

UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA QUIMICA Y AMBIENTAL
VALPARAISO - CHILE



IMPLEMENTACION DE METODOLOGIA DE BALANCES Y MODELACION PARA PREDECIR LA RECUPERACIÓN POR FLOTACIÓN EN FUNCIÓN DEL TAMAÑO DE PARTICULA A ESCALA INDUSTRIAL

FERNANDA ZAMORANO WILDE

Memoria de titulación como requisito para optar al título de
INGENIERO CIVIL QUIMICO.

Profesor Guía

Dr. Juan Yianatos Bernardino

Correferente

M. Sc. Paulina Vallejos Aravena

Correferente externo

Dr. Gerson Sandoval Zambrano

Septiembre 2022

AGRADECIMIENTOS

A mis padres por su entrega incondicional a mí, quizás los que se han llevado la mayor carga de este proceso, los que han estado en mis altibajos, en todas mis celebraciones y todos mis aprendizajes, gracias por ser los mejores y por regalónearme siempre, por creer en mí.

A mis amigas y amigos tanto de la universidad como del colegio, por estar siempre alentándome a seguir y calmándome en los momentos de estrés vividos a lo largo de este periodo, gracias por ser parte de este camino, por el apoyo y por aguantarme.

A mi hermana y familia por entender mi falta de tiempo y dedicación a los estudios, por tener tanta fe en mí, incluso a veces más que yo. Por último, a los que ya no están, mis abuelos que fueron parte de mi inicio en la Universidad, llenos de orgullo, ahora les cuento que estoy terminando esta etapa y los llevo conmigo.

A mi tutor, Gerson Sandoval, gracias por la oportunidad brindada, por su disposición, sus conocimientos y paciencia.

A mi profesor guía, Juan Yianatos, y a mi correferente Paulina Vallejo, gracias por su guía, por la oportunidad y las enseñanzas.

RESUMEN

La flotación es un importante proceso de la industria minera utilizado para separar los minerales de interés de la ganga. A lo largo de la historia, este proceso ha evolucionado para ser cada vez más selectivo y eficiente, cambiando el tamaño de las celdas, los reactivos usados y las directrices de la operación planta, todo esto gracias al estudio más en profundidad de las múltiples variables que lo afectan.

El objetivo de esta tesis es desarrollar un modelo para el análisis de datos de flotación industrial y de laboratorio que permita una predicción robusta de la recuperación por flotación según el tamaño de partícula que mejorará las capacidades predictivas para el mejor rendimiento de la flotación.

El trabajo ha sido realizado mediante el análisis de datos planta y data de laboratorio externo con muestras de las principales corrientes *rougher* para planta 1 de Las Tórtolas (LT1). Se tiene dos campañas de muestreo conformando el set de datos utilizado.

Los datos disponibles de los turnos fueron utilizados para desarrollar una metodología para la resolución de los balances en IES (Integrated Extraction Simulator), como parte de la metodología se considera el filtro de los datos antes de ser balanceados, para evitar la presencia de datos con desviaciones importantes, ya sean por la toma de la muestra o al ser analizada.

Una vez balanceados los datos y calculadas las recuperaciones por tamaño, para interpretar de mejor forma los resultados, las recuperaciones por tamaño son clasificadas según variables de alimentación propias el mineral y también utilizando un resultado importante para el proceso (recuperación másica). Del análisis realizado se consideran como las variables más relevantes a la ley de alimentación y la recuperación másica.

Teniendo en cuenta las dos variables más influyentes de las analizadas, se continúa probando los resultados obtenidos para las recuperaciones por tamaño clasificando las obtenidas de data de compósitos mensuales luego de ser balanceados dichos datos. El fin de esta prueba es comprobar la representatividad de los resultados obtenidos. El ajuste con la data de compósitos mensuales es bueno, exceptuando algunos casos puntuales; sin embargo, es necesario considerar más factores como por ejemplo la variación de las leyes de alimentación a lo largo de los años y la calidad de la misma.

El siguiente paso en el trabajo sería la obtención del modelo; un aspecto que restringe la aplicación de esta metodología es la cantidad considerable de datos necesarios para el balance de masa de un circuito de flotación. Considerando el número de datos disponibles no es factible por ahora obtener el modelo.

También se debe tener en cuenta el error que se propaga en cada medición y cálculo asociado a los parámetros utilizados en la metodología, ya que, al tener un modelo, podría tener serias implicaciones en la interpretación de los resultados.

INDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	I
RESUMEN.....	II
INIDICE DE TABLA.....	VII
INIDICE DE FIGURAS.....	IX
INTRODUCCION	1
Antecedentes generales Anglo American	1
Estructura de la tesis	2
OBJETIVOS	4
1. FUNDAMENTOS TEORICOS.....	5
1.1. Proceso de flotación.....	5
1.1.1. Zona de colección	6
1.1.2. Zona de espuma.....	7
1.2. Equipos de flotación.....	8
1.2.1. Celdas mecánicas	9
1.2.2. Celdas neumáticas	10
1.3. Reactivos de flotación	10
1.3.1. Colectores	11
1.3.2. Espumantes.....	13
1.3.3. Modificadores	15
1.4. Balance de masa.....	15
1.5. Tamaño de partícula en flotación	17
1.5.1. Partículas finas	19
1.5.2. Partículas gruesas	20
1.5.3. Liberación.....	21

1.5.4.	Recuperación por tamaño	23
1.6.	Resumen.....	27
2.	METODOLOGIA PARA LA RESOLUCION DE BALANCES	28
2.1.	Planta Concentradora Las Tórtolas.	28
2.1.1.	Planta LT1.....	28
2.2.	Datos disponibles	29
2.2.1.	Toma de muestras y estado de cortadores	31
2.2.2.	Procesamiento de las muestras	34
2.3.	Selección de datos.....	35
2.4.	IES	40
2.5.	Resolución de balances	41
2.6.	Ajuste a datos turno	46
2.7.	Análisis de sensibilidad.....	48
2.8.	Resumen.....	55
3.	RESULTADOS.....	57
3.1.	Resultados balances	57
3.2.	Diferencia turnos balanceados	59
3.3.	Recuperación por tamaño.....	60
3.4.	Características del mineral	62
3.4.1.	Clasificación de rangos de variables	65
4.	ANALISIS COMPARATIVO COMPOSITOS MENSUALES.....	75
4.1.	Compósitos mensuales	75
4.1.1.	Gráficas promedio.....	82
4.2.	Confiabilidad data compósitos mensuales	85
4.3.	Comportamiento planta.....	86
4.4.	Principales causas de las desviaciones.....	88

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	90
REFERENCIAS	93
ANEXOS.....	98
A. <i>Flowsheet</i> LT1	98
B. Protocolo limpieza de muestreadores planta Las Tórtolas.	99
C. Estado de cortadores.....	108
D. Preparación de muestras.....	112
E. Leyes de Cu por tamaño.	121
F. Recuperaciones de Cu por tamaño.	127

INDICE DE TABLA

Tabla 2.1 Códigos datos turnos.....	30
Tabla 2.2 Tipo de muestreadores LT1.....	32
Tabla 2.3 Leyes analizadas corrientes rougher.....	36
Tabla 2.4 Resumen pesos parciales y Ley CuT turno 361A corriente alimentación.....	38
Tabla 2.5 Diferencia leyes turno 370A.....	40
Tabla 2.6 Leyes globales data turno.	47
Tabla 2.7 Resumen análisis de sensibilidad por turno.....	53
Tabla 3.1 Resultado balance leyes por tamaño turno 363A.....	59
Tabla 3.2 Diferencias leyes globales. Turnos descartados.	60
Tabla 3.3 Valores variables recuperación másica, Factor k y P_{80}	63
Tabla 3.4 Mineralogía dispatch por turno en corriente de alimentación.	64
Tabla 3.5 Cantidad de turnos por rango de Ley de alimentación y recuperación másica.	66
Tabla 3.6 Cantidad de turnos por rango de Ley de alimentación y Factor K.....	69
Tabla 3.7 Cantidad de turnos por rango de Ley de alimentación y P_{80}	70
Tabla 4.1 Valores de recuperación por tamaño según rango de recuperación másica y ley de alimentación.	75
Tabla 4.2 Meses correspondiente a cada rango según ley de alimentación y recuperación másica, datos mensuales.	76
Tabla 4.3 Errores calculados recuperaciones por tamaño promedio data compósitos mensuales.	85
Tabla C.1 Estado de cortadores turnos en estudio corriente de alimentación.....	108
Tabla C.2 Estado de cortadores turnos en estudio corriente de concentrado rougher.....	109
Tabla C.3 Estado de cortadores turnos en estudio corriente de relave rougher.	110
Tabla E.1 Leyes de Cu por malla corriente de alimentación.....	121
Tabla E.2 Pesos parciales [g] por malla corriente de alimentación.	122
Tabla E.3 Leyes de Cu por malla corriente de concentrado rougher.	123
Tabla E.4 Pesos parciales [g] por malla corriente de concentrado rougher.....	124
Tabla E.5 Leyes de Cu por malla corriente de relave rougher.....	125
Tabla E.6 Pesos parciales [g] por malla corriente de relave rougher.	126

Tabla F.1 Valores calculados de recuperación másica y recuperación de Cu rougher turno 363A.	127
Tabla F.2 Recuperaciones de Cu por tamaño data balanceada.....	127

INIDICE DE FIGURAS

Figura 1 Ubicación mina Los Bronces y planta Las Tórtolas (<i>AngloAmerican, 2022</i>).	1
Figura 1.1 Esquema del proceso de flotación (Wills & Finch, 2015).	6
Figura 1.2 Transporte de masa en flotación (Yianatos & Vinnett, 2015).	8
Figura 1.3 Banco de 9 celdas en arreglos de 3-3-3 (Yianatos et al., 2005).....	9
Figura 1.4 Las 3 zonas hidrodinámicas de una celda mecánica (Fuerstenau & Han, 2003). ...	10
Figura 1.5 A: Colector disuelto en fase acuosa; B: Adsorción en la superficie del mineral; C: Interacción burbuja de aire y superficie hidrófoba (Kelly & Spottiswood, 1982).	11
Figura 1.6 Cobertura de superficie y ángulo de contacto críticos en función del tamaño de partícula (Crawford & Ralston, 1988).	13
Figura 1.7 Tamaño de burbuja en función de la concentración de espumante (Finch et al., 2008).	14
Figura 1.8 Diagrama celda flotación.	16
Figura 1.9 Ley de concentrado v/s recuperación de mineral.	17
Figura 1.10 Curva de recuperación por tamaño para cobre (Yianatos et al., 2000).	19
Figura 1.11 Simulación factor de arrastre en función del tamaño de partícula (Neethling & Cilliers, 2009).....	20
Figura 1.12 Constante cinética según tamaño de partícula y grado de liberación (Welsby, Vianna, & Franzidis, 2010)	22
Figura 1.13 Pasante acumulado por especie mineral (Bazin et al., 1994).....	24
Figura 1.14 Recuperación calculada por tamaño según especie mineralógica (Bazin et al., 1994).	25
Figura 1.15 Rendimiento metalúrgico para distribuciones hipotéticas (Bazin et al., 1994). ..	26
Figura 2.1 Circuito flotación rougher planta LT1.	29
Figura 2.2 Muestreadores de pulpa planta LT1.	31
Figura 2.3 Leyes de alimentación rougher turno y analizadas.	39
Figura 2.4 Leyes de concentrado rougher turno y analizadas.	39
Figura 2.5 Leyes de relave rougher turno y analizadas.	40
Figura 2.6 Diagrama para balance IES.....	42
Figura 2.7 Datos balance corriente de alimentación en IES.	43

Figura 2.8 Leyes de cobre por tamaño a balancear.....	45
Figura 2.9 Resultado del balance de masa.	45
Figura 2.10 Elemento “Subset” en alimentación rougher.	46
Figura 2.11 Resultado óptimo del balance.	46
Figura 2.12 Sensibilidad turno 362B corriente alimentación rougher.	50
Figura 2.13 Sensibilidad turno 362B corriente concentrado rougher.	50
Figura 2.14 Sensibilidad turno 362B corriente relave rougher.	51
Figura 2.15 Sensibilidad turno 373A corriente alimentación rougher.	51
Figura 2.16 Sensibilidad turno 373A corriente concentrado rougher.....	52
Figura 2.17 Sensibilidad turno 373A corriente relave rougher.	52
Figura 2.18 Resultado sensibilidad turno 362B.	54
Figura 2.19 Resultado sensibilidad turno 373A.	55
Figura 3.1 Resultado balance pesos pasantes y ley de cabeza alimentación, turno 361A.	58
Figura 3.2 Resultado balance leyes por tamaño alimentación, turno 361A.	58
Figura 3.3 Recuperación por tamaño 26 turnos balanceados, campaña 1.	60
Figura 3.4 Recuperación por tamaño 10 turnos balanceados, campaña 2.	61
Figura 3.5 Contenido de cobre en masa total por fracción de tamaño.....	62
Figura 3.6 Recuperación datos turno y IES.	66
Figura 3.7 Recuperación por tamaño, baja ley, rangos de recuperación másica.....	67
Figura 3.8 Recuperación por tamaño, alta ley, rangos de recuperación másica.....	68
Figura 3.9 Recuperación por tamaño, baja ley, rangos de Factor K.	69
Figura 3.10 Recuperación por tamaño, alta ley, rangos de Factor K.....	70
Figura 3.11 Recuperación por tamaño, baja ley, rangos de P_{80}	71
Figura 3.12 Recuperación por tamaño, alta ley, rangos de P_{80}	72
Figura 3.13 Recuperación por tamaño. Alta ley, bajo P_{80} , rangos de MP.	73
Figura 3.14 Recuperación por tamaño. Alta ley, alto P_{80} , rangos de MP.	73
Figura 4.1 Ajuste compósito mensual a $CuT < 0.64$ $MP < 9$	77
Figura 4.2 Ajuste compósito mensual a $CuT > 0.64$ $MP > 12.5$	77
Figura 4.3 Ajuste compósito mensual a $CuT > 0.64$ $MP < 9$ 2017.	78
Figura 4.4 Ajuste compósito mensual a $CuT > 0.64$ $MP < 9$ 2018.	79
Figura 4.5 Ajuste compósito mensual a $CuT > 0.64$ $MP < 9$ 2019.	79
Figura 4.6 Ajuste compósito mensual a $CuT > 0.64$ $MP < 9$ 2020.	80

Figura 4.7 Ajuste compósito mensual a $CuT > 0.64$ $MP < 9$ 2021.	80
Figura 4.8 Ajuste compósito mensual a $CuT > 0.64$ $9 < MP < 12.5$ 2019.	81
Figura 4.9 Ajuste compósito mensual a $CuT > 0.64$ $9 < MP < 12.5$ 2020.	82
Figura 4.10 Ajuste compósito mensual a $CuT > 0.64$ $9 < MP < 12.5$ 2021.	82
Figura 4.11 Recuperación por tamaño $CuT > 0.64$ $MP > 12.5$	83
Figura 4.12 Recuperación por tamaño $CuT < 0.64$ $MP < 9$	84
Figura 4.13 Recuperación por tamaño $CuT > 0.64$ $MP < 9$	84
Figura 4.14 Recuperación por tamaño $CuT > 0.64$ $9 < MP < 12.5$	85
Figura 4.15 Recuperaciones globales $LT1 + LT2$ según % alimentación stock.	87
Figura A.1 Diagrama de proceso de flotación colectiva planta LT1.	98

INTRODUCCION

Antecedentes generales Anglo American

Anglo American es una compañía minera cuya casa matriz está ubicada en Londres, Inglaterra. La compañía cuenta con operaciones en África, América, Asia y Europa. Entre sus principales productos se encuentran platino, diamantes, cobre, níquel, hierro, carbón y otros activos mineros e industriales. En el caso de las operaciones presentes en Chile, se encuentra la mina El Soldado, el 50,1% de la mina Los Bronces y la fundición Chagres, además del 44% de la mina Collahuasi, la unidad de negocios corresponde a Cobre, dentro de la cual los productos incluyen cátodos de cobre, concentrado de cobre y productos secundarios asociados, como molibdeno y plata. (AngloAmerican, 2022)

La mina Los Bronces se ubica en la zona de montaña de la comuna de Lo Barnechea, Región Metropolitana, a 3.500 metros sobre el nivel del mar y a 65 kilómetros de Santiago, mientras que la planta Las Tórtolas, donde es procesado el mineral extraído en la montaña, se encuentra en la comuna de Colina. En la Figura. 1 se aprecia la ubicación de mina y planta, y como éstas se comunican a través del mineroducto de 56 km de extensión.



Figura. 1 Ubicación mina Los Bronces y planta Las Tórtolas (AngloAmerican, 2022).

En 2020, Los Bronces produjo 324.700 toneladas de cobre fino, entre cátodos de alta pureza y cobre contenido en concentrado. Los Bronces tiene una dotación aproximada de 5.300 trabajadores, entre personal propio y contratistas de operación y proyectos. (AngloAmerican, 2022)

La División Los Bronces cuenta con las plantas de molienda “Los Bronces” y “Confluencia”, asimismo, en planta Las Tórtolas se tienen dos plantas concentradoras, denominadas Las Tórtolas 1 y 2. Después de ser espesada la pulpa de mineral en las plantas de Los Bronces y

Confluencia, se envía a través de un mineroducto cerrado de acero hacia las Plantas 1 y 2 de Las Tórtolas respectivamente, por tuberías independientes. Dada la diferencia de cotas entre las plantas de molienda y las concentradoras, no se requiere de energía externa, por el contrario, se tienen estaciones disipadoras de energía para controlar la presión y la velocidad de la pulpa. En ambas plantas concentradoras, el producto corresponde a concentrado de cobre y molibdeno.

Estructura de la tesis

Para dar cumplimiento a los objetivos planteados en el inciso anterior, el desarrollo del trabajo de memoria se compone de cuatro capítulos, los cuales se describen a continuación.

Capítulo 1

Se describen los antecedentes generales en el contexto de la flotación de minerales, sus principios básicos, equipos y reactivos que se utilizan en el proceso de flotación.

Se presenta una revisión crítica de la literatura con relación al tamaño de partícula y cómo influye en la recuperación de mineral valioso, haciendo énfasis en el estudio mencionado en los objetivos, en el que está basado el trabajo realizado.

Capítulo 2

Se describe en detalle la metodología que se debe seguir para la correcta solución de los balances, además se entrega antecedentes de las campañas de muestreo consideradas en este trabajo, la forma en que los datos son colectados en planta y procesados en laboratorio. Además, se describe el análisis de sensibilidad realizado para la primera campaña de muestreo con una metodología de solución de balances distinta a la seleccionada.

Capítulo 3

Se presentan los resultados del estudio, obtenidos de la solución de los balances, se muestra las recuperaciones por tamaño calculadas y como se clasifican estas para poder estudiarlas de forma más precisa e interpretar los resultados de forma más simple.

Capítulo 4

Se presenta el análisis realizado a los datos de compósitos mensuales probando las curvas de recuperación por tamaño obtenidas de la clasificación por rangos en el capítulo 3, comparando su ajuste con las recuperaciones por tamaño obtenidas de la data de compósitos mensuales balanceada en IES. Además, se presentan antecedentes de la planta para el último tiempo que permiten comprender de mejor manera el comportamiento de los datos. se analiza la respuesta de los datos y la confiabilidad de los compósitos en una discusión detallada.

OBJETIVOS

Implementar nueva metodología de balances y modelación de especies valiosas, incorporando información de perfil granulométrico para reconciliar compósitos mensuales con data de producción, como también para ser implementado en distintas unidades geometalúrgicas, UGM.

- Construir una nueva metodología basada en rigurosidad estadística para reconciliar data de producción con datos metalúrgicos que poseen información detallada de ocurrencia de especies valiosas por clase de tamaño de partículas.
- Obtener Modelo tipo Bazin (1994) para estimar recuperación por tamaño, a partir de caracterización de análisis químicos y mineralógicos.

CAPITULO 1

1. FUNDAMENTOS TEORICOS

1.1. Proceso de flotación

La flotación es un proceso de separación físico-químico ampliamente utilizado en la industria, hoy en día es el método de procesamiento de minerales más importante en la industria minera. Pero también es utilizado con otros fines, en el tratamiento de aguas, para la remoción de aceites y grasas, en el reciclaje de plástico y en la industria del reciclaje de papel para la remoción de tintas. (Mesa & Brito-Parada, 2019)

Este proceso involucra 3 fases, y está basado en la interacción entre las burbujas y las partículas de sólido suspendidas. Mediante la introducción de burbujas de aire, se pueden separar las partículas hidrófobas o flotables de las hidrófilas en una suspensión acuosa. Las partículas de mineral chocan con las burbujas, adhiriéndose de forma selectiva de acuerdo con el carácter hidrófobo del mineral, formando el agregado partícula – burbuja. Después de adherirse a las burbujas, las partículas hidrófobas ascienden hacia la superficie, como consecuencia de la menor densidad aparente respecto al medio líquido de las burbujas, formando una espuma en la parte superior de la suspensión, siendo descargadas al concentrado. Los agregados con menor energía de adhesión pueden romperse y retornar a la pulpa. Por otro lado, las partículas más hidrófilas (generalmente ganga) descienden hacia el fondo de la pulpa y se dirigen hacia las colas. (Bravcová et al., 2015) (Yianatos & Vinnett, 2015)

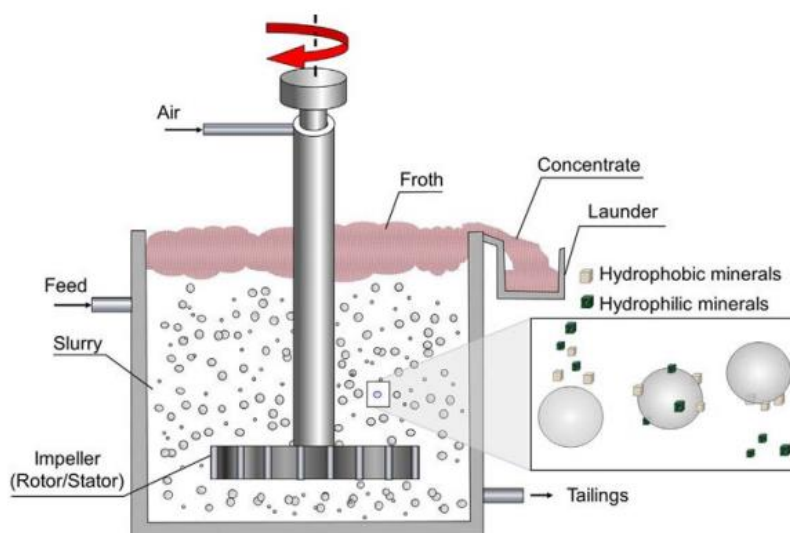


Figura 1.1 Esquema del proceso de flotación (*Wills & Finch, 2015*).

En la Figura 1.1 se muestra un esquema del proceso de flotación en una celda mecánica con agitación. El agitador genera la suficiente turbulencia en la fase de pulpa para provocar la colisión entre las partículas y burbujas, formando el agregado partícula-burbuja y la espuma, donde el mineral valioso generalmente se encuentra. La función de la espuma es retener a las partículas recolectadas para que sean transportadas hacia la descarga de la celda y formar el concentrado, otra función es mejorar la selectividad general del proceso. La espuma logra esto al permitir que el material arrastrado se drene mientras retiene preferentemente el material adherido. Esto aumenta la ley del concentrado, pero al mismo tiempo se ve limitada la recuperación del mineral de interés. La relación entre la recuperación y la ley es inversa y debe ser controlada considerando las limitaciones de la operación. (*Wills & Finch, 2015*)

En el proceso de flotación, las partículas se transfieren desde la zona de colección de la celda a la fase de espuma, y desde la espuma hasta el concentrado, la eficiencia de este último proceso de transferencia se define como la recuperación de espuma. (*Fuerstenau et al., 2007*)

1.1.1. Zona de colección

En la zona de colección se produce el primer contacto entre las partículas de mineral y las burbujas de gas ascendentes. La velocidad de colección y recuperación de las partículas dependen de la probabilidad de colisión y adhesión, dicha probabilidad es representada generalmente por un modelo de primer orden. Mientras mayor es la diferencia entre la velocidad de colección del componente de interés con respecto a otros minerales no valiosos, más selectiva es la separación. (*Yianatos & Vinnett, 2015*)

Para promover las colisiones partícula-burbuja, se requiere un mezclado intenso para suspender las partículas, generar burbujas finas y dispersar el gas. (Yianatos *et al.*, 2005)

Las condiciones del mezclado son determinantes por la hidrodinámica de la zona de colección. El proceso se puede aproximar a dos casos distintos, respecto de la hidrodinámica, flujo pistón, en un proceso de flotación batch, y mezclado perfecto, en un proceso de flotación continua. En la práctica, la operación industrial corresponde a un proceso continuo.

Las principales variables, según la literatura revisada en este trabajo, que influyen en el proceso de concentración por flotación son: (Yianatos & Vinnett, 2015)

- Tiempo de residencia y régimen de mezcla.
- Reactivos.
- Tamaño de partículas y liberación.
- Dispersión del gas.

1.1.2. Zona de espuma

Esta etapa corresponde a la separación del agregado partícula-burbuja que ha sido transportado desde la pulpa hasta la interfase para formar un lecho de espuma. La espuma es descargada de los equipos por rebalse formando el concentrado.

En la Figura 1.2 se muestra el transporte de masa en flotación, con los principales flujos, se observa que la separación no es perfecta, algunas de las razones son el transporte de partículas sólidas que entran a la espuma por arrastre mecánico o hidráulico y son llevadas hacia la descarga, ensuciando el concentrado.

Si la fase de espuma no es lo suficientemente estable, las burbujas mineralizadas que entran a la zona de espuma pueden colapsar perdiendo a las partículas del mineral de interés, las que retornan a la pulpa, lo que representa una pérdida en recuperación y la ruptura del agregado partícula-burbuja. Por el contrario, una espuma demasiado estable puede provocar un arrastre no selectivo de partículas hidrófilas de ganga, producto de la recuperación excesiva de agua, reduciendo la ley de concentrado. (Zhang, 2016).

Otra forma de arrastre en el sentido contrario se puede dar por parte del líquido que está contenido entre las burbujas que forman la espuma, este retorna a la pulpa acarreando parte

del sólido, favoreciendo a su paso el desprendimiento de minerales flotables con bajo grado de liberación.

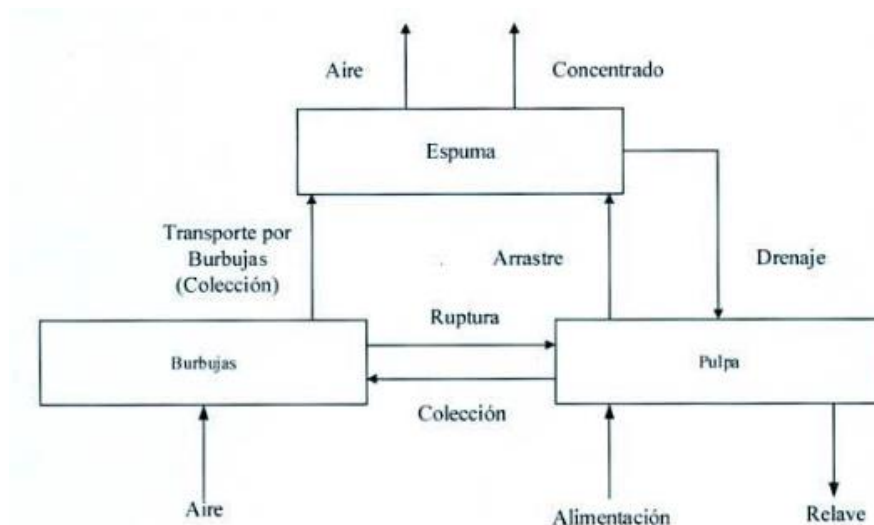


Figura 1.2 Transporte de masa en flotación (Yianatos & Vinnett, 2015).

1.2. Equipos de flotación

Las celdas de flotación durante los años han ido aumentando su capacidad considerablemente, llegando incluso a volúmenes superiores a 600 m³. En las plantas concentradoras las celdas se agrupan comúnmente en serie dando origen a los bancos de flotación, este arreglo tiene el fin de evitar el cortocircuito de la pulpa al interior del sistema. (Yianatos et al., 2005) Esto mejora la distribución del tiempo de residencia de las partículas en las celdas, aumentando la probabilidad de que las partículas que requieren mas tiempo puedan alcanzar la zona de espuma. (Kelly & Spottiswood, 1982)

Las variables que controlan el proceso de flotación varían con las condiciones de operación y el diseño del equipo. La transferencia de masa no será perfecta, por lo que los equipos no son eficientes en la formación y remoción de la espuma. Un diseño adecuado de los equipos debe considerar una zona de mezclado con alta intensidad, una región de separación y calma, minimizar el arrastre de pulpa al concentrado y una interfase pulpa-espuma estable (Fuerstenau *et al.*, 2007). En la Figura 1.3 se muestra como ejemplo un banco de 9 celdas en arreglo 3-3-3. Es posible clasificar a los equipos de flotación en dos categorías, correspondientes a las celdas mecánicas y celdas neumáticas.

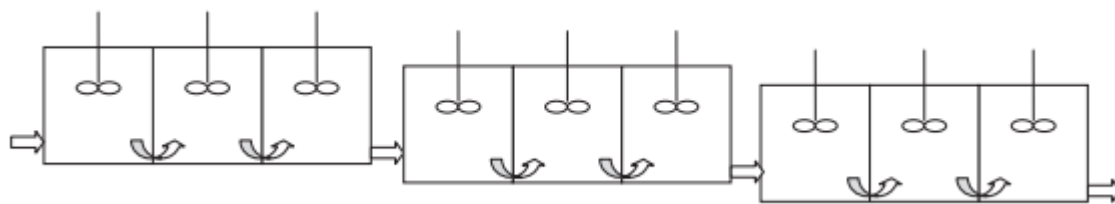


Figura 1.3 Banco de 9 celdas en arreglos de 3-3-3 (Yianatos et al., 2005)

1.2.1. Celdas mecánicas

Las celdas de flotación mecánica no han cambiado significativamente su diseño a lo largo de los años, estas celdas se caracterizan por poseer un medio de agitación que genera una región altamente turbulenta producida por el impulsor, encargado de proporcionar la agitación necesaria para mantener las partículas en suspensión, dispersar las burbujas de aire y favorecer la formación del agregado partícula-burbuja. (Kelly & Spottiswood, 1982)

El diseño del impulsor consiste en una turbina con paletas, a través del impulsor el gas es introducido para proporcionar buena dispersión, el aire puede ser introducido a presión, o ingresar por la succión creada en el impulsor (auto-aspirante), en este caso el flujo de aire que ingresa se encuentra limitado por el diseño y velocidad del impulsor. El estator está ubicado alrededor del impulsor y tiene por función la creación de zonas menos turbulentas en el equipo, transformando los flujos horizontales de burbujas y pulpa en uno radial, reduciendo los remolinos horizontales de la pulpa. (Fuerstenau et al., 2007) En cuanto a la geometría de estas celdas, puede ser rectangular o cilíndrica, siendo las segundas las que proporcionan las mejores condiciones en la celda reduciendo las zonas muertas. (Yianatos & Vinnett, 2015)

Una celda de flotación mecánica requiere la generación de tres zonas hidrodinámicas, en la Figura 1.4 se ilustran, la región turbulenta se encuentra cercana al impulsor, la turbulencia es necesaria para lograr la suspensión de los sólidos y la dispersión del gas en burbujas. Por sobre la zona turbulenta se encuentra la zona de calma, adyacente a la zona de espuma donde se elevan las burbujas cargadas de mineral sin separación turbulenta de las partículas adheridas a la superficie de la burbuja. La tercera zona corresponde a la espuma.

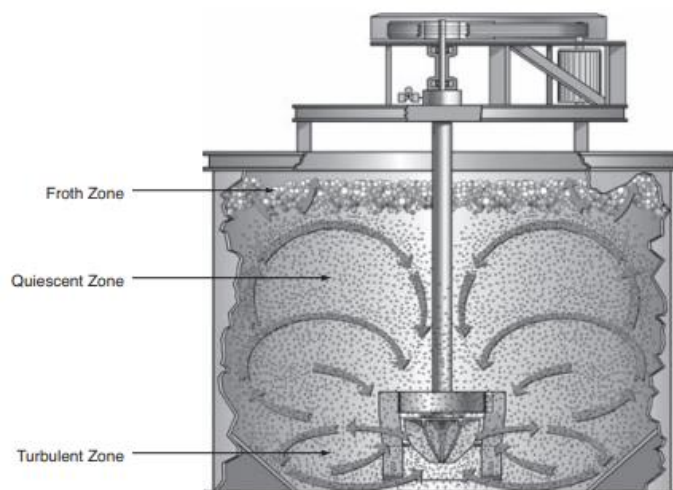


Figura 1.4 Las 3 zonas hidrodinámicas de una celda mecánica (Fuerstenau & Han, 2003).

1.2.2. Celdas neumáticas

Las celdas neumáticas a diferencia de las mecánicas no tienen agitación mecánica, poseen un sistema de generación de burbujas usando aire comprimido suministrado a través de inyectores, utilizan agua de lavado y tienen una geometría distinta respecto a la relación de altura y diámetro (columnas). Son utilizadas comúnmente en circuitos de limpieza. Las columnas se clasifican según la forma de contactar la pulpa en co-corriente y contra-corriente. (Yianatos & Vinnett, 2015)

Las celdas neumáticas se caracterizan por prescindir del uso de partes móviles para lograr la dispersión de aire y agitación de pulpa al interior del equipo de flotación, y en su reemplazo emplean como fuerza motriz el aire. (Imhof, 1988)

1.3. Reactivos de flotación

Con el fin de modificar algunas propiedades superficiales de las partículas para promover la formación del agregado partícula-burbuja y la recuperación de mineral de interés, se agregan reactivos químicos (colectores, espumantes, modificadores, entre otros), para acondicionar la pulpa de mineral. Los reactivos modifican las propiedades superficiales de los minerales para facilitar su colección y el transporte selectivo. (Zhu *et al.*, 2014)

La selección de los reactivos adecuados para asegurar los mejores resultados de separación y concentración, junto con el control de la adición de reactivos, son aspectos muy importantes

(Bulatovic, 2007). Los reactivos se clasifican según la función específica que cumplen en colectores, espumantes y modificadores.

1.3.1. Colectores

Existen minerales que presentan hidrofobicidad natural, como el Carbón, Pirita, Galena, Estibina, Calcosina, Molibdenita, Grafito, Azufre, Talco, entre otros. (Zhao et al., 2014) Sin embargo, en algunos casos el nivel de hidrofobicidad natural no es suficiente, y dado que la interacción entre partículas y burbujas está definida por la hidrofobicidad, se hace necesaria la adición del colector, encargado de mejorar la hidrofobicidad de las partículas que contienen el mineral que se desea recuperar, aumentando la probabilidad de que se adhieran las partículas a las burbujas. (Gupta & Yan, 2016)

Los colectores son sustancias orgánicas que permiten entregar características hidrófobas a un mineral de naturaleza hidrófila, o aumentar el nivel de hidrofobicidad de uno hidrófobo. Consisten en un grupo funcional polar de carácter hidrófilo y una cadena hidrocarbonada (sección apolar), el grupo polar se puede modificar para ser atraído específicamente por ciertos minerales. En la Figura 1.5 se aprecia el mecanismo utilizado por los colectores, si está presente una superficie mineral adecuada y el grupo polar es atraído por la superficie sólida, los iones colectores se adsorberán en la superficie del mineral, formando una película delgada en la superficie del mineral, haciendo la superficie hidrófoba. Al entrar en contacto con una burbuja de aire, la cadena de hidrocarburos se extenderá en la fase de aire, si la fuerza de enlace entre el grupo polar y la superficie mineral es lo suficientemente fuerte, la partícula será elevada a la superficie. (Kelly & Spottiswood, 1982)

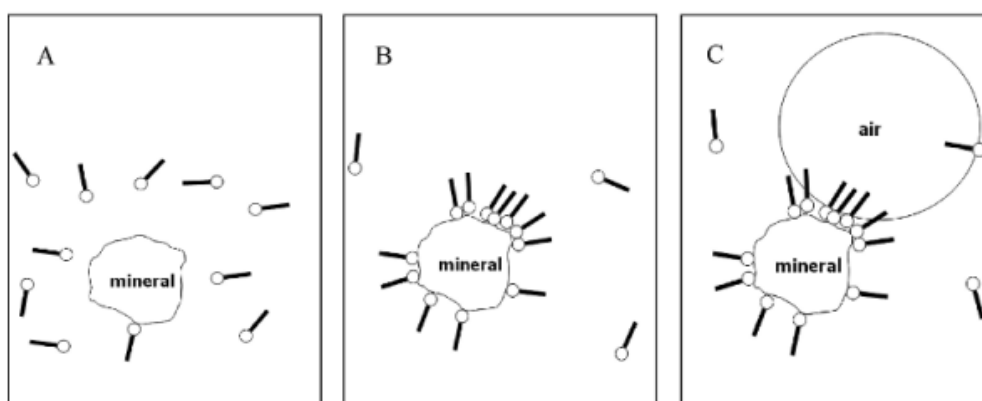


Figura 1.5 A: Colector disuelto en fase acuosa; B: Adsorción en la superficie del mineral; C: Interacción burbuja de aire y superficie hidrófoba (Kelly & Spottiswood, 1982).

La elección del colector es compleja, en la industria hay una amplia gama de estos y la selección del indicado tiene muchos factores a considerar (Prasad, 1992). Una descripción más detallada podría incluir una caracterización de la proporción entre especies hidrófobas (azufre, moléculas colectoras) y especies hidrófilas presentes en las superficies minerales (Piantadosi & Smart, 2002) (Piantadosi et al., 2000). Otra evaluación importante considera el tiempo en que se maximiza la recuperación con los distintos colectores, siendo el de menor tiempo el más atractivo. (Ackerman et al., 1987)

Los colectores se dividen en dos grupos, los colectores ionizables y no ionizables. Los colectores ionizables son compuestos que se disocian en agua, corresponden a moléculas orgánicas heteropolares, dependiendo de la carga resultante presentan dos subgrupos, colectores aniónicos y catiónicos, siendo los primeros los más utilizados, en este grupo se encuentran los Xantatos y Ditiofosfatos, los catiónicos están representados por las aminas y derivados amínicos. Los colectores no ionizables también se dividen en dos grupos. El primer grupo son los reactivos que contienen azufre bivalente, el segundo grupo contiene aceites de hidrocarburos no polares. (Bulatovic, 2007)

En relación con el tamaño de partícula, para un tamaño dado existe un ángulo de contacto único, por debajo del cual la partícula no flotará, por lo tanto, existe una región donde la flotación es posible según el tamaño de partícula y el ángulo de contacto (Crawford & Ralston, 1988). Esta relación también depende del grado de cubrimiento de la superficie del mineral provisto por el colector, como se puede ver en la Figura 1.6 se describe la región donde la flotación ocurre para el cuarzo a distintos tamaños, ángulos de contacto y porcentaje de cobertura del colector.

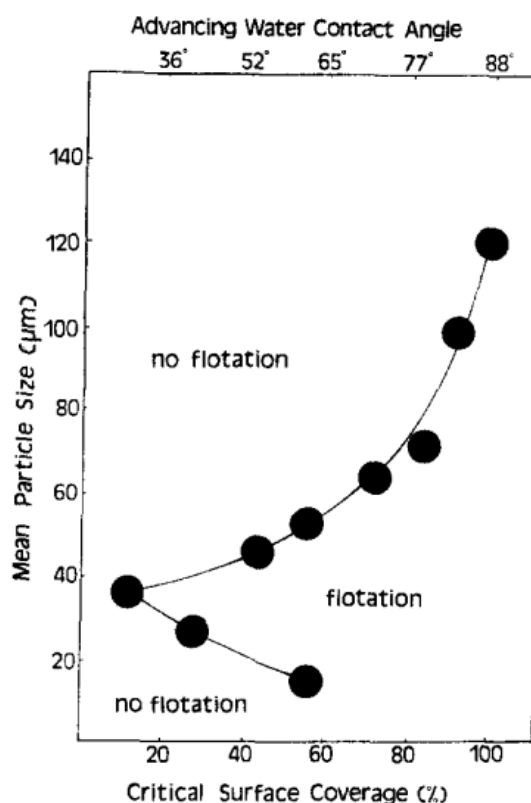


Figura 1.6 Cobertura de superficie y ángulo de contacto críticos en función del tamaño de partícula (Crawford & Ralston, 1988).

