 2. El resto de material regresa a la banda CV-58, donde repite la clasificación por tamaño y seguidamente el material pasa a una segunda etapa de trituración.

3. Material Fino < 6,30mm es transferido a un alimentador FE-31, que a su vez, hace pasar el material a través del Rodillo Magnético MH-01, el cual retiene los Finos con metal y los deposita en el Compartimiento 1. El resto de material es el rechazo del proceso de trituración clasificación y separación magnética, este material se deposita en el cuarto compartimiento.

Al finalizar todo el proceso de trituración, clasificación y separación magnética, se obtienen los productos que muestra la Figura 3, de los cuales los siguientes son comercializados por Cerro Matoso S.A:

- **Chatarra de Ferroníquel Triturado Grueso:** Este producto se obtiene cuando se tritura material del compartimiento 3 de Escoria de la subfase de refinación y Pérdidas del proceso de colado y granulación.

En la planta de trituración los lotes comercializados de Chatarra de Ferroníquel Triturado Grueso están conformados por 40% de Escoria de la subfase de refinación y el otro 60% Pérdidas del proceso de colado y granulación.

- **Chatarra de Ferroníquel Triturado Medio:** este producto se obtiene cuando se tritura varias veces material del compartimiento 1 y 2 (mezclado) de Escoria de la subfase de refinación y Pérdidas del proceso de colado y granulación. Después de la tercera pasada por el sistema de trituración, clasificación y separación magnética, se retira el material depositado en el compartimiento 2 y se comercializa como Chatarra de Ferroníquel Triturado Medio.
- **Chatarra de Ferroníquel Triturado Fino:** este producto se obtiene cuando se tritura varias veces material del compartimiento 1 y 2 (mezclado) de Escoria de la subfase de refinación y Pérdidas del proceso de colado y granulación. Después de la tercera pasado por el sistema de trituración, clasificación y separación magnética, se retira el material depositado en el compartimiento 1 y se comercializa como Chatarra de Ferroníquel Triturado Fino.

Los otros dos productos, Estéril y Finos con bajo contenido metálico, se obtienen de la siguiente manera: cuando se tritura material procedente de *pérdidas del proceso de colado y de granulación, material del compartimiento 3 de pérdidas del proceso de colado y de granulación, y material de los compartimientos 1 y 2*, se obtiene como salida material **Fino con bajo contenido metálico**. Por otra parte, cuando se tritura material procedente de *escoria de la subfase de refinación y material del compartimiento 3 de escoria de la subfase de refinación* se obtiene como salida material **Estéril**.

2.2 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL PROCESADO EN LA PLANTA

La caracterización del material fue de suma importancia en el desarrollo de este trabajo, teniendo en cuenta la necesidad de establecer las características físicas y químicas de las corrientes determinantes del proceso de recuperación de ferróniquel en la Planta de Trituración.

2.2.1 Fracción Metálica. Corresponde al porcentaje en peso de material recuperable en forma de metal o aleación. Esta característica es importante para productos con presencia de impurezas no metálicas.

La determinación de la fracción metálica se realizó para cada una de las fundiciones; después de desencofrar la muestra solidificada del molde, se separó la escoria del metal y se pesó los productos independientemente usando la siguiente fórmula⁵.

$$\text{Fracción Metálica, peso \%} = \frac{W_f}{W_i} \times 100 \quad (4)$$

Donde:

W_i = Peso total de la Muestra antes de Fundir, kg

W_f = Peso del Metal después de Fundir, kg

W_f debe excluir el peso de la escoria formada

2.2.2 Análisis Químico. Este análisis busca determinar de manera confiable y oportuna, la composición química de las corrientes determinantes en el proceso de recuperación de Ferróniquel, a fin de permitir el control de las diferentes variables de operación. Las técnicas de análisis utilizadas dependen del elemento a determinar según se especifica en la Tabla 1.

⁵ ASTM. Standard Test Methods for Municipal Ferrous Scrap. ASTM E701-80. 2010. 3p.

Tabla 1. Especificación de técnicas aplicadas a la Chatarra de ferróníquel triturado por el Laboratorio de Cerro Matoso S.A y porcentaje de incertidumbre.

ELEMENTO	Técnica	% Incertidumbre
Ni	Espectroscopia de emisión a chispa	0.37
Co	Espectroscopia de emisión a chispa	0.18
Cr	Espectroscopia de emisión a chispa	0.02
Si	Espectroscopia de emisión a chispa	0.007
P	Espectroscopia de emisión a chispa	0.004
S	Combustión LECO	0.002
C	Combustión LECO	0.004
Al	Espectroscopia de emisión a chispa	0.002
Fe	Espectroscopia de emisión a chispa	Calculo por Balance

Fuente: Manual de operación del espectrómetro de emisión a chispa. Cerro Matoso S.A., (2009).

2.2.3 Análisis Granulométrico. Es uno de los métodos de análisis de tamaño más antiguos. El principal objetivo de este análisis es determinar en forma cuantitativa la distribución por tamaño de las partículas de material⁶.

