

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

**ALTERNATIVAS DE OPTIMIZACIÓN EN EL
TRATAMIENTO DE UN MINERAL TIPO
BRECHA ALTERADA DEL SUR
DEL PERÚ**

TESIS

Presentada por:

Bach. Naysha Geomara Laura Cueva

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO METALURGISTA

TACNA – PERÚ

2022

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

**ALTERNATIVAS DE OPTIMIZACIÓN EN EL
TRATAMIENTO DE UN MINERAL TIPO
BRECHA ALTERADA DEL SUR
DEL PERÚ**

TESIS

Tesis sustentada el 13 de agosto del dos mil veintiuno, siendo el jurado calificador integrado por:

PRESIDENTE



.....
Dr. JESUS MEDINA SALAS

SECRETARIO



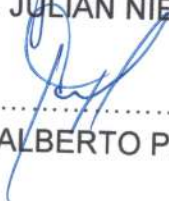
.....
Dr. NATANIEL LINARES GUTIERREZ

VOCAL



.....
Ing. JULIAN NIETO QUISPE

ASESOR



.....
Dr. ALBERTO PACHECO PACHECO

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer al asesor de mi tesis, Ing. Alberto Pacheco, por la motivación a través de sugerencias y recomendaciones, para hacer posible la elaboración de la misma.

A mi profesor, Ing. Nataniel Linares, por su dirección, conocimiento, y apoyo durante el desarrollo de este trabajo.

A mi supervisor por su aporte en mi desarrollo profesional y por ser ejemplo de superación constante.

A mis compañeros de trabajo y a todas aquellas personas que indirectamente me ayudaron a culminar esta tesis, gracias por su invaluable apoyo.

DEDICATORIA

Dedico esta tesis en primer lugar, a Dios, por iluminar mi camino para procurar ser cada día mejor persona.

A mi familia, por su apoyo constante en la realización de mis metas. A mis padres, porque son ellos la principal motivación de mi vida. Gracias por sus consejos y palabras de aliento. Este logro también es de ustedes.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
AGRADECIMIENTOS	iii
DEDICATORIA	iv
RESUMEN	xii
INTRODUCCIÓN	xiv
CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.1. Antecedentes del problema	1
1.1.1. Problemática de la investigación	2
1.2. Formulación del problema	2
1.3. Justificación e importancia	2
1.4. Limitación de la investigación	3
1.5. Objetivos	3
1.5.1. Objetivo general	3
1.5.2. Objetivos específicos	3
1.6. Hipótesis	4
1.6.1. Hipótesis general	4
1.6.2. Hipótesis específicas	4
1.7. Variables	4
1.7.1. Identificación de variables	4

1.7.2. Definición operacional de variables	5
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO	6
2.1. Antecedentes del estudio	6
2.2. Bases teóricas	7
2.2.1. Geología económica del yacimiento	7
2.2.2. Brecha alterada	9
2.2.3. Mineralogía aplicada	9
2.2.4. Identificación del mineral	11
2.2.5. Determinación de texturas y asociaciones del mineral	12
2.2.6. Identificación de minerales que diluyen un concentrado	12
2.2.7. Identificación de causas que dificultan la recuperación	13
2.2.8. Herramientas de la mineralogía	13
2.2.9. Microscopía estereoscópica	14
2.2.10. Microscopía petrográfica	14
2.2.11. Microscopía de minerales	15
2.2.12. Difracción de rayos x	15
2.2.13. Microscopía electrónica de barrido	16
2.2.14. Análisis automático de imágenes	17
2.2.15. Definición del proceso de flotación	17
2.2.16. Muestreo	23
2.2.17. Preparación de la muestra de mineral	24

2.2.18. Pruebas de cinéticas de flotación	29
2.2.19. Pruebas de flotación	32
2.2.20. Pruebas de flotación de ciclo cerrado	33
2.2.21. Manejo de productos de flotación	35
2.2.22. Efecto de las arcillas sobre la flotación de sulfuros de cobre	36
2.2.23. Efecto de las cloritas en la flotación de sulfuros de cobre	41
CAPÍTULO III MARCO METODOLÓGICO	43
3.1. Tipo y diseño de la investigación	43
3.1.1. Tipo	43
3.1.2. Diseño	43
3.2. Población y muestra	44
3.2.1. Población	44
3.2.2. Muestra	44
3.3. Operacionalización de variables	45
3.4. Técnicas e instrumentos para recolección de datos	45
3.5. Materiales, equipos y reactivos	46
3.6. Procesamiento y análisis de datos	47
3.6.1. Procedimiento para la caracterización mineralógica	47
3.6.2. Procedimiento para pruebas de flotación	48
CAPÍTULO IV RESULTADOS	51
4.1. Resultados de la caracterización mineralógica	51

4.1.1. Resultados de ensaye químico	51
4.1.2. Resultados de difracción por rayos x	52
4.1.3. Resultados de microscopía	53
4.1.4. Aspectos cualitativos	53
4.1.5. Aspectos cuantitativos	56
4.2. Resultados de pruebas de flotación	57
4.2.1. Resultados de pruebas de cinética de flotación	58
4.2.2. Resultados de pruebas <i>batch</i> de flotación	64
CAPÍTULO V ANÁLISIS Y DISCUSIÓN	72
5.1. Análisis de resultados	72
5.2. Discusión de resultados	75
CONCLUSIONES	78
RECOMENDACIONES	80
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 <i>Resultados de ensaye químico</i>	51
Tabla 2 <i>Resultados de difracción de rayos x</i>	52
Tabla 3 <i>Resultados de la determinación del grado de liberación</i>	57
Tabla 4 <i>Resultados de los tipos de asociaciones</i>	57
Tabla 5 <i>Constantes experimentales del estudio</i>	59
Tabla 6 <i>Balance metalúrgico acumulado</i>	60
Tabla 7 <i>Valores acumulados de tiempo y distribución</i>	60
Tabla 8 <i>Valores de recuperación real y ajustada al modelo de Klimpel</i>	61
Tabla 9 <i>Valores de recuperaciones y leyes de cobre</i>	62
Tabla 10 <i>Resultados de pruebas de cinética de flotación</i>	63
Tabla 11 <i>Resultados variando la granulometría</i>	64
Tabla 12 <i>Resultados variando el % de sólidos</i>	65
Tabla 13 <i>Resultados modificando pH</i>	67
Tabla 14 <i>Resultados evaluando colectores</i>	68
Tabla 15 <i>Resultados evaluando dispersantes</i>	69
Tabla 16 <i>Resultados efecto del blending</i>	70
Tabla 17 <i>Resultados optimización de variables</i>	74