1.3.2. Espumantes

Para lograr una espuma estable, se acondiciona la pulpa con espumante, estos reactivos son agentes tenso-activos o surfactantes que modifican las propiedades superficiales de las burbujas para reducir su coalescencia (Comley et al, 2002). Poseen una parte polar (hidrófila) y una parte apolar (hidrófoba). La parte apolar es una cadena hidrocarbonada y la parte polar es típicamente un grupo OH. En la superficie de la burbuja (interfase aire-agua), la cadena hidrocarbonada se orienta hacia la fase gaseosa y el grupo polar hacia el lado del agua. (Azgomi et al, 2007)

Los espumantes reducen la tensión superficial del agua y tienen la capacidad de adsorberse en la interfase aire-agua. Son utilizados para generar un mayor número de burbujas pequeñas, aumentando así el área superficial de burbujas disponibles. Su presencia aumenta la fuerza de la película de las burbujas de aire, logrando así una mejor unión de las partículas hidrófobas a las burbujas. La eficacia del reactivo depende del pH de la pulpa (Bulatovic, 2007) (Finch et al., 2008).

En la industria hay un amplio número de espumantes disponibles, sin embargo, se debe evaluar su selección según su desempeño y objetivos específicos de cada planta, la elección del espumante está determinada por el tamaño de las burbujas, el consumo del reactivo y las interacciones que puedan existir. En la Figura 1.7 se presenta un ejemplo de un estudio donde se muestran tamaños de burbuja para cinco tipos de espumantes en función de la concentración. En cada gráfica se indica la concentración crítica de coalescencia (línea roja), indicando el impacto en el tamaño de burbuja y la concentración a la que ocurre. El espumante logra reducir el tamaño de burbuja a medida que aumenta concentración, hasta que se vuelve aproximadamente constante el tamaño, en ese punto se encuentra la concentración crítica de coalescencia (CCC) que varía según el tipo de espumante y sus propiedades (Elmahdy & Finch, 2013).

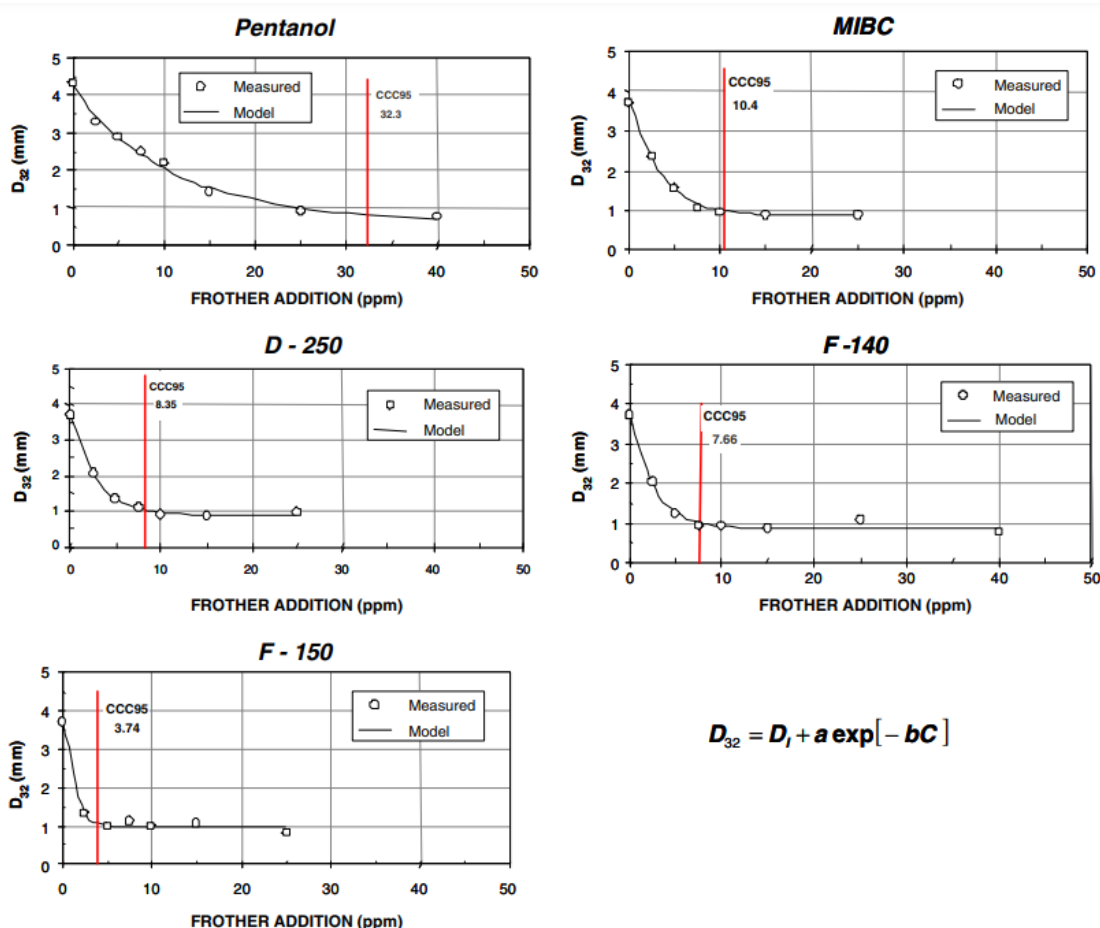


Figura 1.7 Tamaño de burbuja en función de la concentración de espumante (Finch et al., 2008).

Se ha demostrado que el uso de un solo tipo de espumante no tiene la capacidad de abarcar toda la distribución de tamaño de partículas; el uso de alcoholes es más efectivo para la

flotación de partículas de menor tamaño, mientras que los poliglicoles presentan un mejor desempeño para los mayores tamaños. Con el fin de ampliar el espectro de cobertura en el rango de tamaño de partículas alimentado al proceso, se puede utilizar una mezcla de espumantes de tipo alcohol/poliglicol, conocido en la industria como el uso de espumante dual (Zhang *et al.*, 2012).

Otra razón para el uso de la mezcla de espumantes es que trae más beneficios en las funciones del espumante ya que, en el caso de los alcoholes, destacan en la reducción del tamaño de las burbujas, siendo menos eficientes en la estabilización de la espuma; mientras que los poliglicoles pueden aportar al control de la espuma (Elmahdy & Finch, 2013).

1.3.3. Modificadores

En esta categoría de reactivos se incluye a todos aquellos cuya función principal no es la de colector ni espumantes. La función de los modificadores es preparar las superficies minerales para el correcto funcionamiento de un determinado reactivo sobre ellas y mantener condiciones favorables para la flotación en la pulpa. Se pueden clasificar en depresores, activadores y reguladores de pH. Un depresor inhibe o previene la adsorción de un colector por una partícula mineral y por lo tanto evita su flotación. Un activador prepara la superficie mineral para mejorar la adsorción del colector. Los reguladores de pH ajustan el pH de la pulpa para obtener un óptimo desempeño para un reactivo y mineral en particular. Los reguladores de pH comunes son la cal, carbonato de sodio y ácido sulfúrico. (Kelly & Spottiswood, 1982)

1.4. Balance de masa

Para tener un mejor control del proceso, conocer los flujos másicos y la recuperación de los elementos de interés son ampliamente utilizados los balances de masa en el proceso de flotación. En la Figura 1.8 se puede observar un esquema del proceso, considerándolo como caja negra, es decir puede representar un equipo (celda) o un circuito de flotación. En la Figura se define:

F , Flujo de alimentación al sistema.

C , Flujo de producto valioso (Concentrado).

T , Flujo descartable (Relave).

$x_{F,i}$ ley del mineral i en la alimentación.

$x_{C,i}$ ley del mineral i en el concentrado.

$x_{T,i}$ ley del mineral i en el relave.

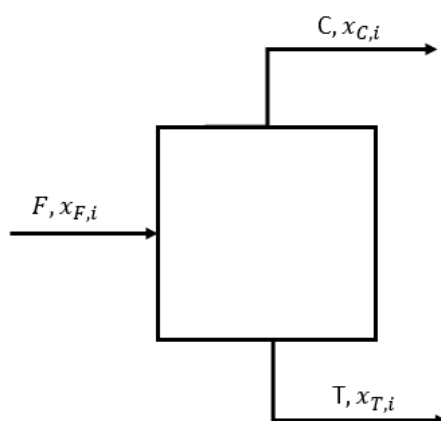


Figura 1.8 Diagrama celda flotación.

Las leyes del mineral corresponden a las fracciones másicas de algún componente de interés, se expresan comúnmente en porcentaje. Para realizar cualquier balance de masa, se debe considerar el sistema una vez alcanzado el estado estacionario, de esta forma todo lo que entra es igual a lo que sale, por lo que el balance de masa global puede ser expresado según la ecuación (1.1) (Yianatos & Vinnett, 2015)

$$F = C + T \quad (1.1)$$

Luego el balance por componente del sistema para los elementos valiosos presentes en cada corriente puede expresarse según la ecuación (1.2)

$$F \cdot x_{Fi} = C \cdot x_{Ci} + T \cdot x_{Ti} \quad (1.2)$$

Recuperación metalúrgica

La eficiencia metalúrgica es uno de los conceptos más importantes y básicos en el procesamiento de minerales, comúnmente para describir la eficiencia del proceso se utilizan los términos recuperación y ley. (Fuerstenau & Han, 2003)

La recuperación corresponde a la razón entre el flujo del elemento valioso en la corriente de concentrado respecto del que ingresó al circuito en la corriente de alimentación (ecuaciones 1.3 y 1.4). Esta razón nunca alcanzará el máximo valor, ya que el mineral no está totalmente liberado y la separación no es perfecta. (Kelly & Spottiswood, 1982)

$$R = \frac{\text{masa de mineral en el concentrado}}{\text{masa de mineral en la alimentación}} = \frac{C \cdot x_{Ci}}{F \cdot x_{Fi}} \quad (1.3)$$

$$R = \frac{x_{Ci} \cdot (x_{Fi} - x_{Ti})}{x_{Fi} \cdot (x_{Ci} - x_{Ti})} \quad (1.4)$$

La ley del mineral corresponde a la razón de la especie de interés respecto de la masa total de una corriente. La relación entre la recuperación y la ley de mineral es inversa, al aumentar la recuperación del mineral de interés, aumenta también la masa arrastrada al concentrado, ensuciándolo con material no valioso. En la Figura 1.9 se puede observar que a medida que aumenta la recuperación, la ley de concentrado tiende a disminuir.

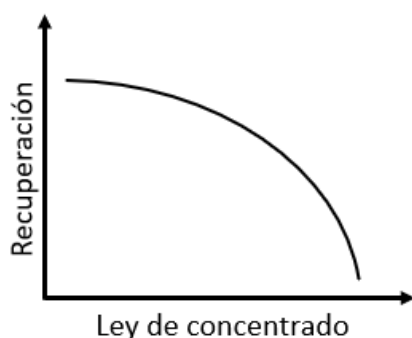


Figura 1.9 Ley de concentrado v/s recuperación de mineral.

1.5. Tamaño de partícula en flotación

Un tema ampliamente investigado en flotación tiene relación con la influencia del tamaño de partícula y la recuperación de minerales. Si la alimentación al proceso tiene un tamaño de partícula no adecuado, traerá consecuencias como la reducción de la ley de concentrado (por falta de liberación) y la recuperación, así como un aumento del consumo de energía en el circuito de molienda. El comportamiento de partículas finas y gruesas es distinto, sin embargo, ambas son más difíciles de recuperar en comparación con las partículas de tamaño

intermedio. (Gaudin *et al.*, 1931; Hassanzadeh, 2016; Subrahmanyam, 1990). Respecto al consumo de energía, en conjunto el chancado, molienda y separación representan entre 35% y 50% de los costos totales de la mina, (Ballantyne & Powell, 2014) por lo que es parte importante de la economía del proceso realizar estas etapas de manera eficiente.

El grado mínimo de hidrofobicidad necesario para la flotación de una partícula depende de su tamaño y por lo tanto las curvas de recuperación por tamaño son una valiosa ayuda para la evaluación del rendimiento de flotación (Trahar W. , 1981). En la Figura 1.10 se tiene una curva de recuperación por tamaño para el cobre, en la que se observa que la tendencia que sigue tiene forma de “elefante”, esta forma de las curvas de recuperación por tamaño asimétrica demuestra que la recuperación es mejor para los tamaños de partícula intermedios. (Yianatos *et al.*, 2000)

Sin embargo, el rango de los tamaños intermedios no será el mismo para todos los minerales, está definido como el óptimo para la flotación, pero varía en caso de cada planta y según el tipo de mineral, por lo que la definición de dichos rangos fue motivo de estudios posteriores. (Trahar & Warren, 1976)

Distintos autores han investigado sobre el rango intermedio óptimo para la flotación según el tipo de mineral, pero la respuesta no depende únicamente del tipo de mineral, y frecuentemente están mal definidos, los límites son variables por lo que es preferible referirse a los rangos como partículas finas, intermedias o gruesas. (Trahar W. , 1981)

En la interacción partícula-burbuja el tamaño de partícula juega un rol importante, en la probabilidad de que ocurra el choque entre las partículas con las burbujas (Dai *et al.*, 2000), en la unión de ambas después de la colisión y también en la permanencia de la unión. (Feng & Aldrich, 1999)

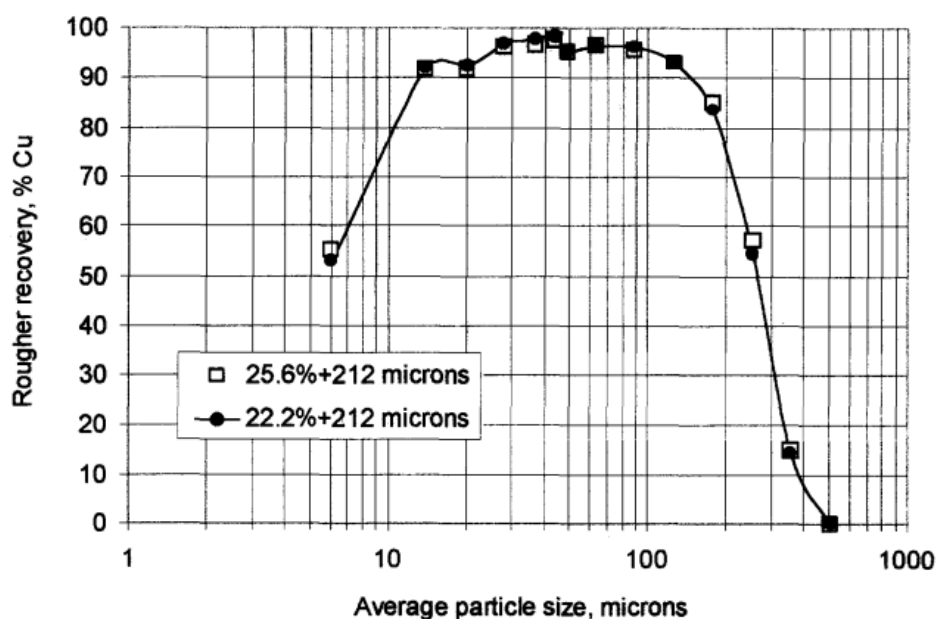


Figura 1.10 Curva de recuperación por tamaño para cobre (Yianatos *et al.*, 2000).

1.5.1. Partículas finas

Como afectan las partículas finas a la flotación ha sido el tema más estudiado dentro del efecto del tamaño de partícula (Trahar & Warren, 1976). La probabilidad de colisión en la pulpa depende del tamaño de partícula, tamaño de burbuja y condiciones hidrodinámicas de la celda (Tao, 2005; Pyke *et al.*, 2003). Las partículas muy finas no son recuperadas porque es difícil que entren en contacto con las burbujas. La unión de las partículas de mineral a las burbujas está dada por el encuentro directo entre ambas, considerando que la probabilidad del encuentro está directamente relacionada con el tamaño de partícula y que las partículas son pequeñas en comparación a las burbujas, mientras más fina sea la partícula, más baja será su probabilidad de ser recuperada. (Gaudin & Malozemoff, 1932). Para la flotación de partículas finas, se ha estudiado que las burbujas de menor tamaño presentan una mejora en la recuperación, aumentando la probabilidad de colisión, siendo más notable para las partículas de baja densidad (Ahmed & Jameson, 1985). Sin embargo, el uso de burbujas pequeñas en celdas mecánicas trae una serie de desventajas, como la baja fuerza con que se elevan las burbujas pequeñas comprometiendo la selectividad del proceso y un aumento en la recuperación de agua provocado por las microburbujas que conlleva un aumento en el arrastre de ganga (Miettinen *et al.*, 2010; Hassanzadeh *et al.*, 2022).

El arrastre es la recuperación no selectiva en el concentrado de partículas no unidas a superficies de burbujas, que son arrastradas o atrapadas en el agua que desplazan las burbujas (Welsby *et al.*, 2010). Se ha demostrado que el arrastre contribuye a la recuperación de partículas finas (Trahar W. , 1981) ya que las partículas finas tienden a suspenderse de forma homogénea en la pulpa, siguiendo las líneas de corriente debido a su baja masa, a diferencia de las partículas gruesas que tienden a acumularse en los niveles inferiores de la celda. (Savassi *et al.*, 2015)

El grado de arrastre depende del tamaño de partícula, pero sólo se considera significativo para las partículas de un tamaño menor a 50 micrones, este tamaño límite puede variar en cada caso y es dependiente de las propiedades de la espuma (Savassi *et al.*, 1998). Sin embargo, para tamaños bajo los 10 micrones el arrastre es el mecanismo predominante, ya que en los tamaños inferiores la eficiencia de colisión entre partículas y burbujas es mínima (Subrahmanyam & Forssberg, 1988). En la Figura 1.11 se representa gráficamente a través de una simulación la dependencia del factor de arrastre con el tamaño de partícula. El factor de arrastre se define como la recuperación de las especies arrastradas dividido por la recuperación de agua. En la Figura 1.11 se observa que los mayores valores para el factor de arrastre se dan en las partículas más finas (Neethling & Cilliers, 2009).

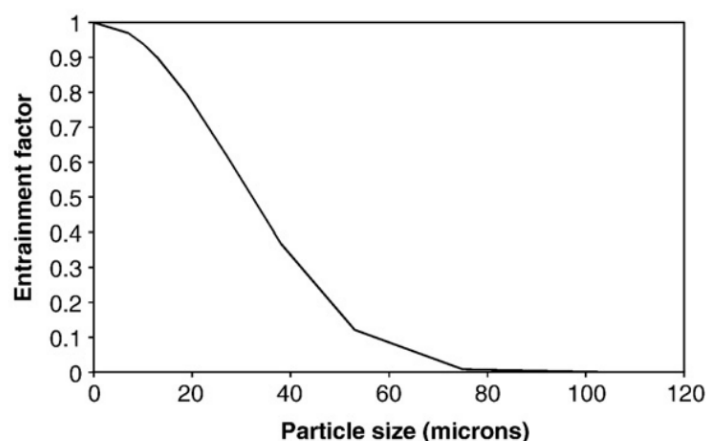


Figura 1.11 Simulación factor de arrastre en función del tamaño de partícula (Neethling & Cilliers, 2009).

1.5.2. Partículas gruesas

La flotación de partículas gruesas debe enfrentar desafíos como la estabilidad reducida de los agregados partícula-burbuja y la capacidad de carga limitada de las burbujas (Schulze, 1982),

además, se deben considerar las condiciones hidrodinámicas de la celda y la dispersión del gas.

Algunas partículas gruesas tienen la capacidad de adherirse a una burbuja; sin embargo, son incapaces de mantenerse adheridas en las zonas de turbulencia, donde usualmente colapsará el agregado partícula-burbuja (Jameson, 2010; Schulze, 1977). Otra de las razones de la baja capacidad de flotación de las partículas gruesas es que, al aumentar el tamaño de las partículas, la densidad del agregado de partículas-burbujas se aproxima a la densidad de la pulpa y, por lo tanto, se vuelve menos flotable (Subrahmanyam & Forssberg, 1988). Se ha demostrado que una forma de mejorar significativamente la recuperación de partículas gruesas es trabajar con una altura de espuma poco profunda en la celda (Tabosa *et al.*, 2013).

Recientemente, se ha observado que la reducción de la distancia de transporte de espuma permite aumentar la recuperación de partículas gruesas, especialmente en celdas de gran tamaño (Vallejos *et al.*, 2022).

Las zonas de calma en la celda pueden evitar la alta probabilidad de desprendimiento de las partículas y burbujas (Hassanzadeh *et al.*, 2016). Otra razón de su baja recuperación se puede atribuir al bajo grado de liberación de las partículas gruesas (Hassanzadeh *et al.*, 2022).

1.5.3. Liberación

Con el objetivo de recuperar los minerales de interés, estos deben liberarse de la roca en que están contenidos (ganga). Para esto el mineral requiere el proceso de conminución, donde su tamaño es reducido lo suficiente como para que algunas partículas estén compuestas únicamente del mineral objetivo (partículas liberadas) (Meloy & Gotoh, 1985). No todas las partículas alcanzan el grado total de liberación, por lo que el concepto se entiende como la fracción expuesta del mineral de interés. La eficiencia de la etapa de concentración del mineral es dependiente del grado de liberación (King, 1979). Las características de liberación varían según el tipo de mineral y dependen principalmente de su textura, y del proceso de molienda (Zhang & Subasinghe, 2013).

Mientras el mineral es reducido de tamaño, la liberación aumenta, pero también se pueden fracturar partículas ya liberadas lo que resulta en sobre molienda, teniendo consecuencias como un uso ineficiente de la energía y reducción en la capacidad del equipo de molienda (Gaudin, 1957). Además, esta sobre molienda no representa un beneficio para la etapa de

flotación, debido a la baja flotabilidad de las partículas ultrafinas. En resumen, es deseable en la etapa de molienda alcanzar el mayor grado de liberación de mineral, minimizando al mismo tiempo la sobre molienda, por lo que es de gran importancia la correcta elección de tamaño de molienda del mineral (King, 1979).

El objetivo de reducir el tamaño de partícula para liberar el mineral valioso es para exponer el área hidrófoba requerida para la correcta adsorción de los reactivos químicos y favorecer la colección. El grado de liberación está definido como el porcentaje del mineral valioso que se encuentra libre con relación al contenido total del mineral, siendo la eficiencia de concentración del mineral dependiente del grado de liberación logrado (King, 1979), y es dependiente del tipo de mineral y tamaño de molienda. Así, la alimentación puede contener partículas completamente liberadas, generalmente las de menor tamaño; y también puede haber partículas flotables compuestas con contenido de ganga (Jameson G. , 2012). En la Figura 1.12 se presenta la relación entre el tamaño de partícula y la constante cinética de flotación para distintos grados de liberación, se observa que la constante cinética es dependiente del tamaño de partícula y grado de liberación, siguiendo la regla de que a mayor grado de liberación mejor será la cinética de flotación, en cuanto al tamaño de partícula, sigue las distribuciones explicadas en los puntos anteriores, siendo mejor la cinética en los tamaños intermedios, presentando los valores mínimos de cinética para las partículas finas y gruesas.

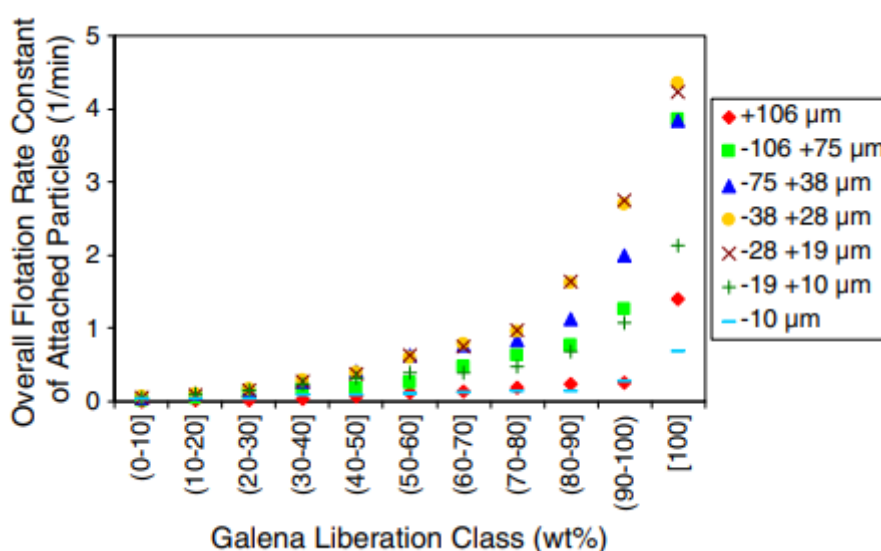


Figura 1.12 Constante cinética según tamaño de partícula y grado de liberación (Welsby, Vianna, & Franzidis, 2010)

En la literatura, algunos autores han descrito el grado de liberación de un mineral como constante para una clase de tamaño dado, independiente de la distribución de tamaño en dicha corriente. Esto es útil para poder modelar las características de las partículas en las etapas de conminución y separación (Wightman *et al.*, 2010).

1.5.4. Recuperación por tamaño

De la bibliografía consultada previo al estudio realizado, se tiene como referencia al estudio realizado en 1994 por Bazin *et al.*, titulado “Predicción de los rendimientos metalúrgicos en función del grado de molienda”. Si bien, dicho estudio fue realizado para un mineral distinto, los principios que se plantean son aplicables al estudio actual y serán explicados a continuación.

El método se basa principalmente en observaciones recogidas de pruebas de laboratorio y muestras de un circuito de ensayo industrial, donde se presenta un método para predecir Ley y recuperación en una planta de flotación en función de la distribución de tamaño alimentada para determinar el grado óptimo de molienda, el estudio se basa en una planta Cu-Pb de New Brunswick, Canadá.

El método desarrollado en el trabajo está dividido en tres secciones, primero se muestra la tendencia observada para la distribución de metales y sólidos, en la segunda sección se describe la metodología para el cálculo de la recuperación de mineral por clase de tamaño en un circuito *rougher*, y en la tercera sección se combinan los resultados de las anteriores para predecir la ley y recuperación para distintas distribuciones de tamaño.

Distribución de metales vs sólidos.

Se tienen datos de 16 campañas de muestreo de planta, los que son tamizados y separados por clase de tamaño para los minerales de plomo, zinc, cobre y hierro, los datos son balanceados para asegurar la consistencia de estos con los análisis. A partir de los datos ajustados se calcula el contenido de los minerales Galena, Marmatita, Calcopirita, Pirita y mineral no sulfurado. Se obtiene la distribución acumulada de los minerales y se grafica en función de la distribución acumulada del mineral en cada caso como se muestra en la Figura 1.13.

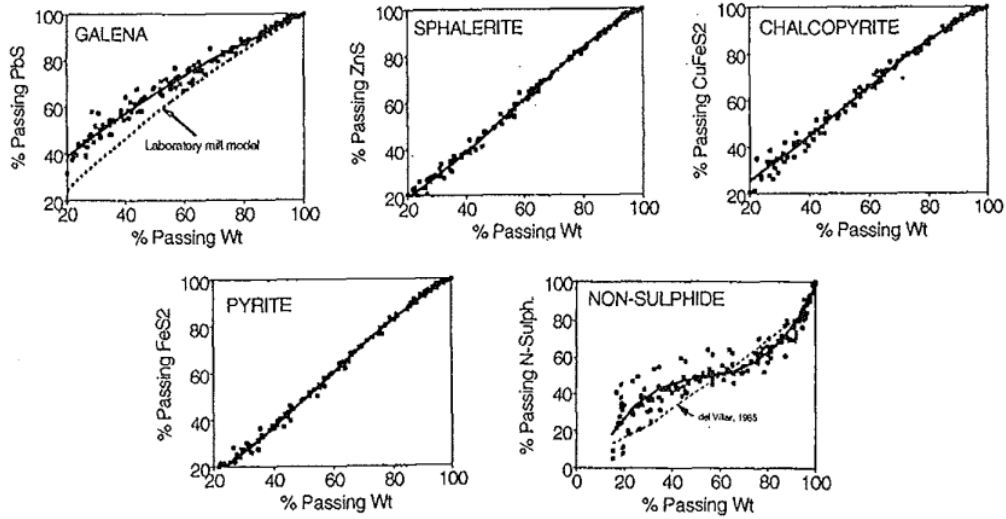


Figura 1.13 Pasante acumulado por especie mineral (Bazin et al., 1994).

Al realizar una regresión a las gráficas se obtiene una ecuación empírica de tercer orden que representa a cada una con sus respectivos coeficientes, a_0 , a_1 , a_2 y a_3 tienen un valor distinto para cada mineral. La ecuación general del modelo (1.5), donde C_{ij} corresponde al peso del mineral i pasando el intervalo de tamaño j , y C_j es el peso pasante en el intervalo de tamaño j :

$$C_{ij} = a_0 + a_1 C_j + a_2 C_j^2 + a_3 C_j^3 \quad (1.5)$$

Recuperación del mineral por clase de tamaño.

La recuperación según clase de tamaño viene dada por la ecuación (1.6), donde W_k representa al flujo másico en la corriente k , r_{jk} corresponde a la fracción másica de sólido retenida en el intervalo de tamaño j para la corriente k , x_{ijk} es la fracción másica de la especie i en el intervalo de tamaño j para la corriente k .

$$R_{ij} = 100 \frac{W_k r_{jk} x_{ijk}}{W_F r_{jF} x_{ijF}} \quad (1.6)$$

Las recuperaciones por tamaño y especie calculadas son promediadas y graficadas como se muestra en la Figura 1.14, incluyendo un intervalo de confianza del 95% en cada caso.

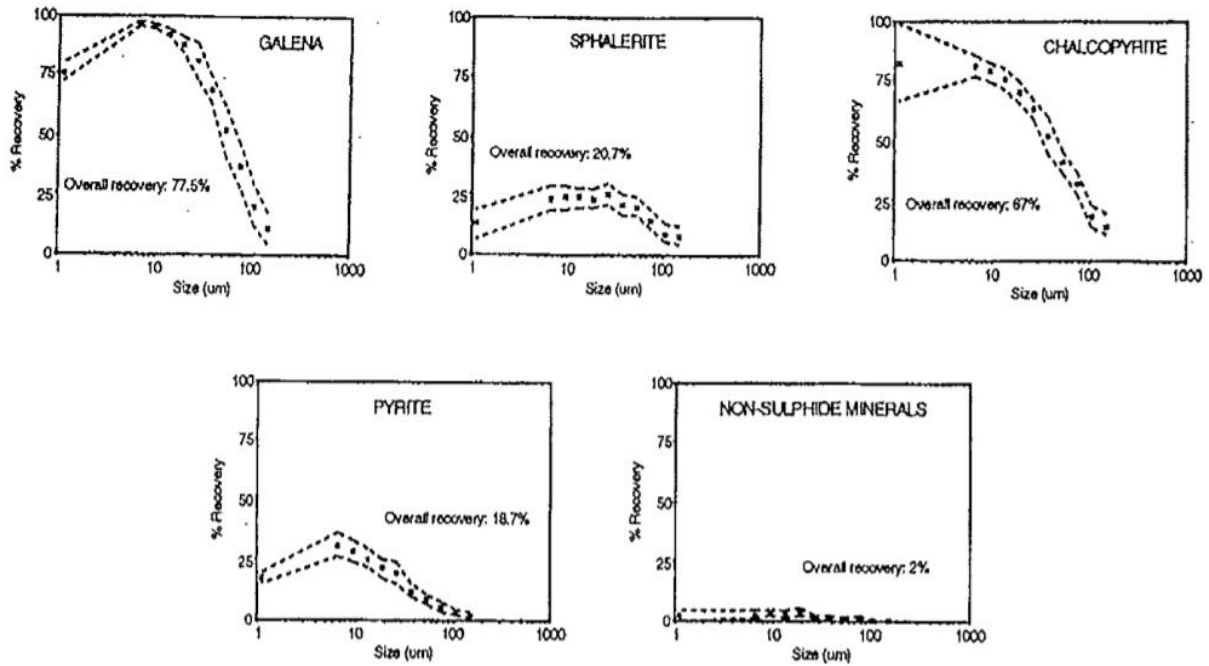


Figura 1.14 Recuperación calculada por tamaño según especie mineralógica (Bazin *et al.*, 1994).

Predicción rendimiento metalúrgico.

Para predecir el rendimiento metalúrgico, se combina el uso de la relación empírica de la ecuación (1.5) para la predicción de la distribución del mineral en función del tamaño de partícula y los valores de recuperación promedio presentados en las curvas de la Figura 1.14.

Para obtener la recuperación global se utiliza la ecuación (1.7), donde n corresponde al número de clases de tamaño

$$R_i = \sum_{j=1}^n r_{jc} x_{ijc} \quad (1.7)$$

Mientras que para obtener la ley del concentrado se utiliza la ecuación (1.8), donde m corresponde al número de especies presentes.

$$x_{ic} = \frac{\sum_{j=1}^n r_{jc} x_{ijc}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n r_{jc} x_{ijc}} \quad (1.8)$$

En ambos casos, para obtener la ley y recuperación global, se utiliza la expresión descrita en la ecuación (1.9) para calcular el producto $r_{jc} x_{ijc}$. Y para estimar la fracción de cada mineral en los intervalos de tamaño, se hace a través del contenido mineral en la alimentación,

descrito en la ecuación (1.10), donde r_{jF} corresponde a la fracción másica de mineral en el intervalo de tamaño j en la alimentación, y x_{iF} es el contenido de mineral i en la alimentación (ley de cabeza).

$$r_{jC}x_{ijC} = R_{ij}r_{jF}x_{ijF} \quad (1.9)$$

$$r_{jF}x_{ijF} = \frac{x_{iF}(C_{ijF} - C_{ij-1F})}{r_{jF}} \quad (1.10)$$

Finalmente, al poder predecir los rendimientos metalúrgicos de distintas distribuciones de tamaño se presentan ventajas que pueden mejorar el desempeño del proceso como por ejemplo se muestra en la Figura 1.15, donde se ilustra un caso hipotético para dos leyes de alimentación de plomo, los resultados observados muestran la ventaja de tener una pendiente mas pronunciada en las curvas de distribución de tamaño, ya que en la etapa *rougher* el objetivo es maximizar recuperación.

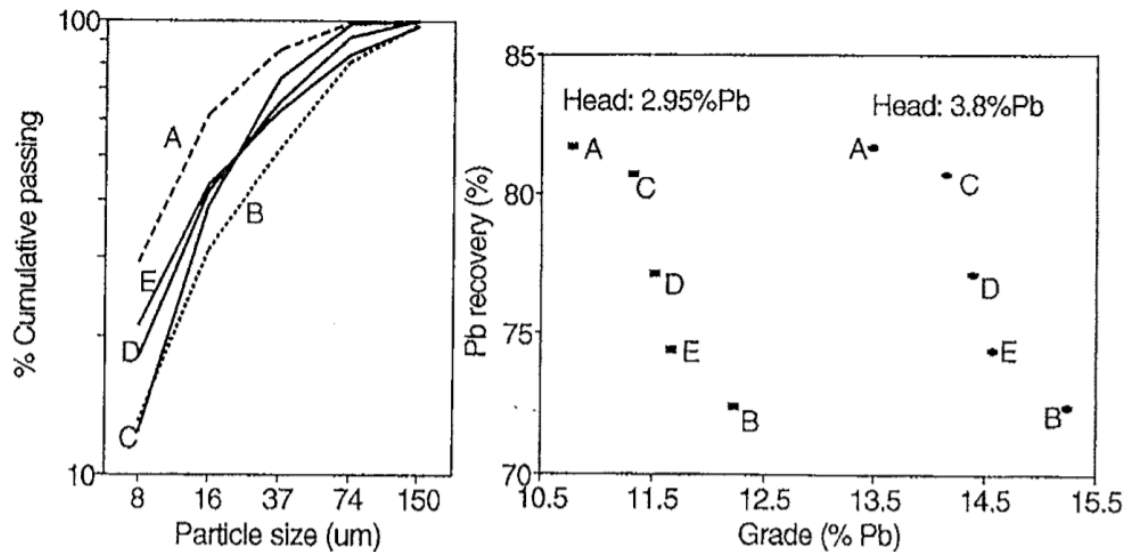


Figura 1.15 Rendimiento metalúrgico para distribuciones hipotéticas (Bazin *et al.*, 1994).

Como complemento a lo desarrollado por Bazin *et al* (1994) en la metodología descrita, el trabajo desarrollado por Wightman *et al* (2010) menciona que, al ser la liberación constante por clase de tamaño, se cumple que el flujo total de sólidos en el intervalo de tamaño cambia, pero la distribución de clases de liberación de partículas dentro de cada intervalo de tamaño

no; por lo que es posible predecir los flujos másicos de una determinada clase de partícula en función de la distribución de sólidos en la alimentación. Así, se pueden obtener las recuperaciones por tamaño y junto a la distribución de liberación, utilizando el flujo másico de sólido en la alimentación se puede tener la recuperación y ley de concentrado.

1.6. Resumen

Según lo descrito en este capítulo, se tienen las principales variables presentes en el proceso de flotación y como influyen en el resultado buscado para recuperar el mineral de interés, dentro de las variables que dominan el proceso estudiadas en la literatura, se encuentra poca información sobre cómo influye la recuperación másica, esta variable será estudiada en el desarrollo de este trabajo. Esta variable controlada con el nivel de la celda y la adición de reactivos tiene relación con la recuperación, se puede entender mejor al estudiarla en conjunto al tamaño de partícula y liberación.

También se estudió la relación que tiene la ley de concentrado con la recuperación, considerando que los circuitos de flotación tienen varias etapas y que en este trabajo se estudia solo la primera (*rougher*), cabe destacar que el objetivo de dicha etapa es maximizar la recuperación ya que todo el mineral de interés que se recupere condiciona a las siguientes etapas, mientras que en el caso de la ley del concentrado irá aumentando a lo largo del circuito, a medida que sea más limpio el concentrado; por lo mismo una menor altura de espuma es aconsejable en dicha etapa, aumentando la recuperación másica y con ello la recuperación de Cu; esto a su vez permite la recuperación de partículas de mayor tamaño con la adición del espumante dual.

Además, se describieron los problemas que pueden traer las partículas finas y gruesas en la recuperación, quedando claro que se apunta a una fracción media de tamaño en la molienda que permite mejorar los resultados de recuperación, pero es importante entender que la cinética no depende únicamente del tamaño; sino también del grado de liberación.

CAPITULO 2

2. METODOLOGIA PARA LA RESOLUCION DE BALANCES

Previo a la resolución de los balances se describirá la planta donde los datos fueron colectados y se detallaran los datos disponibles y su análisis.

2.1. Planta Concentradora Las Tórtolas.

La Planta las tórtolas, ubicada en Colina, Región Metropolitana, es el lugar donde es procesado el mineral proveniente desde el yacimiento Los Bronces, el mineral pasa primero por la etapa de chancado primario en el área mina, luego es transportado a las plantas de molienda Los Bronces y Confluencia, en las que se encuentran los molinos SAG y chancado de *Pebbles*, finalmente es transportado a la planta a través de un mineroducto que cuenta con 56 km de extensión.

En planta Las Tórtolas se recibe el mineral y es donde se realiza la flotación colectiva, flotación selectiva (planta de Moly), espesamiento y filtrado de concentrado de cobre y espesamiento de relaves. Se encuentra también la instalación de planta de reactivos y un sistema de recuperación de aguas de tranque, un laboratorio donde se preparan las muestras tomadas en el proceso para ser enviadas a laboratorios externos, además de diversas instalaciones anexas. Para llevar a cabo el proceso, se cuenta con dos plantas concentradoras LT1 y LT2 de las que se obtiene el concentrado de cobre y molibdeno.

Para el desarrollo de este proyecto, los datos utilizados corresponden en su totalidad a la planta LT1, que es también la más antigua. A continuación, se describirá brevemente las instalaciones de ésta a modo de contextualización previo al análisis de los datos.

2.1.1. Planta LT1

En la planta LT1 se realiza la flotación colectiva y selectiva, para efectos de este trabajo se describirá la instalación para el proceso de flotación colectiva. En Anexo A se encuentra el diagrama correspondiente al proceso, donde las etapas principales son: flotación *rougher*, *scavenger*, de limpieza y remolienda. En este trabajo, los datos utilizados serán exclusivamente de la etapa *rougher* en la planta LT1.