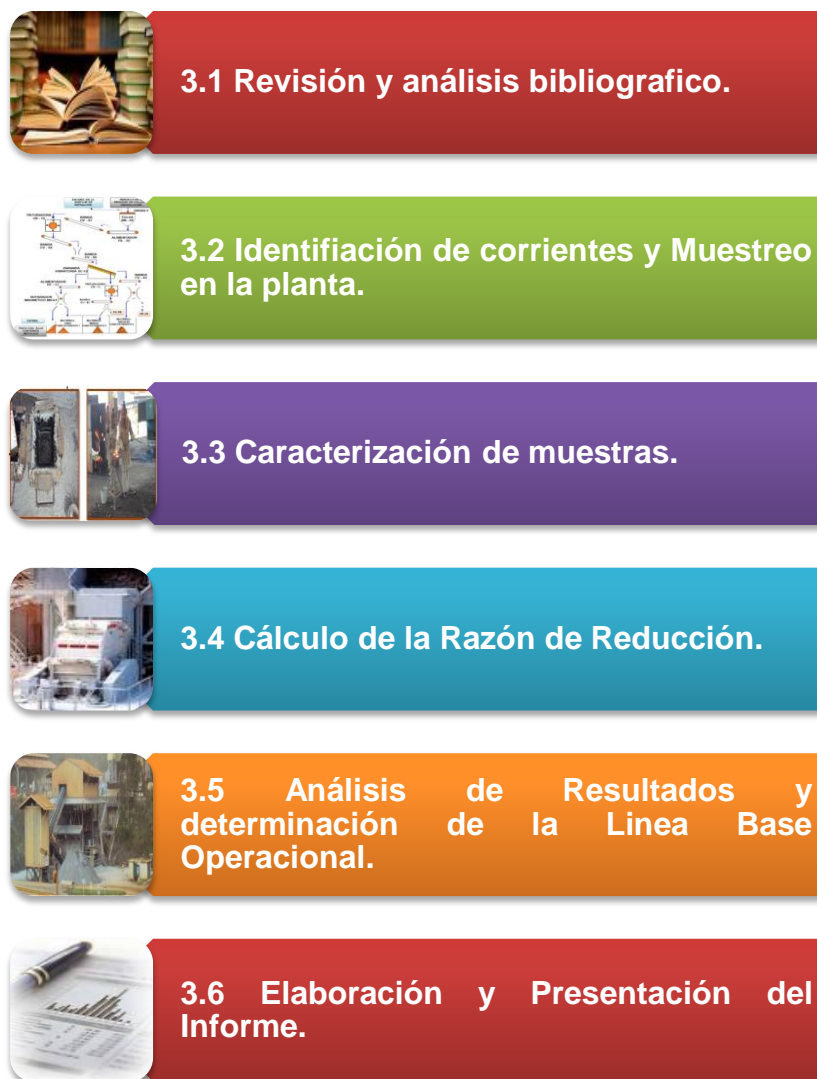
Este análisis consiste en hacer pasar partículas de material por una serie de mallas de distintas aberturas que actúan como filtros de las partículas, donde en la parte superior se encuentra el tamiz de mayor diámetro; la columna de tamices se somete a vibración y movimientos rotatorios, luego de unos minutos se retiran los tamices y se desensamblan tomando por separado el peso de material retenido en cada uno de ellos⁶.

⁶ Wills Barry A. Particle-size analysis. En: Mineral processing technology. 2 ed. Great Britain, 1981. p 71-75.

3 DISEÑO METODOLOGICO

En la figura 7 se muestra un esquema del diseño metodológico utilizado en el desarrollo de este proyecto de grado.

Figura 7: Esquema de la metodología empleada.



Fuente: Autor de este documento.

3.1 REVISIÓN Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO.

Durante el desarrollo del proyecto, se realizaron consultas bibliográficas en libros, artículos de revista, páginas de internet, manuales de equipos, normas y base de datos acerca de: fichas técnicas y manuales de equipos de trituración, clasificación y separación magnética, libros de procesos de conminución y operaciones unitarias en procesamiento de minerales, manual de proceso y operación de Cerro Matoso S.A, documentos internos de Cerro Matoso S.A.

3.2 IDENTIFICACIÓN DE CORRIENTES Y MUESTREO EN LA PLANTA.

Durante el desarrollo de esta etapa, se realizó:

- Identificación de las corrientes determinantes de operación en la planta de Trituración.
- Muestreo en la planta de trituración: se hizo con el fin de recoger muestras en las corrientes de operación para los dos tipos de material procesados.

Los puntos de muestreo⁷ sugeridos como punto de partida para el presente trabajo se ilustran en la Tabla 2.

⁷ Los puntos de muestreo ilustrados en la tabla 2, se identifican en el diagrama de flujo de la operación de la planta de trituración (figura 6). En cada punto de muestreo sugerido ocurre una etapa ya sea de trituración, clasificación ó separación magnética.

Tabla 2: Puntos de muestreo en la planta de trituración.

PUNTOS DE MUESTREO
Banda Cv-57
Banda Cv-59
Banda Cv-60
Compartimiento # 3
Banda Cv-61
Compartimiento # 2
Alimentador Fe-31
Compartimiento #1
Estéril / Finos Con Bajo Contenido Metálico

Fuente: Autor de este documento.

3.3 CARACTERIZACIÓN DE MUESTRAS.

En esta etapa se determinaron las características, metálicas, químicas y granulométricas de las muestras de material tomadas en los diferentes puntos de la planta de Trituración. El análisis químico se empleó para determinar los contenidos de Ni, Co, Cr, Si, P, S, C, Al, Fe presentes en las muestras tanto de material procesado como de productos de la planta, debido a que los productos obtenidos en la planta son comercializados por su contenido de níquel.

También se realizó fusión de las muestras de proceso con el fin de determinar la fracción metálica presente⁸. El proceso de fusión se llevó a cabo por aluminotermia, que se basa en la fuerte reacción exotérmica entre el aluminio y el oxígeno, con lo cual se logra subir la temperatura del metal y lograr la fusión.

⁸ En el Anexo 1 se muestra el procedimiento de fundición realizado a las muestra de material tomadas en cada punto de muestreo de la planta de trituración.

El material fundido se vierte en moldes que facilitan separación física por la diferencia de densidades entre las fracciones metálicas y no metálicas.

3.4 CÁLCULO DE LA RAZÓN DE REDUCCIÓN

Con el fin de establecer la línea base operacional, se realizó el cálculo de la razón de reducción de tamaño y la razón de reducción global del proceso, los cuales sirven como indicadores del desempeño del proceso. Esta etapa fue de vital importancia, para analizar y comprender el proceso en cada etapa de operación realizando un diagnóstico de todo el sistema de trituración, clasificación y separación magnética.

3.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DETERMINACIÓN DE LA LÍNEA BASE OPERACIONAL.

Esta etapa se realizó con el fin de establecer y analizar las condiciones de operación y los índices de recuperación de níquel de la planta de trituración.

3.6 ELABORACIÓN Y PRESENTACIÓN DEL INFORME.

En esta etapa se elaboró y presentó el registro de toda la información recopilada en el desarrollo del proyecto en este informe final, que contendrá los índices de desempeño, la línea base operacional y el diagnóstico general de la planta de trituración.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 CÁLCULO DE LA RAZÓN DE REDUCCIÓN DE TAMAÑO PARA CADA ETAPA DE TRITURACIÓN Y RAZÓN DE REDUCCIÓN GLOBAL.

Para cada material procesado en la planta de trituración se calculó la razón de reducción de tamaño al 80% para cada etapa de trituración y la razón de reducción global.

4.1.1 Escoria de la subfase de refinación: Es un producto residual proveniente del proceso de producción que ingresa al sistema de trituración, clasificación y separación magnética para ser procesado; una vez triturado la Escoria de la Subfase de Refinación, se recoge y tritura nuevamente el material depositado en el compartimiento 3. En la tabla 3 se muestran los resultados de la razón de reducción al 80%.