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 <i>Caracterización mineralógica según unidades geometalúrgicas</i>	8
Figura 2 <i>Mineralogía de procesos</i>	10
Figura 3 <i>Componentes de un sistema de flotación de espumas</i>	18
Figura 4 <i>Influencias en el rendimiento de la flotación de espumas</i>	19
Figura 5 <i>Esquema de los mecanismos de flotación por espumas</i>	20
Figura 6 <i>Procesamiento del mineral en el laboratorio metalúrgico</i>	22
Figura 7 <i>Clasificación general de los colectores</i>	28
Figura 8 <i>Esquema operacional y control de la cinética de flotación</i>	30
Figura 9 <i>Prueba de flotación cuantificada</i>	33
Figura 10 <i>Esquema de una prueba de flotación de ciclo cerrado</i>	34
Figura 11 <i>Representación esquemática de arcillas con estructuras 1:1 y 2:1</i>	38
Figura 12 <i>Efecto de los filosilicatos sobre la ley de cobre en la flotación de calcopirita</i>	39
Figura 13 <i>Fracción +m50</i>	54
Figura 14 <i>Fracción +m100</i>	55
Figura 15 <i>Fracción +m140</i>	55
Figura 16 <i>Fracción + m270</i>	56
Figura 17 <i>Esquema del proceso de evaluación de la cinética de flotación</i>	58

Figura 18	<i>Curvas cinéticas real y ajustada y leyes parciales y acumuladas</i>	62
Figura 19	<i>Rendimiento metalúrgico variando la granulometría</i>	65
Figura 20	<i>Rendimiento metalúrgico variando el porcentaje de sólidos</i>	66
Figura 21	<i>Rendimiento metalúrgico variando el pH</i>	67
Figura 22	<i>Rendimiento metalúrgico variando el tipo mezcla de colectores</i>	68
Figura 23	<i>Rendimiento metalúrgico a diferentes mezclas o blendings</i>	71
Figura 24	<i>Diagrama de las pruebas de validación</i>	74
Figura 25	<i>Consumo de cal vs pH</i>	76

RESUMEN

Este trabajo tiene como objetivo encontrar las mejores opciones de tratamiento, para un mineral tipo brecha alterado de una zona del sur del Perú, distrito minero Tintaya, región Cusco, el cual debido a la presencia de arcillas, cloritas y carbonatos presenta una metalurgia complicada. La investigación se desarrolla en base a una serie de pruebas en las cuales se manejan estrategias de tratamiento diferentes.

En la parte mineralógica, se identificó la presencia de cloritas y carbonatos como la ganga que afecta la recuperación. Adicionalmente también se tiene la presencia de arcillas. Estas tres especies constituyen los principales productos de alteración.

Las estrategias que se evaluaron fueron, la formación de mezclas controladas, manejar el porcentaje de sólidos en flotación, reducción de la granulometría para mayor liberación, incremento del pH en la flotación y pruebas con diferentes colectores.

Los resultados muestran que el mineral responde mejor en porcentajes de sólidos muy diluidos y a granulometría por debajo de 200 micrones. También se observa que procesando este mineral con proporciones de mezcla con un mineral

estándar se obtiene beneficios en la recuperación. Estas estrategias forman parte del manejo operativo. Por el lado de los reactivos se probaron dos bases químicas con resultados positivos.

El estudio concluye que las mejores opciones para el aprovechamiento de este mineral van por el lado de la estrategia de mezclas y el cambio de la fórmula colectora. Las otras opciones tales como granulometría, sólidos y pH presentan limitaciones de capacidad instalada que se da en esta planta y en las plantas concentradoras ordinarias.

Palabras clave: Brecha alterada, arcillas, cloritas, carbonatos, *mass pull*, ley en el concentrado, recuperación.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años las operaciones de gran minería del Perú se han enfrentado al reto de procesar minerales cada vez más complejos y de menor ley. Las tecnologías avanzan en esa dirección, creando equipos de mayor capacidad, de modo que, permite que los yacimientos de muy bajas leyes sean procesados económicamente. A esto le acompaña, la mayor variabilidad mineralógica que se observa en los yacimientos hoy en día.

Perú, al ser de un país de geología muy rica presenta minerales de muy alta complejidad de tratamiento por los contenidos de óxidos y alteraciones. Esto realmente representan retos profesionales mayores para los metalurgistas quienes tienen la labor del procesamiento técnico-económico de estos minerales.

Dentro de las especies que se considera problema, es la presencia de arcillas en mayor cantidad, la cual por las características que poseen, presentan dificultades e influyen negativamente en el comportamiento metalúrgico, originando bajas recuperaciones y bajas leyes del concentrado producido.

En ese estado de complejidad mineralógica, también existen otras gangas que tienen efectos igualmente perjudiciales para el procesamiento, donde la clorita

y algunos tipos de carbonatos son dos de ellas. Sobre estos dos componentes, no existe mucha literatura.

El mineral problema que es objeto de este estudio es una muestra representativa que permitió evaluar el efecto de estas gangas. De ahí la importancia del estudio de minerales como el mencionado, puesto que se centró en la necesidad de hacer económico el tratamiento de minerales con esta complejidad mineralógica, para poder sacarle el mayor beneficio.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Antecedentes del problema

El depósito de mineral sulfuro de cobre estudiado corresponde a un mineral de tipo brecha alterada localizado en el Sur del Perú, distrito minero Tintaya, región Cusco, el cual se encuentra contenido dentro de un depósito principalmente de tipo pórfido. Este representa el 5% de la mineralización económica.

Esta zona de mineralización de brecha alterada es un mineral que presenta baja respuesta metalúrgica en lo referente a la recuperación de cobre. Esto se debe a la presencia de gangas que afectan la recuperación tales como arcillas, carbonatos y cloritas.

A lo largo de la vida del yacimiento se tiene programado el envío periódico de este mineral de tal forma que afecta el valor generado por la empresa. Esto hace que sea necesario encontrar alternativas o estrategias de tratamiento para lograr mitigar su efecto.

1.1.1. Problemática de la investigación

El mineral de brecha alterada presenta baja recuperaciones de cobre. En los circuitos de flotación tradicionales este mineral obtiene recuperaciones de 60 a 70% lo cual afecta económicamente en el procesamiento. Las gangas que acompañan y generan baja recuperación son las arcillas, cloritas y algunos carbonatos como la dolomita y magnesita.

Es necesario estudiar la baja recuperación mostrada por este mineral, determinar sus causas y alternativas de mejoras realistas para la aplicación en planta. Esta investigación persigue estos objetivos.