Para cada etapa se tienen las siguientes instalaciones:

Flotación *rougher*

El mineral es recibido en la planta desde el mineroducto, donde es acondicionado en el cajón de alimentación, adicionando agua y reactivos, a continuación, comienza la etapa *rougher*, al inicio de cada línea del circuito se tiene una celda cilíndricas de 4500 pie³ y 200 HP cada una (3 en total), el resto se compone de 3 líneas en paralelo, con 3 bancos de 3 celdas cada uno, lo que suma un total de 27 celdas. Las celdas utilizadas “Wemco” son del tipo auto aspirante, rectangulares de 3000 pie³ y 200 HP.

En la Figura 2.1 se muestra el arreglo de las celdas para este circuito en la planta LT1.



Figura 2.1 Circuito flotación *rougher* planta LT1.

Flotación *scavenger*

El circuito *scavenger*, es similar al circuito *rougher*, pero las celdas son de menor tamaño, considerando que no todo lo que pasa a través del circuito *rougher* ingresa al *scavenger*, pero la disposición es similar, con 3 líneas de 3 bancos, a diferencia del anterior, los 2 primeros bancos poseen dos celdas y el último 3 celdas en cada serie, lo que suma un total de 21 celdas con un tamaño de 1500 pie³ cada una.

Flotación de limpieza

Para la flotación de limpieza, se tienen 5 columnas con un tamaño de 8 x 2 x 14 [m³] instaladas en un arreglo en paralelo.

2.2. Datos disponibles

Para desarrollar la resolución de los balances, se tienen distintos datos de la operación. Los datos corresponden a dos campañas de muestreos realizadas para estudiar la flexibilización del circuito. Ambos conjuntos de datos pertenecen a turnos del segundo semestre del 2021. Las pruebas realizadas a dichas muestras están a cargo de un laboratorio externo el que se encarga de reportar los análisis granulométricos y químicos por malla por corriente para cada turno según lo solicitado, también se informan las leyes globales analizadas en cada caso. En conjunto las dos campañas de muestreo suman 43 turnos a la base de datos que será utilizada. Para resguardar la confidencialidad de la data se asignó un código alfanumérico a cada uno de estos 43 turnos, en la Tabla 2.1 se encuentran detallados.

Tabla 2.1 Códigos datos turnos.

Turnos	
361A	361B
362A	362B
363A	363B
367A	367B
368A	369B
369A	370B
370A	372B
371A	373B
372A	374B
373A	375B
374A	
380A	380B
381A	381B
382A	382B
383A	383B
384A	384B
385A	385B
387A	388B
388A	390B
390A	391B
391A	392B
393A	393B

Además, se cuenta con la información “Data turno”, estos datos corresponden a las leyes de las tres corrientes principales de la etapa *rougher*, también al *CuS*, para el cálculo del Factor K, recuperación *rougher*, leyes de As y Fe en la alimentación, entre otros. Estos datos son

solicitados para los 43 turnos a estudiar y son obtenidos desde el sistema de registro automático de datos *PI Vision*.

2.2.1. Toma de muestras y estado de cortadores

En la planta se toman muestras a diario para el control del proceso, además de los análisis en línea para un control más inmediato, pero menos preciso, que es validado con los análisis de laboratorio. Para obtener dichas muestras diariamente, se tienen instalados cortadores automáticos que facilitan y estandarizan esta acción.

Las muestras necesarias para dar origen a las campañas de muestreo utilizadas en este trabajo, a pesar de ser análisis puntuales, son tomadas también con estos muestreadores. En la planta LT1 se presentan dos tipos de muestreadores, el muestreador tipo cuchara y el muestreador tipo Vezin (Figura 2.2).

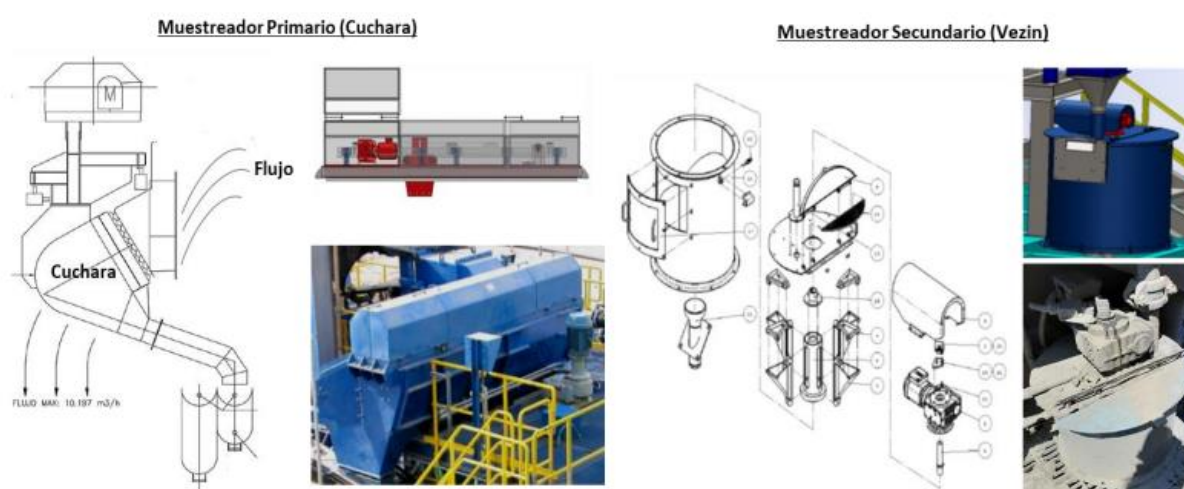


Figura 2.2 Muestreadores de pulpa planta LT1.

Los sistemas de muestreo de pulpa usualmente se instalan en las descargas de cañerías o canaletas con el objetivo de tomar la totalidad del flujo de la corriente a muestrear (TecProMin, 2022). En particular, el muestreador tipo Vezin se puede utilizar para muestreo primario o secundario, consiste en una unidad completamente cerrada que contiene un cortador giratorio de recolección de muestras. El conjunto de recolección de muestras puede incluir un solo cortador o múltiples cortadores, dependiendo de las necesidades. Los cortadores de muestras pasan a una velocidad constante y uniforme a través de la corriente descendente de lodo o sólidos para coleccionar muestras del material que ingresa a la entrada

de alimentación en la parte superior de la máquina. El material rechazado pasa directamente a través del equipo, mientras que el material de muestra se dirige a través de una tolva de muestra fija y continúa con el siguiente paso en el proceso de muestreo. (Michaud, 2020) (McLanahan, 2022)

Los muestreadores se encuentran ubicados en las corrientes principales como alimentación, concentrado *rougher* y final; relave *rougher* y final. En la Tabla 2.2 se puede ver el tipo de muestreador correspondiente a cada una de las corrientes principales del proceso.

Tabla 2.2 Tipo de muestreadores LT1.

Flujo	Muestreador	Tipo Muestreador
Alimentación	Primario	Cuchara
	Secundario	Vezin
	Terciario	Vezin
	Divisor	-
Concentrado Final	Primario	Cuchara
	Secundario	Vezin
Concentrado <i>Rougher</i>	Primario	Cuchara
	Secundario	Vezin
Relave <i>Rougher</i>	Primario	Cuchara
	Secundario	Vezin
Relave final	Primario	Cuchara
	Secundario	Vezin
	Terciario	Vezin

Sin embargo, el funcionamiento de los muestreadores descritos no es continuo todo el tiempo en la operación de la planta, ya que hay mantenciones e inconvenientes de por medio como embancamiento, que pueden impedir la correcta toma de la muestra. En estos casos las muestras son colectadas de forma manual por personal del laboratorio, siempre que el acceso al sector de toma de la muestra se encuentre habilitado para el paso y sea seguro para

el personal. Para realizar la correcta limpieza de los equipos, existe un instructivo de limpieza de muestreadores para planta las tórtolas actualizado al 2021 para asegurar la operatividad y buen desempeño de los equipos, el documento se presenta en Anexo B.

Para conocer estos casos en detalle se genera un informe de estado de cortadores, actualizado a diario con la información de los cortadores de la planta, con comentarios que permiten conocer si hay algún cortador fuera de servicio o con algún detalle a considerar. Este informe es utilizado para comprobar que los datos considerados en este trabajo corresponden a muestras tomadas sin problemas, o para tener identificada la posible fuente de error.

En Anexo C se presenta el resumen de estado de cortadores para las dos campañas de muestreo en planta LT1. Del estado de cortadores se considera que en el caso de la alimentación, la única observación se encuentra en el turno 362A con el cortador generando poca muestra. Para la corriente de concentrado *rougher* se tiene el cortador fuera de servicio desde el turno 361A hasta 385B por el motivo “Tubería secundario embancada” y también “Embanque tubería cortador primario al secundario”, es importante considerar que durante este periodo las muestras son tomadas de forma manual, por lo que puede haber diferencias. A partir del turno 387A no hay irregularidades registradas. Finalmente, para el relave *rougher* solo un turno presenta problema, 374A con comentario “Cortador sin detención recorrida constante”.

Las muestras que son colectadas de manera diaria en planta tienen distintos fines, distintos análisis son realizados para entregar información sobre el funcionamiento de la planta, las muestras colectadas diariamente son procesadas y divididas para su almacenamiento en 7 sobres distintos, que se envían a análisis químico realizado por turnos en duplicado, además se almacena un testigo, otra muestra para la microscopía y para generar el compósito semanal, una muestra para el pulverizado. Esto solo para las 3 corrientes principales del proceso y finalmente una muestra para dar origen a los compósitos mensuales.

Todos los testigos de los turnos A y B que se procesan diariamente en la planta son almacenados en una proporción de la muestra diaria durante el mes para las corrientes que

serán estudiadas y al final son procesadas en conjunto conformando el compósito mensual, que es enviado a laboratorio externo para ser analizado. Los compósitos mensuales serán utilizados más adelante en el estudio por lo que es importante comprender la variabilidad que éstos presentan debido a su origen. A final del mes se reúnen todas las muestras del mes (60 sobres) y se hace la granulometría mensual, posteriormente una muestra es obtenida por corriente para realizar el análisis químico, de las corrientes de alimentación *rougher*, relave final, concentrado final, relave *rougher*, concentrado *rougher* y relave *scavenger*.

2.2.2. Procesamiento de las muestras

Para conocer el detalle de cómo son manipuladas las muestras desde que son tomadas en la planta hasta que se procesan en el laboratorio se deben estudiar los protocolos de procesamiento de muestras, ya que una parte del error asociado a los datos con los que se trabaja siempre será atribuida a error humano por esta manipulación, al tener estandarizados los procedimientos por medio de los protocolos necesarios, este error se puede minimizar.

En Anexo D se encuentra el protocolo de preparación de muestras utilizado en la operación, donde se describen en detalle los pasos necesarios para ejecutar la labor de preparación mecánica de las mismas, con el objetivo de asegurar la calidad en el proceso de preparación y envío de las muestras. El procedimiento es realizado en el laboratorio de planta Las Tórtolas, a cargo de la empresa Guiñez, los principales pasos para la preparación de las muestras desde que son tomadas en planta y llevadas al laboratorio corresponden a filtrado de muestras, secado de muestras, homogenización primaria de la muestra, homogenización secundaria de la muestra, pulverización de muestras y por último la revisión y envío de sobres a análisis químico en laboratorio externo.

Otro factor para tener en consideración es que no todos los análisis son realizados por las mismas empresas externas, por lo que los protocolos internos de las mismas pueden variar. Sin embargo, en este caso, la empresa que realiza los análisis que serán utilizados en este trabajo, se encuentra homologada por Anglo American, es decir, sus procedimientos son realizados siempre por los mismos flotadores, los que hicieron los ensayos necesarios para estandarizar su técnica, asegurando así la calidad de la información y la minimización de errores posibles.

2.2.3. Pasos a seguir

Una vez que se tienen los datos recopilados, se debe revisar las condiciones de la planta para los turnos correspondientes y el estado de cortadores, con el fin de descartar los turnos que presenten algún problema.

El siguiente paso es filtrar los datos, en caso de faltar información por clase de tamaño para algún turno, se debe descartar ya que se requiere la información completa de leyes Cu por clase de tamaño para las corrientes de alimentación, concentrado *rougher* y relave *rougher*. Si falta información de leyes de Cu globales analizadas, y están disponibles desde la data turno, se puede utilizar, siempre cuando sean comparados los valores con los demás disponibles de análisis y sean coherentes las diferencias.

Finalmente, se pueden resolver los balances en IES según lo descrito en la sección 2.4. Al resolver los balances se debe asignar un grado de confianza a los valores ingresados por corriente, para decidir esto se utilizan las conclusiones del análisis de sensibilidad, descrito en la sección 2.7. Este análisis se realiza previo a la solución de los balances en IES; para resolverlos se utilizó el método de Lagrange en Microsoft Excel. Luego de resolver los balances, se debe revisar que los resultados tengan coherencia, de lo contrario de pueden resolver nuevamente para descartar el error, si persiste, se descarta la información de ese turno.

2.3. Selección de datos

Antes de comenzar con la resolución de los balances es necesario ordenar y filtrar la data disponible, con el fin de comprobar que todos los turnos considerados sean un real aporte de información para la futura construcción del modelo.

Para la primera campaña de muestreo, se tienen 33 turnos. Con esta información reportada directamente desde el laboratorio encargado, el primer paso es recopilar únicamente las corrientes de interés en el estudio, esto es alimentación, concentrado *rougher* y relave *rougher* para cada turno, y además a alimentación, concentrado y relave *scavenger*; alimentación columnas; concentrado final y relave final.

Para la segunda campaña de muestreo, se cuenta inicialmente con 10 turnos. Y se debe proceder de la misma forma a recopilar la información de las tres corrientes de interés únicamente.

En la Tabla 2.3 se presentan los valores de leyes para las corrientes principales *rougher* desde análisis de laboratorio, previo al balance para los 43 turnos disponibles.

Tabla 2.3 Leyes analizadas corrientes *rougher*.

Turno	x_F	x_C	x_T
361A	0.617	6.230	0.116
362A	0.563	5.760	-
363A	-	5.630	-
367A	0.687	4.456	0.180
368A	-	-	-
369A	0.699	-	0.117
370A	0.922	3.854	0.133
371A	0.829	4.812	0.117
372A	0.744	4.551	0.137
373A	0.689	3.915	0.130
374A	0.665	4.731	0.108
361B	0.612	6.400	0.118
362B	-	7.070	-
363B	-	4.989	-
367B	0.728	-	-
369B	0.670	5.906	0.133
370B	0.709	4.230	0.110
372B	0.814	5.370	-
373B	0.703	-	0.130
374B	0.583	3.705	0.106
375B	0.609	-	0.105
380A	0.557	-	-
381A	0.598	-	-
382A	0.623	6.220	-
383A	0.597	8.130	0.108
384A	0.692	6.190	-
385A	-	-	-
380B	0.636	6.550	-
381B	0.619	6.930	0.127
382B	0.605	8.170	0.124
383B	0.628	6.540	0.129
384B	0.664	5.180	0.134
385B	0.603	-	-
387A	0.943	6.480	0.137
388A	0.462	3.130	0.102
390A	0.767	4.664	0.108
391A	0.702	4.881	0.117
393A	0.753	4.520	0.135

388B	0.637	6.540	0.106
390B	0.702	4.881	0.117
391B	0.714	4.901	0.119
392B	0.783	5.230	0.128
393B	0.651	4.520	0.120

En primera instancia, se puede notar que las leyes del análisis no están disponibles para las 3 corrientes de interés en todos los casos, solo están completas para 26 turnos, es decir el 60% de los datos. Esta información es relevante para la resolución del balance, ya que se requieren para poder ajustar correctamente los datos por tamaño. Esta falta de información será suplida por la data turno disponible, mencionada previamente, donde los datos se encuentran disponibles en su totalidad como se puede apreciar en la Tabla 2.6.

Del análisis químico se reportan datos para distintas especies, en la mayoría de los turnos corresponde a Cu; Fe; Mo y CuS, en algunos casos As. La especie de interés en este caso corresponde al cobre por lo que será el análisis químico de Cu el utilizado para la posterior resolución de los balances. Sin embargo, los valores de analizados de CuS serán también utilizados para calcular el Factor K, más detalles sobre esto en Capítulo 3.

Con esta data recopilada se hace un resumen, que luego es procesado extrayendo únicamente la información necesaria de cada corriente ya apartada, es decir, por corriente y turno, se recopilan los pesos retenidos por tamaño del análisis granulométrico y las leyes de cobre por tamaño del análisis químico, como también las leyes globales. En Anexo E se encuentran los datos de leyes y pesos parciales por tamaño resumidos para cada uno de los turnos disponibles. En dichas tablas se puede apreciar que para el turno **363B** no se tiene información para la corriente de alimentación, mientras que para el turno **367B** no se tiene información para la corriente de relave *rougher*. La falta de estos datos, necesarios para la solución del balance, lleva al descarte de ambos turnos.

Además, para todos los turnos se recopila la información en tablas tal como se presenta el turno **361A** en la Tabla 2.4 con los datos de pesos retenidos para obtener el peso pasante acumulado, los datos de la Tabla 2.4 corresponden a la corriente de alimentación, pero son calculados para las 3 corrientes de interés y todos los turnos. En primer lugar, los pesos retenidos por tamaño recopilados del análisis granulométrico son utilizados para calcular los pesos parciales en cada caso, para esto se suman los valores para obtener el peso total y luego

cada peso retenido por fracción de tamaño es dividido entre el peso total y multiplicado por cien para trabajar los valores de forma porcentual. De esta forma al sumar consecutivamente cada uno de estos valores, se obtiene el peso retenido acumulado, el total debe ser 100 ya que se trabaja en base porcentual. Finalmente, para cada fracción de tamaño la diferencia del cien por ciento y el peso retenido acumulado da como resultado el peso pasante acumulado.

Tabla 2.4 Resumen pesos parciales y Ley CuT turno 361A corriente alimentación.

Malla	Pesos Parciales (g)	Peso Acum (g)	Peso Parcial (%)	Peso Acum. Ret (%)	Peso Acum Pasante (%)	Ley CuT (%)	Ley CuT AcuM (%)	Fino Parcial (g)	Fino Parcial (%)	Fino Acum Retenido (%)
35	0.0				100	0.0				
48	26.4	26.4	13.10	13.10	86.90	0.256	0.256	0.068	5.184	5.184
65	19.0	45.4	9.42	22.52	77.48	0.310	0.279	0.059	4.518	9.702
100	20.8	66.2	10.32	32.84	67.16	0.375	0.309	0.078	5.983	15.685
150	17.2	83.4	8.53	41.37	58.63	0.509	0.350	0.088	6.715	22.401
200	13.6	97	6.75	48.12	51.88	0.662	0.394	0.090	6.906	29.307
270	15.0	112	7.44	55.56	44.44	0.777	0.445	0.117	8.940	38.247
400	11.2	123.2	5.56	61.11	38.89	0.955	0.492	0.107	8.205	46.451
-400	78.4	201.6	38.89	100.00	0.00	0.890	0.647	0.698	53.549	100.00

Con el fin de continuar revisando los datos previo al balance de los mismos, para los 41 turnos restantes se compara además las diferencias producidas entre las leyes globales analizadas y las obtenidas desde la data turno, a continuación se presentan graficados los valores separados por corriente (Figura 2.3; 2.4; 2.5) , como se puede notar, no todos los turnos tienen un valor reportado de ley analizada, por lo que en esos casos no hay punto de comparación y se trabajará con la ley reportada por la data turno. En el caso del turno 370A se tienen las mayores diferencias tanto en la ley de alimentación como la de concentrado, en la Tabla 2.5 se encuentra el resumen con el cálculo de la diferencia entre ambos valores para cada corriente, a su vez se calcula la recuperación de Cu y recuperación másica para observar cómo afecta la diferencia en las leyes globales con dichos cálculos.

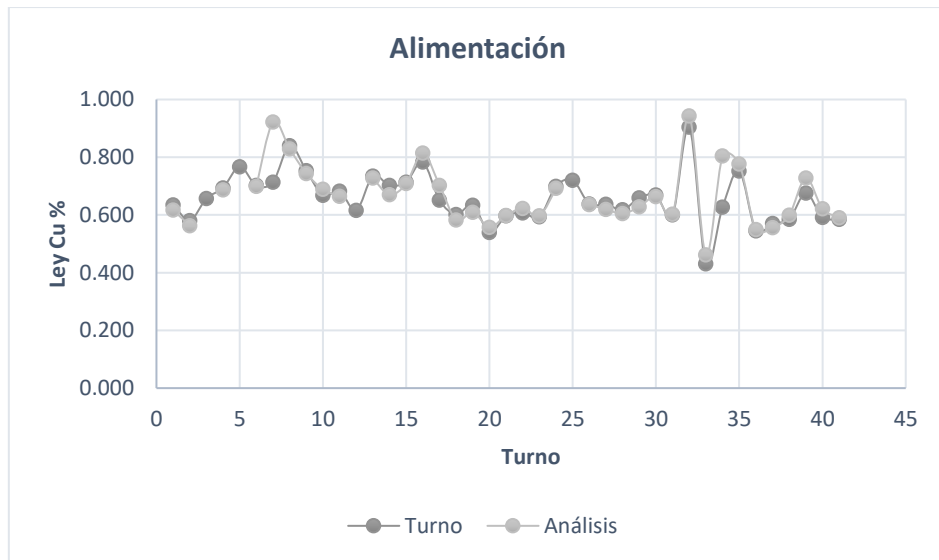


Figura 2.3 Leyes de alimentación *rougher* turno y analizadas.

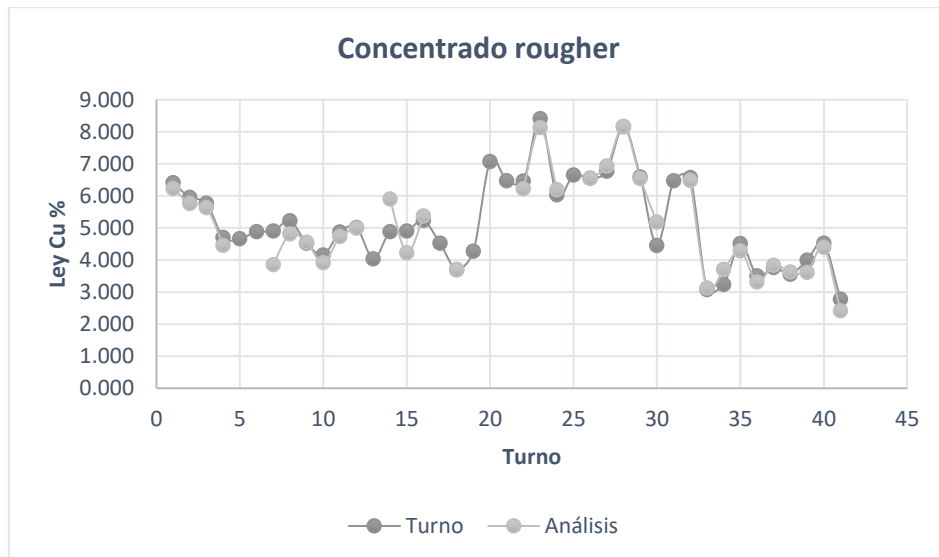


Figura 2.4 Leyes de concentrado *rougher* turno y analizadas.

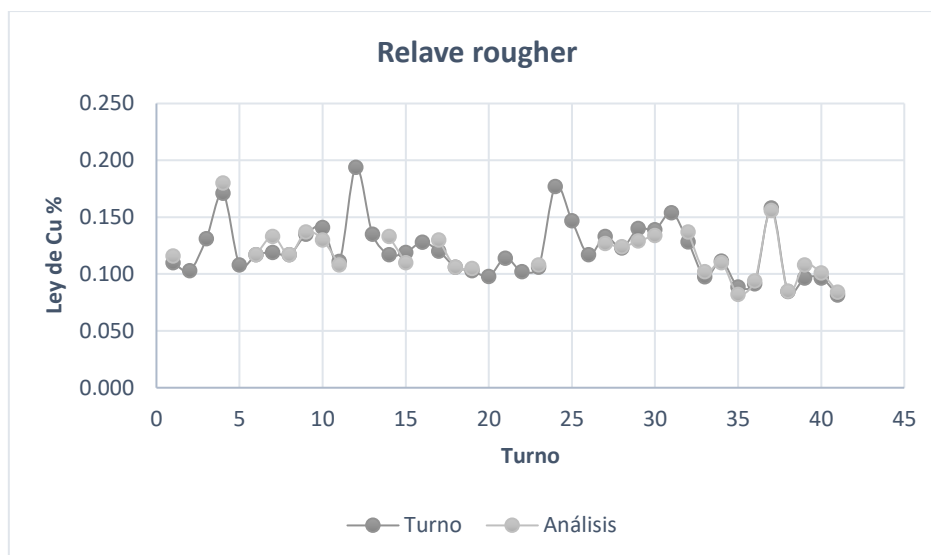


Figura 2.5 Leyes de relave *rougher* turno y analizadas.

Las diferencias observadas en la Tabla 2.5 para el turno 370 A presentan el mayor error en la corriente de alimentación para las leyes, aproximadamente 30%. Sin embargo, la amplia diferencia en las leyes afecta mayormente a los valores de recuperación másica calculados, considerando que este parámetro será utilizado más adelante para evaluar los resultados de los balances, se considera una desviación importante. Ya que este turno representa una fuente de error más que un aporte para el conjunto de datos también es eliminado. Por lo tanto, ahora se cuenta con un conjunto de 40 datos para balancear.

Tabla 2.5 Diferencia leyes turno 370A.

	Ley Cu Análisis %	Ley Cu Turno %	Diferencia abs	Error %
Alimentación	0.922	0.714	0.208	29.13
Concentrado <i>rougher</i>	3.854	4.901	1.047	21.36
Relave <i>rougher</i>	0.133	0.119	0.014	11.76
Recuperación másica	21.20	12.44	8.761	70.42
Recuperación <i>rougher</i>	88.63	85.41	3.226	3.78

2.4. IES

La resolución de los balances se realiza utilizando el software Integrated Extraction Simulator, IES,. Este simulador exclusivo para minería fue creado por la empresa Cooperative Research Centre for Optimising Resource Extraction, CRC ORE, organización australiana creada para optimizar la extracción de recursos en Australia mejorando la productividad del sector minero. (CRCORE, 2022)

El software hoy se encuentra a cargo de ORICA, una corporación multinacional con sede en Australia, es uno de los proveedores más grandes del mundo de explosivos comerciales y sistemas de voladura para los mercados de minería.

IES es la primera plataforma que integra todas las operaciones de minería y procesamiento de minerales en un diagrama de flujo continuo, fue desarrollado con el objetivo de integrar y optimizar los procesos de perforación y tronadura, chancado, molienda y flotación para poder brindar a la administración de minas una plataforma de soporte de decisiones basada en la nube que permite que todos los departamentos de producción se coordinen y optimicen como un solo equipo (Australian mining, 2015). La optimización de las operaciones de procesamiento mediante el uso de IES también permitirá reducciones drásticas en el consumo de energía y agua. (ORICA, 2022)

Beneficios de utilizar IES:

- Cadena de valor minera integrada.
- Nuevas métricas de desempeño: económicas y ambientales.
- Servicio basado en la nube.
- Capacidad de simulación masiva.
- Base de datos de resultados de simulación.
- Desarrollo de modelos y prototipos.
- Seguridad y protección de la información.

La empresa Anglo American posee una licencia de este software, esto permite el uso para la resolución de balances mediante la habilitación de una cuenta personal y la realización de una capacitación para poder utilizarlo correctamente.

2.5. Resolución de balances

Para resolver los balances se cuenta con 30 y 10 turnos por cada campaña de muestreo respectivamente, es decir, los balances serán resueltos para 40 turnos en total.

Para trabajar en IES la solución de los balances, es necesario considerar en el programa el circuito *rougher* como una caja negra donde se presentan 3 corrientes principales, correspondientes a la alimentación, concentrado *rougher* y relave *rougher*. El primer paso en el programa es crear un proyecto nuevo, configurar los componentes de este y las categorías de tamaño que serán utilizadas. Luego se debe dibujar el “*flowsheet*”, el diagrama que representa el problema que será resuelto, en la Figura 2.6 se puede ver el “*flowsheet*” creado en IES con las corrientes principales.

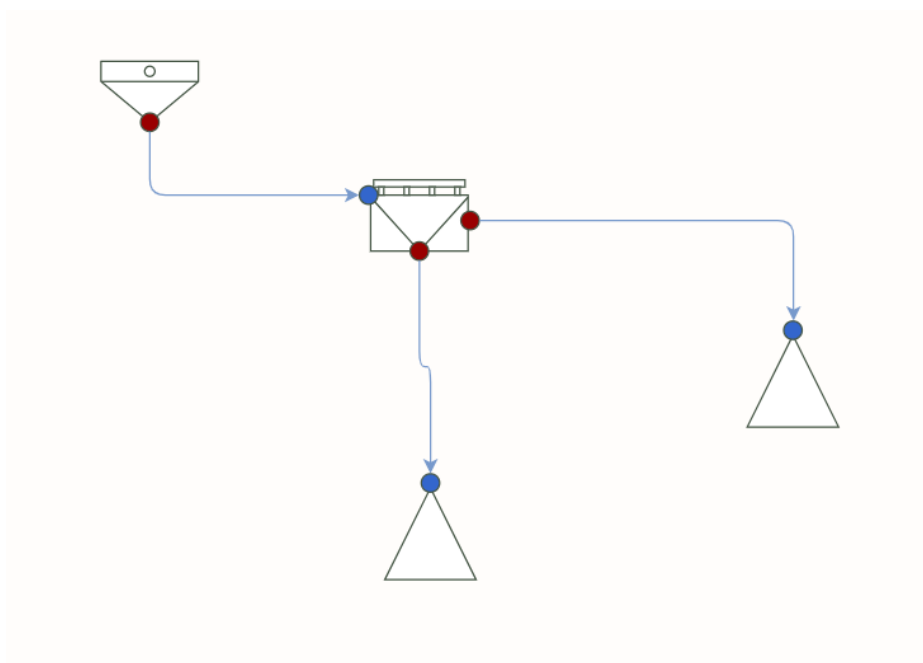


Figura 2.6 Diagrama para balance IES.

Una vez creado el “*flowsheet*” se procede a crear “*survey*” que corresponde a la pestaña donde serán ingresados los datos para cada turno, estos serán los pesos por tamaño, las leyes de CuT por tamaño y el flujo de sólidos. En la Figura 2.7 se observa la forma en que los datos son ingresados en la pestaña “*survey*” este ejemplo corresponde al turno 361A para la corriente de alimentación.

Rougher Feed
? ↶ ↷

Survey Data
PSD Graph

Confidence:
Excellent

Solids Flow (t/h)
waterFlow (t/h)
% Solids (%)

100
Missing
Missing

Size
E

Size	Initial (%)
300 µm	13.100
212 µm	9.420
150 µm	10.320
106 µm	8.530
75 µm	6.750
53 µm	7.440
38 µm	5.560
< 38 µm	38.890

Assay

Element	Confidence	Assay
CuT (%)	Excellent	0.647
Others (%)	Excellent	99.353

Figura 2.7 Datos balance corriente de alimentación en IES.

Aspectos a considerar al ingresar los datos:

Nivel de confianza

Existen 4 niveles de confianza predeterminados en el software, cuyos nombres vienen dados por las 4 opciones disponibles a continuación; excelente, bueno, promedio y pobre. Cada una de estas opciones es representada cuantitativamente por un factor, que al ser elegido será aplicado a los datos de dicha corriente, los valores de estos factores son 2; 5; 10 y 20% respectivamente.

Para poder asignar los niveles de confianza se realizó un estudio acucioso de análisis de sensibilidad de los datos provenientes de análisis químico en todas las corrientes, descrito más adelante en este capítulo. De este estudio se concluyó que las mayores afectaciones se encuentran en la corriente de relave, por lo que, para asignar el nivel de confianza, se debe considerar que el mayor error estará presente en las colas.

En este caso a los valores de las leyes para las 3 corrientes principales, se asignó un nivel de confianza excelente ya que no se quiere que dichos valores tengan una variación luego de ajustar el balance. Por el contrario, a los valores de leyes por tamaño de CuT para las corrientes de concentrado y relave *rougher*, se les asignó el nivel de confianza bueno.

Flujo de sólidos, flujo de agua y porcentaje de sólidos

En el caso del flujo de sólidos se utiliza 100 para la alimentación, el valor de la recuperación másica para el concentrado y la diferencia de ambos valores para la corriente de relave *rougher*. Para el flujo de agua y el porcentaje de sólidos no se encuentra disponible la información desde las pruebas de laboratorio, por lo que no se ingresan dichos valores.

Tamaño

En el ítem tamaño, ya se encuentran las clases de tamaño indicadas en la creación del proyecto por lo que solo se deben ingresar los datos de pesos parciales (%).

Leyes globales

En el ítem “Assay” se debe ingresar los valores de ley para la corriente que se está trabajando y su nivel de confianza. En este caso los elementos disponibles son CuT y otros. En el ítem otros, se consideran las demás especies presentes agrupadas, ya que no se tiene detalle de estas, solamente se ingresa la diferencia del CuT (%) respecto de 100.

Valores CuT por clase de tamaño.

En la Figura 2.8 se muestra el ítem “Assays in size” que corresponde a las leyes por clase de tamaño para los elementos presentes, en este caso CuT y otros. Se ingresan los valores de CuT proveniente de las campañas de muestreo para cada turno por clase de tamaño y en otros se considera la diferencia de los mismos respecto de 100%.

Assays in Size			
Sizes	CuT	(%)	Others (%)
Rougher Feed	Excellent		Excellent
300 µm		0.256	99.744
212 µm		0.310	99.690
150 µm		0.375	99.625
106 µm		0.509	99.491
75 µm		0.662	99.338
53 µm		0.777	99.223
38 µm		0.955	99.045
< 38 µm		0.890	99.110

Figura 2.8 Leyes de cobre por tamaño a balancear.

Una vez ingresados los datos para las 3 corrientes en el turno que se está trabajando, se puede crear el balance de masa en una nueva pestaña, para resolverlos solo se debe clicar en el botón para resolver el balance.

Al resolver el balance, el primer resultado no será el esperado, tal como se puede observar en la Figura 2.9, en la parte superior derecha se tiene un alto error y el status de la solución del balance es confiable pero no óptima, para corregir esto, es necesario agregar un elemento en el diagrama, en IES llamado “subset” que representa a un subconjunto, este se debe ubicar en la alimentación, que es donde se encuentra el desajuste, tal como se ve en la Figura 2.10 previo a la solución del balance.

Mass Balance Results

Status:

Feasible

Elapsed Time(s):

0.34

Score:

60.09

Tolerance:

1.464e-7

Score

Stream	Overall	Solids Flow	% in Size	Assay	Assays in Size
Rougher Feed	37.637637	0.051193	5.267932	0.305941	32.012571
Rougher Conc	1.940601	0.037955	0.112674	0.209291	1.580681
Rougher Tail	20.512405	0.033385	10.191021	0.318149	9.969850

Figura 2.9 Resultado del balance de masa.

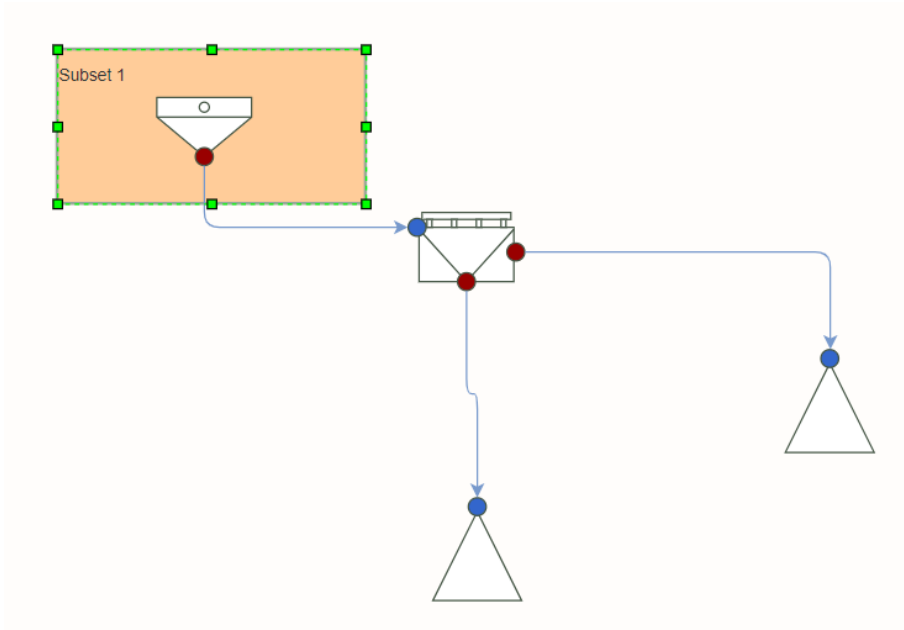


Figura 2.10 Elemento “Subset” en alimentación rougher.

Una vez agregado este elemento, el balance puede ser resuelto unicamente para la corriente seleccionada, en este caso para la alimentación, y como se puede ver en la Figura 2.11 ha cambiado la tolerancia y el estado del resultado es óptimo, por lo tanto una vez que se encuentra balanceada dicha corriente, se debe bloquear la misma con el fin de resolver nuevamente el balance global pero esta vez sin tener cambios en la alimentación.

Mass Balance Results

Status:

Elapsed Time(s):

Score:

Tolerance:

Optimal

0.07

1.71

0.000e+0

Score

Stream	Overall	Solids Flow	% in Size	Assay	Assays in Size
Rougher Feed	1.705560	0.000020	0.011412	0.228566	1.465562
Rougher Conc	1.940601	0.037955	0.112674	0.209291	1.580681
Rougher Tail	20.512405	0.033385	10.191021	0.318149	9.969850

Figura 2.11 Resultado óptimo del balance.

Este procedimiento descrito se debe repetir para todos los turnos disponibles y recopilar la información entregada por los balances, la que será descrita en el siguiente capítulo.

2.6. Ajuste a datos turno

Para los 40 turnos filtrados, que serán utilizados para resolver el balance, no se posee la información sobre las leyes globales en todos los casos. Sin embargo, esta información si está completa para la data de turno, como se muestra en la Tabla 2.6.

Recordando el apartado de toma de muestras se tiene que las muestras que dan origen a la data turno y las que son enviadas para analizar corresponden a la misma muestra de origen, la única diferencia es que la data proveniente de los análisis ha sido mayormente manipulada (envío a laboratorio externo y espera a ser procesada), lo que puede llegar a aumentar el error en este proceso.

Tabla 2.6 Leyes globales data turno.

Turno	x_F	x_C	x_T
361A	0.635	6.410	0.110
362A	0.581	5.950	0.103
363A	0.657	5.770	0.131
367A	0.694	4.700	0.171
368A	0.767	4.664	0.108
369A	0.702	4.881	0.117
371A	0.840	5.220	0.117
372A	0.753	4.520	0.135
373A	0.668	4.160	0.141
374A	0.682	4.870	0.111
361B	0.637	6.540	0.106
362B	0.534	6.670	0.105
369B	0.702	4.881	0.117
370B	0.714	4.901	0.119
372B	0.78	5.230	0.128
373B	0.651	4.520	0.120
374B	0.602	3.696	0.106
375B	0.634	4.274	0.103
380A	0.539	7.070	0.098
381A	0.597	6.470	0.114
382A	0.607	6.460	0.102
383A	0.594	8.410	0.106
384A	0.699	6.030	0.177
385A	0.720	6.650	0.147
380B	0.638	6.550	0.117
381B	0.637	6.770	0.133
382B	0.618	8.160	0.123
383B	0.659	6.590	0.140
384B	0.669	4.456	0.139
385B	0.600	6.470	0.154
387A	0.904	6.569	0.128
388A	0.431	3.079	0.097
390A	0.627	3.234	0.111

391A	0.752	4.512	0.089
393A	0.545	3.510	0.092
388B	0.571	3.770	0.158
390B	0.585	3.561	0.085
391B	0.675	3.992	0.096
392B	0.592	4.523	0.096
393B	0.585	2.778	0.082

Teniendo en cuenta los antecedentes mencionados, se plantearon dos alternativas a considerar para ajustar las leyes globales de los balances.

La primera consiste en utilizar las leyes desde los análisis (incompletas) y para los turnos que no presenten información, completar con la data de turno. El segundo caso sería utilizar solo la data turno para ajustar las leyes. Se elige la segunda opción, para que no haya confusiones, es decir, que todos los balances tengan leyes del mismo origen. La decisión se reafirma con las Figuras 2.3; 2.4 y 2.5, con mínimas diferencias para las leyes de análisis disponibles y las de turno.