El cálculo realizado para la razón de reducción al 80% cuando se procesa Escoria de la Subfase de Refinación en la planta de trituración se muestran en el anexo 2.

El material triturado del compartimiento 3 de Escoria de la Subfase de Refinación, se retira del compartimiento, se empaca para ser comercializado como chatarra de Ferroníquel triturado grueso, este producto tiene una razón de reducción de tamaño de 1.05.

En la tabla 3, se observa que cuando el material depositado en el compartimiento 3 de escoria de la subfase de refinación se tritura, la reducción de tamaño de las partículas en la trituración primaria es de 1.97 y en la trituración secundaria no hay razón de reducción de tamaño de partículas debido a que la razón de reducción es menor de 1. Por lo tanto, en la trituración secundaria no hay liberación de

partículas de valor presentes en el material cuando se tritura material del compartimiento 3.

Tabla 3: Razón de reducción al 80% para cada etapa de trituración y razón de reducción global de la planta de trituración cuando se procesa Escoria de la subfase de refinación, y se tritura material depositado en el compartimiento 3.

DESCRIPCIÓN MATERIAL	RAZÓN DE REDUCCIÓN AL 80%	
	Trituración de Escoria de la Subfase de Refinación	Trituración del material depositado en el compartimiento 3 de Escoria de la subfase de Refinación
Trituración Primaria	1,17	1,97
Trituración Secundaria	3,19	0,95
RAZÓN DE REDUCCIÓN GLOBAL		
Material en el Compartimiento # 1	16,77	10,35
Material en el Compartimiento # 2	2,97	2,61
Material en el Compartimiento # 3	1,17	1,05
Estéril	7,54	

Fuente: Autor de este documento.

4.1.2 Pérdidas del proceso de colado y granulación: Consiste en un producto residual proveniente de dos etapas del proceso de producción, que ingresa al sistema de trituración, clasificación y separación magnética para ser procesado. Una vez triturado, se recoge y tritura nuevamente el material depositado en el compartimiento 3. En la tabla 4 se muestran los resultados de la razón de reducción al 80%.

El cálculo realizado para la razón de reducción al 80% cuando se procesa este material en la planta de trituración, es similar al que se muestra en el anexo 2 para la Escoria de la Subfase de Refinación.

El material triturado del compartimiento 3 de Pérdidas del Proceso de Colado y Granulación, se retira del compartimiento, se empaca para ser comercializado como chatarra de Ferroníquel triturado grueso; este material se mezcla con el material empacado del compartimiento 3 de Escoria de la Subfase de refinación con el objetivo de completar lotes de 24 Toneladas, y finalmente ser vendido.

Tabla 4: Razón de reducción al 80% para cada etapa de trituración y razón de reducción global de la planta de trituración cuando se procesa el material de Pérdidas del proceso de colado y granulación, y se tritura material depositado en el compartimiento 3.

DESCRIPCIÓN MATERIAL	RAZÓN DE REDUCCIÓN AL 80%	
	Trituración de Pérdidas del Proceso de Colado y Granulación	Trituración del material depositado en el compartimiento 3 de Pérdidas del Proceso de Colado y Granulación
Trituración Primaria	1,02	1,17
Trituración Secundaria	2,67	3,19
RAZÓN DE REDUCCIÓN GLOBAL		
Material en el Compartimiento # 1	7,67	16,77
Material en el Compartimiento # 2	1,98	2,97
Material en el Compartimiento # 3	0,99	1,17
Estéril	5,31	7,54

Fuente: Autor de este documento.

En la tabla 4 se observa que cuando se tritura material depositado en el compartimiento 3, hay mayor razón de reducción de las partículas del material, comparada con la razón de reducción del material triturado inicial depositado en el compartimiento 3 producto de la trituración de Pérdidas del Proceso de Colado y Granulación. Por lo tanto, es importante realizar la trituración del material depositado en el compartimiento 3, para liberar las partículas de valor presentes en el material procesado, y poder aumentar la concentración de la Chatarra de ferróníquel triturado grueso.

4.1.3 Trituración del Compartimiento 1 y 2.: El material de los compartimientos 1 y 2 es producto de la trituración de:

- Escoria de la Subfase de Refinación.
- Material depositado en el compartimiento 3 de Escoria de la subfase de Refinación.
- Pérdidas del proceso de Colado y Granulación.
- Material depositado en el compartimiento 3 de Pérdidas del Proceso de Colado y Granulación.

El material de los compartimiento 1 y 2 es mezclado y procesado en la planta de trituración. Este material es procesado tres veces en el Sistema de trituración, clasificación y separación magnética.

En la tabla 5 se muestran los resultados de la razón de reducción al 80; para el material triturado de los compartimientos 1 y 2. A partir de estos resultados se puede decir que, en la segunda triturada de los compartimientos 1 y 2 hay mayor razón de reducción de tamaño de partículas en el estéril, que en el compartimiento 1. Esto lleva a que en la etapa de separación magnética, sea difícil separar partículas metálicas muy pequeñas (4,6mm) para depositarlas en el compartimiento 1.

El material triturado de los compartimientos 1 y 2 se retira y se empaca para ser comercializado. El material del compartimiento 1 se vende como chatarra de Ferroníquel triturado Fino, y el material del compartimiento 2 como Chatarra de Ferroníquel triturado Medio.

Tabla 5: Razón de reducción al 80% para cada etapa de trituración y razón de reducción global de la planta de trituración cuando se procesa material de los Compartimientos 1 y 2.

. DESCRIPCIÓN MATERIAL	RAZÓN DE REDUCCIÓN AL 80%		
	Primera triturada de los Compartimientos 1 y 2.	Segunda triturada de los Compartimientos 1 y 2.	Tercera triturada de los Compartimientos 1 y 2.
Trituración Primaria	2,18	2,53	2,46
Trituración Secundaria	0,90	0,77	1,23
RAZÓN DE REDUCCIÓN GLOBAL			
Material en el Compartimiento # 1	2,92	1,23	1,53
Material en el Compartimiento # 2	0,84	0,79	0,68
Material en el Compartimiento # 3	0,42	0,41	0,36
Estéril	2,30	3,48	1,71

Fuente: Autor de este documento.