1.2. Formulación del problema

El problema que abordará la tesis es la búsqueda de métodos para mejorar la recuperación de este mineral problema descrito anteriormente.

El enunciado de formulación es: ¿Cómo mejorar la recuperación de cobre de este mineral de brecha alterada?

1.3. Justificación e importancia

Para cualquier empresa minero-metalúrgica, el procesamiento de este mineral significa pérdidas económicas debido a la baja recuperación, impidiendo que cumpla con la producción proyectada cobre fino anual.

A nivel académico no se cuenta con mucha información de estrategias para el tratamiento de este tipo de mineral, en fuentes primarias tales como libros o *papers* de procesamiento de minerales.

El aporte que significa esta investigación es relevante en el campo del procesamiento de sulfuros de cobre en menas complejas utilizando la técnica operacional de flotación de espumas, por cuanto, genera posibilidades para aplicación directa u optimización o adecuación de la misma.

1.4. Limitación de la investigación

Las conclusiones derivadas de esta investigación solo son aplicables a depósitos de mineralogía similar. Para otras variaciones mineralógicas se debe considerar otros estudios, por cuanto, cada mineral es una identidad con respuestas propias a esta técnica.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Determinar la mejor estrategia para procesar el mineral sulfuro de cobre en tipo brecha alterada en el sur del Perú, distrito minero Tintaya, región Cusco.

1.5.2. Objetivos específicos

1. Estudiar las causas de la baja recuperación del mineral sulfuro de cobre.
2. Evaluar el efecto de las variables operacionales sobre la optimización.

3. Evaluar una combinación de reactivos alterno.
4. Evaluar opciones de manejo de la mezcla (*blending*).

1.6. Hipótesis

1.6.1. Hipótesis general

La estrategia analizada permite mejorar significativamente la recuperación del sulfuro de cobre del mineral tipo brecha alterada.

1.6.2. Hipótesis específicas

1. Las cloritas, carbonatos y arcillas perjudican significativamente la recuperación de cobre.
2. La granulometría, porcentaje de sólidos y pH influye de manera significativa en la recuperación de cobre.
3. Es posible mejorar la recuperación de cobre por medio de cambio de reactivos.
4. La recuperación de cobre puede ser mejorada significativamente a través de estrategias de *blending*.

1.7. Variables

1.7.1. Identificación de variables

Variable independiente

- Granulometría (μm)

- Porcentaje de sólidos, C_w (%)
- pH
- Reactivos (g/t)
- *Blending* o mezcla (%)

Variable dependiente

- Recuperación (%)

1.7.2. Definición operacional de variables

Las variables en el presente estudio pueden ser medidas con bastante precisión dado que se trata de un trabajo realizado en Laboratorio Metalúrgico, donde se tiene numerosos instrumentos de medición: *pHmeters*, balanzas, micropipetas, material de vidrio, etc. La recuperación se calcula a través de ensayos químicos en Laboratorio Químico certificado.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del estudio

Ndoro y Witika (2017) investigaron las principales propiedades de las especies mineralógicas de cobre y su comportamiento en la flotación. Determinan que aún con las tendencias más modernas, solo las especies sulfuradas de cobre (calcopirita, bornita, etc) son de buena respuesta a la adsorción de colectores, por lo que solo estas tienen una buena flotabilidad. Es muy común que los minerales alterados por meteorización posean grandes cantidades de arcilla que perjudican la adsorción de reactivos y por consiguiente afecte en la recuperación. Sugieren el uso de NaSH como un método para recuperar especies oxidadas a la sulfidización, pero se aclara que no es aplicable en todas las especies minerales de Cobre.

Chen y Pen (2018) realizaron un estudio de los efectos perjudiciales de las arcillas para la flotación. El primer efecto negativo es la formación de capas sobre los sulfuros reduciendo su flotabilidad. El segundo efecto es la formación de aglomerados de arcilla en la pulpa. Dependiendo de la fuerza del aglomerado, este puede ocasionar mayor arrastre de gangas al concentrado o incrementar la viscosidad de la pulpa. Para su mitigación describe métodos físicos, tales como

separaciones con cicloneo de deslamado, agitación de alta intensidad y métodos con ultrasonido. También escribe métodos químicos tales como dispersantes tanto orgánicos e inorgánicos.

Farrokpay y Bradshaw (2012) investigaron acerca del efecto de las arcillas en la estabilidad de la espuma de flotación. Para los procesos de flotación es muy importante lograr y mantener una estabilidad óptima de la espuma porque es un factor que influye en el rendimiento de la flotación. La presencia de minerales arcillosos podría reducir el rendimiento de la flotación al disminuir o aumentar la estabilidad de la espuma.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Geología económica del yacimiento

Los minerales de presencia económica en el yacimiento son principalmente calcopirita y bornita. Se tiene también presencia en menor escala de bornita secundaria, calcosina, covelita y cobre nativo. Este último depende del grado de meteorización. El yacimiento está dividido económicamente en Unidades Geometalúrgicas (UGM) definidas por la respuesta de recuperación y litología.

En la Figura 1 se han definido las UGM económicas como sigue. El mineral de brecha alterada corresponde al UGM 6.

Figura 1

Caracterización mineralógica según unidades geometalúrgicas

	Características Litológicas	Características de Mineralización de Cu	Características de Gangas	Ratox
UGM 1	Pórfidos con Recuperación > 85%	Mineralización de sulfuros venillas predominante	No se evidencia gangas perjudiciales	<0.10
UGM 2	Pórfidos con Recuperación < 85%	Mineralización de sulfuros diseminada predominante	Arcillas >5%, Clorita >10%, Pirita en ratio 3 a 1 con respecto a sulfuros de cobre, Calcita >10%	<0.10
UGM 3	Pórfidos con Yeso	Mineralización de sulfuros venillas y/o diseminadas	Yeso >3%	<0.10
UGM 4	Stock Work	Mineralización de sulfuros venillas y/o diseminadas	Cuarzo >40%	<0.10
UGM 5	Skarn	Mineralización de sulfuros diseminadas > venillas	Se puede evidenciar presencia de pirita, cobre nativo y arcillas	>0.10 <0.35
UGM 6	Brecha Polimictica	Mineralización de sulfuros diseminadas > venillas	Se puede evidenciar presencia de pirita, cobre nativo, arcillas >15%, clorita >20%, Calcita >20%	>0.10 <0.35
UGM 7	Óxidos	Mineralización de óxidos de cobre venillas y/o diseminadas	Se puede evidenciar contenidos de arcilla	>0.35
UGM 8	Mixtos	Mineralización de sulfuros, óxidos y cobre nativo en venillas y diseminadas	Arcillas >5%	>0.10 <0.35
UGM 9	Hornfels / Sedimentarios	Mineralización de sulfuros diseminadas > venillas	Presencia de cuarzo >30%,	<0.10
UGM 10	Waste	Mineralización de sulfuros diseminadas con ley de CUT < 0.10%	Cloritas, pirita y arcillas	
UGM 11	Cobertura	No tiene sulfuros		

Nota: La figura muestra un cuadro representativo de la caracterización del mineral en Unidades Geometalúrgicas (UGM), siendo la UGM 1 correspondiente a los pórfidos con recuperación > 85% y UGM 6 correspondiente al mineral de estudio.