Se ajustan las leyes globales de las corrientes de alimentación, concentrado *rougher* y relave *rougher* a los valores del turno para poder balancear las leyes por tamaño de las mismas corrientes. Para resolver esto, es necesario plantear como restricción para la recuperación de Cu y la recuperación másica que sus valores deben ser positivos siempre.

2.7. Análisis de sensibilidad

El objetivo de realizar un análisis de sensibilidad es entender las diferencias que se presentan en los resultados de los balances para la campaña 1 al ser resueltos utilizando el método de Lagrange en Microsoft Excel. También se desea conocer que corriente es más sensible para asignar los grados de confiabilidad en el balance. La solución de los balances de esta forma fue descartada debido a las diferencias presentadas en las recuperaciones másicas y recuperaciones de Cu por clase de tamaño, en algunos casos negativos y en otros con valores que superaban el 100%.

Al igual que con los balances resueltos en IES, utilizando el método anterior se ajustaron las leyes a los datos turno. Para lograr la solución del balance, se asignó un coeficiente a las varianzas por tamaño y por corriente, por lo que es pertinente cuestionar si el error asociado

a cada corriente mediante la varianza es muy influyente en el resultado logrado, y si el valor asignado arbitrariamente al inicio corresponde al mejor ajuste respecto a la *raw data* (datos originales). Para comprobarlo se realiza un análisis de sensibilidad donde en cada caso se amplifican las varianzas con distintos valores por corriente y por tamaño. Los valores utilizados son: 1, 10, 50, 80, 100, y 300; y son modificados para una corriente a la vez. El caso base con el que se resolvieron los balances anteriormente, corresponde a los valores de 10, amplificando la varianza en cada corriente. Los ajustes de varianza se representan anteponiendo una S al valor utilizado S1 a S300.

Los balances se resuelven ajustando las leyes globales a los datos turno nuevamente, con las combinaciones propuestas. Es decir, por ejemplo, el valor 1 será reemplazado en la corriente de alimentación y las demás conservarán el valor 10. Para ese caso, se resuelven los balances nuevamente para todos los turnos, y así sucesivamente con los 6 casos propuestos, y para cada corriente.

Para analizar los resultados, se realizan gráficas recuperación másica y recuperación de Cu *rougher* por clase de tamaño donde se incluyen los resultados de los balances para los casos estudiados y los datos originales (*raw data*) como referencia, con el fin de observar cómo se comportan los resultados respecto a la misma.

Como ejemplo se presentan en las Figuras 2.12, 2.13 y 2.14, las recuperaciones de Cu por tamaño obtenidas del análisis de sensibilidad en la corriente de alimentación, concentrado *rougher* y relave *rougher* para el turno 362B. En el caso de la alimentación, los ajustes del S1 al S300 siguen una tendencia similar, pero se alejan de los datos originales (*raw data*) en los tamaños mayores de partícula, especialmente en la clase de tamaño que va desde los 212 a 300 micrones. Por otra parte, en el caso de la corriente de concentrado, los ajustes S50, S80, S100 y S300 presentan un cambio en la tendencia para el mayor tamaño, y en el caso de la corriente de relave, aumenta la variabilidad principalmente en la clase [212-300] micrones. Este turno representa un caso particular y no refleja la tendencia obtenida por la totalidad de los datos.

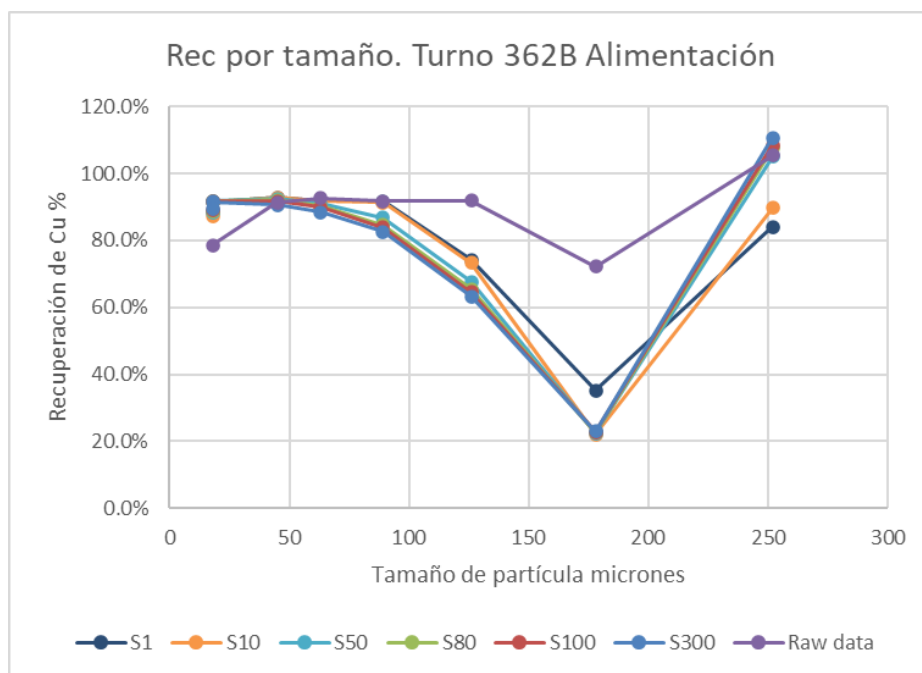


Figura 2.12 Sensibilidad turno 362B corriente alimentación *rougher*.

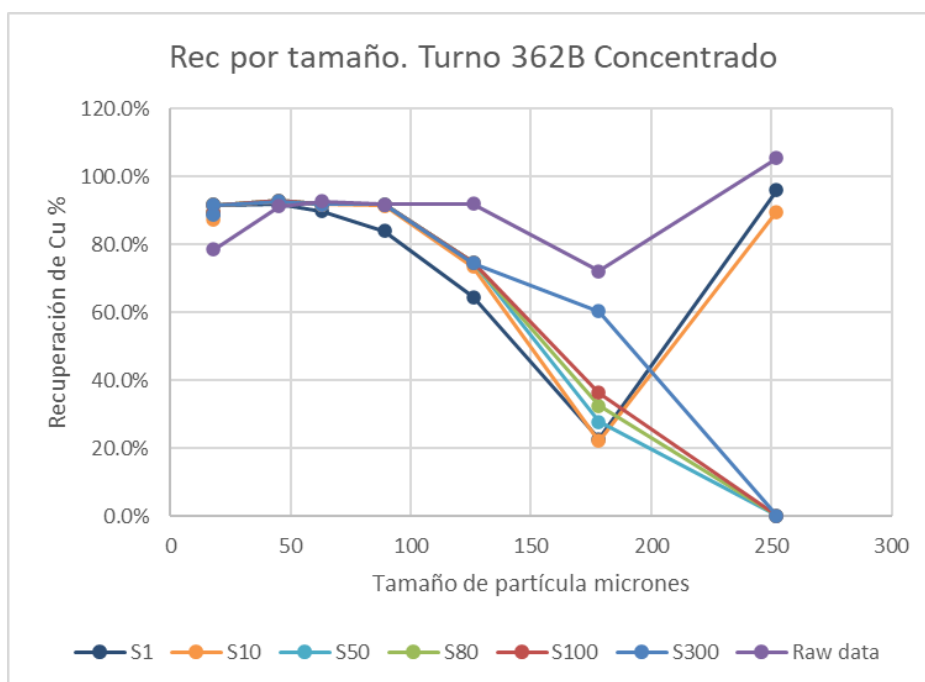


Figura 2.13 Sensibilidad turno 362B corriente concentrado *rougher*.

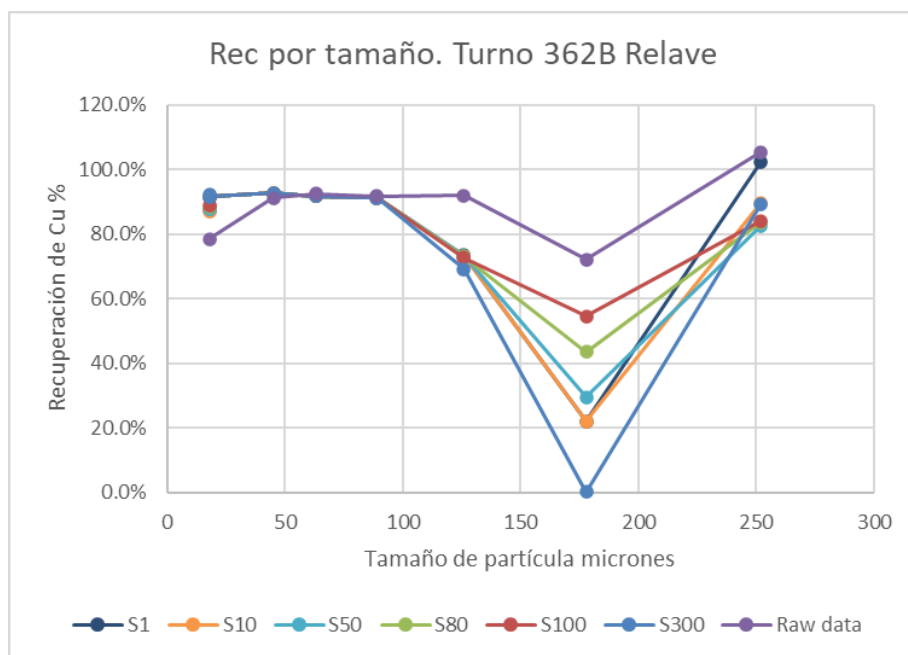


Figura 2.14 Sensibilidad turno 362B corriente relave *rougher*.

Para mostrar las diferencias en las tendencias obtenidas, se muestra un segundo ejemplo realizado para el turno 373A (Figuras 2.15, 2.16 y 2.17). En este caso, la variabilidad que se ve como resultado del análisis de sensibilidad es considerablemente menor que para el turno 362B en las 3 corrientes. Se observan diferencias únicamente en la clase [212-300[micrones y también, en la clase +300 micrones en la corriente de relave *rougher*, pero en menor proporción. El mejor ajuste, sin embargo, es distinto según cada corriente.

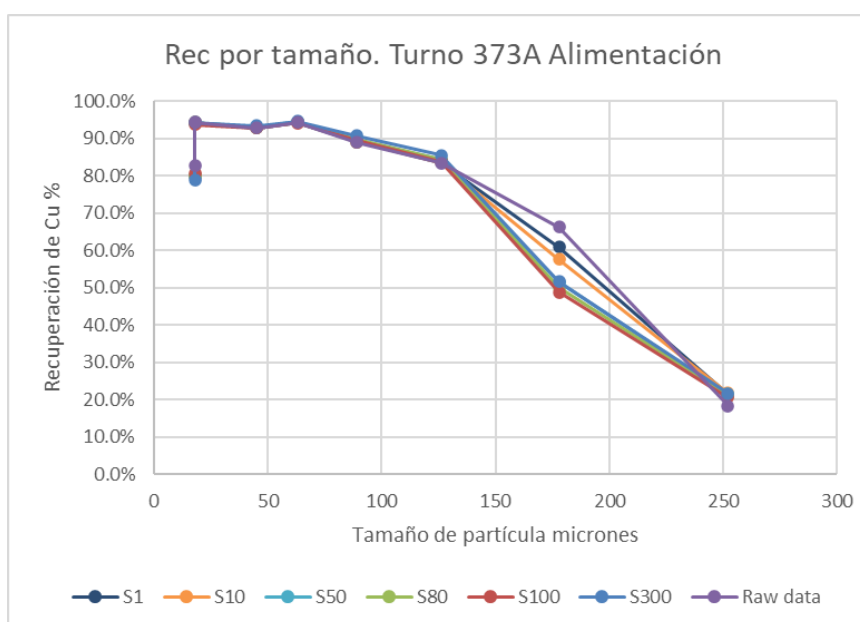


Figura 2.15 Sensibilidad turno 373A corriente alimentación *rougher*.

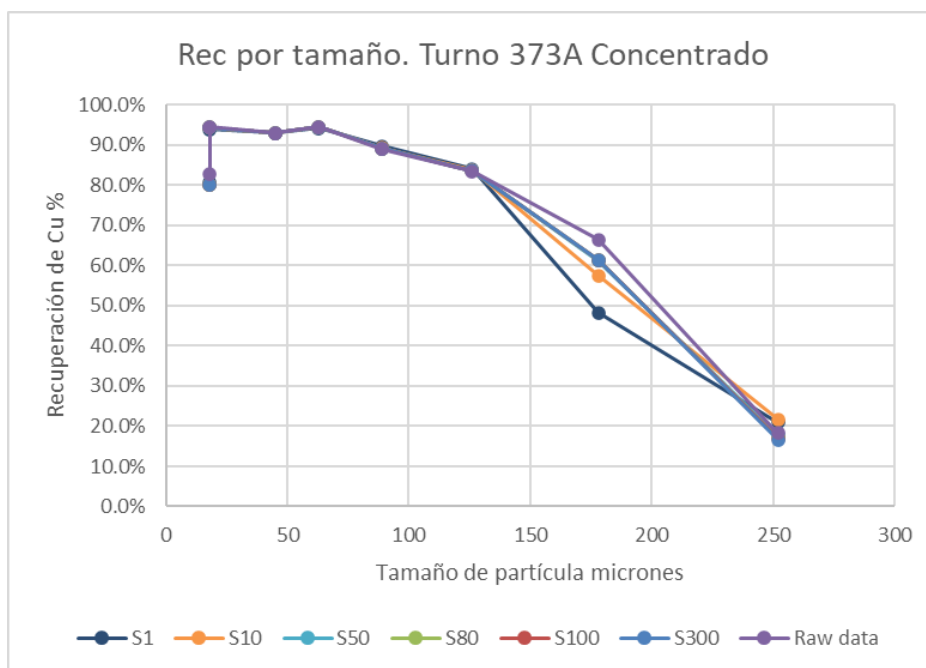


Figura 2.16 Sensibilidad turno 373A corriente concentrado *rougher*.

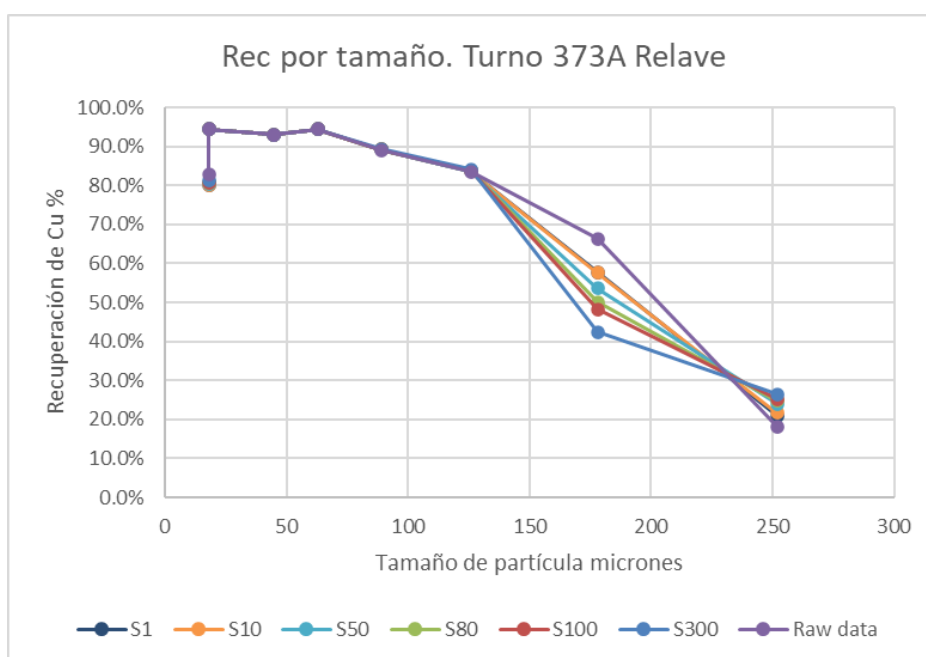


Figura 2.17 Sensibilidad turno 373A corriente relave *rougher*.

Al resolver nuevamente los balances en cada caso se verificó el cambio en las leyes por clase de tamaño y los valores respecto al caso original no presentaron diferencias importantes. Para resumir los resultados del análisis, se registró la mejor respuesta obtenida para cada corriente. En la Tabla 2.7 se muestran las combinaciones elegidas para cada uno de los 30 turnos. Hay tres aspectos importantes a destacar de estos valores:

- El turno 373B es el único que conserva la combinación original con la que se resolvieron en un inicio los balances, demostrando que era bastante arbitraria la elección y se aleja del mejor ajuste de la data original (raw data).
- El turno 369B presenta en las tres corrientes el mismo factor, además del anterior que corresponde al caso base. Por lo tanto, se comprueba que habría sido arbitrario, también, realizar el análisis de sensibilidad asignando el mismo valor a las 3 corrientes.
- Como se mencionó anteriormente, el ajuste S300 es el que afecta más a los datos en general, generando mayores desviaciones en algunos casos, especialmente en los mayores tamaños. Como se observa en la Tabla 2.7 en 2 turnos se obtuvo como óptimo en una corriente dicho ajuste (en rojo).

Tabla 2.7 Resumen análisis de sensibilidad por turno.

Turno	Alimentación	Concentrado Ro	Relave Ro
361A	S1	S10	S10
362A	S10	S50	S1
363A	S1	S1	S10
367A	S10	S100	S10
368A	S1	S50	S1
369A	S1	S10	S10
371A	S1	S10	S80
372A	S1	S50	S50
373A	S1	S50	S1
374A	S1	S100	S1
361B	S1	S50	S50
362B	S1	S50	S100
369B	S1	S1	S1
370B	S10	S10	S1
372B	S1	S10	S1
373B	S10	S10	S10
374B	S1	S10	S80
375B	S1	S50	S1
380A	S1	S50	S1*
381A	S10	S50	S1
382A	S1	S80	S50
383A	S1	S300	S50
384A	S1	S50	S50
385A	S50	S1	S80
380B	S1	S10	S50
381B	S1	S100	S300
382B	S1	S80	S1
383B	S1	S10	S100

384B	S1	S80	S1
385B	S1	S100	S1

Los balances son resueltos por última vez, utilizando ahora las combinaciones presentadas en la Tabla 2.7, para las varianzas por corriente. En la Figura 2.18, se observa la recuperación de Cu por tamaño obtenida para el turno 362B. En este caso, el balance fue resuelto ajustando las varianzas con la combinación elegida del análisis de sensibilidad. Se observa que las diferencias con los datos originales (*raw data*) disminuyeron, principalmente en la clase donde se acentuaba más en todos los casos. Lo mismo ocurre con el turno 373A, cuyos resultados se presentan en la Figura 2.19. En este caso, se observa una mejora justificativa del ajuste.

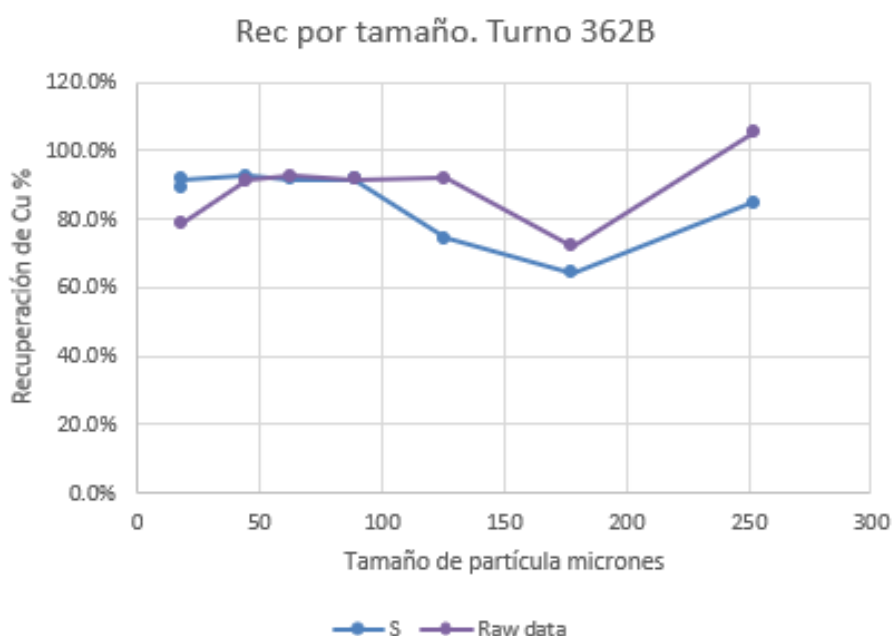


Figura 2.18 Resultado sensibilidad turno 362B.

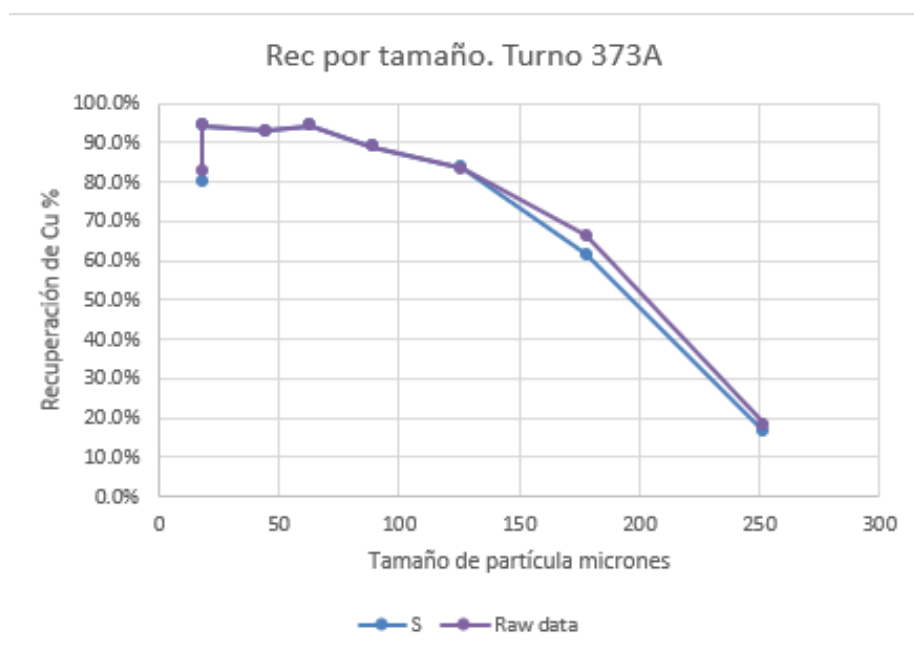


Figura 2.19 Resultado sensibilidad turno 373A.

Luego de realizar el análisis de sensibilidad a los datos de la primera campaña de muestreo, se tienen las siguientes observaciones:

- El ajuste S300 muestra los cambios más significativos en la recuperación por tamaño, especialmente en las dos clases de tamaño superior.
- La tendencia que siguen las curvas para la corriente de alimentación y concentrado muestran menor variabilidad que para la corriente de relave.
- Los ajustes en corriente de relave *rougher* son más susceptibles a cambios. (más sensible, mayor error)
- Los resultados de los balances resueltos con las combinaciones de factores de la Tabla 2.7 se ajustan mejor a los datos originales (*raw data*) que el caso original (S10).

De lo anterior, se rescata que los errores son más tolerables para la corriente de relave. Ya que, el análisis de sensibilidad ha demostrado que es donde las mayores diferencias son obtenidas.

2.8. Resumen

Para resumir la metodología explicada en este capítulo, se recomienda para cada turno que se quiera analizar, seguir los siguientes pasos:

Chequear si se dispone de las leyes globales analizadas para todos los datos, en caso de tenerlas usarlas para resolver los balances. Si no se encuentran disponibles se usan las leyes de data turno.

Si se usan las leyes de data turno, se debe verificar que coincidan con las leyes analizadas que se encuentren disponibles. Si las diferencias representan un error mayor al 15%, descartar dichos datos.

Revisar que la información analizada de pesos y leyes por tamaño se encuentre completa para las corrientes requeridas en el estudio. En caso de faltar información, los balances de dicho turno no podrán ser resueltos.

Para los turnos en cuestión, es importante revisar el estado de los cortadores, para evitar analizar datos que puedan presentar una alta desviación debido a problemas en la toma de la muestra.

Una vez filtrados los datos, resolver los balances con ayuda de IES, siguiendo los pasos descritos.

CAPITULO 3

3. RESULTADOS

3.1. Resultados balances

Una vez resueltos los balances en IES lo que se obtiene son las leyes por clases de tamaño de partícula y las distribuciones másicas balanceadas. En la Figura 3.1 se muestran las distribuciones másicas balanceadas e iniciales previo al desarrollo del balance para el turno 361A en la corriente de alimentación. En la Figura 3.2 se presentan las leyes de cobre iniciales y balanceadas por clase de tamaño. Como parte del desarrollo del balance, se ajustan las distribuciones másicas y leyes por clase de tamaño. Usando la opción del software “excelente” para el grado de confianza, las leyes globales se mantienen en su valor inicial, siendo esto importante ya que dichos valores de leyes se encuentran ajustados a la data turno tal como se explicó en el capítulo anterior. Los valores de leyes globales se muestran en el recuadro “Assay”. Cabe destacar que en algunos casos las leyes cambiaron levemente, y también el valor de las otras especies, donde la suma de Cu y otras especies no alcanza el valor 100 (Figura 3.1), se entiende que dicho error es un mal ajuste del software.

Mass Balance Data		PSD Graph	Scatter Graph
Confidence:	Excellent		
Solids Flow (Initial)	(t/h)	Solids Flow (Balanced)	(t/h)
100.000		100.102	
Size			E
Size	Initial (%)	Balanced	
300 µm	13.100	13.089	
212 µm	9.420	9.421	
150 µm	10.320	10.320	
106 µm	8.530	8.553	
75 µm	6.750	6.766	
53 µm	7.440	6.742	
38 µm	5.560	5.300	
< 38 µm	38.890	39.809	
Assay			
Element	Confidence	Initial	Balanced
CuT (%)	Excellent	0.635	0.635
Others (%)	Excellent	99.365	98.762

Figura 3.1 Resultado balance pesos pasantes y ley de cabeza alimentación, turno 361A.

Assays in Size				
Sizes	CuT (%)		Others (%)	
	Initial	Balanced	Initial	Balanced
Rougher Feed	Good		Good	
300 µm	0.256	0.250	99.744	99.117
212 µm	0.310	0.336	99.690	98.934
150 µm	0.375	0.320	99.625	98.994
106 µm	0.509	0.364	99.491	98.907
75 µm	0.662	0.455	99.338	98.836
53 µm	0.777	0.533	99.223	98.792
38 µm	0.955	0.711	99.045	98.597
< 38 µm	0.890	1.010	99.110	98.517

Figura 3.2 Resultado balance leyes por tamaño alimentación, turno 361A.

En la Tabla 3.1 se resumen las leyes por tamaño iniciales y las obtenidas del balance para las 3 corrientes en estudio y las 8 clases de tamaño consideradas, para el turno 363A. De la misma forma se recopila la información para todos los datos.

Tabla 3.1 Resultado balance leyes por tamaño turno 363A.

Tamaño	Alimentación		Concentrado <i>rougher</i>		Relave <i>rougher</i>	
	Inicial	Balanceado	Inicial	Balanceado	Inicial	Balanceado
300 μm	0.353	0.353	3.298	3.298	0.241	0.241
212 μm	0.308	0.308	3.778	3.759	0.123	0.123
150 μm	0.423	0.423	4.386	4.386	0.075	0.075
106 μm	0.542	0.542	4.917	4.977	0.06	0.06
75 μm	0.694	0.694	5.69	5.668	0.058	0.058
53 μm	0.858	0.858	6.53	6.53	0.057	0.057
38 μm	0.707	0.707	7.58	5.752	0.078	0.078
<38 μm	1.004	0.988	6.883	7.059	0.183	0.183

Con las leyes por tamaño se puede calcular la recuperación másica por tamaño según la ecuación (3.1) y también las recuperaciones por tamaño. De esta forma para el mismo turno tenemos la distribución de recuperaciones másicas por tamaño y las recuperaciones de Cu por tamaño como se observa en la Tabla F.1 en Anexo F.

$$\text{Recuperación másica } \% = \frac{x_F - x_T}{x_C - x_T} \cdot 100 \quad (3.1)$$

3.2. Diferencia turnos balanceados

Antes de focalizar el análisis en las recuperaciones por tamaño, se estudiaron los resultados globales obtenidos para las leyes de alimentación, concentrado *rougher* y relave *rougher*, para todos los turnos, luego de ser balanceados. Como se mencionó, no se espera que los valores presenten variaciones importantes.

Sin embargo, para cuatro turnos, pertenecientes a la primera campaña de muestreo, se presentan importantes diferencias, debido a los desvíos presentados en los turnos 362A, 372B, 380A y 380B, en los cuatro casos mayores al 15%. Estos fueron descartados del conjunto de datos, ya que, al tener un alto error, no proporcionan información confiable a los resultados. Finalmente, el conjunto de datos incluyendo ambas campañas de muestreo, quedó con 36 turnos. En la Tabla 3.2 se resumen las desviaciones registradas en las leyes globales balanceadas para dichos turnos, para la corriente donde se encuentra la principal diferencia.

Tabla 3.2 Diferencias leyes globales. Turnos descartados.

Turno	Corriente	Ley turno	Ley balance	Error %
362A	Relave rougher	0.103	0.129	25.24
372B	Relave rougher	0.128	0.149	16.41
380A	Concentrado rougher	7.070	5.81	17.82
380B	Concentrado rougher	6.550	5.54	15.42

3.3. Recuperación por tamaño

Las recuperaciones por tamaño para todos los turnos se resumen en la Tabla F.2 en Anexo F y se grafican, separándolas por campaña de muestreo como se presenta en las Figuras 3.3 y 3.4, obteniendo una curva de recuperación por tamaño para cada turno. La tendencia que siguen los datos, es la esperada, ya que las recuperaciones alcanzan los máximos valores en tamaño intermedio, decayendo para los finos, y más bruscamente, para los gruesos. En las Figuras 3.3 y 3.4 hay una diferencia significativa para un turno, que presenta recuperaciones menores que la tendencia general. En la Figura 3.3 corresponde al turno 384A, y en la Figura 3.4 al turno 388B. Ambos turnos serán evaluados para estudiar esta diferencia.

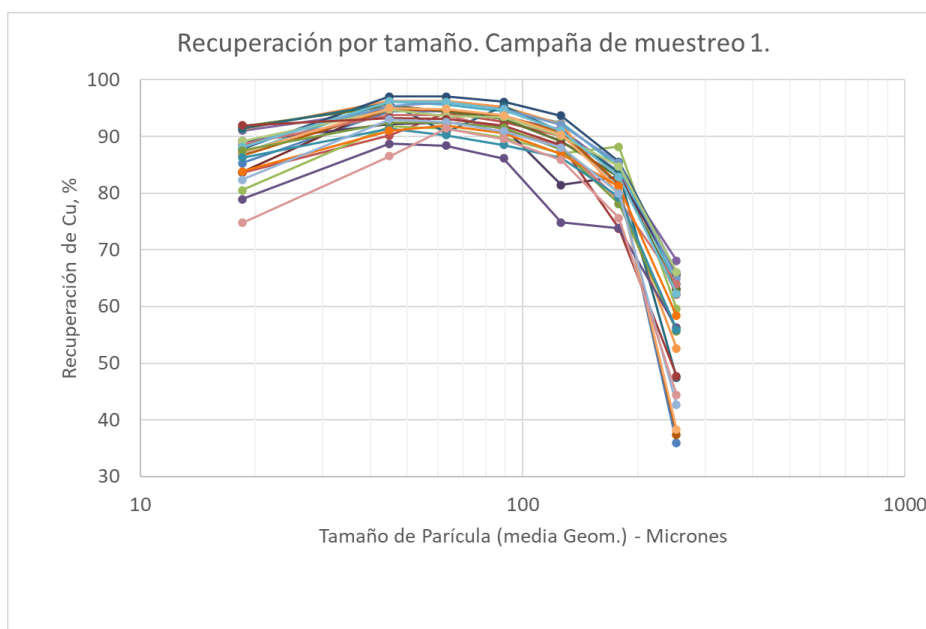


Figura 3.3 Recuperación por tamaño 26 turnos balanceados, campaña 1.

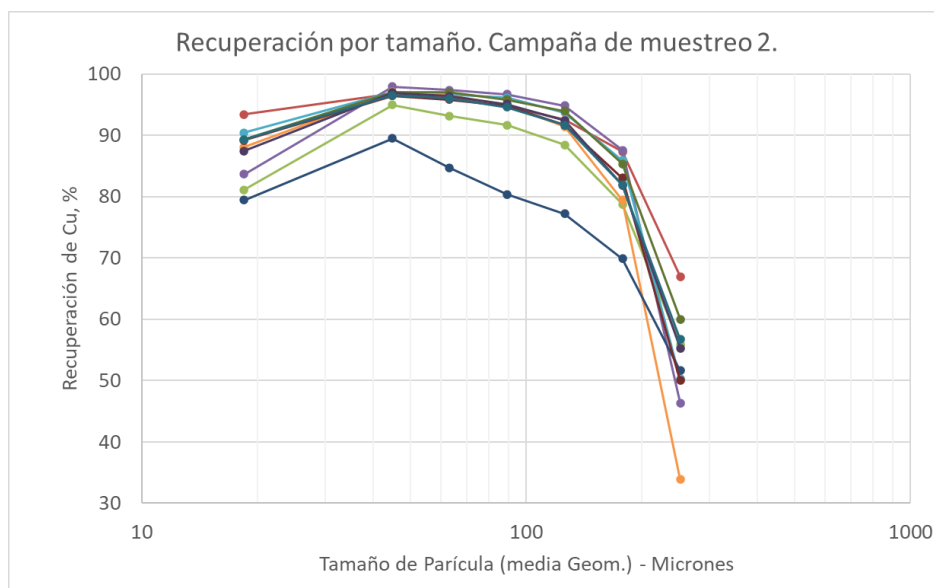


Figura 3.4 Recuperación por tamaño 10 turnos balanceados, campaña 2.

Es importante considerar el contenido de cobre en cada fracción de tamaño, dada la diferencia de recuperación que se observa para los tamaños gruesos y finos. Para esto se realizó una gráfica de distribución del contenido de Cu por unidad de masa (Figura 3.5), según la fracción de tamaño. En la Figura 3.5 se observa que, en el 50% de la masa, que incluye a las dos fracciones de tamaño más finas se encuentra aproximadamente el 70% del cobre. Por lo tanto, el análisis de las desviaciones en los tamaños menores es más relevante que en las clases de mayor tamaño debido a la ocurrencia de cobre.

Las principales desviaciones obtenidas en la solución de los balances, respecto a la data original, se dan en la fracción más gruesa de tamaño, por lo que dicha clase tiene una confiabilidad menor en el resultado de recuperación. Sin embargo, debido a la ocurrencia de cobre, que es mayor en las fracciones finas, el análisis no se centrará en las desviaciones de las clases gruesas.

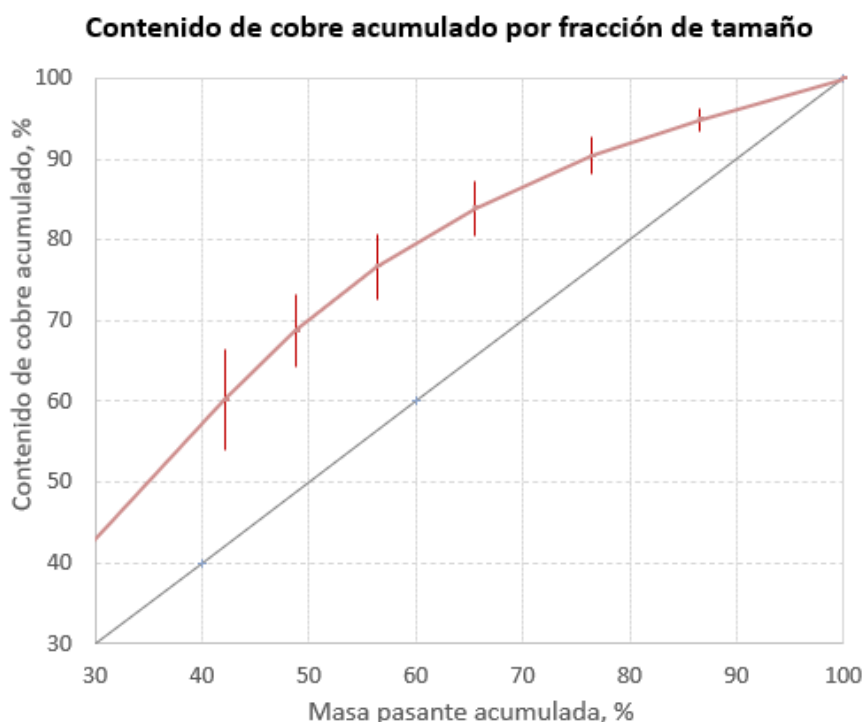


Figura 3.5 Contenido de cobre en masa total por fracción de tamaño.

3.4. Características del mineral

Para comprender como se ven afectadas las recuperaciones por tamaño, se debe considerar que existen diversas variables que le dan características especiales al mineral. Sin embargo, estudiando el comportamiento histórico de la planta, se tomarán en cuenta las variables con mayor impacto, para clasificar los resultados obtenidos del balance. Para esto, se tomará en cuenta la ley de alimentación, el Factor k y el P_{80} . El Factor k corresponde a la razón de cobre soluble con respecto al cobre total. El P_{80} , que muestra cómo es la granulometría, corresponde al tamaño de partícula donde se encuentra el 80% del material tamizado, se expresa en micrones.

Además de las características propias del mineral, un factor muy importante para conocer la recuperación que se puede obtener, es la operación de la planta. Pequeños cambios en la misma pueden producir cambios a los resultados esperados para un tipo de mineral. Existen diversas variables que es interesante observar en forma más amplia, en este caso se estudia el comportamiento de la recuperación másica en los turnos seleccionados para comprender

como se relaciona con el resultado obtenido de recuperación de Cu y con las variables de entrada del proceso propuestas para el estudio (Ley de alimentación, Factor k y P_{80}).

De los balances, se cuenta con los valores de recuperación másica por tamaño para todos los turnos. Además, se recopiló información de la recuperación másica global para la recuperación *rougher* de data turno y de la data balanceada.

En el caso del Factor k, se tienen valores calculados desde los análisis donde se reporta el CuS y el CuT. Estos datos también son reportados desde la data turno, por lo que se calcula igualmente el Factor k. Se comparan los resultados con la data de análisis y de turno, en el caso de los datos desde análisis no se encuentran completos para el CuS, por lo que no se puede calcular el Factor k para todos los turnos. En algunos turnos se encuentran disponibles pero difieren los valores calculados y analizados, por lo que los valores de Factor k se ven alterados. En cambio, para la data turno, solo falta información para un turno, el 390A, por lo que serán considerados los valores de Factor k desde data turno y el análisis excluirá al turno sin información.

Para el P_{80} , los valores son reportados con la data proveniente de laboratorio. Además, éstos fueron recalculados y comparados para asegurar su confiabilidad.

En la Tabla 3.3 se resumen los valores de recuperación másica, Factor k y P_{80} para los turnos en estudio.

Tabla 3.3 Valores variables recuperación másica, Factor k y P_{80} .

Turno	Recuperación másica	Factor K	P_{80}
361A	8.33	4.25	234
363A	9.33	8.07	286
367A	11.55	9.80	273
368A	14.46	7.43	209
369A	12.28	6.84	221
371A	14.17	4.05	238
372A	14.09	6.37	274
373A	13.11	6.29	243
374A	12.00	6.01	215
361B	8.25	5.81	224
362B	6.53	6.55	278
369B	12.28	7.25	188
370B	12.44	4.12	237
373B	12.07	6.45	217

374B	13.82	7.64	251
375B	12.73	4.73	198
381A	7.60	5.70	236
382A	7.94	6.26	233
383A	5.88	7.91	222
384A	8.92	10.16	211
385A	8.81	12.78	217
381B	7.59	8.32	213
382B	6.16	6.63	182
383B	8.05	7.74	246
384B	12.28	9.27	219
385B	7.06	11.83	213
387A	12.05	4.98	272
388A	11.21	6.50	252
390A	15.67	NO DATA	222
391A	14.99	3.99	172
393A	13.45	4.44	203
388B	11.43	3.46	237
390B	14.29	4.59	189
391B	15.19	3.72	196
392B	11.20	5.32	215
393B	19.93	5.30	174

Considerando que para los turnos estudiados el valor mínimo de recuperación másica es 5,88 y el máximo 19,93 se proponen 3 rangos para estudiar el comportamiento de las recuperaciones según la operación de la planta. En el caso de la ley de alimentación, el Factor K y el P_{80} , se proponen dos rangos en cada caso.