4.2 CÁLCULO DE LA FRACCIÓN METÁLICA PARA CADA CORRIENTE DETERMINANTE DEL PROCESO DE RECUPERACIÓN DE FERRONÍQUEL.

Para cada material procesado en la planta de trituración se calculó la Fracción metálica en cada una de las corrientes determinantes en proceso.

4.2.1 Escoria de la subfase de refinación: Este material procesado en la planta se caracterizó por fracción metálica, para determinar el porcentaje en peso del material recuperable en forma de metal. En la tabla 6, se muestran los resultados de fracción metálica para el material triturado de escoria de la subfase de refinación y material triturado del compartimiento 3 de escoria de la subfase de refinación⁹.

Tabla 6: Fracción metálica para cada corriente determinante del proceso de recuperación de ferroníquel, cuando se procesa escoria de la subfase de refinación, y trituración del material depositado en el compartimiento 3 de este material.

DESCRIPCIÓN MATERIAL	% FRACCIÓN METÁLICA	
	Trituración de Escoria de la Subfase de Refinación	Trituración del material depositado en el compartimiento 3 de Escoria de la subfase de Refinación
Banda CV-57	23,76	55,12
Banda CV-59	24,84	71,00
Banda CV-60	54,13	87,16
Material en el Compartimiento # 3	57,20	88,28
Banda CV-61	42,96	88,60
Material en el Compartimiento # 2	47,44	84,72
Alimentador FE-31	37,61	60,00
Material en el Compartimiento # 1	45,44	62,36
Estéril	14,00	18,60

Fuente: Autor de este documento.

De los resultados obtenidos, se observa que cuando se tritura el material del compartimiento 3 aumenta la concentración en fracción metálica del material depositado en el compartimiento 3, el cual se comercializa como chatarra de ferroníquel triturado grueso con una fracción metálica de 88,28%.

4.2.2 Pérdidas del proceso de Colado y Granulación¹⁰: En la tabla 7 se muestran los resultados de fracción metálica para el triturado del material Pérdidas del proceso de colado y granulación, y para el material triturado del compartimiento 3.

De los resultados mostrados en la tabla 7, se observa que cuando se tritura material del compartimiento 3 se alcanza una fracción metálica del 98,24% en el material depositado en el compartimiento 3, el cual es comercializado como Chatarra de Ferroníquel triturado grueso.

La chatarra de ferroníquel triturado grueso que se obtiene como producto cuando se tritura Pérdidas del Proceso de Colado y Granulación, tiene mayor porcentaje de fracción metálica, comparada con la chatarra de ferroníquel triturada gruesa obtenida cuando se tritura Escoria de la Subfase de Refinación.

⁹ Los calculos realizados para la fracción metálica de Escoria de la Subfase de Refinación se muestran en el anexo 3 y en la tabla 13 se muestran nlos resultados.

Tabla 7: Fracción metálica para cada corriente determinante del proceso de recuperación de ferroníquel, cuando se procesa Pérdidas del Proceso de Colado y Granulación, y trituración del Compartimiento 3 de este material.

. DESCRIPCIÓN MATERIAL	% FRACCIÓN METÁLICA	
	Trituración de Pérdidas en el Proceso de Colado y Granulación	Trituración del material depositado en el compartimiento 3 de Pérdidas del Proceso de Colado y Granulación
Banda CV-57	40,28	64,68
Banda CV-59	42,20	94,80
Banda CV-60	64,68	96,00
Material en el Compartimiento # 3	64,68	98,24
Banda CV-61	64,68	96,28
Material en el Compartimiento # 2	91,56	96,24
Alimentador FE-31	40,14	78,00
Material en el Compartimiento # 1	79,12	83,80
Finos con Bajo contenido metálico	32	34,28

Fuente: Autor de este documento.

¹⁰ Las Pérdidas del proceso de Colado y Granulación se caracterizó por fracción metálica, para determinar el porcentaje en peso del material recuperable en forma de metal. Los cálculos realizados para la fracción metálica de este material se realiza de la misma manera que el que se describe en el Anexo 3.

4.2.3 Trituración del Compartimiento 1 y 2: En la tabla 8, se muestran los resultados de fracción metálica para la primera, segunda y tercera triturada del material de los compartimientos 1 y 2.

En los resultados obtenidos de Fracción Metálica cuando se tritura material de los compartimientos 1 y 2 (tabla 8), se observa que con la segunda triturada de los compartimientos 1 y 2, el material alcanza un porcentaje en fracción metálica de 97,44% para el compartimiento 1 y 92,80% para el compartimiento 2. Este porcentaje de fracción metálica representa una concentración óptima de metal para comercializar estos productos como chatarra triturada de ferróníquel fino y medio.

En la tercera triturada del material de los compartimiento 1 y 2, el porcentaje de fracción metálica del material de estos compartimientos disminuye con respecto a los resultados obtenidos en la segunda trituración de los compartimientos. Además de esto, se observa que la concentración metálica en la tercera triturada disminuye, y se concentra más en el material de Finos con Bajo Contenido Metálico. Finalmente, el material depositado en los compartimientos 1 y 2 producto de la tercera triturada se retira cada uno por separado, y respectivamente se empaca.

Tabla 8: Fracción metálica para cada corriente determinante del proceso de recuperación de ferroníquel, cuando se procesa material de los Compartimientos 1 y 2.

. DESCRIPCIÓN MATERIAL	% FRACCIÓN METÁLICA		
	Primera triturada de los Compartimiento 1 y 2.	Segunda triturada de los Compartimiento 1 y 2.	Tercera triturada de los Compartimiento 1 y 2.
Banda CV-57	49,40	82,40	94,20
Banda CV-59	58,84	86,40	90,24
Banda CV-60	78,00	94,00	89,80
Material en el Compartimiento # 3	93,88	98,40	94,80
Banda CV-61	82,84	90,60	90,00
Material en el Compartimiento # 2	76,16	92,80	92,12
Alimentador FE-31	60,40	93,40	87,60
Material en el Compartimiento # 1	89,20	97,44	91,12
Finos con Bajo contenido metálico	34,00	25,52	32,28