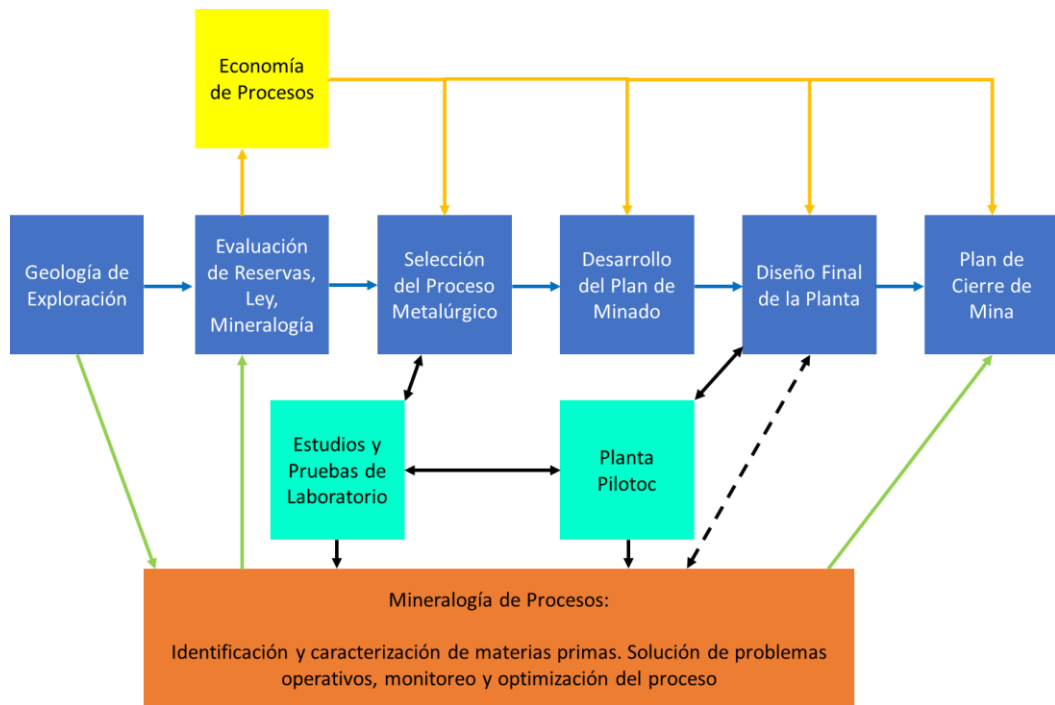
2.2.2. Brecha alterada

Una brecha es una roca constituida por fragmentos líticos que se mantienen ligados por una matriz y cuyo cemento en el caso de las asociadas a mineralización pueden ser minerales hidrotermales incluyendo a los minerales de mena (Ejemplo: turmalina, cuarzo, calcopirita, etc.). En general, los minerales hidrotermales rellenan total o parcialmente los huecos formados en la roca fragmentada. Mucha de la mineralización en brechas ha sido introducida por fluidos hidrotermales y consecuentemente se encuentra en la masa fundamental de la brecha. Este último es un término general, no genético, que incluye matriz y el cemento de la brecha. Los procesos hidrotermales en ocasiones producen reemplazo o metasomatismo en brechas, este reemplazo corresponde composicionalmente a cemento, pero que ha sido reemplazado por sustitución de material preexistente en la brecha (Maksaev, 2015).

2.2.3. Mineralogía aplicada

La mineralogía aplicada, a veces llamada mineralogía de procesos, abarca la identificación y la forma en que se presentan los minerales en cuanto a la relación que tienen con el beneficio de los mismos. Incluso hoy en día, el rol de la mineralogía aplicada no se utiliza ni se aprecia en toda su dimensión. La importancia del estudio mineralógico en el desarrollo de un proyecto minero ha dado lugar al desarrollo de una nueva especialidad conocida como Mineralogía de Procesos, Ingeniería de Minerales o Procesamiento de Minerales.

Figura 2
Mineralogía de procesos



Nota: La figura representa la estrecha relación entre las características propias de los minerales y los procesos de concentración, mediante los estudios básicos que posibiliten la identificación de los tipos de mineralización. Adaptado de La mineralogía de procesos y su relación con el desarrollo del proyecto minero, de Canepa & Manzaneda, 2015.

Como se muestra en la Figura 2, la estrecha relación entre las características propias de los minerales y el proceso de concentración de estos, se inicia tempranamente con estudios básicos que posibiliten la identificación de los tipos de mineralización y de su aptitud a determinados tipos de procesamiento. La secuencia correcta de los estudios mineralógicos básicos antecede a la selección de procesos aplicables y la consiguiente ejecución de investigaciones metalúrgicas. La siguiente etapa suele incluir estudios mineralógicos de control para pruebas de flotación, lo

que garantiza poder establecer los ajustes requeridos para un correcto diseño de la Planta Piloto. Análogamente, los estudios mineralógicos de los productos obtenidos a nivel de Planta Piloto permitirán formular un diseño preciso de la Planta Industrial. Finalmente, un adecuado monitoreo de la eficiencia de los procesos y la oportuna adecuación de estos a las previsibles variaciones de los tenores de la alimentación solo será posible con la ayuda de estudios mineralógicos periódicos (Canepa y Manzaneda, 2005).

2.2.4. Identificación del mineral

Los minerales se identifican por sus características estructurales (ordenación interna de sus partículas) y por sus propiedades físicas, ópticas y químicas, mediante la utilización de una serie de técnicas e instrumentos, como son el análisis químico, la difracción o fluorescencia de rayos x, el microscopio petrográfico, etc. (Del Ramo y Guillen, 2007).

Algunos ejemplos que justifican la importancia de una información detallada del mineral para su beneficio, son:

- Presencia del elemento deseado en más de un mineral, especialmente si los minerales tienen distintas respuestas a la concentración.
- Variabilidad en la composición mineral (substitución, isomorfismo).
- La presencia de minerales de ganga que puedan tener un efecto adverso sobre el beneficio, por ejemplo, la montmorillonita y el talco.