En la Tabla 3.4 se muestran las mineralogías de alimentación reportadas por *dispatch*, que corresponde a un sistema de gestión del área mina, estas mineralogías provienen del modelo de bloques y se presentan para los 40 turnos balanceados. Se presentan especies de interés con contenido de cobre (covelina, calcopirita, calcosina y bornita), y también pirita y molibdenita total.

Tabla 3.4 Mineralogía *dispatch* por turno en corriente de alimentación.

Turno	%Cut	%CuS	%MoT	Cu Cv	Pirita	Cu Cpy	Cu Cc	Cu Bo
361A	0.596	0.039	0.016	0.017	2.384	1.051	0.227	0.010
362A	0.640	0.043	0.020	0.016	3.013	1.091	0.253	0.010
363A	0.625	0.044	0.020	0.015	2.472	1.051	0.254	0.007
367A	0.694	0.061	0.019	0.024	2.154	0.923	0.367	0.007
368A	0.714	0.041	0.034	0.116	2.445	1.151	0.324	0.012

369A	0.638	0.041	0.029	0.019	2.217	1.034	0.282	0.010
371A	0.636	0.036	0.015	0.019	3.054	1.281	0.180	0.012
372A	0.727	0.054	0.017	0.022	2.381	0.988	0.398	0.013
373A	0.727	0.048	0.023	0.017	3.038	1.182	0.316	0.010
374A	0.591	0.049	0.017	0.024	2.545	0.724	0.361	0.010
361B	0.633	0.045	0.018	0.016	4.798	0.981	0.287	0.012
362B	0.611	0.043	0.017	0.014	2.443	1.029	0.250	0.007
369B	0.796	0.040	0.034	0.026	3.598	1.365	0.309	0.031
370B	0.765	0.032	0.027	0.032	4.609	1.475	0.218	0.042
372B	0.723	0.055	0.018	0.014	2.412	0.956	0.405	0.010
373B	0.669	0.048	0.013	0.017	2.857	1.015	0.314	0.010
374B	0.559	0.045	0.015	0.024	2.213	0.758	0.284	0.011
375B	0.676	0.035	0.014	0.016	3.628	1.477	0.144	0.011
380A	0.603	0.029	0.015	0.008	3.426	1.485	0.097	0.012
381A	0.577	0.032	0.014	0.012	2.379	1.110	0.195	0.008
382A	0.590	0.045	0.012	0.022	2.265	0.980	0.230	0.010
383A	0.610	0.040	0.011	0.018	2.751	1.124	0.206	0.011
384A	0.701	0.065	0.010	0.031	2.375	1.098	0.321	0.013
385A	0.555	0.044	0.013	0.014	1.819	0.835	0.273	0.004
380B	0.602	0.031	0.016	0.008	2.929	1.394	0.113	0.011
381B	0.586	0.034	0.011	0.021	2.050	0.957	0.253	0.009
382B	0.594	0.039	0.012	0.016	2.848	1.172	0.173	0.011
383B	0.708	0.060	0.010	0.029	2.324	1.122	0.296	0.013
384B	0.671	0.087	0.009	0.045	1.887	0.926	0.546	0.016
385B	0.557	0.057	0.011	0.024	1.308	0.746	0.363	0.021
387A	0.555	0.044	0.013	0.014	1.819	0.835	0.273	0.004
388A	0.597	0.035	0.019	0.027	2.930	1.147	0.174	0.014
390A	0.602	0.022	0.080	0.024	3.243	1.261	0.142	0.016
391A	0.638	0.026	0.126	0.038	4.385	1.362	0.140	0.017
393A	0.651	0.041	0.023	0.023	2.227	1.152	0.309	0.010
388B	0.798	0.040	0.055	0.025	3.900	1.926	0.080	0.012
390B	0.643	0.020	0.146	0.039	4.940	1.430	0.109	0.018
391B	0.657	0.025	0.144	0.043	4.774	1.398	0.133	0.018
392B	0.503	0.015	0.036	0.009	2.600	1.178	0.078	0.006
393B	0.679	0.047	0.024	0.027	2.185	0.987	0.320	0.013

3.4.1. Clasificación de rangos de variables

Se incorporó la clasificación de los turnos según la recuperación másica y tres características del mineral (Ley de alimentación, Factor k y P_{80}). De esta forma, se distribuyeron los turnos en rangos de estas variables, lo cual permite estudiar el comportamiento de la recuperación en los mismos.

En la primera clasificación, hay 3 rangos para la recuperación másica y dos para la ley de alimentación. De esta forma, al clasificar las recuperaciones, existen 6 posibilidades. En la Tabla 3.5 se puede observar la cantidad de turnos correspondiente a cada rango y los valores límites de los rangos propuestos. Para definir los límites de los rangos se eligió usar la mediana debido al número de datos, para que la distribución de estos fuera más homogénea.

Tabla 3.5 Cantidad de turnos por rango de Ley de alimentación y recuperación másica.

	Ley alim < 0.64%	Ley alim > 0.64%
Recuperación másica < 9	9	3
9 < Recuperación másica < 12.5	3	9
Recuperación másica < 12.5	6	6

En la Figura 3.6 se observan las recuperaciones *rougher* reportadas en la data turno y las calculadas con las leyes balanceadas. Como para los balances las leyes globales se ajustaron a las del turno, esta comparación se realiza para observar si hay concordancia entre el resultado del balance y la data turno original. Como muestra la Figura 3.6 no hay diferencias significativas.

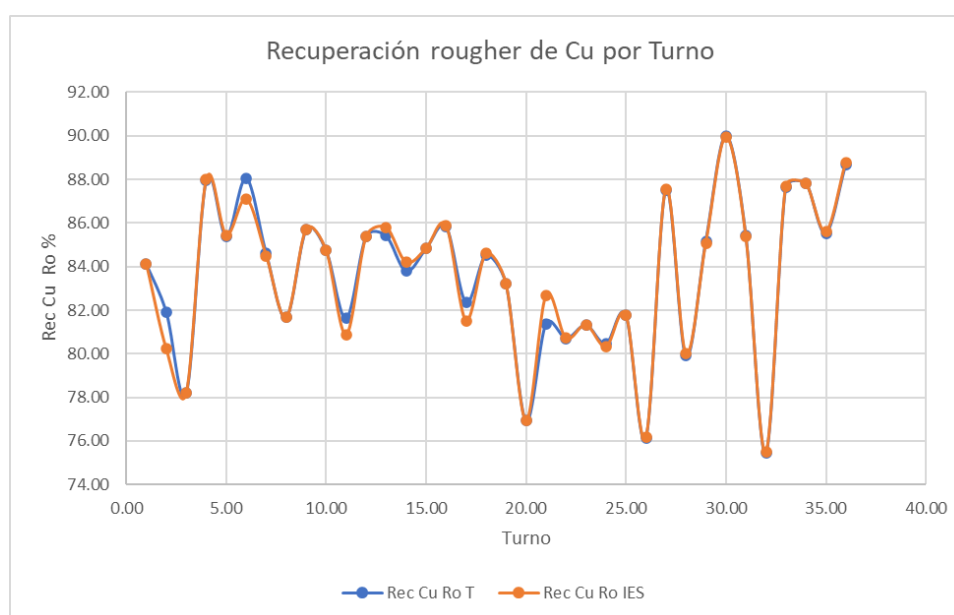


Figura 3.6 Recuperación datos turno y IES.

En las Figuras 3.7 y 3.8 se presentan las curvas de recuperación por tamaño obtenidas para la clasificación por rangos de recuperación másica y ley de alimentación. En las gráficas se incluyen los promedios de las recuperaciones *rougher* obtenidas en cada caso. Además, se presentan las barras error considerando un intervalo de confianza de 95%, asumiendo una

distribución normal de los datos. En la leyenda de las Figuras 3.7 y 3.8 “MP” representa a la recuperación másica.

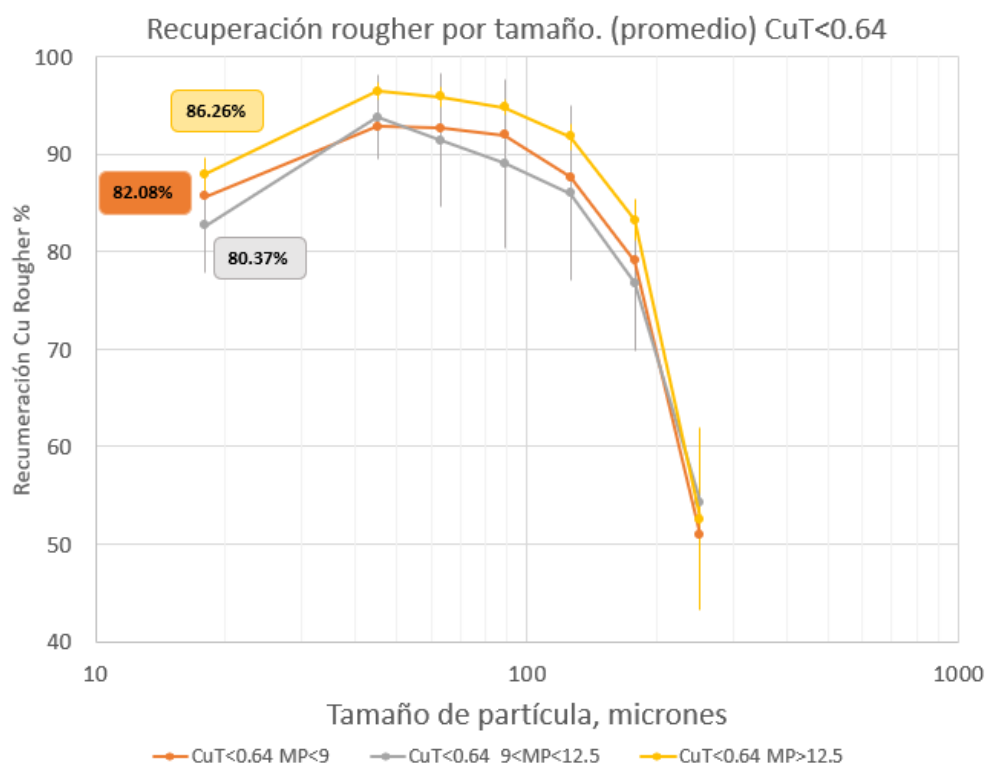


Figura 3.7 Recuperación por tamaño, baja ley, rangos de recuperación másica.

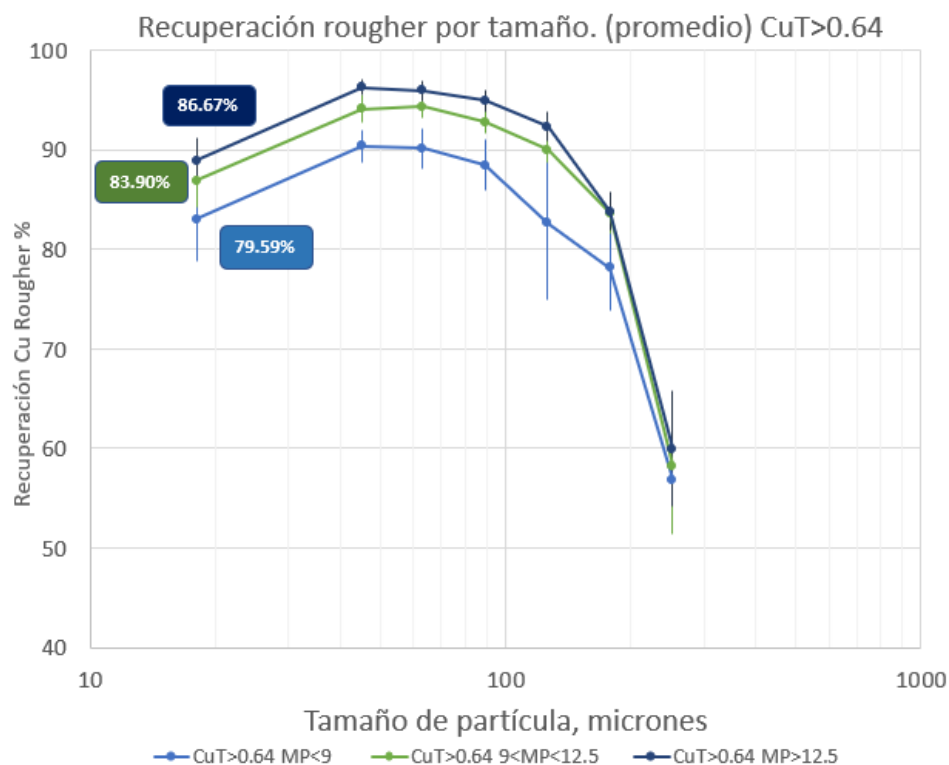


Figura 3.8 Recuperación por tamaño, alta ley, rangos de recuperación másica.

De los resultados obtenidos, se puede notar que, en el caso de la baja ley (Figura 3.7), para los rangos de recuperación másica intermedio y bajo no se sigue la tendencia esperada de las curvas, ya que a mayor recuperación másica se debería alcanzar una mayor recuperación de Cu. Esto se puede deber a múltiples desviaciones en el tratamiento del mineral y también de los datos, que serán explicados en detalle en el Capítulo 4.

En el caso de la alta ley (Figura 3.8), se sigue la tendencia esperada de las curvas y se muestra un gran efecto en la recuperación para los turnos que presentan alta ley y baja recuperación másica. Se puede decir, que independiente de la ley de alimentación, los beneficios obtenidos por un tratamiento con un valor de recuperación másica alto son considerables. También se concluye de las Figuras 3.7 y 3.8 que para el mayor tamaño las mejoras producto del tratamiento no son claras, sino más bien dependen de la ley de alimentación. Como última observación, se destaca la baja recuperación obtenida con una alta ley de alimentación y una baja recuperación másica; siendo más perjudicial en este caso que al tener una menor ley de alimentación. No se descarta que esta observación sea producto de la desviación presentada en la curva de baja de ley y recuperación másica.

La siguiente clasificación viene dada por la ley de alimentación y el Factor k, con dos rangos de cada variable. En la Tabla 3.6 se resumen los límites y el número de datos que corresponde a cada clasificación. Para definir los límites de los rangos se eligió usar la mediana debido al número de datos, para que la distribución de estos fuera más homogénea.

Tabla 3.6 Cantidad de turnos por rango de Ley de alimentación y Factor K.

	Ley alim < 0.64%	Ley alim > 0.64%
Factor K < 6.4	10	8
Factor K > 6.4	7	10

El total de los turnos en este caso no es 36, sino 35, ya que para un turno no fue posible calcular el Factor k, por falta de información registrada en la data turno (turno 390A). En las Figuras 3.9 y 3.10 se presentan las curvas de recuperación por tamaño obtenidas para esta clasificación.

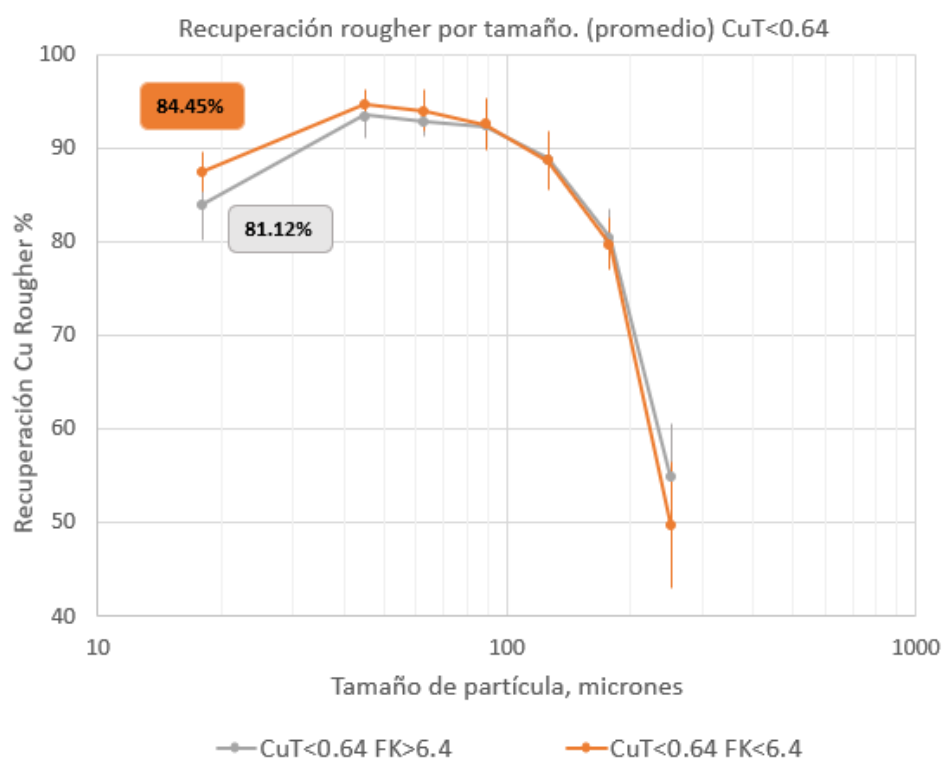


Figura 3.9 Recuperación por tamaño, baja ley, rangos de Factor K.

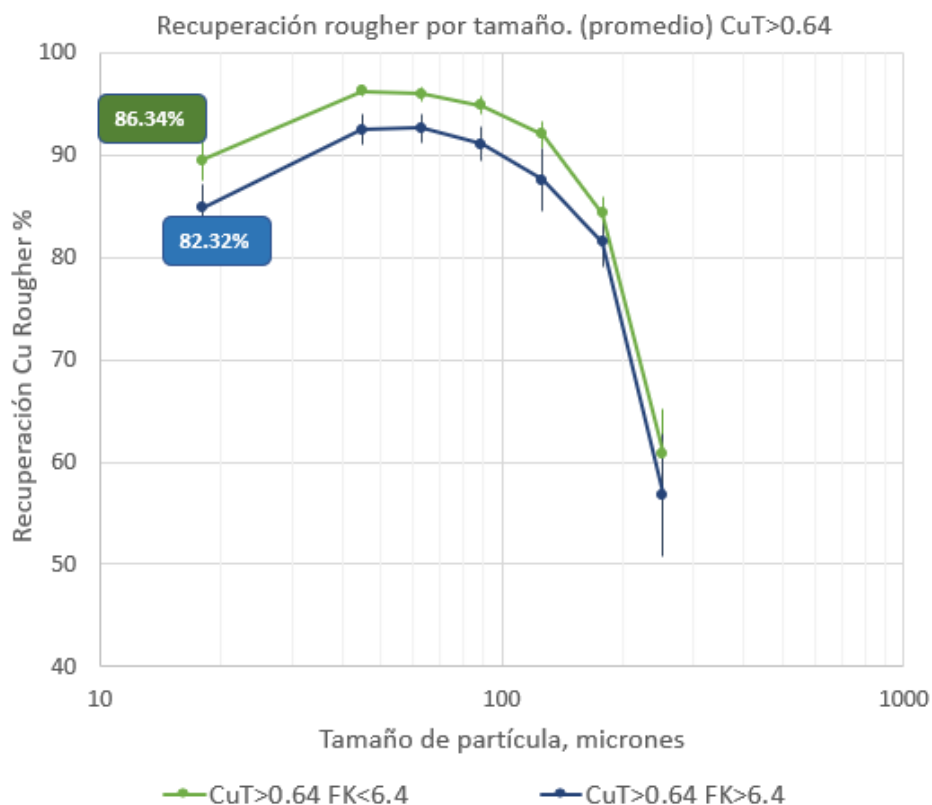


Figura 3.10 Recuperación por tamaño, alta ley, rangos de Factor K.

De las Figuras 3.9 y 3.10 se observa cómo afecta el Factor k a la recuperación, especialmente en el tamaño de partícula más fino, lo que es una pérdida importante, ya que en dicho tamaño se concentra la mayor masa de cobre. En el caso de la baja ley, con una diferencia considerable solo en el menor tamaño, la recuperación global promedio se ve afectada en más de 3 puntos, lo que demuestra la importancia de focalizar el análisis en dicho tamaño. Para la alta ley, la diferencia causada por el aumento del Factor k provoca pérdidas de recuperación en todas las clases de tamaño, acentuándose más en el bajo tamaño.

La tercera clasificación realizada corresponde a los rangos de ley alimentación ya utilizados, y dos rangos de P_{80} . En la Tabla 3.7 se resumen los límites y el número de datos que corresponde a cada clasificación. En las Figuras 3.11 y 3.12 se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 3.7 Cantidad de turnos por rango de Ley de alimentación y P_{80} .

	Ley alim < 0.64%	Ley alim > 0.64%
$P_{80} < 230$	11	10
$P_{80} > 230$	7	8

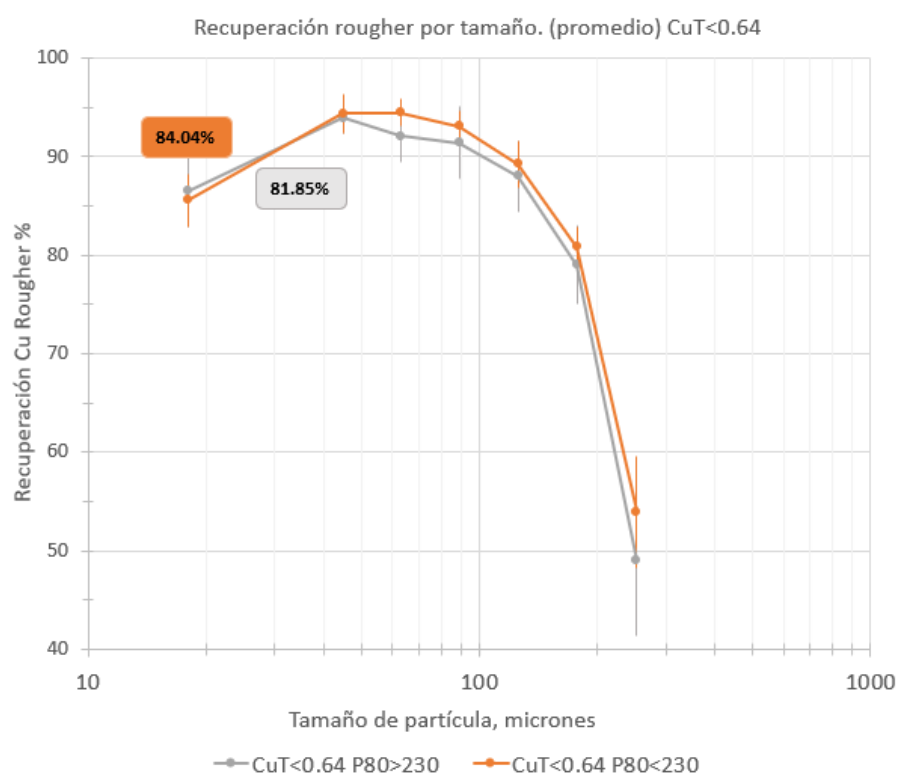


Figura 3.11 Recuperación por tamaño, baja ley, rangos de P₈₀.

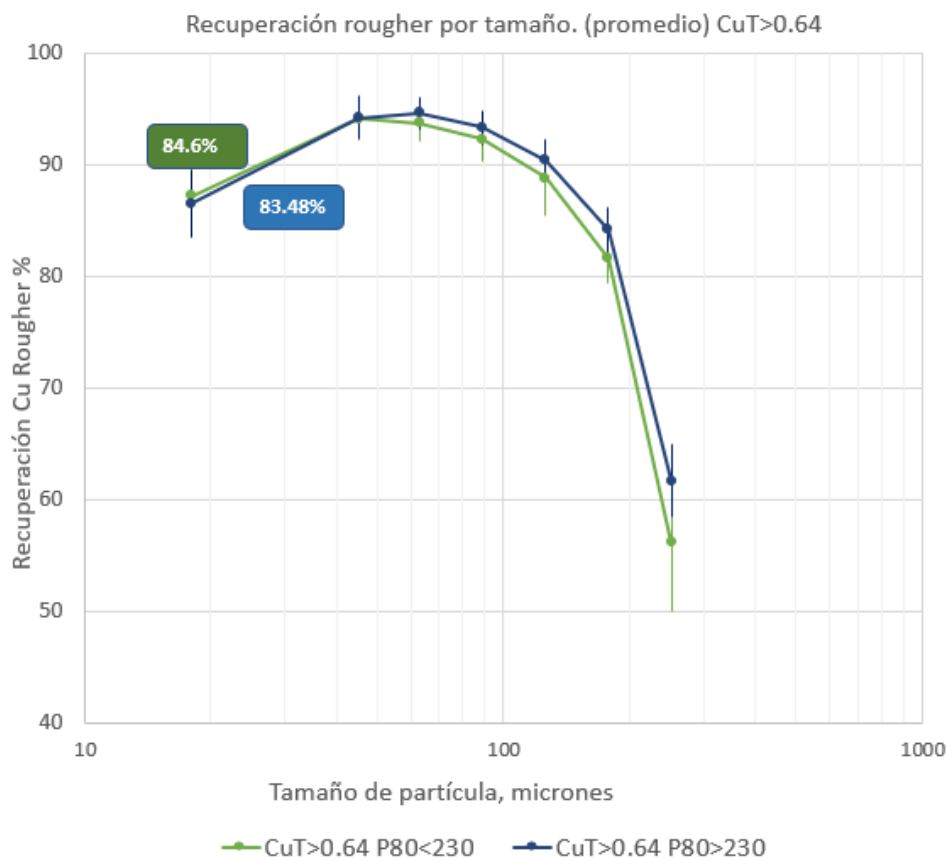


Figura 3.12 Recuperación por tamaño, alta ley, rangos de P_{80} .

Para la clasificación de los rangos según ley de alimentación y P_{80} , se puede apreciar que no se presentan grandes diferencias en las curvas de recuperación por tamaño, que permitan obtener conclusiones determinantes. No obstante, se observa una particularidad en la Figura 3.12, para el caso de la ley de alimentación mayor a 0.64%, puesto que la diferencia presentada por las curvas es contraria a lo esperado, obteniéndose mejores recuperaciones para los valores de P_{80} mayores a los 230 micrones. Para evaluar esta condición, para los turnos presentes en la Figura 3.12 (18 turnos), se realizó un desacople de las curvas, considerando los valores de recuperación másica separados en 2 rangos, menores y mayores a 12%.

En las Figuras 3.13 y 3.14 se muestran las diferencias de recuperación obtenidas para los distintos valores de P_{80} , considerando en ambos casos una ley mayor a 0.64% y en para la recuperación másica, en la Figura 3.13 menor a 12, mientras en la Figura 3.14 menor a 12.

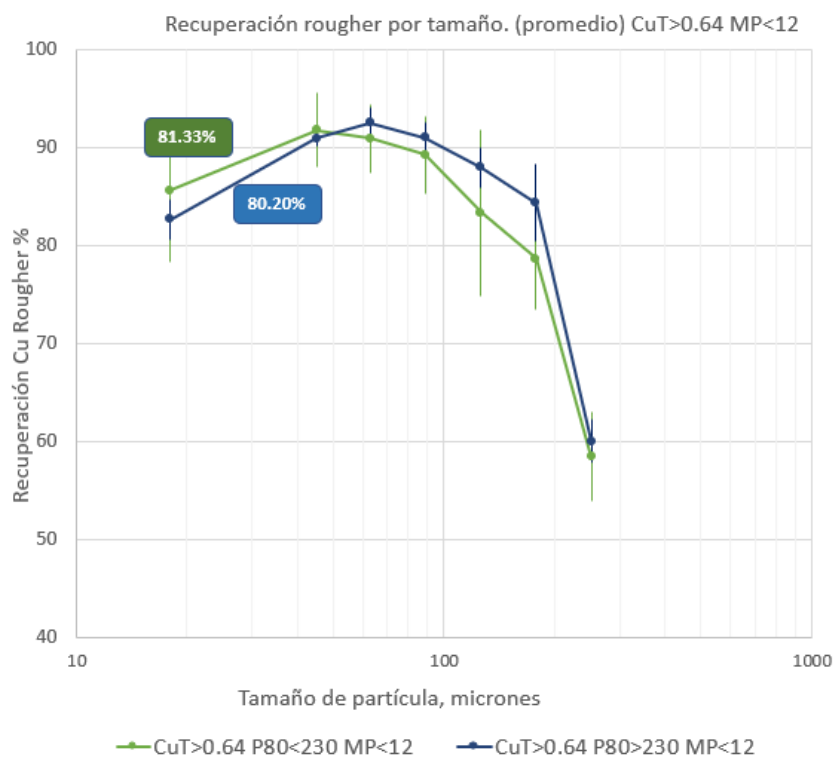


Figura 3.13 Recuperación por tamaño. Alta ley, bajo P₈₀, rangos de MP.

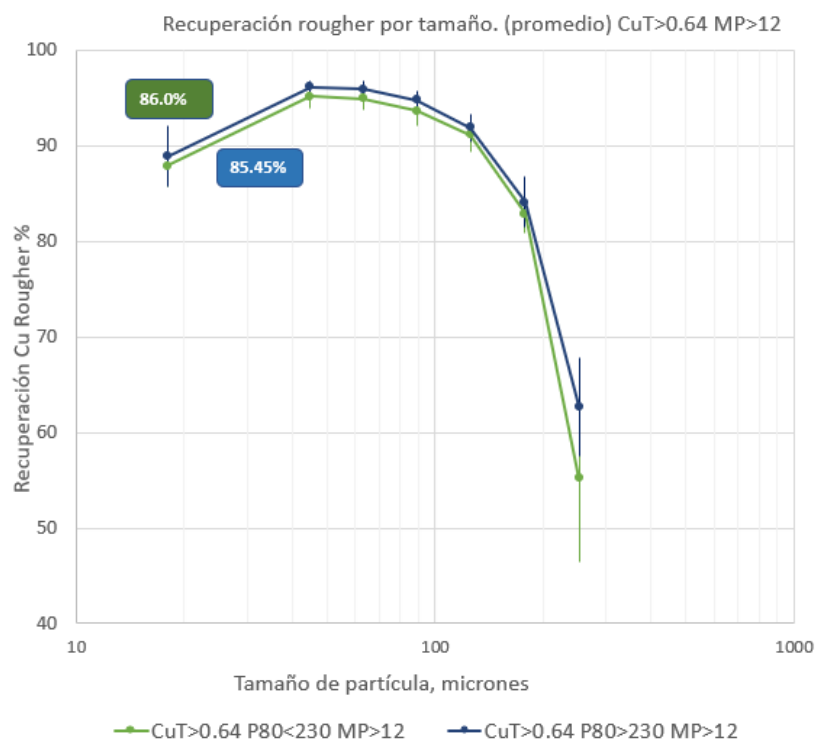


Figura 3.14 Recuperación por tamaño. Alta ley, alto P₈₀, rangos de MP.

En la Figura 3.13 se observa que la tendencia de la Figura 3.12 se mantiene (mayor recuperación por tamaño para el mayor P₈₀), excepto en los tamaños mas finos donde es

mayor la recuperación para los valores de P_{80} menores. En la Figura 3.14, con un valor de recuperación másica mayor, las diferencias en las recuperaciones producto de los distintos valores de P_{80} son mínimas, por lo que se concluye que a una alta recuperación másica el P_{80} no es una variable que marque la diferencia.

Cabe destacar que en el caso de las Figuras 3.12 a 3.14, las recuperaciones globales son mayores para los menores P_{80} , contrario a la tendencia de recuperación por tamaño. También en los tres casos los intervalos de confianza se superponen entre las curvas de P_{80} , lo que hace que las diferencias no sean tan concluyentes.

CAPITULO 4

4. ANALISIS COMPARATIVO COMPOSITOS MENSUALES

4.1. Compósitos mensuales

Se decide utilizar información contenida en los compósitos mensuales históricos para estudiar el comportamiento de los resultados obtenidos y verificar como estos reflejan el desempeño de la planta. Se tiene data recopilada desde 2017, con información de pesos y leyes por tamaño, al igual que para los datos ya trabajados. Con el fin de que sean comparables a los datos balanceados, se resuelven los balances en IES, utilizando la metodología descrita en el Capítulo 2 para todos los meses con información disponible desde el 2017.

Para realizar la comparación, se toman en consideración los rangos descritos en el Capítulo 3, considerando los 3 rangos de recuperación másica y dos de ley de alimentación. Para cada uno de estos rangos se tienen los valores de recuperación por tamaño resumidos en la Tabla 4.1 los que corresponden a las curvas de referencia con las que serán comparadas las recuperaciones por tamaño de los compósitos mensuales.

Tabla 4.1 Valores de recuperación por tamaño según rango de recuperación másica y ley de alimentación.

Tamaño micrones	212	150	106	75	53	38	<38
CuT<0.64 MP<9	50.88	79.08	87.65	92.00	92.64	92.84	85.64
CuT<0.64 9<MP<12.5	54.27	76.83	86.02	89.03	91.43	93.80	82.65
CuT<0.64 MP>12.5	52.57	83.26	91.79	94.84	95.92	96.48	87.92
CuT>0.64 MP<9	56.84	78.13	82.64	88.43	90.16	90.36	83.00
CuT>0.64 9<MP<12.5	58.28	83.61	90.02	92.82	94.31	94.11	86.93
CuT>0.64 MP>12.5	59.98	83.83	92.32	94.95	95.96	96.25	88.90

Cada uno de estos rangos será una referencia para la comparación a realizar, por lo que en primera instancia se clasifican los datos mensuales según su ley de alimentación y recuperación másica para observar la distribución de los datos.

Al balancear la data de compósitos mensuales en IES, se deben descartar cuatro meses, ya que se presentan desviaciones importantes en los resultados obtenidos, que no reflejan la realidad de la planta. En la Tabla 4.2, se presenta la cantidad de meses que se seleccionan

según la clasificación por rangos. Se puede observar en la Tabla 4.2 que, para la data histórica, predominan las leyes de alimentación mayores a 0.64, quedando los rangos de baja ley sin información, excepto para la baja recuperación másica. Por lo tanto, se trabajará solamente con cuatro categorías de datos.

Tabla 4.2 Meses correspondiente a cada rango según ley de alimentación y recuperación másica, datos mensuales.

Rangos	N° meses
CuT<0.64 MP<9	2
CuT<0.64 9<MP<12.5	-
CuT<0.64 MP>12.5	-
CuT>0.64 MP<9	24
CuT>0.64 9<MP<12.5	20
CuT>0.64 MP>12.5	1

Luego se grafican los valores de recuperación por tamaño obtenidos de los datos de compósitos mensuales ya balanceados, utilizando como referencia, en cada caso la curva obtenida del análisis en el capítulo 3, según la ley de alimentación y la recuperación másica. Para realizar las gráficas, por la alta cantidad de datos presentes en las categorías de alta ley y recuperación másica menor a 9 y menor a 12.5, dichos gráficos fueron separados según el año al que corresponden los datos, para poder observarlos de forma más clara.

A continuación, se presentan las gráficas obtenidas para el rango CuT<0.64 MP<9 y CuT>0.64 MP>12.5, correspondientes a los dos extremos estudiados. En la Figura 4.1, se puede ver como un mes se ajusta muy bien a la tendencia (en gris), mientras que el otro tiene un sesgo constante, que se ajusta en la clase de tamaño más gruesa.

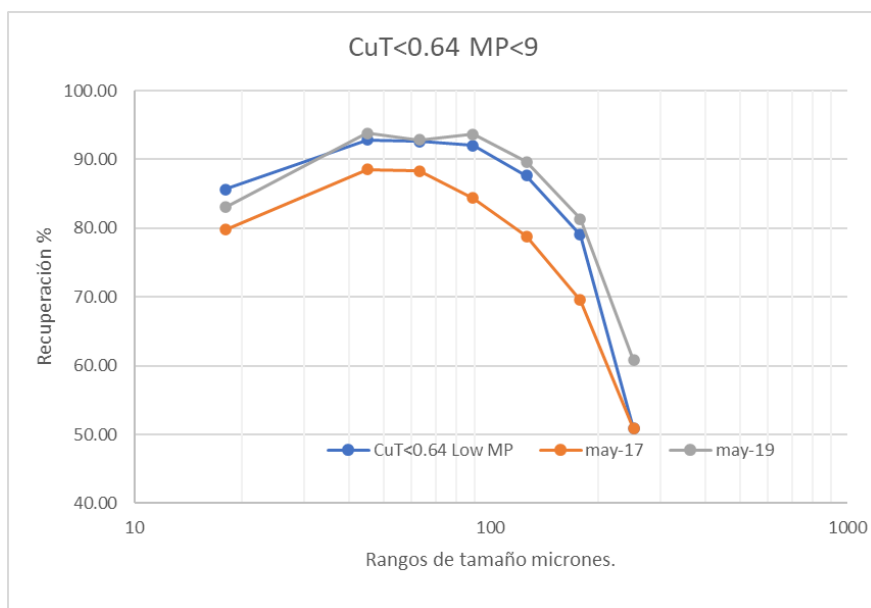


Figura 4.1 Ajuste compósito mensual a CuT<0.64 MP<9.

En la Figura 4.2 se presenta solo un mes para el rango CuT>0.64 MP>12.5. Se ajusta a la tendencia, en el tamaño más grueso y también en el más fino tamaño.

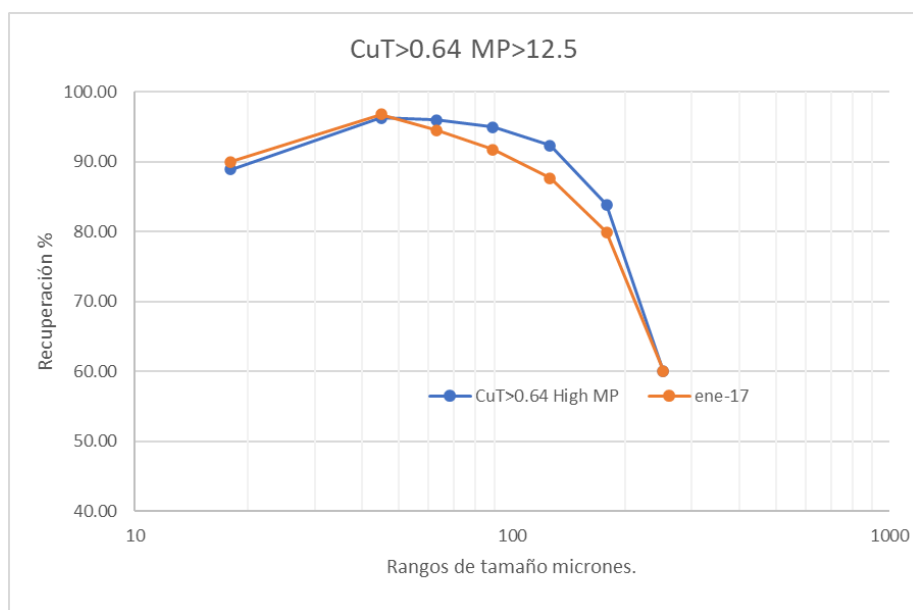


Figura 4.2 Ajuste compósito mensual a CuT>0.64 MP>12.5.

En el caso de la categoría CuT>0.64 y MP<9 debido a la cantidad de datos, se dividen en cinco gráficas, según el año al que pertenecen (2017, 2018, 2019, 2020 y 2021), Figuras 4.3 a 4.7. En el caso del 2017 (Figura 4.3) se puede ver un dato que no sigue la tendencia de las recuperaciones para el mes de febrero, este error puede ser producto de desviaciones en la toma de la muestra o el ajuste del balance. Para el 2018 (Figura 4.4), las desviaciones

aumentan especialmente en el tamaño más fino, existiendo grandes diferencias con la curva de referencia que se busca representar. Para el año 2019 (Figura 4.5) solo se tienen 3 datos para representar la tendencia, observándose que las recuperaciones se encuentran por sobre la curva de referencia con un sesgo casi constante a lo largo de la distribución de tamaño. En el año 2020 (Figura 4.6) se dispone de solo un mes con presencia de importantes desviaciones que no representan la tendencia. Finalmente, para el 2021 (Figura 4.7), dos meses representan este rango. Ambos meses muestran resultados similares, con la misma tendencia que la curva de referencia.