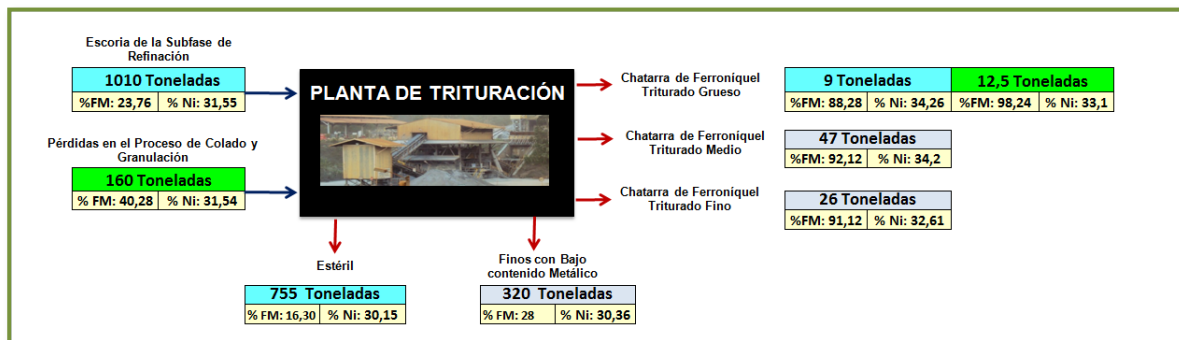
Fuente: Autor de este documento.

4.3 ÍNDICES DE RECUPERACIÓN DE FERRONÍQUEL EN LA PLANTA DE TRITURACIÓN.

Con base en los resultados obtenidos de fracción metálica, se calculó el porcentaje de recuperación de ferroníquel en la planta de trituración¹¹. En la figura 8 se muestra un esquema de las entradas y salidas de la planta de trituración con las siguientes características:

- Peso en toneladas del material de entrada y los productos obtenidos en el sistema de trituración, clasificación y separación magnética¹².
- Porcentaje de fracción metálica y porcentaje de Níquel presente en la parte metálica de las entradas y salidas de la planta de trituración¹².

Figura 8: Diagrama de Flujo de entradas y salidas a la planta de trituración.



Fuente: Autor de este documento.

En la figura 8, se muestra las toneladas, porcentaje en fracción metálica y porcentaje de níquel de las materias primas que ingresan mensualmente a la planta de trituración, los productos obtenidos y el material de rechazo de la planta. En la ecuación 5 se calculó el porcentaje de Escoria de la Subfase de Refinación que ingresa mensualmente a la planta de trituración. El 86,324% de lo que ingresa mensualmente a la planta de trituración corresponde a la Escoria de la Subfase de

Refinación, y el 13, 675 corresponde a las Pérdidas en el Proceso de Colado y Granulación (Ecuación 6).

$$\% \text{ Escoria de la Subfase de Refinación} = \frac{\text{Toneladas de Escoria de la Subfase de Refinación}}{\text{Toneladas de Materia Prima que ingresa a la Planta de Trituración}} * 100 \text{ (5)}$$

$$\% \text{ Escoria de la Subfase de Refinación} = \frac{1010}{1170} * 100$$

$$\% \text{ Escoria de la Subfase de Refinación} = 86,324$$

$$\% \text{ Pérdidas del Proceso de Colado y Granulación} = 100 - 86,324 \text{ (6)}$$

$$\% \text{ Pérdidas del Proceso de Colado y Granulación} = 13,675$$

En el diagrama de la Figura 8, la chatarra de ferróníquel triturado grueso está constituida por dos tipos de material; la casilla en azul claro muestra el material obtenido cuando se procesa Escoria de la subfase de Refinación, y la casilla verde claro corresponde al material obtenido cuando se procesan las Pérdidas del Proceso de Colado y Granulación.

Tabla 9¹⁰: Toneladas de níquel del material de entrada y productos obtenidos de la planta de trituración.

DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL	Toneladas de Níquel
Escoria de la Subfase de Refinación	75,71
Pérdidas del Proceso de Colado y Granulación	20,32
Chatarra de Ferróníquel Triturado Fino	7,75
Chatarra de Ferróníquel Triturado Medio	14,80
Chatarra de Ferróníquel Triturado Grueso (Obtenido cuando se procesa el compartimiento 3 de Escoria de la Subfase de Refinación)	2,72
Chatarra de Ferróníquel Triturado Grueso (Obtenido cuando se tritura el compartimiento 3 de Pérdidas del Proceso de Colado y Granulación)	4,06
Estéril	37,10
Finos con bajo contenido metálico	27,20

Fuente : Autor de este documento.

Con base en la información anterior, se calculó las toneladas de níquel del material de entrada y los productos obtenidos en la planta de trituración, siguiendo el procedimiento descrito en el anexo 4 (Ver Tabla 9).

Con base en los resultados que se muestran en la tabla 9, se calculó el porcentaje de recuperación global de la planta de trituración, mediante la siguiente ecuación:

$$\%Recuperación = \frac{\text{Toneladas de Níquel de los productos de la planta de trituración}}{\text{Toneladas de Níquel de los materiales de entrada a la planta de trituración}} * 100 \quad (5)$$

$$\%Recuperación = \frac{7,752 + 14,807 + 2,720 + 4,064 + 27,202}{75,712 + 20,326} * 100$$

$$\%Recuperación = 0,5827 * 100$$

$$\%Recuperación = 58,27$$

El porcentaje de recuperación de níquel de los productos obtenidos en la planta de trituración es entonces de 58,27%. De estos productos obtenidos, tres son comercializados como Chatarra de Ferroníquel Triturada y los Finos con bajo contenido metálico son adicionados al proceso de fundición-calcinación.

El material estéril es el rechazo de la planta de trituración, el cual es depositado en botadero. Mediante la siguiente ecuación se calculó el porcentaje de pérdidas en la planta de trituración.

$$\%Pérdidas = \frac{\text{Toneladas de Níquel en el Estéril}}{\text{Toneladas de Níquel de los materiales de entrada a la planta de trituración}} * 100 \quad (6)$$

$$\%P\acute{e}rdidas = \frac{37,104}{96,039} * 100$$

$$\%P\acute{e}rdidas = 37,104$$

Por tanto, el porcentaje global de pérdidas en el proceso de trituración, clasificación y separación magnética es de 37,1%. Según las mediciones realizadas, este material posee un tamaño bastante fino, de 4,6 mm, difícil de recuperar.

¹¹ En la sección 3.1.2 se describe el proceso de trituración, clasificación y separación magnética realizado en la planta para obtener como productos Chatarra de Ferróníquel Triturada, Estéril y Finos con Bajo contenido Metálico.

¹² Datos obtenidos del balance de masa reportado por planta de recuperación, en el mes de Diciembre del 2010.