- La presencia de minerales raros o no esperados.

Un esquema que representa esta situación exploratoria la propuso Cedillo (1980).

2.2.5. Determinación de texturas y asociaciones del mineral

Este puede ser un análisis cualitativo o cuantitativo, involucra la determinación del grado de liberación (en distintos tamaños de molienda) de los minerales valiosos respecto a las gangas. Esta información es esencial para la selección, modificación y operación de un proceso de beneficio en particular.

Algunas características importantes de considerar son las siguientes (Cytec, 2002):

- Bordes o capas de un mineral alrededor de otro.
- Intercrecimiento extremadamente fino de dos o más minerales.
- Inclusiones extremadamente finas de un mineral en otro.
- Más de una forma de presentación de un mineral deseado.

2.2.6. Identificación de minerales que diluyen un concentrado

Los exámenes mineralógicos pueden entregar importantes datos en relación a un concentrado de baja ley. Un examen puede determinar si los diluyentes se encuentran libres o asociados con otros minerales. Si los diluyentes están asociados, se puede determinar qué condiciones podría cambiarse, si fuera el caso, para

obtener una ley más alta. Además de aquellos minerales que simplemente bajan las leyes de los concentrados y encarecen los costos de fundición, ya que contienen elementos tóxicos nocivos (Cytec, 2002).

2.2.7. Identificación de causas que dificultan la recuperación

El análisis mineralógico de las muestras de relaves de flotación puede identificar los minerales valiosos presentes en el relave, determinar si están libres o asociados y entregar una buena indicación sobre si la optimización de las condiciones de la flotación podría mejorar la recuperación. Si los minerales están asociados, se puede determinar el tamaño de sus granos y el grado de enlace con otros minerales valiosos o ganga, otorgando así información muy útil para optimizar el tamaño de molienda (Cytec, 2002).

2.2.8. Herramientas de la mineralogía

Las herramientas de los exámenes mineralógicos pueden variar desde lentes y magnetos manuales hasta sofisticados instrumentos, por ejemplo, microscopía electrónica (microscopio electrónico de barrido), difracción de Rayos X y/o análisis automático de imágenes. Además, existen tres tipos de microscopios ópticos que se usan en la mineralogía aplicada: el microscopio estereoscópico, el microscopio petrográfico y el microscopio de minerales. Los microscopios ópticos aún se usan en demasía debido a la amplitud y versatilidad de las observaciones que se hacen

con ellos. Se complementan con distintas técnicas e instrumentos de separación (Cytec, 2002).

2.2.9. Microscopía estereoscópica

El microscopio estereoscópico es un primer paso en la identificación de minerales, se usa para examinar granos sueltos y superficies ásperas. La imagen es tridimensional y las características físicas y cristalográficas son las mismas que aquellas observadas en minerales más gruesos a simple vista. Algunos minerales pueden ser rápidamente reconocidos por propiedades como el color, lustre, hábito cristalino, clivaje, fractura, transparencia y comportamiento magnético. Si se requiere una mayor identificación, o mayores detalles de textura o un análisis mineralógico cuantitativo, se debiera recurrir a los microscopios petrográficos o de mineral (Cytec, 2002).

2.2.10. Microscopía petrográfica

El estudio de los minerales y rocas mediante microscopía petrográfica es una de las técnicas más usadas por los geólogos, porque permite identificar y cuantificar la composición mineralógica, además de establecer las características texturales de una muestra (Pozo, 2019). El microscopio petrográfico se usa para examinar secciones delgadas y granos sueltos en capas muy delgadas y transparentes mediante una luz transmitida en forma axial. Las secciones delgadas

miden unos 30 micrones y se componen de trozos de roca, mineral, o en algunos casos, plástico con fragmentos incrustados (Gil, 2013).

2.2.11. Microscopía de minerales

El microscopio de minerales puede tratar los minerales microscópicamente opacos y semiopacos. Los minerales se identifican sobre la base del color reflejado, la reflectividad, la dureza de pulido, la reflexión interna, el clivaje, el hábito cristalino y las propiedades ópticas de la superficie mineral. Para poder examinar los minerales se deben preparar briquetas, las que después de endurecerse son desgastadas hasta obtener una superficie plana y pulidas hasta que se consigue un acabado espejo. Se debe poner cuidado en que la superficie pulida esté perpendicular al eje del microscopio en el momento de la lectura. El microscopio de minerales se usa para examinar secciones pulidas de mineral y granos opacos mediante una luz reflejada axialmente con amplificaciones de 20 aumentos hasta 1200 aumentos. Es posible obtener amplificaciones más altas, pero se llega a un punto en que no es deseable tanto aumento ya que no se obtienen mayores detalles. Para una mejor resolución, se requiere el microscopio de escaneo electrónico (Cytec, 2002).

2.2.12. Difracción de rayos x

La difracción de rayos x es uno de los métodos más confiables en la identificación mineralógica de todos los materiales que presentan una estructura

cristalina y por tanto sus componentes se encuentran ordenados espacialmente. Este método está basado en un fenómeno físico, que se produce por la interferencia de un haz de rayos x, de una determinada longitud de onda, con la red cristalina. Las longitudes de onda empleadas son muy pequeñas (del orden de 1 Å) y su valor va a depender del metal empleado para la generación de rayos x (Pozo, 2019). Nos permite establecer la estructura reticular del mineral que estemos analizando y, por consiguiente, establecer la especie mineral de que se trata. En los estudios mineralógicos, la difracción de rayos x se usa generalmente para identificar las arcillas específicas u otros minerales de grano fino que se encuentran presentes (Gil, 2013).

2.2.13. Microscopía electrónica de barrido

El microscopio electrónico de barrido permite la vista de una muestra a altas ampliaciones. Esto debido a que un haz de electrones sustituye la luz, permitiendo observaciones con mayor resolución a elevados aumentos. Además, incorpora un sistema de análisis puntual que permite conocer la composición química de los constituyentes de la muestra (Pozo, 2019). Por lo tanto, el microscopio electrónico de barrido es una herramienta valiosa porque con una cuidadosa preparación de la muestra, se puede analizar el contenido químico de granos individuales en una sección delgada o en una montura de grano pulida (Canepa & Manzaneda, 2005).