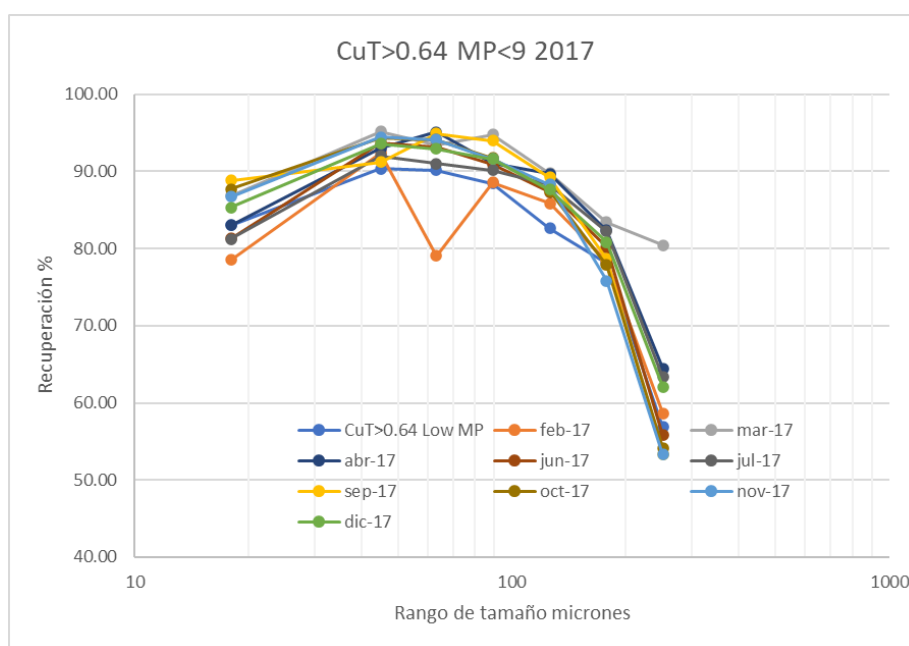


Figura 4.3 Ajuste compuesto mensual a CuT>0.64 MP<9 2017.

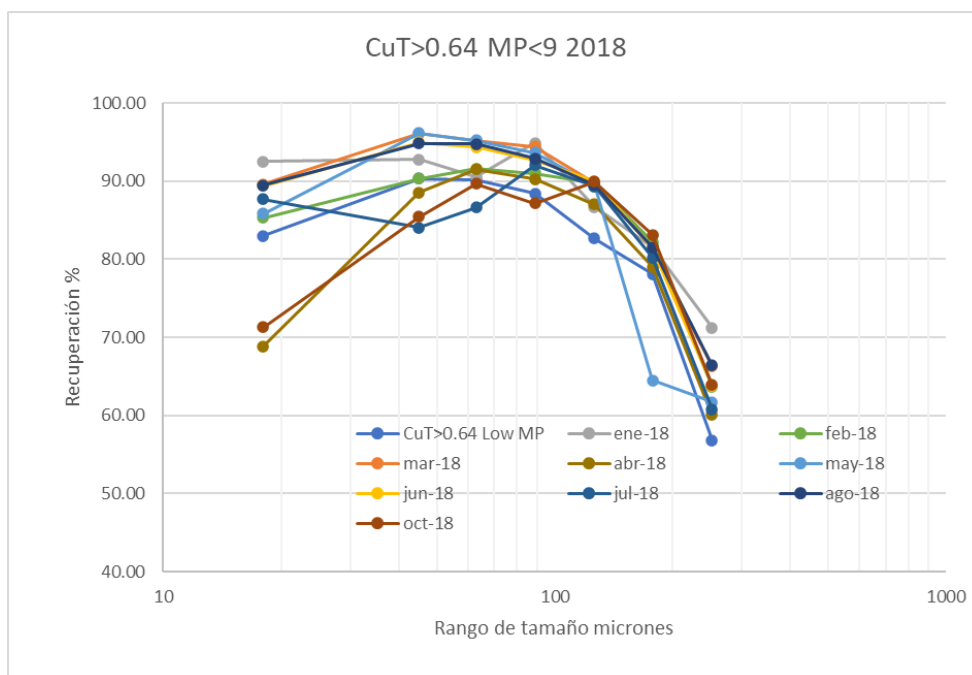


Figura 4.4 Ajuste compósito mensual a CuT>0.64 MP<9 2018.

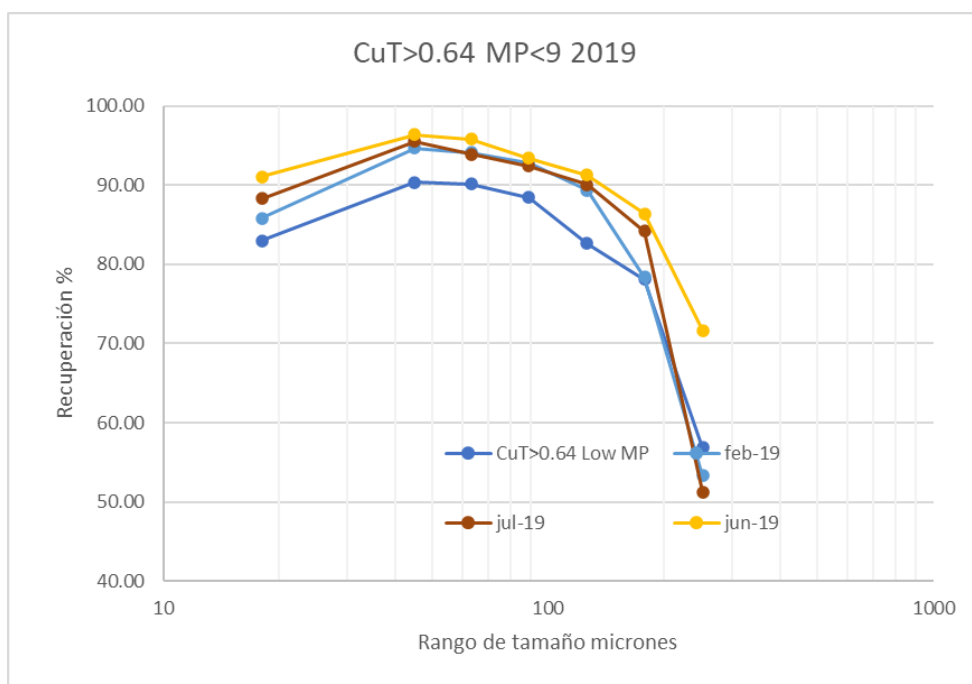


Figura 4.5 Ajuste compósito mensual a CuT>0.64 MP<9 2019.

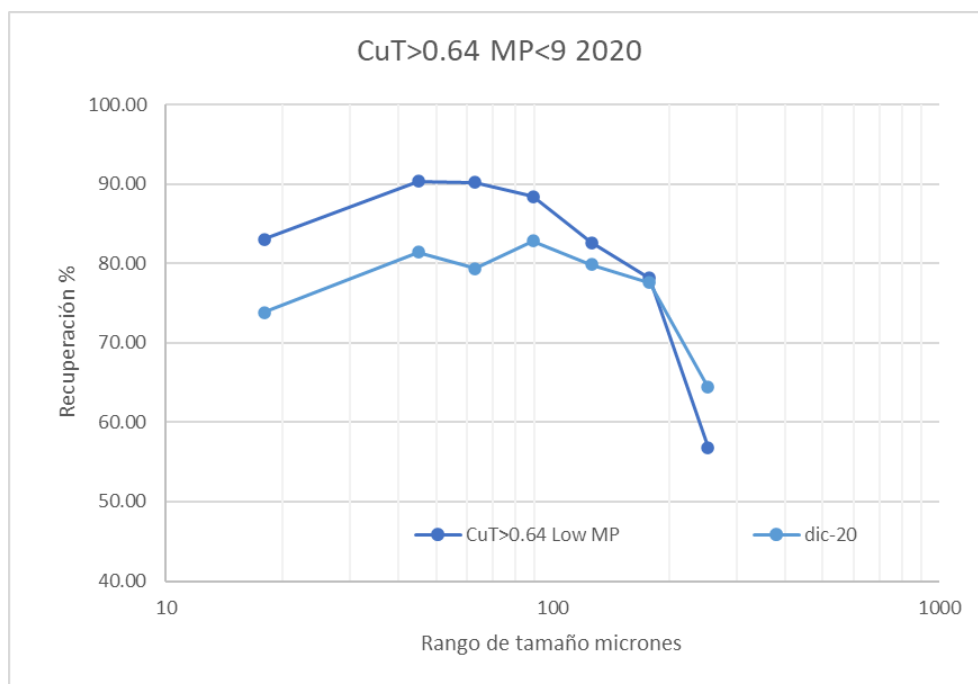


Figura 4.6 Ajuste compuesto mensual a CuT>0.64 MP<9 2020.

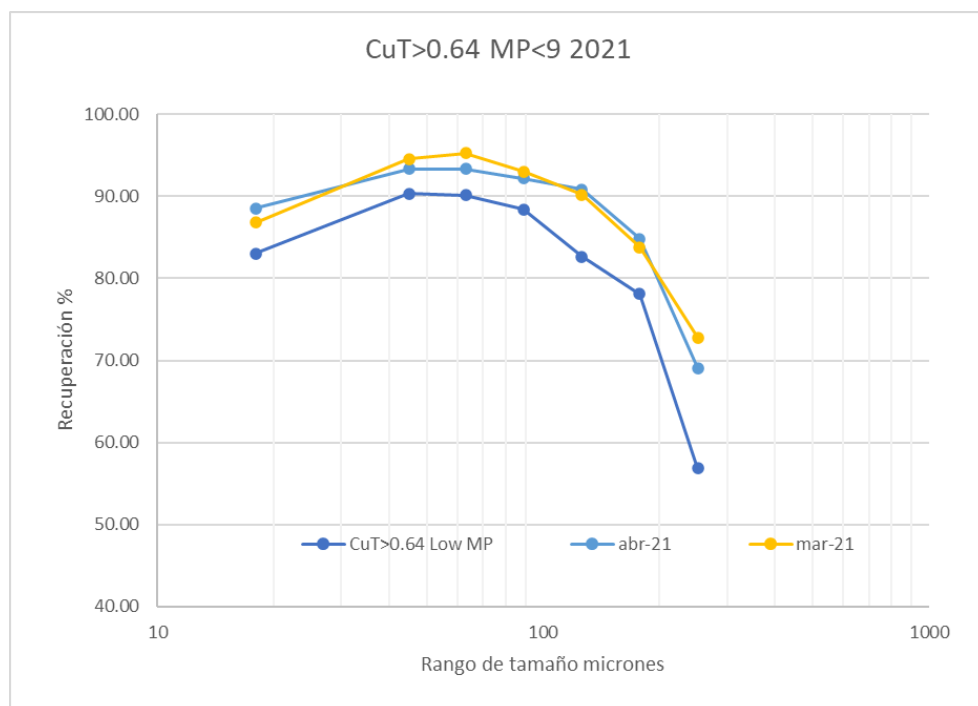


Figura 4.7 Ajuste compuesto mensual a CuT>0.64 MP<9 2021.

La última clasificación corresponde a una alta ley de cobre y un rango de recuperación másica que se encuentra entre 9 y 12.5. En este caso, los datos son igualmente separados por año,

para que se puedan observar de una mejor manera. Se tienen datos para 3 años: 2019, 2020 y 2021, Figuras 4.8 a 4.10.

Para el año 2019 (Figura 4.8), los 7 meses disponibles siguen bastante bien la tendencia. Existen diferencias en algunos casos, con valores inferiores de recuperación en el tamaño intermedio para el mes de septiembre, pero no son desviaciones muy amplias. En el caso del 2020 (Figura 4.9), la tendencia es clara, pero existe mayor dispersión de los valores de recuperación obtenidos especialmente en el tamaño inferior, siendo el más notorio, el mes de abril que se encuentra bastante por debajo, evidenciando pérdidas en el tamaño más fino. Finalmente, para el año 2021 (Figura 4.10), los datos se encuentran muy ordenados y cercanos al valor esperado, lo cual se puede deber, principalmente, a que la obtención de las curvas de referencia fue realizada con data del mismo año. En los tres casos la representación de este rango es mucho mejor que en el caso de alta ley y recuperación másica menor a 9.

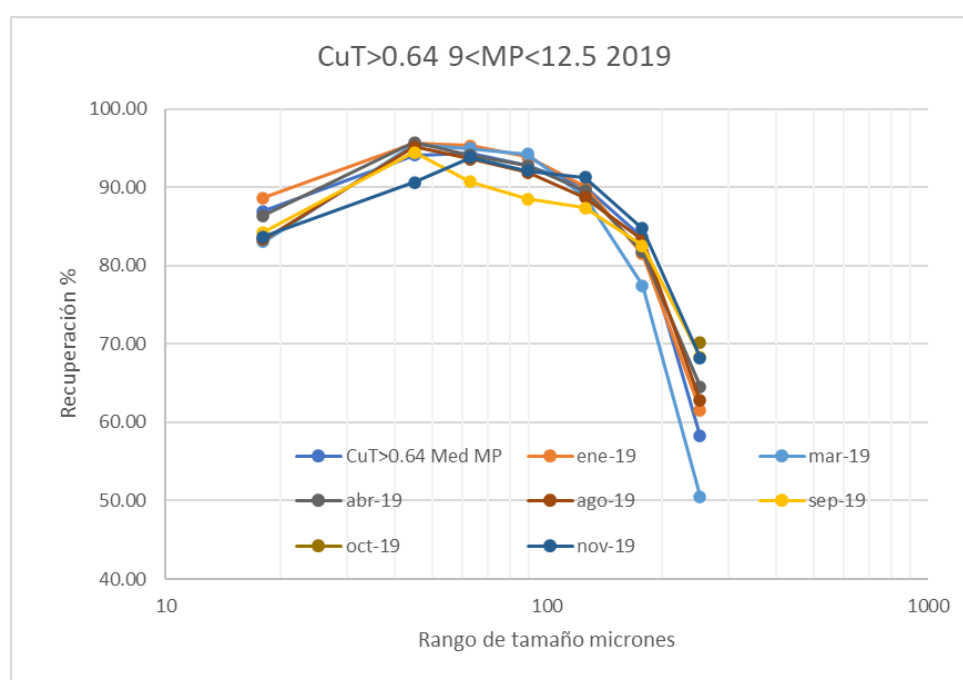


Figura 4.8 Ajuste compuesto mensual a $CuT > 0.64$ $9 < MP < 12.5$ 2019.

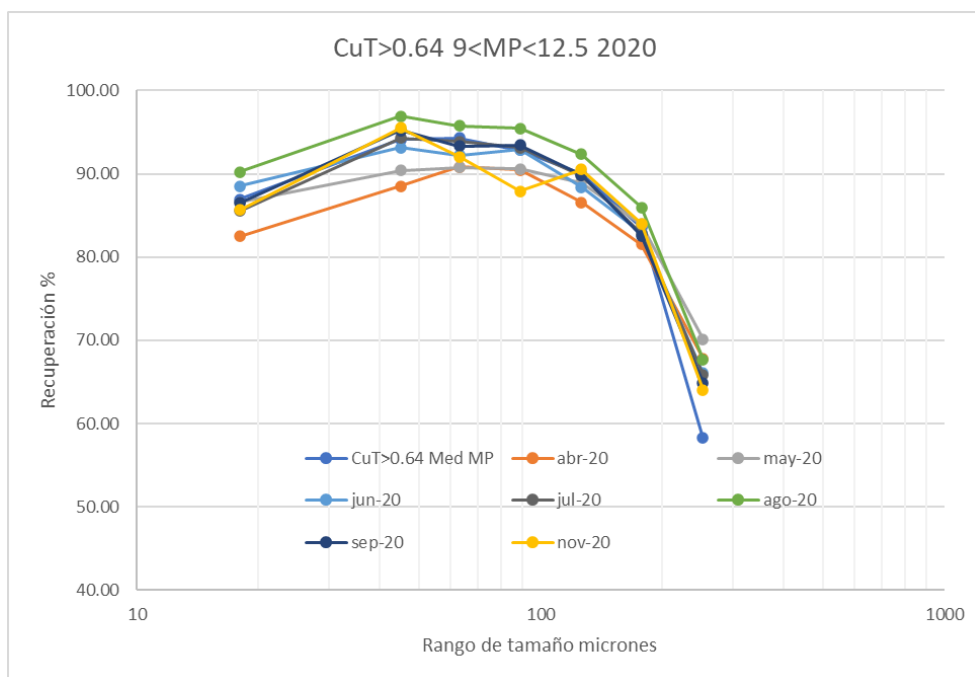


Figura 4.9 Ajuste compuesto mensual a $\text{CuT}>0.64$ $9<\text{MP}<12.5$ 2020.

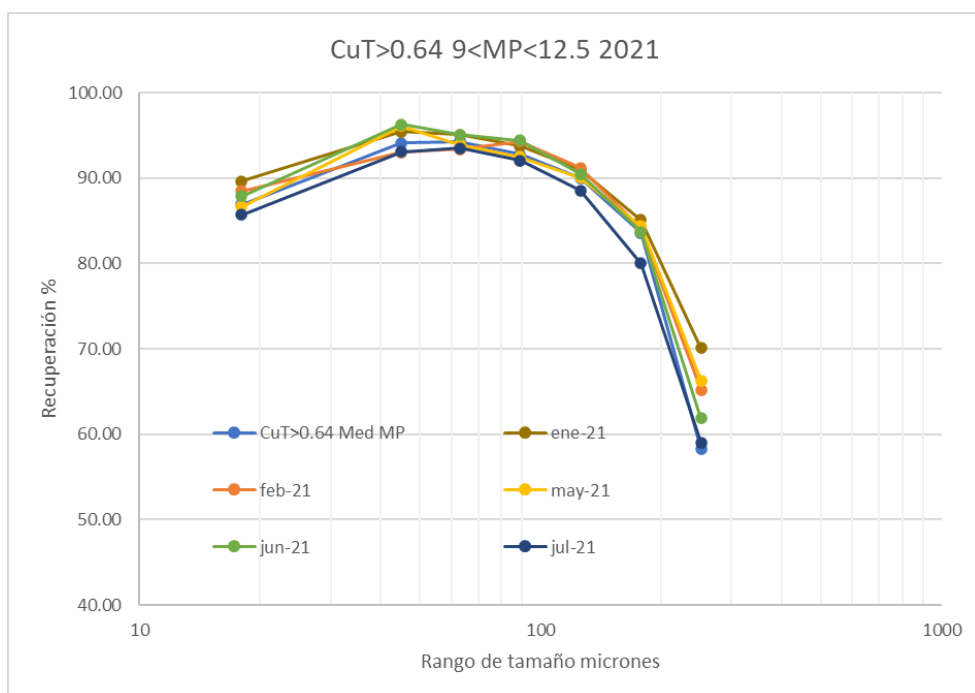


Figura 4.10 Ajuste compuesto mensual a $\text{CuT}>0.64$ $9<\text{MP}<12.5$ 2021.

4.1.1. Gráficas promedio

Debido a la cantidad de datos, y producto de las diferencias obtenidas en cada caso, para simplificar el análisis, se analizaron los valores promedio de recuperaciones por tamaño para

cada uno de los 4 rangos ($CuT < 0.64$ $MP < 9$; $CuT > 0.64$ $MP < 9$; $CuT > 0.64$ $9 < MP < 12.5$; $CuT > 0.64$ $MP > 12.5$). En cada gráfica se muestra la curva de referencia y los valores promedio de los compósitos mensuales calculados para cada rango.

En la Figura 4.11 correspondiente al rango $CuT > 0.64$ $MP > 12.5$, no hay cambios respecto a la Figura 4.2 ya que solo hay un valor para dicha categoría. En las Figuras 4.12 a 4.14 se presentan los promedios de las recuperaciones por tamaño mensuales que representan a los rangos $CuT < 0.64$ $MP < 9$; $CuT > 0.64$ $MP < 9$ y $CuT > 0.64$ $9 < MP < 12.5$ respectivamente. En la Figura 4.13 se presentan las mayores desviaciones, se mantiene un sesgo en todos los tamaños, pero la tendencia es clara. En la Figura 4.14 se confirma lo comentado anteriormente en las Figuras 4.8, 4.9 y 4.10, ya que la tendencia promedio es casi exacta, solo con una desviación en el tamaño más grueso.

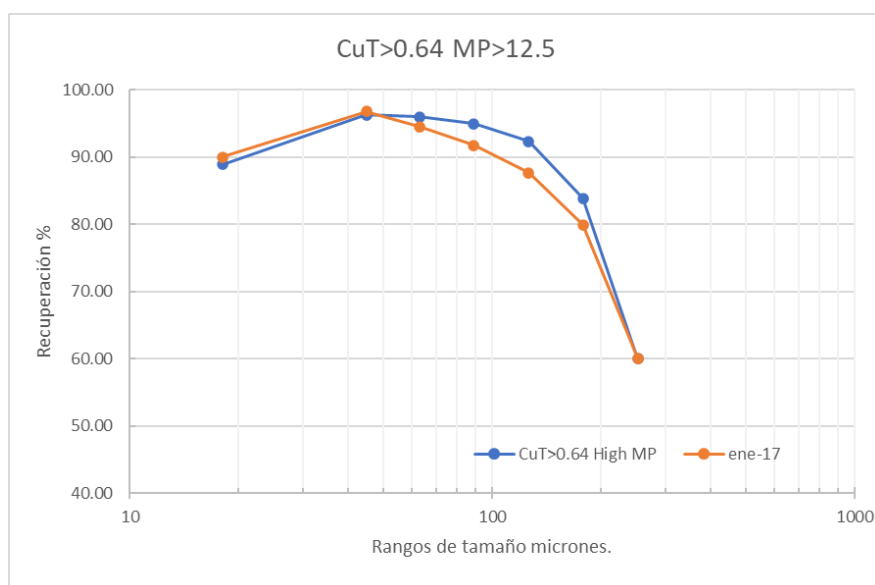


Figura 4.11 Recuperación por tamaño $CuT > 0.64$ $MP > 12.5$.

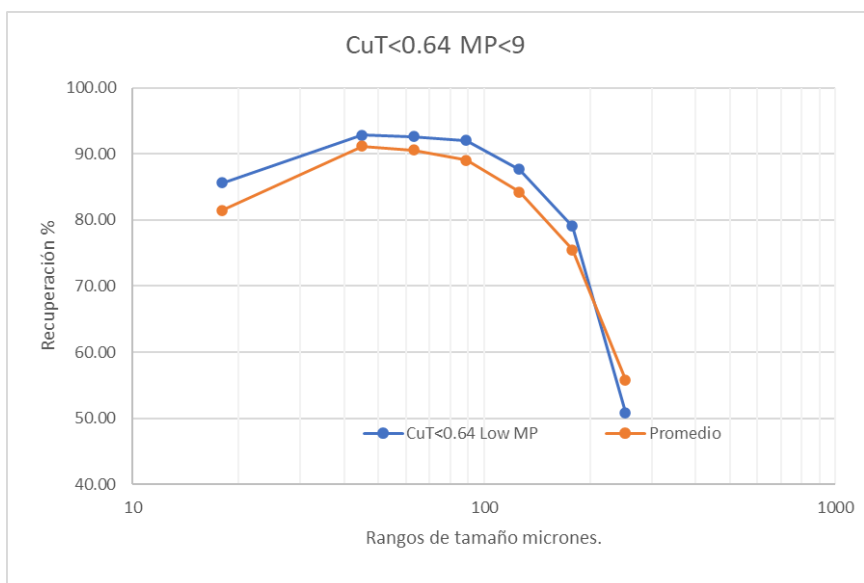


Figura 4.12 Recuperación por tamaño CuT<0.64 MP<9.

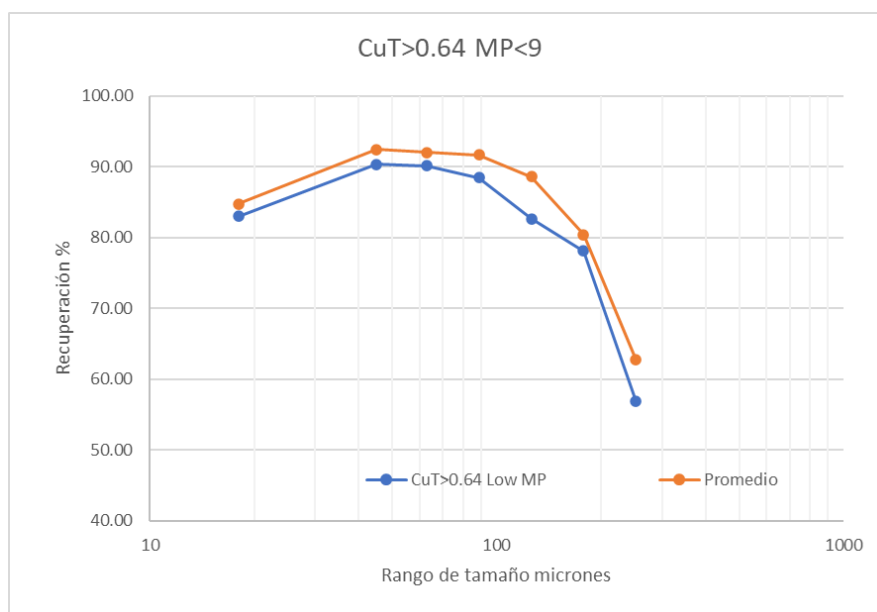


Figura 4.13 Recuperación por tamaño CuT>0.64 MP<9.

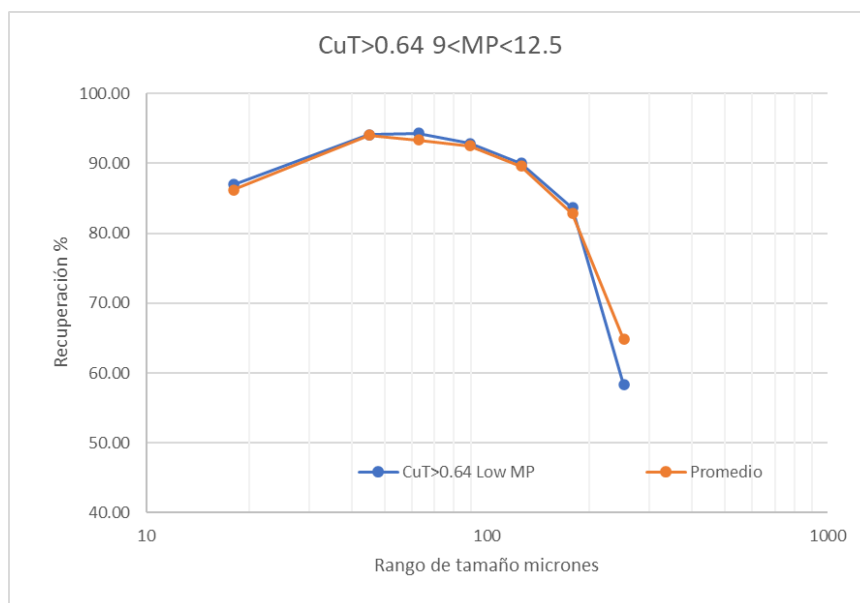


Figura 4.14 Recuperación por tamaño CuT>0.64 9<MP<12.5.

Con el fin de cuantificar las desviaciones y no solo tener la observación gráfica, para cada caso se calcularon los valores de las diferencias entre las recuperaciones por tamaño de referencia y las del valor promedio de los datos. Así mismo, se calcula el error absoluto en cada caso. Los resultados de los errores (%) se presentan en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3 Errores calculados recuperaciones por tamaño promedio data compósitos mensuales.

Tamaño (micrones)	252	178	126	89	63	45	<18
CuT<0.64 MP<9	9.71	4.56	3.91	3.24	2.22	1.78	4.90
CuT>0.64 MP>12.5	0.07	4.69	5.03	3.38	1.46	0.60	1.24
CuT>0.64 MP<9	10.39	2.93	7.22	3.66	2.07	2.32	2.09
CuT>0.64 9<MP<12.5	11.16	0.94	0.50	0.31	1.02	0.07	0.80

Como se observa, para el mayor tamaño, se presentan los mayores errores, superando en dos casos el 10% (en rojo), y en otro caso llegando casi al 10% (en negrita). Para el resto de los tamaños, los valores son bastante bajos, mostrando un buen ajuste con las curvas de referencia, superando solo en un caso el 5% (7.22% en negrita).

4.2. Confiabilidad data compósitos mensuales

A pesar de que la data promedio se ajuste adecuadamente a las curvas de referencia propuestas, no se pueden ignorar los resultados vistos anteriormente, donde las curvas mensuales en algunos casos presentan diferencias importantes, que distan de un buen ajuste.

En este caso, es pertinente cuestionar como es la variabilidad de la data de compósitos mensuales, según lo descrito en el capítulo 2, sobre la toma de las muestras en la planta. Al igual que con los datos utilizados de campañas de muestreo, existe la posibilidad de falla en los cortadores por lo que las muestras pueden en algunos casos ser tomadas de forma manual.

Sin embargo, lo que principalmente afecta a los datos de compósitos mensuales es la representatividad que hay de los turnos involucrados, ya que se colecta muestra diariamente de ambos turnos, A y B, y se guarda un testigo para, al cabo de 30 días, homogenizar dichas muestras y formar el compósito mensual para ser enviada a laboratorio externo, con una porción de cada turno (en teoría). En este caso, la variabilidad que se ve en la planta a lo largo del mes es absorbida por el conjunto de datos, por lo que no se reflejan de buena manera los cambios que se pudieron presentar en turnos o semanas puntuales. Solo se presentará como un valor final del mes desviado.

4.3. Comportamiento planta

Otro factor importante para considerar es el comportamiento histórico de la planta para el periodo en que se presentan los datos de compósitos mensuales, en este caso desde el 2017 al 2021.

En la evaluación de los datos, es importante considerar que los compósitos mensuales van variando sus resultados según las condiciones de la planta cada mes. Un factor muy importante es el porcentaje de mineral oxidado presente en la alimentación a la planta, reportado como Factor K. La variación en la calidad de la alimentación a la planta representa los cambios observables en las recuperaciones de Cu balanceadas para los compósitos mensuales.

En los últimos 2 años ha aumentado considerablemente la razón de mineral desde stocks respecto al mineral fresco alimentado, principalmente la proveniente de un stock que se caracteriza por una antigüedad mayor a las 42 semanas, lo que a su vez significa un aumento

en el Factor k por la oxidación del mineral. Esto ha afectado considerablemente las recuperaciones de la planta. En la Figura 4.15 se observa la relación entre el porcentaje de la alimentación proveniente desde el stock mencionado y las recuperaciones obtenidas para las plantas LT1 y LT2.

De la Figura 4.15 se observa que se ha separado en 3 rangos el % de alimentación proveniente desde el stock, para estudiar de mejor forma su efecto en las recuperaciones. Cuando el porcentaje alimentado supera el 22% se comienzan a notar las bajas en recuperación y en el caso del tercer rango, cuando el porcentaje alimentado supera el 55% los resultados son ampliamente alterados producto de la alta presencia de óxidos, llegando a recuperaciones muy por debajo de lo esperado para el desempeño de las plantas.

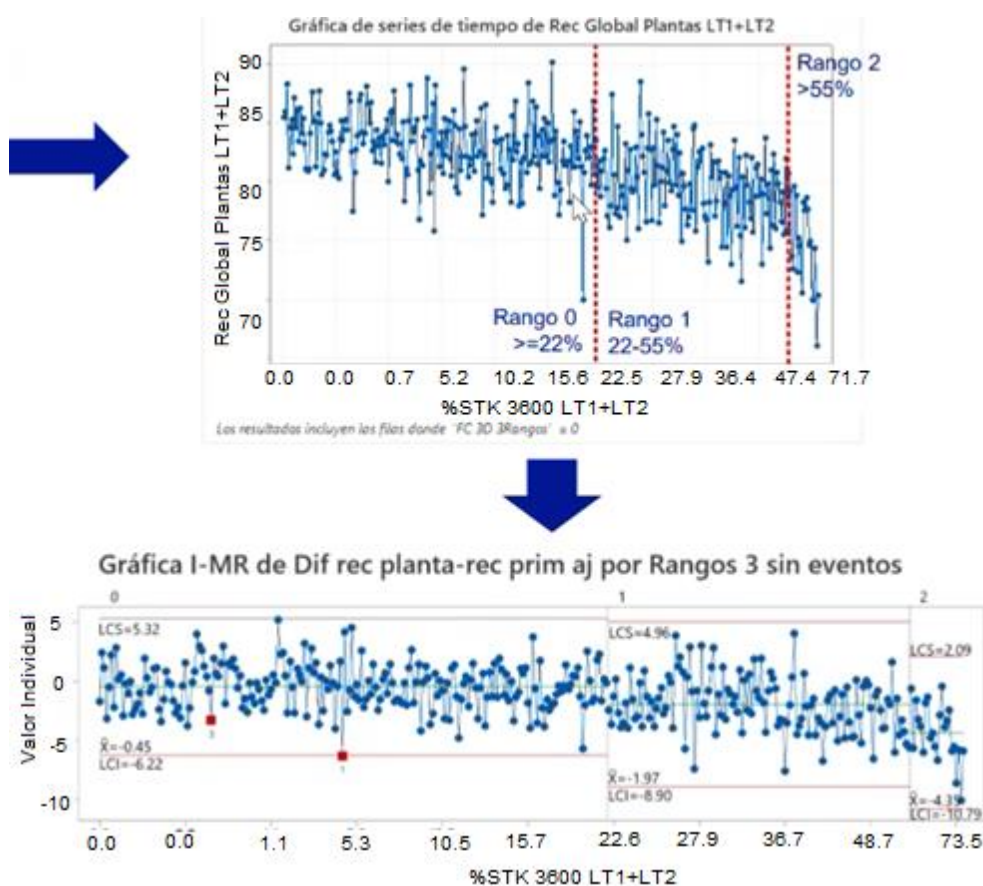


Figura 4.15 Recuperaciones globales LT1+LT2 según % alimentación stock.

Para la formulación de las curvas de recuperación por tamaño estudiadas se utilizaron conjuntos de datos correspondientes a turnos del año 2021. Por lo tanto, considerando que las condiciones de alimentación a la planta son distintas en cada año, tiene más sentido que

las curvas de recuperación evaluadas se ajusten mejor para los datos de compósitos mensuales del año 2021.

Además, es importante tener en cuenta que a medida que pasa el tiempo las leyes alimentadas a la planta van decayendo, por lo que eso representa una condición distinta respecto a los años anteriores.

4.4. Principales causas de las desviaciones

Es importante conocer las fuentes de error asociadas a los datos analizados, para poder comprender de mejor forma las desviaciones que pudo haber a lo largo del proceso del tratamiento de las muestras y de los datos para obtener las curvas de recuperación por tamaño que son analizadas en este capítulo. Es decir, analizar la confiabilidad del resultado de las recuperaciones por tamaño de las dos campañas de muestreo del estudio.

En primer lugar, se tiene el error que se puede obtener al tomar las muestras en planta de forma manual para los cortadores fuera de servicio como se muestra en el estado de cortadores (Anexo C). Posterior a la toma de la muestra, también puede haber diferencias en el procesamiento de las muestras, a pesar de que se presenta un protocolo descrito en detalle, debido a error humano.

Una vez que las muestras dejan el laboratorio de planta y van al laboratorio externo, son flotadas. Para esto los flotadores de la empresa externa se encuentran homologados, con el fin de asegurar que las condiciones de las pruebas serán las mismas, y disminuir al máximo la variabilidad producida por las intervenciones del flotador. Sin embargo, esto no asegura que el error humano no exista, es un estándar para minimizarlo.

En el tratamiento de los datos también hay un error asociado, ya que el resultado numérico de los cálculos realizados puede no representar la realidad en planta, si no que puede solamente ser una solución matemática de un balance o un cálculo puntual.

Finalmente, puede haber desviaciones en los datos producto de condiciones en la planta que se desconocen, como la falla o mantención de algún equipo que cambia la operación del circuito.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

De los dos objetivos planteados al inicio del trabajo, se logra cumplir el primero; mientras que la obtención del modelo (2do objetivo) queda pendiente.

Se propuso una metodología para el ajuste de los balances del circuito *rougher* en IES. El objetivo de estos balances es determinar los valores por tamaño de partícula de masas y leyes de cobre. Con los resultados obtenidos es posible calcular las recuperaciones por tamaño.

La cantidad de cobre contenida en la fracción fina determina un peso mayor en el análisis de dichas fracciones, por la cantidad de mineral valioso contenida y por los desvíos mayores obtenidos en los balances para los extremos.

En cuanto al análisis de sensibilidad, se confirma lo observado en las figuras de recuperación por tamaño, que son más propensos a desvíos los valores extremos de tamaño, finos y gruesos. En dichas fracciones se registra la mayor sensibilidad sobre todo en la corriente de relave.

Para la solución correcta de los balances utilizando IES, basta seguir los pasos descritos en este trabajo. Filtrar bien los datos, previo a los balances es crucial. Sin embargo, es muy importante comprobar la coherencia de los resultados, ya que incluso con la data previamente filtrada hubo incongruencias en algunos casos, lo que llevó a descartar algunos datos.

Los resultados de recuperación por tamaño fueron analizados según las características estudiadas del mineral, incluyendo además un resultado de gran relevancia para el proceso, observándose que su efecto en la recuperación por tamaño es importante y se debe tener en cuenta para tomar decisiones en la operación.

Luego de la evaluación de las curvas de recuperación por tamaño clasificadas según ley de alimentación y recuperación másica considerando los resultados obtenidos al balancear los datos de compósitos mensuales desde 2017; se tiene que de los valores promedio obtenidos según cada rango de clasificación y año de los datos, el ajuste es adecuado. Sin embargo, al analizar los casos uno a uno se observaron grandes diferencias en meses puntuales.

Esto lleva a dos conclusiones importantes. La primera es sobre el número de datos considerados para el desarrollo de este trabajo, siendo más robusto y representativo un análisis con más datos. Lo segundo corresponde a la representatividad de los datos analizados, ya que los conjuntos de datos correspondían a data del año 2021 y fue contrastada con data de compósitos desde el año 2017. Al respecto, existen diferencias en las leyes de alimentación históricas, en el tratamiento dado al mineral en la planta y también periodos de alimentación con alto óxido, lo que no se ve reflejado en los resultados obtenidos ya que la data corresponde a distintos periodos.

De la contribución al problema, se logró cambiar el paradigma instaurado en la empresa de utilizar data de compósitos mensuales para el desarrollo de balances. Se comprobó que estos datos presentan un alto error. Y que son mas representativos los datos utilizados turno a turno.

RECOMENDACIONES

Es posible continuar este trabajo agregando un número importante de datos que deben ser tratados con la metodología descrita y balanceados. Con la data balanceada y clasificada, se desarrollará el modelo propuesto por (Bazin et al., 1994), descrito en el capítulo 1. A lo propuesto por Bazin, se recomienda realizar algunos cambios, tal como se registra en el capítulo 3, donde los resultados son clasificados por rangos, según ley de alimentación, Factor K y P_{80} . En un modelo estos rangos podrían ser variables de entrada que ayuden a predecir la recuperación de una forma más exacta según las características del mineral. En el caso de la recuperación másica, sería según el tratamiento en planta del mineral; es decir, según las características de entrada de un tipo de mineral. Con el modelo se podrían dar directrices a la operación del valor de recuperación másica para el circuito *rougher* que maximiza la recuperación de Cu.

Otra recomendación para la continuación del trabajo en un nuevo modelo consiste en utilizar las liberaciones para calcular las recuperaciones por tamaño, además de las leyes por tamaño, tal como se explica en el capítulo 1. Según lo propuesto por (Wightman et al., 2010), se pueden considerar las liberaciones por clase de tamaño como constantes para poder calcular los cambios en las recuperaciones.