5 CONCLUSIONES

5.1 La planta de trituración cumple con su función de recuperar gran parte del Níquel contenido en las pérdidas del proceso normal de producción de ferroníquel.

5.2 La diversidad de materias primas que ingresan al sistema de trituración, clasificación y separación magnética requieren ser diferenciadas puesto que la calidad de los productos obtenidos es distinta. Esto es muy importante, teniendo en cuenta que en el proceso no hay una medición completamente confiable de la calidad y cantidad de las materias primas, lo cual dificulta el diagnóstico y la determinación de la eficiencia del proceso. En general, el 86,32% de lo procesado mensualmente en la planta de trituración corresponde a la Escoria de la Subfase de Refinación, y el 13,67% restante corresponde a las Pérdidas en el Proceso de Colado y Granulación

5.3 Durante las pruebas, se determinó que no es necesario realizar el reproceso de los compartimientos 1 y 2, al triturar varias veces el material con el fin de concentrarlo. Los resultados obtenidos indican que es adecuado re-triturar solamente dos veces ya que al tercer y posterior reproceso aumenta muy poco la concentración metálica, y se incrementan las pérdidas en el estéril, los costos operativos y de mantenimiento.

5.4 El material estéril o de rechazo corresponde a un 37% de pérdidas globales del proceso en la planta de trituración. Este material tiene un tamaño de partículas de 4,6 mm, que por el proceso concentración por trituración no es posible recuperar.

6 RECOMENDACIONES

Según los resultados obtenidos en este proyecto, para el adecuado desempeño de la planta de trituración, se recomienda:

6.1 Procesar por separado el material alimentado al sistema de trituración, clasificación y separación magnética, realizando campañas de trituración por separado de la Escoria de la Subfase de Refinación y de las Pérdidas del Proceso de Colado y Granulación, debido a que el material triturado de este último tiene mayor concentración metálica que la Escoria de la Subfase de Refinación.

6.2 Realizar solamente dos pasadas del material de los compartimientos 1 y 2 por el sistema de trituración, clasificación y separación magnética para lograr la mejor concentración en fracción metálica de este material.

6.3 Realizar conformación de lotes de Chatarra de Ferroníquel Triturado Grueso por material procesado. Según los resultados obtenidos, se observa que el producto denominado *Chatarra de Ferroníquel Triturado Grueso* obtenido cuando se procesan las Pérdidas del Proceso de Colado y Granulación, tiene mayor concentración de fracción metálica que el que se obtiene cuando se procesa Escoria de la Subfase de Refinación.

6.4 Durante la ejecución de este proyecto, se observó que los martillos de la trituradora secundaria tenían mayor desgaste; se realizó una prueba controlada utilizando martillos de prueba con un recubrimiento de alta resistencia, lo cual elevó su duración de 18 horas a 36 horas de trituración, lográndose además un mejor desempeño en la concentración de material. Se recomienda entonces, continuar con este seguimiento para mejorar la eficiencia en la trituración primaria.

6.5 Finalmente, se aconseja realizar pruebas de concentración por molienda en el molino de bolas de la planta de MNR del material estéril producto del proceso de trituración, clasificación y separación magnética.

7 BIBLIOGRAFÍA

[1] ASTM. Standard Test Methods for Municipal Ferrous Scrap. ASTM E701-80. 2010.

[2] Currie, J.M.,.Screening. En:Unit operation in mineral processing. 1 ed. British Columbia.

[3]. Documento interno de Cerro Matoso S.A. Producto Alternos de CMSA., (2010).

[4].MEZA, EDGAR DANIEL. Manual de la Subfase de Recuperación de Ferroníquel. Cerro Matoso S.A., (2008).

[5]. PASCUAL, T.J. Trituración: Fundamentos de Tecnología Química. Barcelona: Universidad de Salamanca, 2005.

[6].Portal Minero S.A. Manual General de Minería y Metalurgia. 1ª edición, Abril 2006, portal minero ediciones, (2006).

[7]. RUIZ, JANNETH. Manual de Operación del Espectrómetro de Emisión a Chispa. Cerro Matoso S.A., (2009).

[8] Wills Barry A. Crushers. En:Mineral processing technology. 2 ed. Great Britain, 1981.

8. ANEXOS

ANEXO 1: Procedimiento de Fundición realizado a las muestras de material tomadas en cada punto de muestreo de la planta de trituración.

Figura 9: Procedimiento de Fundición realizado a las muestras tomadas en los puntos de muestreo de la planta de trituración.



Fuente: Autor de este documento.

En la figura 7 se presenta el procedimiento de fundición realizado a las muestras tomadas en cada punto de muestreo establecido inicialmente en la planta de trituración. Inicialmente se realizó cono y cuarteo de la muestra representativa tomada en cada punto de muestreo; respectivamente, se pesó 10kg de material, 600gr de Aluminio y 300 gr de espato flúor, se depositó en un crisol con revestimiento de refractario con capacidad de 10kg de fundición empotrado en una estructura metálica, fabricado por el taller de refractarios de Cerro Matoso S.A.

Después, se llevó a cabo el proceso de fusión por aluminotermia, que se basa en la fuerte reacción exotérmica entre el aluminio y el oxígeno que se inyecta por medio de una lanza refractaria, agitando el baño con esta, se logra subir la temperatura del metal para lograr la fusión. El material fundido se vierte en moldes que facilitan la separación física por la diferencia de densidades entre las fracciones metálicas y no metálicas.

Transcurrido 12 horas, se procedió a desencofrar la muestra solidificada del molde, separando la escoria del metal y pesando los productos independientemente.

ANEXO 2: Cálculo de la razón de reducción al 80% para cada etapa de trituración y razón de reducción global.

- **Escoria de la subfase de Refinación.**

Se realizó el análisis granulométrico para este tipo de material alimentado a la planta de trituración cumpliendo el siguiente procedimiento:

- ✓ Se pesó la muestra tomada en cada punto de muestreo.
- ✓ Se hizo pasar la muestra por una serie de mallas de las siguientes aberturas: 100, 63, 53, 50, 45, 31,50, 22.4, 12.50, 6.30, 3.35, 1, 0.50, 0.25, 0.15, 0.11, 0.06 mm; seguidamente, se pesó el material retenido en cada tamiz.
- ✓ Se calculó el porcentaje de pasante acumulado en cada tamiz, este resultado se muestra en la tabla 10.