2.2.14. Análisis automático de imágenes

Se han desarrollado varias técnicas automatizadas controladas por computador para el análisis cuantitativo de imágenes (SGS, 2005). El QEMSEM (*Quantitative Evaluation of Minerals by Scanning Electron Microscopy*) es un analizador completamente automático y de poderosa imagen que puede determinar cuantitativamente la distribución de tamaño y la asociación de minerales o fases en mezclas complejas. Está compuesto de un microscopio electrónico de barrido controlado por computador, equipado con hasta 4 multielementos, un detector de rayos x dispersivos de energía y un detector electrónico de retrodispersión. El haz del electrón se ubica automáticamente en puntos espaciados regularmente en un campo de observación, permitiendo la identificación computacional del mineral específico que se presenta. Luego, el programa computacional aísla las partículas minerales individuales como granos de los mapas minerales, para determinar la cantidad de cada mineral presente, el tamaño de grano promedio o la distribución de tamaño del grano, y su grado de asociación con otros minerales. Para un despliegue visual, cada mineral tiene un código de color y se puede observar en un monitor en colores (SGS, 2005).

2.2.15. Definición del proceso de flotación

La flotación por espuma es una de las operaciones unitarias más importantes en el procesamiento de minerales. Se basa en diferentes propiedades superficiales de los minerales, ya sea que la superficie sea hidrofílica, es decir, se moje fácilmente

al estar en contacto con agua, o sea hidrofóbica, es decir, repele al agua y puede adherirse a las burbujas de aire. La hidrofobicidad en las superficies minerales a menudo se controla mediante el uso de productos químicos tensioactivos que se controlan para adherirse a los minerales deseados (Malm, 2019).

En la Figura 3, Klimpel (1984) representó la flotación como la interacción de un sistema triangular que incluye componentes químicos, operacionales y referentes al equipo a utilizar. La combinación tanto física y química a menudo ve la flotación descrita como un proceso basado en fenómenos fisicoquímicos.

Figura 3

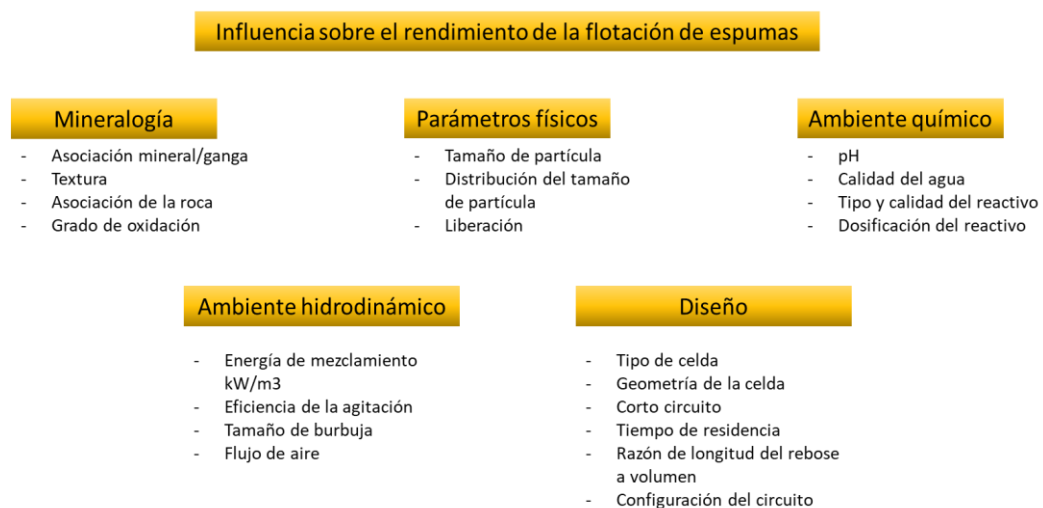
Componentes de un sistema de flotación de espumas



Nota: La figura representa la flotación como un sistema triangular interactivo que incluye componentes químicos, operacionales y referentes al equipo a utilizar. Adaptado de *Factores que afectan el proceso de flotación*, de Klimpel, 1984 y Najaraj 2005.

El proceso de flotación se lleva a cabo en un sistema trifásico donde diversos aspectos tanto mecánicos, físicos y/o químicos pueden afectar el grado y la recuperación como resultado de la flotación (Malm, 2019). En la Figura 4 se enumera los subprocesos y parámetros más comunes que afectan el rendimiento de la flotación.

Figura 4
Influencias en el rendimiento de la flotación de espumas



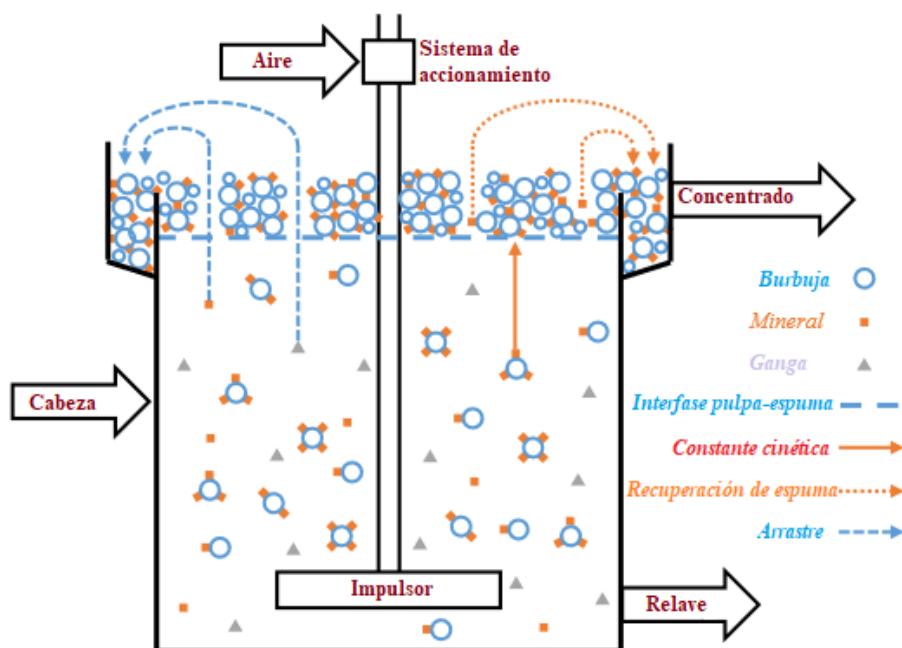
Nota: La figura representa los subprocesos y parámetros más comunes que afectan la flotación. Adaptado de *Influencias en el rendimiento de la flotación*, de Malm, 2019.

En función de lo manifestado anteriormente, Wills y Finch (2016) señalan que el proceso de flotación comprende tres mecanismos principales, tal como se muestran en la Figura 5:

- Fijación selectiva a las burbujas de aire (o "flotación verdadera").
- Arrastre en el agua que atraviesa la espuma.