REFERENCIAS

- Ackerman, P., Harris, G., Klimplel, R., & Aplan, F. (1987). Evaluation of Flotation Collectors for Copper Sulfides and Pyrite, I. Common Sulfhydryl Collectors. *International Journal of Mineral Processing*, 105-127.
- Ahmed, N., & Jameson, G. (1985). The effect of bubble size on the rate of flotation of fine particles. *International Journal of Mineral Processing*, 195-215.
- AngloAmerican. (2022). *Anglo American Chile*. Obtenido de <https://chile.angloamerican.com/operaciones.aspx#/projects-operations-offices-headquarters/diamonds-copper-platinum-coal>
- Australian mining*. (3 de 08 de 2015). Obtenido de <https://www.australianmining.com.au/news/optimising-mineral-processing-the-integrated-extraction-simulator-ies/>
- Azgomi, F., Gómez, C., & Finch, J. (2007). Characterizing Frothers using Gas Hold-Up,. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 237-242.
- Ballantyne, G., & Powell, M. (2014). Benchmarking comminution energy consumption for the processing. *Minerals Engineering*, 109-114.
- Bazin, C., Grant, R., Cooper, M., & Tessier, R. (1994). A method to predict metallurgical performances as a function of fineness of grind . *Minerals Engineering*, 1243-1251.
- Bravcová, Z., Karapantsios, T., Kostoglou, M., Basarová, P., & Matis, K. (2015). Bubble–particle collision interaction in flotation systems. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering*, 95-103.
- Bulatovic, S. (2007). *Handbook of Flotation Reagents (Volume 1)*. Elsevier Science & Technology Books .
- Comley, B., Harris, P., Bradshaw, D., & Harris, M. (2002). Frother characterisation using dynamic surface tension measurements. *Int. J. Miner. Process*, 81-100.
- Crawford, R., & Ralston, J. (1988). The Influence of Particle Size and Contact Angle in Mineral Flotation. *International Journal of Mineral Processing*, 1-24.
- CRCORE. (2022). Obtenido de Cooperative Research Centre for Optimising Resource Extraction: <https://www.crcore.org.au/about-us>
- Dai, Z., Fornasiero, D., & Ralston, J. (2000). Particle]bubble collision models - a review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 231-256.
- Elmahdy, A., & Finch, J. (2013). Effect of frother blends on hydrodynamic properties. *International Journal of Mineral Processing*, 60-63.
- Feng, G., & Aldrich, C. (1999). Effect of particle size on flotation performance of complex sulphide ores. *Minerals Engineerin*, 721-731.

- Finch, J., Nasset, J., & Acuña, C. (2008). Role of frother on bubble production and behaviour in flotation. *Minerals Engineering*, 949-957.
- Fuerstenau, M., & Han, K. (2003). *Principles of mineral processing*. Colorado: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.
- Fuerstenau, M., Jameson, G., & Yoon, R. (2007). *Froth flotation: A century of innovation*. Colorado, USA: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.
- Gaudin, A. (1957). *Flotation* (2nd ed.). New York: McGraw-Hill.
- Gaudin, A., & Malozemoff, P. (1932). Recovery by flotation of mineral particles of colloidal size. *The journal of physical chemistry*, 597-607.
- Gaudin, A., Groh, J., & Henderson, H. (1931). Effect of particle size on flotation. *AIME Technical Publications*, 3-23.
- Gupta, A., & Yan, D. (2016). *Mineral Processing Design and Operation: An Introduction (2nd ed)*. Elsevier Science.
- Hassanzadeh, A. (2016). Recovery improvement of coarse particles by stage addition of reagents in industrial copper flotation circuit. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 309-316.
- Hassanzadeh, A., Safari, M., Hoang, D., Khoshdast, H., Albijanic, B., & Kowalczyk, P. (2022). Technological assessments on recent developments in fine and coarse particle flotation systems. *Minerals Engineering*.
- Hassanzadeh, A., Vaziri Hassas, B., Kouachi, S., Brabcova, Z., & Çelik, M. (2016). Effect of bubble size and velocity on collision efficiency in chalcopyrite flotation. *Colloids Surf.*, 258–267.
- Imhof, R. (1988). Pneumatic flotation – A modern alternative. *Aufbereitungs Technik*, 451-458.
- Jameson, G. (2010). Advances in Fine and Coarse Particle Flotation. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 325-330.
- Jameson, G. (2012). The effect of surface liberation and particle size on flotation rate constants. *Minerals Engineering*, 132-137.
- Kelly, E., & Spottiswood, D. (1982). *Introduction to mineral processing*. United States.
- King, R. (1979). A model for the quantitative estimation of mineral liberation by grinding. *International Journal of Mineral Processing*, 207--220.
- McLanahan. (2022). Obtenido de McLanahan:
<https://www.mclanahan.com/products/vezin-samplers>
- Meloy, T., & Gotoh, K. (1985). Liberation in a homogeneous two-phase ore. *International Journal of Mineral Processing*, 45-55.

- Mesa, D., & Brito-Parada, P. (2019). Scale-up in froth flotation: A state-of-the-art review. *Separation and Purification Technology*, 950-962.
- Michaud. (2020). *911metallurgist*. Obtenido de 911metallurgist: <https://www.911metallurgist.com/blog/vezin-sampler>
- Miettinen, T., Ralston, J., & Fornasiero, D. (2010). The limits of fine particle flotation. *Minerals Engineering*, 420-437.
- Neethling, S., & Cilliers, J. (2009). The entrainment factor in froth flotation: Model for particle size and other operating parameter effects. *Int. J. Miner. Process.*, 141-148.
- ORICA. (2022). Obtenido de <https://www.orica.com/news-media/news-media/orica-to-take-the-reins-on-integrated-extraction-simulator-ies-digital-technology#.Yl9dnuhBxPY>
- Piantadosi, C., & Smart, R. (2002). Statistical comparison of hydrophobic and hydrophilic species on galena and pyrite particles in flotation concentrates and tails from TOF-SIMS evidence. *Int. J. Miner. Process.*, 43-54.
- Piantadosi, C., Jasieniak, M., Skinner, W., & Smart, R. (2000). Statistical comparison of surface species in flotation Concentrates and tails from TOF-SIMS evidence . *Minerals engineering*, 1377-1394.
- Prasad, M. (1992). Reagents in the mineral industry - recent trends and applications. *Minerals Engineering*, 279-294.
- Pyke, B., Fornasiero, D., & Ralston, J. (2003). Bubble particle heterocoagulation under turbulent conditions. *Journal of Colloid and Interface Science*, 141-151.
- Savassi, O., Alexander, D., Franzidis, J., & Manlapig, E. (1998). An empirical model for entrainment in industrial flotation plants. *Minerals Engineering*, 243-256.
- Savassi, O., Manlapig, E., & Franzidis, J. (2015). A Simple Model for Entrainment in Conventional Flotation Cells. *Materials Science*.
- Schulze, H. (1977). New theoretical and experimental investigations on stability of bubble/particle aggregates in flotation: a theory on the upper particle size of floatability* . *International Journal of Mineral Processing*, 241-259.
- Schulze, H. (1982). Dimensionless number and approximate calculation of the upper particle size of floatability in flotation machines. *International Journal of Mineral Processing*, 321-328.
- Subrahmanyam, T. &. (1990). Fine particles processing: shear-flocculation and carrier flotation - a review. *International Journal of Mineral Processing*, 265-286.
- Subrahmanyam, T., & Forssberg, E. (1988). Froth Stability, Particle Entrainment and Drainage in Flotation m A Review . *International Journal of Mineral Processing*, 33-53.

- Tabosa, E., Runge, K., Holtham, P., & Duffy, K. (2013). Strategies for increasing coarse particle flotation in conventional flotation cells. *Sixth International Flotation Conference (Flotation '13)*. Cape Town, South Africa.
- Tao, D. (2005). Role of Bubble Size in Flotation of Coarse and Fine Particles—A Review. *Separation Science and Technology*, 741-760.
- TecProMin. (2022). Obtenido de TecProMin: <https://www.tecpromin.cl/new/sistema-de-muestreo-metalurgico/>
- Trahar, W. (1981). A rational interpretation of the role of particle size in flotation. *International Journal of Mineral Processing*, 289-327.
- Trahar, W., & Warren, L. (1976). The flotability of very fine particles. *International Journal of Mineral Processing*, 103-131.
- Vallejos, P., Yianatos, J., Grau, R., & Yañez, A. (2022). Evaluation of the impact of modifying froth launders in an industrial flotation bank using novel flotation models. *In Proceedings of the International Conference IMPC Asia-Pacific, Agosto 22-24*. Melbourne, Australia.
- Welsby, S., Vianna, S., & Franzidis, J. (2010). Assigning physical significance to floatability components. *International Journal of Mineral Processing*, 59-67.
- Wightman, E., Evans, C., Bradshaw, D., & Manlapig, E. (2010). Predicting flotation response from liberation information. *XXV International Mineral Processing Congress (IMPC 2010)*.
- Wills, B. A., & Finch, J. A. (2015). *Mineral Processing Technology* (8th ed.). Butterworth-Heinemann.
- Yianatos, J., & Vinnett, L. (2015). *Flotación de minerales: Fundamentos, tecnología y aplicación*. Valparaíso, Chile: USM.
- Yianatos, J., Bergh, L., & Aguilera, J. (2000). The effect of grinding on mill performance at division Salvador, Codelco-Chile. *Minerals Engineering*, 485-495.
- Yianatos, J., Bergh, L., Díaz, F., & Rodríguez, J. (2005). Mixing characteristics of industrial flotation equipment. *Chemical Engineering Science*, 2273-2282.
- Zhang, J., & Subasinghe, N. (2013). Prediction of mineral liberation characteristics of comminuted particles of high grade ores. *Minerals Engineering*, 68-76.
- Zhang, W. (2016). The Effects of Frothers and Particles on the Characteristics of Pulp and Froth Properties in Flotation—A Critical Review. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 251-269.
- Zhang, W., Zhou, X., & Finch, J. (2012). Determining independent control of dual-frother systems – Gas holdup, bubble size and water overflow rate. *Minerals Engineering*, 106-116.

- Zhao, C., Chen, J., Wu, B., & Long, X. (2014). Density functional theory study on natural hydrophobicity of sulfide surfaces. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 491-498.
- Zhu, J., Gui, W., Yang, C., Xu, H., & Wang, X. (2014). Probability density function of bubble size based reagent dosage predictive control for copper roughing flotation. *Control Engineering Practice*, 1-12.

ANEXOS

A. *Flowsheet* LT1

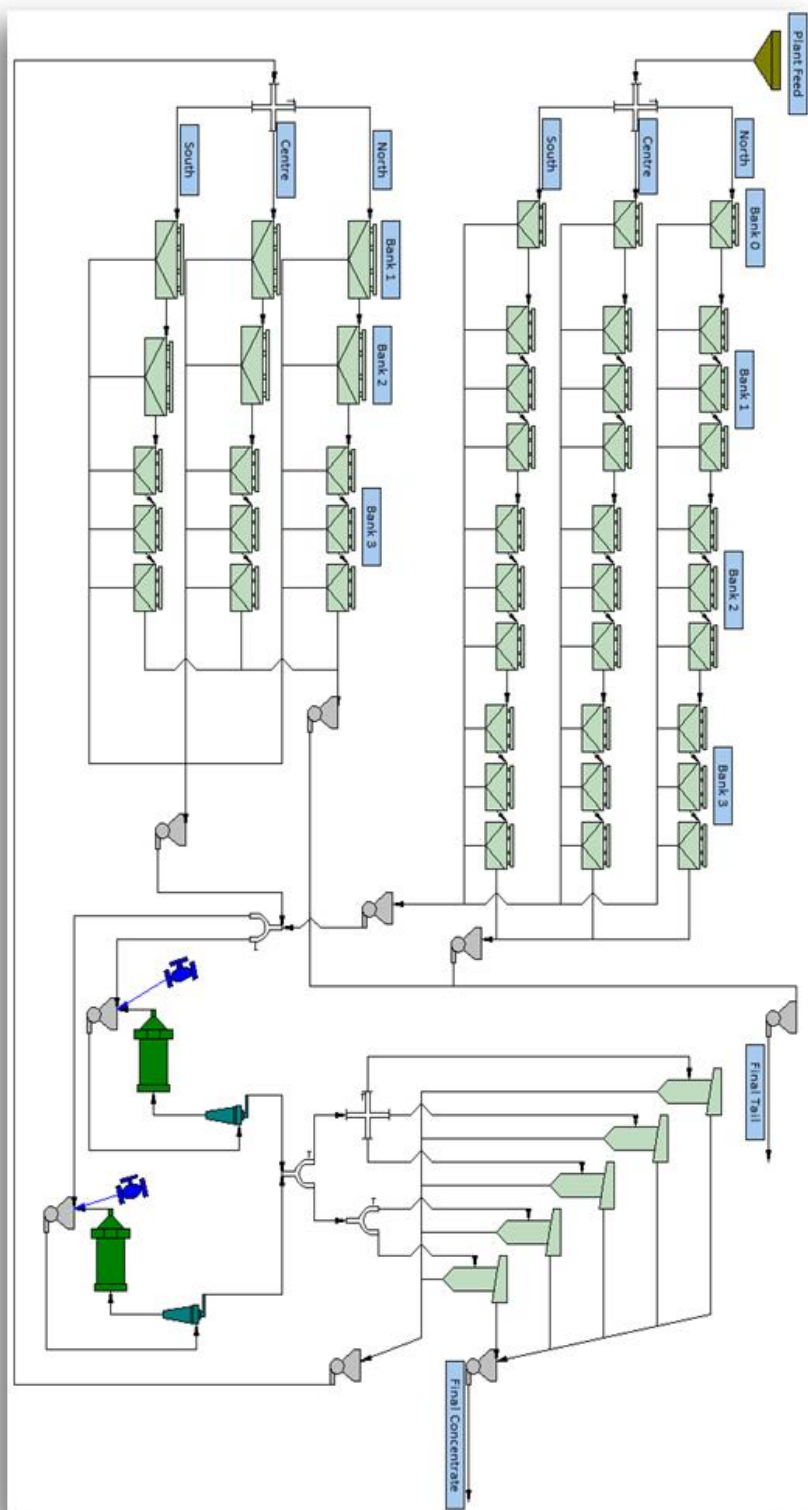


Figura A.1 Diagrama de proceso de flotación colectiva planta LT1.

B. Protocolo limpieza de muestreadores planta Las Tórtolas.

 AngloAmerican DLB - DIV LOS BRONCES GP - Gerencia Plantas CPR - Control de Procesos	Estándar PNP.DLBGPCPR.0001	Fecha Inicio Vigencia : 01.02.2021 Versión: 1.1 Página 1 de 9
---	---	---

INSTRUCTIVO

LIMPIEZA DE MUESTREADORES

PLANTA LAS TORTOLAS

ELABORADOR	REVISOR	APROBADOR
Lorena Herrera <i>Control de Calidad</i>	Karina Deney <i>Jefe Control de Calidad</i>	Sebastian Morell <i>Jefe de Operaciones</i> <i>Planta 2 - Las Tórtolas</i>
Fecha : 17-02-2021	Fecha :	Fecha :
Firma :	Firma :	Firma :

 AngloAmerican DLB - DIV LOS BRONCES GP - Gerencia Plantas CPR - Control de Procesos	Estándar PNP.DLBGPCPR.0001	Fecha Inicio Vigencia : 01.02.2021 Versión: 1.1 Página 2 de 9
---	---	---

1.1. Introducción

Los muestreadores de pulpa, ubicados en los distintitos flujos presentes en la planta 1 y 2 de Las Tórtolas, permiten obtener una muestra representativa de lo procesado en la planta a lo largo del turno. Posteriormente los resultados de los análisis químicos realizados a las muestras tomadas entregan información relevante sobre el desempeño de la planta y los posibles desvíos que estén impactando en los resultados esperados. La disponibilidad, operatividad y buen desempeño de los equipos, es de suma relevancia para la operación.

1.2. Muestreadores

1.2.1 Equipos presentes en planta 1 y 2

Tanto planta 1 como planta 2 tienen muestreadores de pulpa. En cada planta, la tecnología es distinta, por lo que es importante conocer a grandes rasgos las partes principales de cada equipo. En la **Figura 1** se puede observar los muestreadores que se encontrarán en la planta LT1, los cuales están compuestos por un muestreador primario (cuchara) para posteriormente encontrar una seguidilla de vezin, los cuales permiten ir reduciendo el tamaño de la muestra antes de ingresar al balde. En la **Tabla 1** se indica el detalle de la cantidad y tipos de muestreadores en cada flujo

 AngloAmerican DLB - DIV LOS BRONCES GP - Gerencia Plantas CPR - Control de Procesos	Estándar PNP.DLBGPCPR.0001	Fecha Inicio Vigencia : 01.02.2021 Versión: 1.1 Página 3 de 9
---	---	---

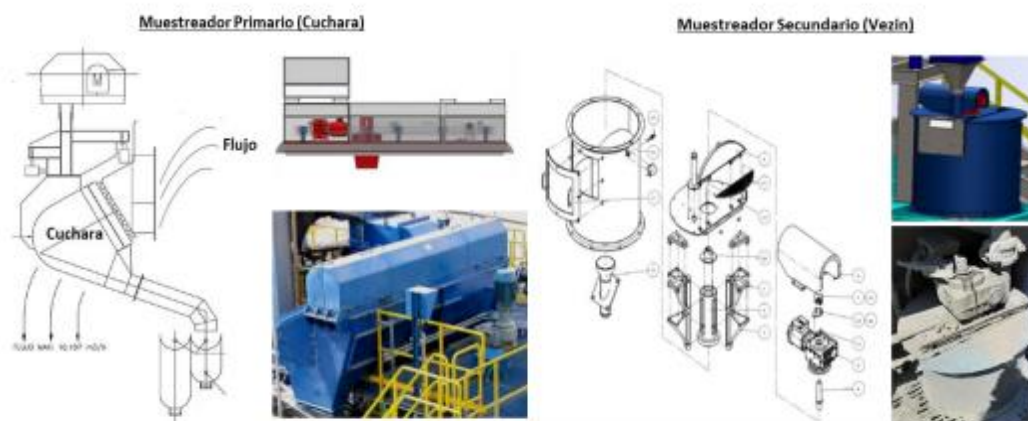


Figura 1 Muestreadores de pulpa Planta 1.

Tabla 1 Detalle de cantidad y tipo de muestreadores presente en cada flujo

Flujo	Muestreador	Tipo Muestreador
Alimentación	Primario	Cuchara
	Secundario	Vezin
	Terciario	Vezin
	Divisor	-
Concentrado Final	Primario	Cuchara
	Secundario	Vezin
Concentrado Rougher	Primario	Cuchara
	Secundario	Vezin
Relave Rougher	Primario	Cuchara
	Secundario	Vezin
Relave Final	Primario	Cuchara
	Secundario	Vezin
	Terciario	Vezin

Para el caso de la planta 2, los equipos en cuanto a metodología de muestreo difieren respecto a la planta 1, sin embargo, el principio y objetivo es el mismo. En la **Figura 2** y **Figura 3**.

 AngloAmerican DLB - DIV LOS BRONCES GP - Gerencia Plantas CPR - Control de Procesos	Estándar PNP.DLBGPCPR.0001	Fecha Inicio Vigencia : 01.02.2021 Versión: 1.1 Página 4 de 9
---	---	---

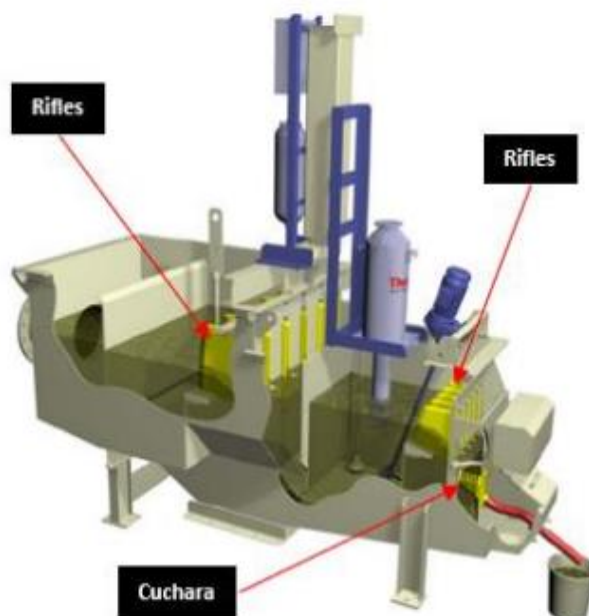


Figura 2 Muestreador de pulpa Planta 2



Figura 3 Partes del muestreador de pulpa de la planta 2

 AngloAmerican DLB - DIV LOS BRONCES GP - Gerencia Plantas CPR - Control de Procesos	Estándar PNP.DLBGPCPR.0001	Fecha Inicio Vigencia : 01.02.2021 Versión: 1.1 Página 5 de 9
---	---	---

Tabla 2 Detalle de cantidad y tipo de muestreadores presente en cada flujo

Flujo	Muestreador	Tipo Muestreador
Alimentación	Primario	Rifle
	Secundario	Rifle
	Terciario	Rifle
	Cuaternario	Cuchara
Concentrado Final	Primario	Rifle
	Secundario	Rifle
	Terciario	Cuchara
Concentrado Rougher	Primario	Rifle
	Secundario	Rifle
	Terciario	Rifle
	Cuaternario	Cuchara
Relave Rougher #1, 2# y 3# (Misma condición para los 3 muestreadores)	Primario	Rifle
	Secundario	Rifle
	Terciario	Rifle
	Cuaternario	Cuchara
Relave Scavenger	Primario	Rifle
	Secundario	Rifle
	Terciario	Rifle
	Cuaternario	Cuchara
Relave Final	Primario	Rifle
	Secundario	Rifle
	Terciario	Rifle
	Cuaternario	Cuchara

1.2.2. Seguridad en la operación

Los riesgos asociados a las tareas de limpieza de muestreadores se indican en la **Tabla 3**. Los peligros y riesgos indicados son los más habituales que se podrían presentar, antes de iniciar la tarea de limpieza, es necesario que el personal verifique en terreno la condición y realice la AST correspondiente.

 AngloAmerican DLB - DIV LOS BRONCES GP - Gerencia Plantas CPR - Control de Procesos	Estándar PNP.DLBGPCPR.0001	Fecha Inicio Vigencia : 01.02.2021 Versión: 1.1 Página 6 de 9
---	---	---

Tabla 3 Guía de los peligros y riesgos habituales que se podrían presentar en la tarea de limpieza

PELIGROS	RIESGOS	MEDIDAS DE CONTROL
Piso resbaladizo, presencia de obstáculos, interacción con trabajos externos en la zona, etc.	Caída al mismo y/o distinto nivel Interacción con trabajos o herramientas que no entran dentro del trabajo planificado	Utilizar siempre los 3 puntos de apoyo. Verificar que el sector se encuentre despejado. En caso presencia de otros trabajos en el área coordinar con personal a cargo y evaluar la realización de la actividad
Limpieza en muestreador	Atrapamiento y/o interacción con parte móvil	Nunca intervenir o ingresar algún elemento a los cajones de los cortadores o a alguna de las zonas que cuenten con partes móviles. La limpieza siempre será en las zonas donde no exista interacción con alguna parte móvil del equipo
Salpicadura de pulpa	Daño ocular o irritación de la piel	En todo instante uso de lentes de seguridad o careta facial. Los EPP por considerar serán los indicados en instructivo de uso de hidrolavadora
Manipulación Hidrolavadora	Daño a persona, golpes en mano y/o cuerpo	La persona que utilizará la hidrolavadora, debe tener el entrenamiento previo y autorización para su uso.

 AngloAmerican DLB - DIV LOS BRONCES GP - Gerencia Plantas CPR - Control de Procesos	Estándar PNP.DLBGPCPR.0001	Fecha Inicio Vigencia : 01.02.2021 Versión: 1.1 Página 7 de 9
---	---	---

1.2.3 Instructivo Limpieza en muestreadores LT1 y LT2

Para realizar la limpieza se deben considerar los siguientes pasos a seguir:

1. Verificar que la zona del muestreador elegido se encuentre despejada y sin trabajos externos que puedan intervenir durante la limpieza. En caso de existir otros trabajos comunicarse con el encargo y verificar disponibilidad del área
2. Comprobando que la zona se encuentra apta para realizar el trabajo, generar la AST y toda la información de seguridad y controles necesarios antes de iniciar.
3. La Hidrolavadora será utilizada sólo por personal autorizado y capacitado para dicha actividad
4. Los baldes receptores de muestra ubicados en cada cortador deberán ser retirados durante la limpieza, para evitar contaminación de la muestra existente. Una vez concluida la limpieza los baldes deben ser instalados nuevamente.
5. La limpieza en los muestreadores se realizará a las zonas que no involucren partes móviles. Por lo que para el caso de la Planta LT2 serían la zona de rifles, zona de traspaso, zona de descarte de muestra y zona riel cuchara - mangueras hacia el balde, **Figura 4**, **Figura 5** y **Figura 6**. En el caso particular de zona de riel cuchara y manguera, la limpieza debe ser siempre desde fuera de esas áreas, sin ingresar la pistola de la hidrolavadora.



Figura 4 Rifles y Zona de traspaso

 AngloAmerican DLB - DIV LOS BRONCES GP - Gerencia Plantas CPR - Control de Procesos	Estándar PNP.DLBGPCPR.0001	Fecha Inicio Vigencia : 01.02.2021 Versión: 1.1 Página 8 de 9
---	---	---



Figura 5 Zona de manguera



Figura 6 Cajón de traspaso, rifles y zona de descarte de muestras

6. En los rifles se debe procurar retirar todo el material que impida el paso de flujo a los cajones posteriores
7. En el cajón de traspaso del rifle secundario, para la limpieza es necesario levantar tapón y limpiar los rifles y zonas de descarte de muestra que se encuentra entre los rifles. Concluida la limpieza será necesario bajar el tapón

 AngloAmerican DLB - DIV LOS BRONCES GP - Gerencia Plantas CPR - Control de Procesos	Estándar PNP.DLBGPCPR.0001	Fecha Inicio Vigencia : 01.02.2021 Versión: 1.1 Página 9 de 9
---	---	---

8. La zona de mangueras, solo se puede limpiar desde afuera, ya que la cuchara es una parte móvil del equipo
9. El cajón donde se ubica el amdel, no debe ser intervenido y solo se podrán limpiar los rifles lanzando agua desde arriba.
10. Bajo ningún punto se debe ingresar la lanza de la hidrolavadora al cajón donde se encuentra el amdel, ya que en esa zona existe un agitador, **Figura 7**.



Figura 7 Cajón de Amdel y Agitador

11. Para el caso de los muestreadores de la planta 1, las solicitudes serán coordinadas en forma puntual, debido a la gran cantidad de partes móviles con la que cuenta el equipo.

C. Estado de cortadores.

Resumen reportes estado de cortadores para las 3 corrientes utilizadas y los turnos a

Tabla C.1 Estado de cortadores turnos en estudio corriente de alimentación.

ALIMENTACION					
TURNO	Si operativo		No operativo		Observación
	Operativo	Disponible	Falla	Proceso	
361A	1	1	0	0	
361B	1	1	0	0	
362A	1	1	0	0	
362B	1	1	0	0	Generando poca muestra
363A	1	1	0	0	
363B	1	1	0	0	
367A	1	1	0	0	
367B	1	1	0	0	
368A	1	1	0	0	
369A	1	1	0	0	
369B	1	1	0	0	
370A	1	1	0	0	
370B	1	1	0	0	
371A	1	1	0	0	
372A	1	1	0	0	
372B	1	1	0	0	
373A	1	1	0	0	
373B	1	1	0	0	
374A	1	1	0	0	
374B	1	1	0	0	
375B	1	1	0	0	
380A	1	1	0	0	
380B	1	1	0	0	
381A	1	1	0	0	
381B	1	1	0	0	
382A	1	1	0	0	
382B	1	1	0	0	
383A	1	1	0	0	
383B	1	1	0	0	
384A	1	1	0	0	
384B	1	1	0	0	
385A	1	1	0	0	
385B	1	1	0	0	
387A	1	1	0	0	

388A	1	1	0	0	
388B	1	1	0	0	
390A	1	1	0	0	
390B	1	1	0	0	
391A	1	1	0	0	
391B	1	1	0	0	
392B	1	1	0	0	
393A	1	1	0	0	
393B	1	1	0	0	

Tabla C.2 Estado de cortadores turnos en estudio corriente de concentrado *rougher*.

TURNO	CONCENTRADO ROUGHER				
	Si operativo		No operativo		Observación
	Operativo	Disponible	Falla	Proceso	
361A	0	0	1	0	Tubería Secundario Embancada
361B	0	0	1	0	Tubería Secundario Embancada
362A	0	0	1	0	Tubería Secundario Embancada
362B	0	0	1	0	Tubería Secundario Embancada
363A	0	0	1	0	Tubería Secundario Embancada
363B	0	0	1	0	Tubería Secundario Embancada
367A	0	0	1	0	Tubería Secundario Embancada
367B	0	0	1	0	Tubería Secundario Embancada
368A	0	0	1	0	Tubería Secundario Embancada
369A	0	0	1	0	Tubería Secundario Embancada
369B	0	0	1	0	Tubería Secundario Embancada
370A	0	0	1	0	Tubería Secundario Embancada
370B	0	0	1	0	Tubería Secundario Embancada
371A	0	0	1	0	Tubería Secundario Embancada
372A	0	0	1	0	Tubería Secundario Embancada
372B	0	0	1	0	Tubería Secundario Embancada
373A	0	0	1	0	Tubería Secundario Embancada
373B	0	0	1	0	Tubería Secundario Embancada
374A	0	0	1	0	Tubería Secundario Embancada
374B	0	0	1	0	Tubería Secundario Embancada
375B	0	0	1	0	Tubería Secundario Embancada
380A	0	0	1	0	Embanque tubería cortador primario al secundario
380B	0	0	1	0	Embanque tubería cortador primario al secundario
381A	0	0	1	0	Embanque tubería cortador primario al secundario

381B	0	0	1	0	Embanque tubería cortador primario al secundario
382A	0	0	1	0	Embanque tubería cortador primario al secundario
382B	0	0	1	0	Embanque tubería cortador primario al secundario
383A	0	0	1	0	Embanque tubería cortador primario al secundario
383B	0	0	1	0	Embanque tubería cortador primario al secundario
384A	0	0	1	0	Embanque tubería cortador primario al secundario
384B	0	0	1	0	Embanque tubería cortador primario al secundario
385A	0	0	1	0	Embanque tubería cortador primario al secundario
385B	0	0	1	0	Embanque tubería cortador primario al secundario
387A	1	1	0	0	
388A	1	1	0	0	
388B	1	1	0	0	
390A	1	1	0	0	
390B	1	1	0	0	
391A	1	1	0	0	
391B	1	1	0	0	
392B	1	1	0	0	
393A	1	1	0	0	
393B	1	1	0	0	

Tabla C.3 Estado de cortadores turnos en estudio corriente de relave *rougher*.

TURNO	RELAVE ROUGHER				
	Si operativo		No operativo		Observación
	Operativo	Disponible	Falla	Proceso	
361A	1	1	0	0	
361B	1	1	0	0	
362A	1	1	0	0	
362B	1	1	0	0	
363A	1	1	0	0	
363B	1	1	0	0	
367A	1	1	0	0	
367B	1	1	0	0	
368A	1	1	0	0	
369A	1	1	0	0	
369B	1	1	0	0	
370A	1	1	0	0	
370B	1	1	0	0	

371A	1	1	0	0	
372A	1	1	0	0	
372B	1	1	0	0	
373A	1	1	0	0	
373B	1	1	0	0	
374A	0	0	1	0	Cortador sin detención recorrida constante
374B	1	1	0	0	
375B	1	1	0	0	
380A	1	1	0	0	
380B	1	1	0	0	
381A	1	1	0	0	
381B	1	1	0	0	
382A	1	1	0	0	
382B	1	1	0	0	
383A	1	1	0	0	
383B	1	1	0	0	
384A	1	1	0	0	
384B	1	1	0	0	
385A	1	1	0	0	
385B	1	1	0	0	
387A	1	1	0	0	
388A	1	1	0	0	
388B	1	1	0	0	
390A	1	1	0	0	
390B	1	1	0	0	
391A	1	1	0	0	
391B	1	1	0	0	
392B	1	1	0	0	
393A	1	1	0	0	
393B	1	1	0	0	

D. Preparación de muestras.

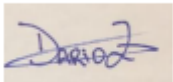
Procedimiento preparación de muestras mecánicas Las Tórtolas.



PROCEDIMIENTO ESPECÍFICO PREPARACION MECANICA DE MUESTRAS PLANTA LAS TÓRTOLAS

Código	PE-SGCM-MPLT-03
Página	1 de 24

PROCEDIMIENTO ESPECIFICO PREPARACION MECANICA MUESTRAS PLANTA LAS TORTOLAS

CONTROL	ELABORADO POR	REVISADO POR	APROBADO POR
NOMBRE	Darío Zelada	Miguel Aragon	Sergio Aguilera
CARGO	Supervisor	Sub Gerente Prevención	Adm. De Contrato
FECHA	Febrero 2021	Febrero 2021	Febrero 2021
FIRMA			



PROCEDIMIENTO ESPECÍFICO PREPARACION MECANICA DE MUESTRAS PLANTA LAS TÓRTOLAS

Código	PE-SGCM-MPLT-03
Página	3 de 24

1. OBJETIVO

Establecer los pasos necesarios para ejecutar la labor de preparación mecánica de muestras que requieran ser analizadas químicamente y necesarias para el desarrollo de pruebas metalúrgicas; ejecutar Filtrado y Secado de Muestras en forma segura, y con un máximo de aseguramiento de la calidad en el proceso de preparación de las muestras y por último la revisión y envío de sobres a análisis químico, todo esto en forma segura y con un máximo de aseguramiento de la calidad en el proceso de preparación y envío de las muestras.

2. ALCANCE

Estos procesos se realizan respectivamente a todas aquellas muestras obtenidas desde los flujos de las plantas y/o piscinas de almacenamiento, procesos plantas, pruebas de laboratorio, etc.

Debe ser aplicado por toda persona autorizada y competente para la preparación mecánica de muestras de procesos.

Estos procedimientos son realizados, exclusivamente, por Operadores del Laboratorio Metalúrgico y de la Muestrera que se encuentren debidamente autorizados de acuerdo a sus competencias.

3. TERMINOLOGÍA

4. RESPONSABILIDADES

- **Gerente Geología y Muestrera:** Entregar los recursos necesarios para cumplir con el presente procedimiento.
- **Supervisor:** Es el responsable de liderar todas las actividades relacionadas con la Seguridad, Salud Ocupacional, Medio Ambiente y Calidad en el grupo de trabajo asignado; además de solicitar y asignar los recursos necesarios para la realización de las actividades operativas y administrativas ligadas a dicha operación. Exigir el cumplimiento y aplicación en terreno de este procedimiento por parte de todo el personal que participe en las labores de este procedimiento. Además del cumplimiento de los estándares establecidos y aplicables al contrato. Tomar acciones inmediatas de carácter administrativo, operacional u de otra índole cuando existan incumplimientos, anomalías y/o desperfectos que puedan afectar, dañar o dejar sin efecto las actividades. Cumplir con las actividades exigidas por el programa personalizado de control de riesgos para el cargo específico. Exigir el uso de todos los elementos protección personal, de acuerdo a los riesgos presentes a todo el personal que participe en dicha actividad. Participar en la investigación de incidentes/accidentes que pudiesen afectar la operación.
- **Líder de Equipo y/o responsable del área:** responsable del cumplimiento, aplicación y control en terreno del presente procedimiento por parte de todo el personal que participe en las labores de



PROCEDIMIENTO ESPECÍFICO PREPARACION MECANICA DE MUESTRAS PLANTA LAS TÓRTOLAS

Código	PE-SGCM-MPLT-03
Página	4 de 24

descritas en este procedimiento, mantener un control y aseguramiento de calidad respecto a las labores asignadas. Además del cumplimiento de los estándares establecidos aplicables al contrato. Participar en la respectiva evaluación de los riesgos, como también controlar la efectiva revisión previa de equipos, materiales y/o herramientas. Capacitar, difundir y evaluar el conocimiento del presente documento a todo el personal que participe en las labores antes mencionadas. Cumplir con las actividades exigidas por el programa personalizado de control de riesgos para el cargo específico. Generar cambios y/o mejoras al presente documento cuando se produzcan variaciones a dicho proceso.

Además de realizar las revisiones al presente, según programa anual de revisiones de procedimientos del Servicio. Participar en la investigación de Incidentes/accidentes que pudiesen afectar la operación.

- **Técnico Metalurgista:** Desarrollar las tareas de acuerdo al presente procedimiento, participar en la evaluación de riesgos cada vez que inicie la tarea. Comunicar los cambios que se produzcan en el lugar de trabajo. Recibir información sobre los riesgos existentes para su seguridad y salud, así como sobre las medidas necesarias para eliminar o reducir dichos riesgos. Participar en el proceso de decisión de las medidas de prevención y protección que se van a adoptar. Recibir formación/instrucciones sobre las medidas que se van a adoptar.

El trabajador es igualmente responsable de los recursos existentes, tanto en uso como cuidado.

5. EQUIPOS Y MATERIALES

5.1 EQUIPOS DE PROTECCIÓN PERSONAL

- Guantes de nitrilo.
- Guantes kevlar (Aluminizados para alta temperatura).
- Guantes quirúrgicos.
- Calzado de seguridad caña alta 12,5 cm mínimo.
- Lentes seguridad foto cromáticos.
- Protector auditivo tipo orejera, cintillo.
- Respirador dos vías, con filtro mixto (P-100).
- Buzo papel desechable.

5.2 MATERIALES O EQUIPOS DE APOYO

- Bolsas Plásticas.
- Sobres.
- Balanzas.
- Bandejas de Acero Inoxidables.
- Divisor rotatorio.
- Pulverizador LM2.
- Sistemas de aire a presión (Pistolas de aire a presión).
- Sistemas de Extracción de polvo (Campanas de extracción).
- Brochas, corcheteras y etiquetas de muestras.



PROCEDIMIENTO ESPECÍFICO PREPARACION MECANICA DE MUESTRAS PLANTA LAS TÓRTOLAS

Código	PE-SGCM-MPLT-03
Página	5 de 24

- Malla de tamizado.
- Espátula acero inoxidable distintos tamaños.
- Pala Jis.
- Filtro a presión 8".
- Capsulas de pulverizado.
- Limpiador de mallas ultra sonido.
- Pistola de impacto neumática.
- Hornos y estufas de secado.
- Computadores.
- Artículos de escritorio.
- Impresoras.
- Pistola Impacto Neumática.
- Baldes o recipientes contenedores de pulpa de colores dependiendo el flujo.
- Aire a presión.
- Agua.
- Tela filtro.
- Papel filtro.
- Hornos de Secado de Muestras, con marcador de temperatura digital.
- Pistola de control de temperatura.

6. DESCRIPCIÓN DE LAS ACTIVIDADES

- Los ejecutores de la actividad deben realizar análisis de seguridad del trabajo (AST) para esta tarea. Cuando existan cambios, ya sea en entorno o la tarea, se deberá generar un nuevo análisis.
- Al inicio de la actividad, cada operador deberá verificar el óptimo estado de los equipos, sean éstos, elementos de protección o herramientas de trabajo o superficies de trabajo.
- Asegurarse que el piso y el sector donde se realiza el trabajo esté limpio y despejado para evitar caídas del personal.

6.1. OPERACIÓN DE PREPARACIÓN MECÁNICA DE MUESTRAS DE FLUJOS DE LAS PLANTAS PARA ANÁLISIS QUÍMICO

A continuación, se detalla el procedimiento de preparación mecánica de muestras para aquellas provenientes de los flujos de las plantas de Cu y Mo.

6.1.1. FILTRADO DE MUESTRAS

Las muestras con contenido de agua de proceso obtenidas desde los distintos flujos de las plantas y/o piscinas de almacenaje y procesos plantas, deben ser sometidas a proceso de filtrado para eliminar, desde las pulpas, la



PROCEDIMIENTO ESPECÍFICO PREPARACION MECANICA DE MUESTRAS PLANTA LAS TÓRTOLAS

Código	PE-SGCM-MPLT-03
Página	6 de 24

mayor cantidad de agua posible. El proceso de filtrado permite, mediante un sistema de aire a presión obtener muestras con una humedad aproximada del 20%. La humedad residual de las muestras es eliminada mediante proceso de secado en hornos en la etapa de tratamiento posterior.