En la tabla 10, se observa que para cada punto de muestreo, por ejemplo: Banda CV-57, se subrayó con color rojo el intervalo de porcentaje de pasante acumulado donde está el 80% del pasante de material. Para este intervalo, le corresponde un intervalo de abertura de malla donde está el tamaño de material correspondiente al 80% del peso de material pasante en mm.

Tabla 10. Porcentaje pasante acumulado de los puntos de muestreo en el sistema de trituración clasificación y separación magnética cuando se procesa Escoria de la Subfase de Refinación.

DESCRIPCION MATERIAL	Porcentaje de Pasante Acumulado																
	100,00	63,00	53,00	50,00	45,00	31,50	22,40	12,50	6,30	3,35	1,00	0,50	0,25	0,15	0,11	0,06	Fondo
BANDA CV-57	100	81,15	61,99	37,61	27,40	14,75	10,42	7,03	5,05	3,70	2,40	1,53	1,05	0,67	0,27	0,15	0
BANDA CV-59	100	100,00	80,36	66,47	61,73	47,51	43,44	40,73	39,38	39,38	21,24	13,89	8,76	4,11	1,84	0,71	0
BANDA CV-60	100	80,53	60,53	47,60	2,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0
COMPARTIMIENTO # 3	100	87,22	80,10	61,00	20,70	3,00	0,18	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0
BANDA CV-61	100	100,00	100,00	100,00	100,00	94,53	88,01	60,26	31,01	18,20	7,64	3,36	2,00	1,33	0,95	0,53	0
COMPARTIMIENTO # 2	100	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	84,22	54,75	29,46	11,64	2,10	1,55	1,33	1,13	0,91	0,45	0
ALIMENTADOR FE-31	100	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	99,61	75,95	54,29	30,69	18,67	13,30	5,47	2,82	0,81	0
COMPARTIMIENTO # 1	100	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	97,23	77,54	36,34	18,66	11,11	5,09	1,94	0,55	0
ESTERIL	100	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	99,32	70,97	43,81	23,75	15,05	10,89	6,60	3,42	2,10	0

Fuente: Autor de este documento.

- ✓ Cálculo de F80 y P80 para los puntos muestreo del Sistema de trituración, clasificación y separación magnética.

Cálculo del F80 en la Banda CV-57:

$$F80 = M1 - ((F1 - 80) * \left(\frac{M1 - M2}{F1 - F2}\right))$$

$$F80 = 63 - ((81,15 - 80) * \left(\frac{63 - 53}{81,15 - 61,99}\right))$$

$$F80 = 63 - (0,6002)$$

$$F80 = 62,40 \text{ mm}$$

Cálculo del P80 en la Banda CV-59:

$$P80 = M1 - ((P1 - 80) * \left(\frac{M1 - M2}{P1 - P2}\right))$$

$$P80 = 53 - ((80,36 - 80) * \left(\frac{53 - 50}{80,36 - 66,47}\right))$$

$$P80 = 53 - (0,599)$$

$$P80 = 52,9229 \text{ mm}$$

Tabla 11. F80 y P80 para los puntos de muestreo del sistema de trituración, clasificación y separación magnética.

DESCRIPCIÓN MATERIAL	F80(mm)	P80(mm)
Banda CV-57	62,40	
Banda CV-59		52,92
Banda CV-60		62,73
Compartimiento # 3		52,98
Banda CV-61		19,54
Compartimiento # 2		20,98
Alimentador FE-31		7,36
Compartimiento # 1		3,71
Estéril		8,27

Fuente: Autor de este documento.

- ✓ Cálculo de la Razón de Reducción al 80% para cada etapa de trituración y la razón de reducción global.

- Cálculo de la Razón de Reducción en la Trituración Primaria.

$$\text{Razón de Reducción (R) al 80\%} = \frac{F_{80_{\text{Banda CV-57}}}}{P_{80_{\text{Banda CV-59}}}}$$

$$\text{Razón de Reducción (R) al 80\%} = \frac{62,401}{52,9229}$$

$$\text{Razón de Reducción (R) al 80\%} = 1,179$$

- Cálculo de la Razón de Reducción en la Trituración Secundaria.

$$\text{Razón de Reducción (R) al 80\%} = \frac{F_{80_{\text{Banda CV-59}}}}{P_{80_{\text{Banda CV-61}}}}$$

$$\text{Razón de Reducción (R) al 80\%} = \frac{62,401}{19,543}$$

$$\text{Razón de Reducción (R) al 80\%} = 3,1930$$

- Cálculo de la Razón de Reducción Global.

- **Material en el Compartimiento # 1.**

$$\text{Razón de Reducción (R) al 80\%}_{\text{Compartimiento\# 1}} = \frac{F80_{\text{Banda CV-57}}}{P80_{\text{Compartimiento\# 1}}}$$

$$\text{Razón de Reducción (R) al 80\%} = \frac{62,401}{3,7191}$$

$$\text{Razón de Reducción (R) al 80\%} = 16,778$$

- **Material en el Compartimiento # 2.**

$$\text{Razón de Reducción (R) al 80\%}_{\text{Compartimiento\# 2}} = \frac{F80_{\text{Banda CV-57}}}{P80_{\text{Compartimiento\# 2}}}$$

$$\text{Razón de Reducción (R) al 80\%} = \frac{62,401}{20,9829}$$

$$\text{Razón de Reducción (R) al 80\%} = 2,973$$

- **Material en el Compartimiento # 3.**

$$\text{Razón de Reducción (R) al 80\%}_{\text{Compartimiento\# 3}} = \frac{F80_{\text{Banda CV-57}}}{P80_{\text{Compartimiento\# 3}}}$$

$$\text{Razón de Reducción (R) al 80\%} = \frac{62,401}{52,9844}$$

$$\text{Razón de Reducción (R) al 80\%} = 1,1777$$

- **Material Estéril.**

$$\text{Razón de Reducción (R) al 80\%}_{\text{Estéril}} = \frac{F80_{\text{Banda CV-57}}}{P80_{\text{Estéril}}}$$

$$\text{Razón de Reducción (R) al 80\%} = \frac{62,401}{8,2739}$$

$$\text{Razón de Reducción (R) al 80\%} = 7,541$$

Tabla 12: Razón de reducción al 80% para cada etapa de trituración y razón de reducción global de la planta de trituración.

DESCRIPCIÓN MATERIAL	RAZÓN DE REDUCCIÓN (R) al 80%
Trituración Primaria	1,17
Trituración Secundaria	3,19
RAZÓN DE REDUCCIÓN GLOBAL	
Material en el Compartimiento # 1	16,77
Material en el Compartimiento # 2	2,97
Material en el Compartimiento # 3	1,17
Estéril	7,54

Fuente: Autor de este documento.