- Atrapamiento físico entre partículas en la espuma adheridas a burbujas de aire (a menudo denominado "agregación")

Figura 5
Esquema de los mecanismos de flotación por espumas



Nota: La figura muestra un esquema representativo de una celda de flotación, donde las partículas hidrofóbicas se adhieren selectivamente a las burbujas de aire; así, el agregado burbuja-partícula asciende a través de una pulpa formando un colchón de espuma. Adaptado de *Diagrama proceso en celda flotación*, de Morell et al., 2014.

Los reactivos agregados alteran las propiedades superficiales de la partícula mineral, desde una condición hidrofóbica, ocasionando un desplazamiento del agua, permitiendo la adherencia del sólido al aire de la burbuja. En general no pueden recuperarse de manera efectiva partículas de mineral sulfuroso mayores de la malla 48 Tyler (0,295mm), luego, para que un mineral pueda flotarse debe

molerse a un tamaño lo suficientemente fino para que la mayor parte de él quede liberada (Ipanaqué y López, 2008).

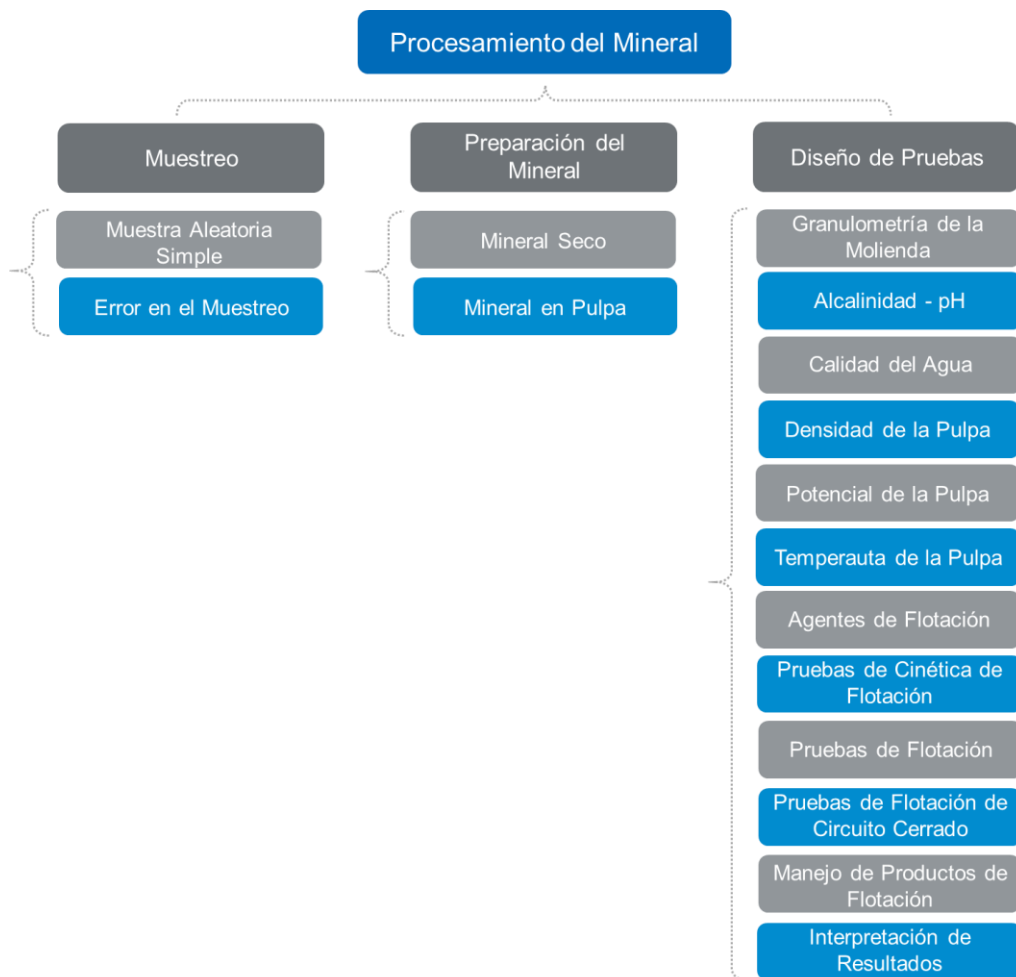
La operación esencial de la flotación de espumas, es crear condiciones fenomenológicas que contribuyan a la anexión de partículas a las burbujas de aire, de tal modo que dichas partículas sean llevadas a la superficie de la pulpa mineral, de donde puedan ser removidas. Este proceso abarca las siguientes etapas (Ipanaqué y López, 2008):

- Moler el mineral a un tamaño lo suficientemente fino para separar los minerales valiosos uno de otro, así como de la ganga.
- Preparar las condiciones favorables para la adherencia de los minerales deseados a las burbujas de aire.
- Crear una corriente ascendente de burbujas de aire en la pulpa del mineral.
- Formación de una espuma cargada de mineral en la superficie de la pulpa.
- Remoción de la espuma cargada.

Las pruebas de flotación de espumas en el laboratorio metalúrgico es un proceso costoso y consume mucho tiempo. La necesidad de obtener resultados de calidad y, más importante aún, asegurar conclusiones exactas y concretas a partir de los recursos invertidos tiene vital importancia (Azañero, 2015).

En la Figura 6, se detallan las etapas desde la obtención de la muestra hasta la interpretación de los resultados.

Figura 6
Procesamiento del mineral en el laboratorio metalúrgico



Nota: La figura muestra un esquema representativo del procesamiento del mineral para realizar las pruebas de flotación a nivel laboratorio, que incluye el muestreo del mineral, la preparación de la muestra y el diseño de la prueba. Adaptado de Azañero, 2015.

2.2.16. Muestreo

Muestra aleatoria simple

En principio, podríamos distinguir dos tipos de muestra: la probabilística y la no probabilística, en el sentido en que una muestra probabilística es una muestra seleccionada de tal forma que cada elemento de la población tiene la misma probabilidad de formar parte de la muestra. De esta manera, si se utilizan métodos no probabilísticos, no todos los elementos de la población tienen la misma probabilidad de ser incluidos. En este caso, diríamos que los resultados están sesgados, lo cual quiere decir que tal vez los resultados de la muestra no sean representativos de la población. Una forma de asegurarnos de que el subconjunto escogido es representativo de toda la población consiste en tomar una muestra aleatoria simple, la cual se caracteriza porque cada miembro de la población tiene la misma probabilidad de ser elegido y las observaciones son elegidas siguiendo una secuencia aleatoria (Juan, Sedano y Vila, 2015).