6.1.1.1. OPERACIÓN DE FILTRADO DE MUESTRAS

- Verificar condiciones óptimas para el uso seguro de los filtros y la limpieza adecuada de éstos.
- Tarar baldes.
- Pesar muestras en balanza digital con balde.
- Instalar en la base de los filtros y en el orden indicado, malla de acero, tela filtrante y papel filtro.
- Colocar sobre papel, de manera vertical el cilindro del filtro y asegurar que éste quede debidamente empotrado en la base del filtro.
- Agitar la muestra contenida en baldes o recipientes contenedores de pulpa para asegurar el vaciado total de sólidos hacia el filtro. En caso de ser necesario, agregar agua al balde o recipiente contenedor de pulpa hasta el vaciado total de residuos sólidos.
- Instalar la tapa del filtro sobre el cilindro de manera tal que las gomas de sello queden perfectamente centradas.
- Asegurar el cierre adecuado de tapa de filtros para evitar escape de muestra, utilizando Pistola de Impacto Neumática (en caso de que esta se encuentre en mal estado se debe usar llave manual).
- Dar paso de aire lentamente para evitar que la muestra se proyecte en el interior del filtro. Mantener válvula de presión de aire abierta hasta verificar que ha evacuado toda el agua desde el interior del filtro.
- Cerrar válvula de aire, y abrir válvula de alivio lentamente para eliminar presión de aire al interior del filtro. Mantener válvula de alivio abierta hasta eliminar todo aire del interior.
- Desmontar tapa de filtro utilizando Pistola de Impacto Neumática (en caso de que esta se encuentre en mal estado utilizar llave manual).
- Desmontar cilindro del filtro lentamente para evitar pérdida de muestra.
- Pesar muestras en bandejas.
- La muestra húmeda contenida en papel filtro se deposita en una bandeja debidamente identificada con el flujo de la planta u origen correspondiente. Si así correspondiere, posteriormente la muestra pasa al proceso de secado en hornos (ver procedimiento de Secado de Muestra).
- Lavar filtro para eliminar residuos y evitar contaminación de muestras. Volver a montar el Cilindro en filtro. Dejar área de trabajo ordenada y limpia.

6.1.2. SECADO DE MUESTRAS

El análisis químico de muestras requiere que estas, una vez filtradas se encuentren totalmente secas.

El proceso de secado de muestras se realiza en hornos industriales de gran capacidad y el objetivo de este procedimiento es eliminar la humedad residual de las muestras de los flujos de las plantas, muestras provenientes de piscinas de almacenamiento de pulpas o de aquellas que presenten algún grado de humedad (ej. Concentrado Cu, Concentrado Mo).



PROCEDIMIENTO ESPECÍFICO PREPARACION MECANICA DE MUESTRAS PLANTA LAS TÓRTOLAS

Código	PE-SGCM-MPLT-03
Página	7 de 24

6.1.2.1. OPERACIÓN DE SECADO DE MUESTRAS

- Verificar condiciones óptimas de funcionamiento de los hornos de secado (rango de temperatura).
- Verificar con equipo medidor de temperatura, la temperatura al interior de los hornos en sus partes superior, media e inferior. Este procedimiento se realizará una vez al día y se llevará registro diario de las Temperaturas por Horno en sus distintos niveles. Las temperaturas deberán ser tomadas con el medidor de temperatura y deben quedar registradas en planillas Excel.
- En el caso de que algún horno no sea utilizado de manera sistemática, de igual manera se realizará pruebas de funcionamiento de hornos para verificar temperaturas en su interior y se llevará un registro de temperaturas como lo indicado en el punto anterior. En este caso se realizará mediciones dos veces a la semana.
- La temperatura de secado de las muestras debe ser estable y no exceder los 105°C, de lo contrario las muestras pueden ser calcinadas o es posible perder la concentración de algunos elementos volátiles.
- Introducir dentro de Hornos de Secado, muestras en bandejas de acero inoxidable reutilizables, debidamente identificadas con los rótulos de muestras (ej., Flujos plantas, números de muestras, etc.). Las muestras pueden ser divididas en varias bandejas. Sin embargo, en este caso, cada bandeja debe ser identificada con el mismo número de muestra.
- El tiempo de secado dependerá de la cantidad de muestra existente en cada bandeja y debe ser determinado de manera experimental hasta obtener, en un período de tiempo, un peso de muestra constante que considera el peso de la bandeja + muestra. Para ello, las bandejas con muestras deben ser extraídas desde los hornos después de un tiempo estimado y determinado experimentalmente de manera que la muestra aún contenga algún grado de humedad (Ej. 1 hora). La muestra cada 1 hora será disgregada para optimizar el secado dentro del horno.
- Antes de pesar las bandejas y su muestra, éstas deben haber alcanzado una temperatura ambiente.
- Pesar las muestras, registrar medidas e introducirlas en los hornos sistemáticamente hasta lograr un peso de muestra constante. Para verificar el secado total de las muestras es necesario tener al menos 3 medidas de peso iguales. Esta información debe ser registrada en planillas de Registro de Peso Constante de las Muestras.

Las muestras provenientes de la planta de Mo requieren de una etapa inicial de disgregado después del secado de las muestras. La razón de esto es que la superficie de las partículas presenta un contenido variable de petróleo el cual se adiciona para el proceso de flotación de Mo. Esta característica evidentemente permite la adherencia de partículas unas con otras. El total de la muestra seca con petróleo es vaciado sobre la # 50Ty. Debido a que las partículas se adhieren, éstas suelen quedar como muestra retenida sobre la malla indicada. La acción de un movimiento circular de la mano en combinación con un leve aprisionamiento sobre la superficie de la malla, permite que las partículas pasen a través de los orificios y sean decepcionadas en una bandeja debidamente identificada con el número de muestra.



PROCEDIMIENTO ESPECÍFICO PREPARACION MECANICA DE MUESTRAS PLANTA LAS TÓRTOLAS

Código	PE-SGCM-MPLT-03
Página	8 de 24

6.1.3. HOMOGENEIZACIÓN PRIMARIA DE LA MUESTRA

El total de la muestra debe ser homogeneizada en equipo Divisor Rotatorio apropiado para la cantidad de muestra original. La cantidad de muestra que puede contener cada recipiente o porción dividida, no debe ser menor al 5% del total de la masa de la muestra original.

El contenido de muestra seca generada en los flujos de las plantas puede variar. Las muestras cuyos pesos varíen entre 0-2 kg, deberán ser homogeneizadas en Divisor Rotatorio cuya capacidad de tolva de recepción de muestra sea de hasta 2 kg. Las muestras de más de 2 kg, deben ser homogeneizadas en Divisor Rotatorio de capacidad de tolva de hasta 20 kg.

La cantidad de masa requerida para la etapa de pulverizado de la muestra debe ser tomada a partir del contenido total de los recipientes o de alguna combinación del contenido total de ellos. En el caso de requerirse más de un recipiente para completar la masa requerida, se deben seleccionar recipientes diametralmente opuestos. El divisor rotatorio debe operar con un mínimo de 30 rotaciones en un mínimo de tiempo de 1,30 min. Para homogeneizar el total de la muestra. El procedimiento de homogeneización primaria de muestras es el siguiente:

- Activar el equipo Divisor Rotatorio. Asegurar que las revoluciones establecidas para el equipo sean las adecuadas para operar con un mínimo de 30 rotaciones.
- Activar sistema de extracción de polvo ubicado sobre equipo divisor rotatorio. Dicho equipo de extracción debe estar regulado para evitar la succión de la muestra.
- Vaciar lentamente el contenido de la muestra en la tolva del Divisor rotatorio. Realizar dicho procedimiento hasta completar vaciado total de la muestra.

Una vez distribuida la totalidad de la muestra en los recipientes del divisor rotatorio, apagar funcionamiento del equipo y mantener en funcionamiento el sistema de extracción de polvo por aproximadamente 20 minutos posteriores a la homogeneización de la muestra.

Vaciar el contenido de muestra de cada recipiente en una bandeja de acero inoxidable con el número de identificación de la muestra hasta, completar una masa aproximada de 750 g. El material remanente debe ser tratado como rechazo. El sobre de llevar la identificación de la muestra.

Realizar limpieza al Divisor rotatorio para evitar contaminación de muestras. Para ello se utiliza sistema de aire a presión. Simultáneamente debe estar activo el sistema de extracción de aire (Campanas de Extracción de Aire).

6.1.4. HOMOGENIZACIÓN SECUNDARIA DE LA MUESTRA

La porción de muestra proveniente de la etapa de pulverización (aproximadamente 400 g) debe ser homogeneizada en equipo Divisor rotatorio para generar los distintos sobres de muestras para análisis químico, duplicados y QA/QC. El procedimiento de homogeneización secundaria es el siguiente:



PROCEDIMIENTO ESPECÍFICO PREPARACION MECANICA DE MUESTRAS PLANTA LAS TÓRTOLAS

Código	PE-SGCM-MPLT-03
Página	9 de 24

- Activar el equipo Divisor Rotatorio. Asegurar que las revoluciones establecidas para el equipo sean las adecuadas para operar con un mínimo de 30 rotaciones.
- Activar sistema de extracción de polvo ubicado sobre equipo divisor rotatorio. Dicho equipo de extracción debe estar regulado para evitar la succión de la muestra.
- Vaciar lentamente el contenido de la muestra en la tolva del Divisor rotatorio. Realizar dicho procedimiento hasta completar el vaciado total de la muestra.
- Una vez distribuida la totalidad de la muestra en los recipientes del divisor rotatorio, apagar funcionamiento de equipo y mantener en funcionamiento el sistema de extracción de polvo por aproximadamente 10 minutos posteriores a la homogeneización de la muestra.
- Una vez pesadas las muestras obtenidas del divisor rotatorio, una submuestra debe ser destinada para análisis químico de duplicado de muestra y esta misma para determinación de tamaño de partícula (QA/QC de pulverizador). Los análisis químicos de muestras de duplicados serán enviados como duplicados ciegos al Laboratorio Químico que corresponda, de acuerdo al Procedimiento de Envío de Duplicados para Control de Calidad/Aseguramiento de la Calidad de Análisis químico de Muestras de Procesos, Planta Las Tórtolas.
- De manera general, se deben destinar muestras para: análisis químico, pulpa duplicado al 5% de las muestras (QA/QC), chequeo laboratorio secundario al 5% de las muestras (QA/QC), determinación de tamaño de partícula (QA/QC de pulverizador) y testigo de la muestra.
- Las muestras contenidas en el resto de los recipientes del divisor rotatorio no destinadas para QA/QC deben ser introducidas en un sobre, como testigo. El sobre debe llevar identificación de la muestra. Este rechazo de muestra debe ser guardado en archivo de pulpas por el tiempo establecido en protocolo de administración de muestras. El lugar determinado para guardar testigos en generar será gabinetes metálicos dispuestos en laboratorio durante el mes en curso del proceso planta, estos gabinetes están identificados con tipo de flujo y planta. Al terminar mes calendario se vaciarán estos gabinetes y los sobres se depositarán en bandejas plásticas en sector de almacenaje secundario de testigos (container). Estas bandejas serán identificadas con tipo de flujo y fecha mensual; Ej: "Alimentación Planta 1 Marzo 2020"
- Las muestras se guardarán según tipo de ley de Cu, las muestras de baja ley por 2 meses y los concentrados por 4 meses.
- Al terminar estos periodos las muestras serán tratadas como rechazos para su posterior descarte en los flujos correspondientes en Planta.
- Realizar limpieza al Divisor rotatorio para evitar contaminación de muestras. Para ello se utiliza sistema de aire a presión. Simultáneamente debe activarse el sistema de extracción de aire (Campanas de Extracción de Aire).
- Finalmente, realizar análisis granulométrico de Control de Granulometría de #150 utilizando equipo Deslamador. Esta parte del procedimiento permite llevar control de calidad (QA/QC) del Pulverizador. Para ello se requiere Tarar la balanza por peso de la bandeja receptora y vaciar el contenido de muestra destinado para QA/QC (Ej: Flujos de Alimentación planta Cu y Concentrado Final Planta de Cu). Registrar peso de dicha muestra. Poner en funcionamiento equipo Deslamador. Vaciar el contenido de la muestra en malla (#150) del deslamador. Abrir llave de paso de agua para que la muestra sólida pase a través de dicha malla y así verificar la existencia o no de material retenido en #150.
- De existir material retenido, vaciar su contenido en una bandeja debidamente identificada con el número de muestra. Realizar lavado de malla con agua para asegurar que el sólido retenido quede depositado en la bandeja receptora. Dejar decantar los sólidos, eliminar contenido de agua superficial e introducir la bandeja en horno para secado de muestra según procedimiento de Secado de Muestras.



PROCEDIMIENTO ESPECÍFICO PREPARACION MECANICA DE MUESTRAS PLANTA LAS TÓRTOLAS

Código	PE-SGCM-MPLT-03
Página	10 de 24

- Extraer bandeja con muestra seca desde Horno de Secado, vaciar el contenido de muestra en la bandeja original utilizada para el pesaje de ésta. Pesar nuevamente la muestra asegurando la tara de la balanza. Calcular y registrar porcentaje de material retenido en malla. Si el porcentaje de material retenido es mayor al 5%, dejar fuera de funcionamiento el equipo pulverizador por no cumplir con estándares de calidad y coordinar revisión y/o mantención de equipo por los especialistas.

6.1.5. PULVERIZADO DE MUESTRA

Las muestras destinadas para análisis químico (común y para QA/QC) deben ser pulverizadas en equipo LM2 para obtener el tamaño de partícula adecuado ($95\% < 106 \mu\text{m}$). El procedimiento para el pulverizado es el siguiente:

- Asegurar que en la cápsula de recepción de muestras del pulverizador no existan residuos de otras muestras.
- Vaciar el contenido completo de muestra (400g aproximadamente) en la cápsula del pulverizador destinada para tratamiento de muestras de flujos de las plantas.
- Antes de realizar el pulverizado de la muestra, poner en funcionamiento el pulverizador con cápsula vacía y verificar el funcionamiento efectivo del sistema de bloqueo (detención de equipo) al levantar la tapa del pulverizador.
- Desactivar el funcionamiento del pulverizador. Verificar que el equipo esté absolutamente detenido (sin movimiento) e instalar la cápsula con contenido de muestra en plataforma vibratoria. Bajar tapa protectora de pulverizador, asegurar el sellado de la tapa y activar el funcionamiento del equipo.
- El tiempo de pulverizado de la muestra es programado y ha sido determinado experimentalmente, de manera tal de asegurar la reducción del tamaño de las partículas a menor a $104 \mu\text{m}$ (-#150).
- Al apagarse automáticamente el pulverizador, levantar la tapa un tiempo después de la detención del equipo para asegurar que éste se encuentre sin movimiento residual. Extraer cápsula desde su interior y vaciar el total de la muestra en la bandeja de recepción previamente identificada con el número de la muestra. Barrer cápsula con una brocha para asegurar que la totalidad de la muestra se encuentre en la bandeja. El vaciado de la muestra se debe realizar en el sector de campana extractora de polvo.
- Realizar la limpieza de la cápsula utilizada agregando cuarzo tipo arroz en el interior de ella. Instalar nuevamente la cápsula en plataforma vibratoria y activar el funcionamiento del Pulverizador por un período de 3 minutos estándar. Extraer el contenido de cuarzo y eliminar con rechazos de muestras de muestrera. Limpiar la cápsula con sistema de aire a presión en el sector de la campana extractora bajo el funcionamiento del sistema de extracción de polvo.

E. Leyes de Cu por tamaño.

Tablas datos leyes de cobre por tamaño y pesos parciales pasantes por tamaño para los turnos a balancear, para las 3 corrientes de interés.

Tabla E.1 Leyes de Cu por malla corriente de alimentación.

Turno/Malla	#48	#65	#100	#150	#200	#270	#400	#-400
361A	0.256	0.310	0.375	0.509	0.662	0.777	0.955	0.890
362A	0.292	0.303	0.403	0.541	0.736	1.062	1.367	0.844
363A	0.353	0.308	0.423	0.542	0.694	0.858	0.707	1.004
367A	0.288	0.323	0.406	0.592	0.754	0.962	1.160	1.109
368A	0.334	0.342	0.415	0.580	0.739	0.903	1.136	0.911
369A	0.275	0.322	0.395	0.531	0.650	0.826	1.039	0.991
370A	0.314	0.376	0.434	0.569	0.753	1.078	1.381	1.074
371A	0.330	0.344	0.467	0.626	0.849	1.145	1.369	1.237
372A	0.419	0.355	0.434	0.644	0.899	1.146	1.320	1.168
373A	0.288	0.310	0.388	0.471	0.686	0.837	1.200	0.992
374A	0.338	0.330	0.415	0.462	0.665	0.822	1.033	0.978
361B	0.259	0.294	0.371	0.470	0.609	0.748	0.895	0.844
362B	0.208	0.273	0.357	0.513	0.690	0.755	0.861	0.776
363B								
367B	0.302	0.342	0.438	0.584	0.694	0.883	1.117	1.101
369B		0.277	0.368	0.460	0.614	0.740	0.889	0.959
370B	0.269	0.297	0.393	0.513	0.674	0.885	1.040	0.981
372B	0.281	0.290	0.375	0.681	1.000	0.681	1.191	1.131
373B	0.293	0.325	0.380	0.500	0.647	0.839	1.036	1.013
374B	0.245	0.292	0.390	0.472	0.677	0.713	0.924	0.844
375B	0.320	0.279	0.348	0.414	0.565	0.741	0.920	0.867
380A		0.236	0.307	0.414	0.549	0.702	0.886	0.868
381A		0.287	0.372	0.521	0.709	0.857	1.044	0.951
382A	0.247	0.283	0.343	0.504	0.674	0.871	1.114	0.997
383A	0.253	0.264	0.334	0.430	0.587	0.657	0.842	0.886
384A	0.268	0.326	0.427	0.587	0.675	0.850	1.008	0.995
385A	0.258	0.297	0.413	0.569	0.706	0.874	1.083	0.998
380B		0.246	0.301	0.386	0.494	0.646	0.825	0.864
381B	0.281	0.304	0.356	0.464	0.619	0.763	0.930	0.888
382B	0.239	0.266	0.313	0.410	0.562	0.709	0.877	0.880
383B	0.255	0.305	0.408	0.510	0.688	0.799	0.988	0.923
384B		0.259	0.406	0.568	0.722	0.870	1.042	0.943
385B		0.293	0.331	0.455	0.587	0.749	0.853	0.890
387A	0.430	0.498	0.608	0.809	1.108	1.488	1.794	1.546
388A	0.197	0.226	0.287	0.385	0.522	0.681	0.841	0.769
390A		0.368	0.484	0.686	0.877	1.076	1.394	1.183
391A	0.255	0.274	0.376	0.527	0.738	0.991	1.173	1.002
393A		0.233	0.289	0.385	0.502	0.637	0.781	0.778
388B	0.250	0.281	0.366	0.518	0.646	0.797	1.037	0.929
390B	0.223	0.237	0.304	0.423	0.548	0.707	0.922	0.817
391B	0.256	0.292	0.382	0.569	0.653	0.905	1.119	0.960
392B	0.237	0.272	0.332	0.430	0.551	0.666	0.861	0.829

393B	0.205	0.213	0.282	0.378	0.521	0.688	0.816	0.826
-------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Tabla E.2 Pesos parciales [g] por malla corriente de alimentación.

Turno/Malla	#48	#65	#100	#150	#200	#270	#400	#-400
361A	26.4	19.0	20.8	17.2	13.6	15.0	11.2	78.4
362A	47.3	31.1	29.9	24.6	17.4	12.4	6.9	33.3
363A	26.4	12.3	16.2	13.8	10.7	8.4	6.8	46.1
367A	34.9	15.2	31.2	18.3	15.3	12.5	9.9	58.8
368A	12.0	12.0	17.2	13.4	11.9	10.6	8.6	63.5
369A	13.7	17.3	21.5	17.1	15.8	14.3	11.4	78.4
370A	39.9	26.1	24.3	24.4	16.6	14.8	5.8	348.1
371A	24.8	22.8	24.2	19.0	16.1	14.6	11.0	69.0
372A	34.1	22.5	31.0	21.8	16.0	12.0	8.4	55.3
373A	15.2	20.5	22.8	19.3	15.9	14.6	9.9	70.6
374A	25.5	15.5	20.3	22.6	17.1	13.8	11.3	75.9
361B	24.1	19.4	20.2	16.6	14.5	13.8	12.0	82.4
362B	27.8	21.4	20.3	15.1	9.6	9.1	6.6	53.9
363B								
367B	29.8	20.6	20.0	18.3	14.9	13.6	9.0	75.4
369B	0.0	28.5	32.6	18.0	15.8	14.4	12.2	80.6
370B	27.1	19.0	25.0	18.6	15.9	13.2	10.5	71.5
372B	14.1	18.6	22.1	18.3	16.2	15.8	12.7	83.4
373B	15.9	16.0	23.8	18.2	15.7	13.6	11.4	76.9
374B	30.3	19.0	18.7	16.7	11.3	15.6	11.0	78.8
375B	22.7	13.9	18.2	20.6	16.5	13.6	11.7	84.5
380A	0.0	39.5	29.1	19.1	18.7	14.8	11.9	68.2
381A	0.0	50.2	27.7	18.2	14.4	11.8	8.6	52.1
382A	26.9	18.6	29.3	22.1	17.7	13.9	10.5	63.9
383A	23.8	18.5	19.7	17.7	13.5	15.7	11.6	78.9
384A	20.0	20.0	20.6	16.7	15.4	14.4	11.4	83.5
385A	19.9	17.3	16.8	17.2	13.2	12.5	7.1	76.8
380B	0.0	22.7	20.6	15.1	16.7	14.6	12.6	96.5
381B	27.8	12.3	30.3	18.4	16.0	13.2	10.7	70.8
382B	16.7	12.5	24.0	18.8	16.4	14.1	11.6	86.3
383B	28.8	19.5	18.1	19.1	12.8	14.9	10.9	76.9
384B	0.0	43.7	21.6	16.9	14.9	13.8	11.1	78.1
385B	0.0	40.6	20.1	20.5	15.7	14.9	9.7	78.2
387A	61.3	43.7	40.8	35.5	29.8	24.1	18.8	117.0
388A	44.7	31.5	43.4	34.0	27.5	23.3	17.5	82.8
390A	0.0	14.7	8.3	5.5	5.7	4.7	3.5	22.8
391A	38.5	52.5	77.1	65.8	58.0	53.2	45.3	280.9
393A	0.0	65.9	46.3	29.7	28.9	24.9	19.9	143.6
388B	68.4	84.4	92.8	64.8	57.5	47.9	35.0	183.0
390B	26.1	48.0	42.9	40.0	38.3	35.0	29.7	183.6
391B	56.3	57.5	76.0	47.4	62.7	48.4	40.4	271.7
392B	45.6	48.5	43.6	39.2	35.1	34.9	29.1	183.9
393B	12.6	14.3	20.5	21.0	16.4	15.1	11.9	83.0

Tabla E.3 Leyes de Cu por malla corriente de concentrado *rougher*.

Turno/Malla	#48	#65	#100	#150	#200	#270	#400	#-400
361A	3.152	3.662	3.532	4.156	4.672	5.770	6.900	8.060
362A	3.720	3.815	3.768	4.526	5.260	6.550	8.090	8.484
363A	3.298	3.778	4.386	4.917	5.690	6.530	7.580	6.883
367A	2.801	3.229	3.842	4.195	4.367	5.250	6.200	5.251
368A	2.810	3.474	3.900	3.775	4.722	5.100	5.674	4.893
369A	2.902	2.919	3.037	3.523	4.213	5.080	5.676	4.419
370A	2.374	2.827	2.788	3.558	4.021	4.831	5.437	4.103
371A	3.063	3.489	4.048	4.364	5.057	5.707	6.872	5.282
372A	2.799	3.028	3.263	3.676	4.228	5.001	5.548	4.518
373A	1.240	1.991	2.283	3.150	3.761	4.980	5.580	4.058
374A	2.187	2.604	3.086	3.962	5.330	6.080	6.970	4.794
361B	3.035	3.606	3.779	4.263	5.200	6.280	8.010	8.671
362B	2.777	3.461	3.431	4.530	5.780	6.900	8.420	8.479
363B	2.422	3.390	3.504	4.044	4.719	5.480	6.300	5.498
367B	3.789	3.568	3.625	3.605	3.980	4.335	4.897	4.390
369B		2.810	3.138	3.983	4.884	5.750	6.697	6.675
370B	2.857	3.147	3.372	3.864	4.314	5.200	5.540	3.994
372B	3.345	3.819	3.861	4.610	5.720	6.350	7.010	5.247
373B	0.954	1.368	1.828	2.278	2.678	3.206	3.830	3.357
374B	2.491	2.915	2.982	3.631	4.071	4.850	5.160	3.705
375B	3.645	3.437	3.750	4.046	4.980	5.590	5.950	3.955
380A		2.308	3.172	4.380	5.420	6.580	7.870	7.579
381A		1.739	3.005	4.441	5.740	6.940	8.110	7.668
382A	3.868	4.049	4.017	4.062	5.490	6.570	7.760	7.521
383A	1.745	2.650	3.434	7.990	6.490	4.670	9.760	10.154
384A	2.386	3.000	3.743	4.407	5.360	6.490	7.550	7.027
385A	3.480	4.363	5.300	6.530	7.780	8.770	9.400	6.145
380B		2.066	2.941	4.140	5.070	6.470	7.710	7.018
381B	3.121	3.773	4.035	4.855	5.620	6.670	7.850	7.840
382B	2.640	3.234	3.848	4.917	6.450	8.080	9.640	9.968
383B	2.074	2.692	3.305	4.003	5.290	6.300	7.910	8.822
384B		3.844	4.839	5.193	5.430	5.940	6.510	4.641
385B		4.198	5.070	5.760	6.330	6.980	7.800	6.316
387A		4.437	4.750	5.990	7.666	9.018	10.248	6.968
388A	1.520	2.466	2.961	3.122	3.276	3.819	4.075	3.158
390A		2.678	2.746	2.844	2.897	3.490	4.283	4.920
391A	2.821	3.454	3.662	3.978	4.573	5.132	5.520	4.640
393A		2.122	2.692	3.019	3.283	3.672	4.202	3.699
388B	1.915	2.611	2.902	3.580	3.981	4.516	4.817	3.944
390B	2.354	2.757	2.977	3.172	3.604	4.223	4.727	3.830
391B	2.226	3.168	3.410	3.857	4.061	4.422	4.817	3.820
392B	1.940	2.633	3.082	3.322	3.767	4.363	5.334	5.577
393B	2.184	2.031	2.641	2.742	2.914	3.098	3.126	2.481

Tabla E.4 Pesos parciales [g] por malla corriente de concentrado *rougher*.

Turno/Malla	#48	#65	#100	#150	#200	#270	#400	#-400
361A	2.6	9.8	15.6	13.9	12.7	12.2	10.8	101.1
362A	6.2	17.3	36.3	31.0	24.3	17.8	11.8	59.1
363A	3.6	16.1	27.7	25.9	23.7	21.3	15.6	69.9
367A	6.2	19.1	25.8	27.3	17.2	17.1	10.2	79.2
368A	4.9	6.3	9.2	11.0	10.9	13.4	11.1	131.3
369A	3.2	10.1	15.0	14.1	11.6	12.4	10.7	111.5
370A	3.3	7.1	15.2	15.1	14.4	13.7	12.4	119.9
371A	3.6	7.6	16.8	24.6	22.3	17.5	13.2	95.9
372A	3.3	7.6	11.4	13.2	12.4	14.0	11.0	126.8
373A	6.5	8.8	24.7	20.4	19.2	16.5	13.0	91.8
374A	4.0	12.0	15.1	13.0	12.6	13.7	12.6	118.1
361B	4.1	10.2	27.5	22.2	20.9	16.0	13.2	87.9
362B	2.8	1.9	23.0	17.5	18.3	17.8	15.8	105.7
363B	3.9	9.9	21.5	19.3	16.2	13.7	11.4	108.3
367B	2.6	9.8	15.6	13.9	12.7	12.2	10.8	101.1
369B	1.1	1.7	17.7	16.0	15.6	16.1	14.6	119.0
370B	5.2	11.3	13.6	15.9	13.0	13.4	8.6	119.8
372B	2.6	4.7	15.0	16.9	17.3	16.1	15.4	102.0
373B	2.7	5.6	7.2	8.7	8.4	9.4	7.5	70.7
374B	3.3	6.9	13.9	12.9	13.0	13.4	13.4	124.9
375B	2.6	7.7	11.2	10.2	9.9	10.6	10.2	101.3
380A	0.3	0.9	12.4	12.8	16.2	15.6	14.4	110.3
381A	0.0	1.6	18.8	16.1	16.3	15.9	14.0	113.1
382A	4.2	11.9	26.2	26.5	22.3	17.4	12.2	79.3
383A	1.8	7.0	15.7	21.5	18.3	21.0	16.0	98.9
384A	3.1	11.8	19.9	18.8	17.3	16.7	14.0	97.6
385A	2.4	8.1	11.3	13.9	11.5	12.3	8.7	111.9
380B	0.0	1.5	9.2	9.3	12.5	12.4	13.1	142.7
381B	3.1	1.7	24.0	16.7	16.8	16.0	14.4	107.6
382B	2.2	6.8	16.6	17.6	16.9	16.0	14.6	109.6
383B	3.7	12.4	21.8	25.2	18.4	22.6	15.7	80.5
384B	0.0	6.7	10.9	13.3	14.9	16.1	14.4	124.2
385B	0.8	4.3	8.2	13.6	14.6	17.5	13.4	122.6
387A	0.0	36.2	44.3	34.4	26.4	23.4	20.6	176.2
388A	5.9	7.1	20.0	14.4	15.7	13.9	14.1	139.4
390A	0.0	19.4	18.5	15.3	10.8	9.9	5.1	42.7
391A	6.0	13.1	50.4	44.5	56.3	50.1	44.1	296.5
393A	0.0	19.0	22.3	26.8	23.4	25.9	22.5	169.1
388B	11.3	27.4	49.6	43.4	38.4	37.5	36.3	300.9
390B	7.1	16.6	39.1	34.4	40.9	38.0	33.3	279.1
391B	5.5	17.3	27.1	31.6	28.6	41.5	30.9	239.9
392B	8.9	19.7	47.7	50.2	48.4	41.5	36.9	209.2
393B	4.8	12.0	27.4	24.3	30.7	30.2	27.6	262.3

Tabla E.5 Leyes de Cu por malla corriente de relave *rougher*.

Turno/Malla	#48	#65	#100	#150	#200	#270	#400	#-400
361A	0.223	0.205	0.076	0.053	0.049	0.050	0.061	0.140
362A	0.256	0.125	0.075	0.056	0.051	0.048	0.075	0.136
363A	0.241	0.123	0.075	0.060	0.058	0.057	0.078	0.183
367A	0.334	0.152	0.053	0.088	0.091	0.099	0.116	0.243
368A	0.199	0.117	0.074	0.059	0.057	0.061	0.074	0.169
369A	0.200	0.125	0.068	0.047	0.042	0.042	0.049	0.180
370A		0.258	0.134	0.076	0.048	0.042	0.043	0.102
371A	0.264	0.172	0.105	0.058	0.049	0.052	0.064	0.146
372A	0.271	0.131	0.071	0.049	0.044	0.044	0.051	0.175
373A	0.224	0.127	0.077	0.059	0.057	0.055	0.068	0.184
374A	0.252	0.107	0.062	0.052	0.046	0.046	0.056	0.127
361B	0.207	0.107	0.069	0.096	0.057	0.064	0.078	0.155
362B	0.249	0.145	0.122	0.056	0.052	0.052	0.060	0.146
363B	0.227	0.213	0.089	0.099	0.075	0.070	0.086	0.317
367B								
369B		0.180	0.075	0.047	0.044	0.046	0.055	0.173
370B	0.209	0.111	0.064	0.046	0.041	0.041	0.059	0.151
372B	0.288	0.122	0.071	0.055	0.051	0.054	0.064	0.248
373B	0.207	0.138	0.096	0.073	0.073	0.069	0.087	0.219
374B	0.197	0.106	0.067	0.053	0.053	0.053	0.059	0.139
375B	0.213	0.111	0.066	0.041	0.034	0.033	0.041	0.142
380A		0.174	0.067	0.051	0.048	0.052	0.069	0.196
381A		0.189	0.079	0.056	0.050	0.050	0.060	0.146
382A	0.198	0.153	0.096	0.065	0.061	0.069	0.087	0.212
383A	0.204	0.124	0.079	0.056	0.054	0.057	0.069	0.115
384A	0.275	0.152	0.122	0.164	0.105	0.112	0.129	0.276
385A	0.215	0.136	0.092	0.084	0.088	0.094	0.105	0.126
380B		0.189	0.069	0.051	0.048	0.047	0.064	0.137
381B	0.212	0.115	0.077	0.056	0.055	0.052	0.061	0.193
382B	0.178	0.115	0.082	0.068	0.069	0.072	0.079	0.180
383B	0.246	0.136	0.085	0.075	0.073	0.073	0.100	0.175
384B		0.153	0.087	0.075	0.075	0.075	0.086	0.197
385B		0.168	0.085	0.069	0.067	0.071	0.127	0.316
387A	0.369	0.180	0.089	0.069	0.067	0.067	0.069	0.152
388A	0.176	0.105	0.066	0.050	0.051	0.056	0.053	0.156
390A		0.224	0.074	0.046	0.041	0.040	0.042	0.101
391A	0.213	0.142	0.060	0.038	0.034	0.041	0.044	0.110
393A		0.167	0.065	0.038	0.030	0.026	0.028	0.111
388B	0.192	0.144	0.121	0.133	0.146	0.143	0.135	0.194
390B	0.194	0.126	0.057	0.040	0.033	0.035	0.040	0.099
391B	0.229	0.126	0.062	0.040	0.032	0.034	0.043	0.119
392B	0.185	0.129	0.066	0.037	0.032	0.028	0.031	0.122
393B	0.174	0.098	0.056	0.036	0.034	0.035	0.038	0.120

Tabla E.6 Pesos parciales [g] por malla corriente de relave *rougher*.

Turno/Malla	#48	#65	#100	#150	#200	#270	#400	#-400
361A	25.7	15.8	24.4	17.0	14.8	12.5	10.2	74.6
362A	24.9	11.0	15.2	10.2	8.0	6.6	5.3	38.3
363A	24.3	15.6	13.8	10.1	8.6	7.9	6.0	36.7
367A	59.7	33.1	28.7	21.1	11.4	11.7	5.8	33.9
368A	7.8	16.7	21.2	22.3	19.1	16.4	9.9	57.9
369A	16.6	23.4	22.8	17.0	14.6	14.0	10.9	71.1
370A	0.0	62.8	32.5	22.0	18.0	13.8	9.5	44.3
371A	24.4	15.4	33.3	21.4	17.5	13.9	10.9	64.1
372A	38.9	19.7	27.9	20.1	16.3	12.7	9.0	57.1
373A	15.6	19.5	19.2	17.1	11.0	16.0	10.1	68.4
374A	34.8	19.9	23.6	21.8	17.1	11.9	9.2	63.9
361B	34.7	17.2	28.4	15.5	14.4	10.3	8.0	56.3
362B	21.1	11.6	15.2	10.6	9.6	8.8	7.3	54.3
363B	22.7	10.2	14.4	9.9	8.5	8.4	6.9	59.0
367B								
369B	0.0	47.0	24.8	19.3	16.4	13.4	10.5	70.3
370B	37.5	29.7	28.4	27.9	18.0	13.7	5.7	41.0
372B	8.9	8.2	14.0	11.1	9.6	8.1	6.5	36.5
373B	17.4	22.3	24.4	19.8	13.7	16.4	10.1	62.7
374B	29.7	16.6	19.5	21.7	16.2	12.3	10.4	76.4
375B	30.3	19.9	18.0	18.0	14.7	13.7	11.8	75.2
380A	0.0	56.0	20.1	15.9	9.0	7.1	3.5	24.6
381A	0.0	63.3	28.6	16.0	13.6	9.6	7.0	46.4
382A	17.0	13.7	23.0	10.5	7.7	5.9	4.2	16.5
383A	17.2	15.7	23.2	17.3	14.7	12.4	10.5	76.2
384A	21.1	18.4	17.2	19.2	14.1	14.9	10.1	70.6
385A	28.5	25.8	24.8	18.9	16.0	14.8	11.4	77.0
380B	30.7	17.7	15.2	14.0	9.7	8.8	4.0	47.2
381B	18.0	16.1	27.6	16.7	15.8	12.1	9.9	73.4
382B	19.1	16.3	23.2	16.8	15.2	13.6	10.9	86.4
383B	21.7	18.6	26.1	17.9	13.9	11.4	9.0	68.9
384B	22.1	19.3	19.7	19.0	13.9	15.8	11.4	80.9
385B	9.2	13.4	12.6	9.5	8.1	7.7	6.2	42.5
387A	32.2	30.5	33.6	28.5	25.6	24.4	20.7	150.1
388A	76.0	45.4	53.9	40.4	34.0	24.3	18.1	115.4
390A	0.0	32.0	14.8	10.6	8.7	7.0	5.7	41.4
391A	15.6	29.3	36.7	21.4	32.6	22.7	19.7	128.8
393A	0.0	81.8	33.8	29.1	24.5	22.4	19.2	121.8
388B	70.5	67.2	69.6	47.9	39.3	35.0	28.5	196.6
390B	46.7	34.6	51.5	35.8	37.5	31.3	25.4	169.2
391B	142.1	75.3	86.7	64.3	53.4	42.3	34.6	241.7
392B	67.9	44.6	51.9	40.4	31.4	26.4	20.8	147.3
393B	37.9	34.1	61.5	39.8	37.6	30.7	24.0	152.3

F. Recuperaciones de Cu por tamaño.

En la Tabla F.1 se muestran las recuperaciones másicas y de Cu obtenidas para el turno 363A con las leyes por tamaño balanceadas.

Tabla F.1 Valores calculados de recuperación másica y recuperación de Cu rougher turno 363A.

Tamaño	Recuperación másica	Rec Cu %
300 µm	3.66	34.23
212 µm	5.09	62.10
150 µm	8.07	83.70
106 µm	9.80	90.02
75 µm	11.34	92.59
53 µm	12.37	94.18
38 µm	11.09	90.19
<38 µm	11.71	83.65

En la Tabla F.2 se resumen las recuperaciones de Cu por tamaño obtenidas para todos los turnos estudiados con la data balanceada.

Tabla F.2 Recuperaciones de Cu por tamaño data balanceada.

Turno	252 µm	178 µm	126 µm	90 µm	63 µm	45 µm	18 µm
361A	35.88	81.49	90.74	93.58	94.38	94.45	85.26
363A	62.10	83.70	90.02	92.59	94.18	90.19	83.65
367A	59.53	88.16	86.96	89.80	91.43	91.72	80.51
368A	68.08	83.76	91.25	93.41	94.37	94.72	90.99
369A	63.92	84.68	92.38	94.48	95.68	96.11	87.05
371A	52.59	79.58	92.22	95.15	96.33	96.22	91.25
372A	65.95	85.50	93.64	96.10	97.01	97.02	87.76
373A	63.06	82.95	89.14	93.10	94.40	95.49	83.71
374A	63.05	82.83	89.10	93.10	94.37	95.37	91.72
361B	65.55	82.97	81.41	91.64	92.39	92.18	89.20
362B	47.38	83.64	90.84	95.38	90.69	95.82	91.34
369B	37.41	81.57	90.85	93.68	94.62	94.70	86.65
370B	64.92	85.33	92.06	94.82	95.99	95.34	88.46
373B	63.99	78.88	88.22	91.20	93.79	93.73	88.55
374B	66.10	84.72	90.09	93.39	93.59	94.70	89.16
375B	62.29	82.91	91.02	94.63	96.11	96.19	88.14
381A	38.31	80.78	90.28	93.70	94.84	94.96	87.09
382A	47.74	73.77	88.52	91.97	93.06	93.24	91.97
383A	55.63	78.15	87.64	91.53	92.45	92.46	87.49
384A	56.22	73.84	74.85	86.13	88.35	88.71	78.95

385A	55.94	79.33	86.17	88.51	90.21	91.32	86.25
381B	64.13	79.90	88.96	92.02	93.92	94.17	81.58
382B	58.86	75.41	84.58	88.67	90.65	91.74	82.13
383B	58.36	81.22	86.92	90.63	91.94	91.03	83.81
384B	42.62	80.01	88.07	90.88	92.55	92.99	82.36
385B	44.44	75.59	85.86	89.53	91.40	86.51	74.73
387A	66.95	87.33	92.54	94.78	96.21	96.81	93.41
388A	55.92	78.76	88.43	91.66	93.14	94.93	81.12
390A	46.38	87.56	94.83	96.69	97.40	97.95	83.65
391A	50.24	85.90	93.69	96.11	96.63	97.02	90.41
393A	33.89	79.43	91.44	94.89	96.60	97.06	88.09
388B	51.60	69.85	77.19	80.35	84.74	89.49	79.42
390B	50.02	83.04	91.69	94.85	95.83	96.44	89.19
391B	59.98	85.31	93.96	95.81	97.01	97.03	89.29
392B	55.28	81.87	92.43	95.08	96.41	96.96	87.43
393B	56.73	81.91	91.68	94.58	96.00	96.52	89.32