ANEXO 3: Cálculo de la fracción metálica para cada punto de muestreo en la planta de trituración cuando se procesa escoria de la subfase de refinación.

- Cálculo de la Fracción Metálica para cada punto de muestreo en la planta de trituración.

Cálculo de la Fracción Metálica para la Banda CV-57:

$$\text{Fracción Metálica}_{\text{Banda Cv-57}} = \frac{Wf_{\text{Banda CV-57}}}{Wi_{\text{Banda CV-57}}} \times 100$$

$$Wf_{\text{Banda CV-57}} = 1188 \text{ gr}$$

$$Wi_{\text{Banda CV-57}} = 5000 \text{ gr}$$

$$\text{Fracción Metálica}_{\text{Banda Cv-57}} = \frac{1188}{5000} \times 100$$

$$\text{Fracción Metálica}_{\text{Banda Cv-57}} = 23,76$$

En la tabla 13 se muestra para cada punto de muestreo: el peso de la muestra a fundir inicialmente, el peso de la escoria y del metal producto de la fundición, y finalmente el resultado de la fracción metálica resaltado en rojo.

Tabla 13. Resultados de Fracción Metálica para cada punto de muestreo en la planta de trituración cuando se procesa escoria de la subfase de refinación.

DESCRIPCION MATERIAL	Resultados				
	Peso de la Muestra (gr)	Peso de Escoria (gr)	Peso de Metal (gr)	Peso Final (gr)	%Fracción Metálica
BANDA CV-57	5000	4800	1188	5988	23,76
BANDA CV-59	5000	4870	1242	6112	24,84
BANDA CV-60	5000	3900	2800	6700	54,13
COMPARTIMIENTO # 3	5000	4500	3210	7710	57,20
BANDA CV-61	5000	4548	2148	6696	42,96
COMPARTIMIENTO # 2	5000	3322	3322	6644	47,44
ALIMENTADOR FE-31	4520	3900	1700	5600	37,61
COMPARTIMIENTO # 1	4520	2392	2054	4446	45,44
ESTERIL	5000	4678	1600	6278	14,00

Fuente: Autor de este documento

ANEXO 4: Cálculo de la Toneladas de níquel de la escoria de la subfase de refinación.

Conociendo el peso, el porcentaje de fracción Metálica y el porcentaje de níquel presente en la parte metálica de los materiales de entrada y productos obtenidos en la planta de trituración, se calcula el porcentaje de recuperación de níquel.

Mediante el análisis químico se determinó los contenidos de Ni, Co, Cr, Si, P S, C, Al, y Fe presentes en las muestras tanto de los materiales procesados como de los productos obtenidos en la planta de trituración, ver tabla 14¹³.

Tabla 14: Composición química de los materiales de entrada y los productos obtenidos en la planta de trituración.

DESCRIPCIÓN MATERIAL	%Ni	%Co	%Cr	%Si	%P	%S	%C	%Al	%Fe
Escoria de la Subfase de Refinación	31,5	0,32	0,3	2,1	0,06	1,02	0,44	0,01	64,04
Pérdidas en el Proceso de Colado y Granulación	31,5	0,62	0,14	2,04	0,04	0,74	0,19	0,04	64,02
Chatarra de Ferroníquel Triturado Fino	32,6	0,68	0,07	1,44	0,03	0,29	0,2	1,23	63,3
Chatarra de Ferroníquel Triturado Medio	34,2	0,7	0,08	1,25	0,03	0,46	0,15	0,04	62,9
Chatarra de Ferroníquel Triturado Grueso (Obtenido cuando se procesa el compartimiento 3 de Escoria de la Subfase de Refinación)	34,26	0,71	0,33	0,91	0,03	0,30	0,06	0,01	63,2
Chatarra de Ferroníquel Triturado Grueso (Obtenido cuando se tritura el compartimiento 3 de Pérdidas en el Proceso de Colado y Granulación)	33,1	0,68	0,06	1,31	0,03	0,17	0,21	0,20	64,0
Estéril	30,15	0,61	0,21	0,77	0,04	0,94	0,08	0,01	67,09
Finos con Bajo contenido Metálico	30,36	0,60	0,2	1,56	0,07	0,10	0,23	0,08	66,77

Fuente: Autor de este documento.

En la tabla 15 se presentan el peso de material en toneladas y porcentaje de fracción metálica para los materiales procesados y los productos obtenidos en la planta de trituración.

Tabla 15: Peso del material en toneladas y porcentaje de fracción metálica para los materiales procesados y los productos obtenidos en la planta de trituración.

DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL	Peso Material (Toneladas)	% Fracción Metálica
Escoria de la Subfase de Refinación	1010	23,76
Pérdidas en el Proceso de Colado y Granulación	160	40,28
Chatarra de Ferróníquel Triturado Fino	26	91,12
Chatarra de Ferróníquel Triturado Medio	47	92,12
Chatarra de Ferróníquel Triturado Grueso (Obtenido cuando se procesa el compartimiento 3 de Escoria de la Subfase de Refinación)	9	88,28
Chatarra de Ferróníquel Triturado Grueso (Obtenido cuando se tritura el compartimiento 3 de Pérdidas en el Proceso de Colado y Granulación)	12,5	98,24
Estéril	755	16,31
Finos con Bajo contenido Metálico	320	28

Fuente: Autor de este documento.

Con base en la información presentada en la tabla 14 y 15, se calculó las toneladas de níquel de los materiales de entrada y productos obtenidos en la planta de trituración, usando la siguiente ecuación.

$$\text{Toneladas de Níquel} = \text{Peso Material (Toneladas)} * \% \text{Fracción Metálica} * \% \text{Níquel} \quad (7)$$

¹³ El contenido de níquel es de vital importancia, para calcular el porcentaje de recuperación de níquel; el contenido de los otros elementos presentes en las muestras analizadas son requeridos por el cliente al momento de comprar los productos obtenidos en la planta de trituración.

Por ejemplo, para calcular las toneladas de níquel de la escoria de la subfase de refinación:

$$\textit{Toneladas de Níquel} = 1010 * 0,2376 * 0,315$$

$$\textit{Toneladas de Níquel} = 1010 * 23,76\% * 31,5\%$$

$$\textit{Toneladas de Níquel} = 75,71$$