Error de muestreo

Tras entender la importancia de escoger una muestra representativa de la población, veamos que para lograr esto, podemos seleccionar, por ejemplo, una muestra aleatoria simple de la población, pero es muy improbable que la media de la muestra sea idéntica a la media de la población. De la misma manera, tal vez la desviación estándar u otra medición que se calcule con base en la muestra no sea igual al valor correspondiente de la población. Por tanto, es posible que existan

ciertas diferencias entre los estadísticos de la muestra (como la media o la desviación estándar), y los parámetros de población correspondientes. A dicha diferencia se la conoce como error de muestreo (Juan, Sedano y Vila, 2015).

2.2.17. Preparación de la muestra de mineral

Mineral seco

La muestra de mineral seco debe ser transportada al laboratorio de pruebas tan rápido como sea posible y preferiblemente en estado grueso, para mantener la oxidación al mínimo. La muestra es luego triturada por etapas hasta menos de 2 mm, y posteriormente dividida en forma manual usando un separador o un divisor rotatorio para obtener las cargas de flotación del peso deseado. Se recomienda someter a análisis químico varias muestras elegidas en forma aleatoria para confirmar que la separación de la muestra se ha realizado en forma adecuada y que las muestras son representativas.

Mineral en pulpa

El tamaño de la muestra de pulpa que se toma en un momento depende de muchos factores. Estos incluyen el porcentaje de sólidos de la pulpa, la capacidad de la celda de flotación del laboratorio y el número de pruebas de flotación a realizar. Se pueden realizar muestreos secundarios de la pulpa en cargas de flotación ya sea en forma volumétrica, o preferiblemente, en forma gravimétrica, mientras la pulpa es agitada adecuadamente (Azañero, 2015).

Diseño de pruebas de flotación

Al realizar un diseño de pruebas de flotación, la experiencia va a jugar un papel muy importante para poder minimizar el número de variables y el rango sobre el que estas variables necesitan ser probadas. Saber la forma en que otras plantas están tratando minerales similares es una herramienta valiosa para el metalurgista. Azañero (2015) recomienda que en un programa de pruebas de flotación deben evaluarse varios factores, tales como:

Granulometría de la molienda

Las pruebas de molienda son efectuadas principalmente para establecer la distribución de tamaños de los sólidos, lo que debe estar de acuerdo con los objetivos del trabajo de prueba. Debido a los costos de operación asociados con la molienda, una práctica común en la planta es moler lo más grueso posible sin sacrificar la recuperación *rougher*. El concentrado *rougher* requiere una remolienda para la liberación adecuada de mineral previo a la flotación de limpieza.

Alcalinidad – pH

La práctica común es flotar a pH natural o en un circuito alcalino ajustado con cal o lechada de cal. En algunos casos, el uso de carbonato de sodio, hidróxido de sodio o amoníaco puede tener una ventaja. Este ajuste se realiza preferentemente en la etapa de molienda con algunos ajustes menores en la celda de flotación. La cantidad de modificador de pH que se agrega normalmente se basa en el método de

ensayo y error, y una vez establecida debería permanecer constante para todas las pruebas, a menos que sea una variable que se esté investigando.

Calidad del agua

La calidad del agua puede tener un efecto sustancial en la metalurgia. Las sales solubles pueden causar una activación o una depresión indeseada de varios metales, afectando significativamente la estructura de la espuma y el consumo de espumante, así como el consumo de otros reactivos. Las sales de magnesio, hierro y cobre son especialmente problemáticas. Es preferible, por lo tanto, realizar estudios de flotación usando el agua de proceso del circuito de flotación de la planta como una forma de simular de una forma más cercana las condiciones reales de la planta. Las pruebas rutinarias de laboratorio para analizar la flotación se pueden realizar usando agua de la llave, pero los resultados se deben confirmar *in-situ* usando agua de proceso de la planta y pulpa fresca.

Densidad de la pulpa

La densidad de la pulpa, que afecta su viscosidad, es un factor significativo que influye en los resultados de flotación. Mientras mayor sea el valor de densidad de pulpa, esta afectará en el tiempo de residencia del mineral en las etapas de flotación y de esta forma en la capacidad del circuito, sin embargo, mientras menor sea el valor de densidad de pulpa, estimula un mejor drenaje de la espuma, obteniendo un mejor grado en el concentrado. Generalmente, la etapa de flotación

rougher de las plantas concentradoras de cobre operan con un porcentaje de sólidos entre 25% a 40%, mientras que las etapas de limpieza operan con un porcentaje de sólidos menor.

Potencial de la pulpa

El potencial de la pulpa puede jugar un papel clave en la flotación de sulfuro. Para un valor de pH dado, se puede determinar el rango de potencial para la óptima flotación de un mineral específico. Se han publicado dichos rangos de potencial tanto para los sistemas que usan xantato como para los que no lo hacen. Los potenciales pueden ser modificados electrónicamente o químicamente, siendo esta última más práctica, especialmente para los minerales sulfuros. Para este propósito se utilizan normalmente sulfuro sódico (Na_2S), sulfhidrato de sodio (NaHS), dióxido de azufre (SO_2), nitrógeno y aire. La adición de ion de sulfuro requiere un cuidadoso control, para asegurar el éxito de la flotación o depresión controlada por potencial.

Temperatura de la pulpa

Normalmente, la temperatura de flotación no se estudia en las separaciones de sulfuro en metales base, pero, no obstante, debiera mantenerse tan constante como sea posible. Sin embargo, el efecto de la temperatura sobre la separación de minerales complejos no debiera ignorarse. Se recomienda el uso de agua de proceso a temperatura ambiente, almacenada en grandes estanques.

El espumante tiene por propósito la formación de una espuma estable y burbujas de tamaño apropiado (aproximadamente de 1 mm de diámetro) con la adición de aire disperso, para así poder remover las burbujas cargadas de mineral hasta el concentrado (Davenport, 2002). La resistencia de la espuma depende de la intensidad en la interacción del espumante con el agua en la zona interfacial líquido-gas (Yianatos, 2005). En general se utilizan los del tipo alcohol con cadena ramificada (Davenport, 2002).

Los modificadores se utilizan para modificar y controlar la acción del colector. Además, estos compuestos modulan el sistema de flotación regulando la química de la solución, o bien dispersando o aglomerando las partículas de la pulpa (Vianna, 2004). Los modificadores según su acción y uso en flotación, es variada, reciben este nombre porque no tienen tareas específicas de colección o espumación. Estos se clasifican en: activadores, modificadores de pH y depresores (Linares, 2004).

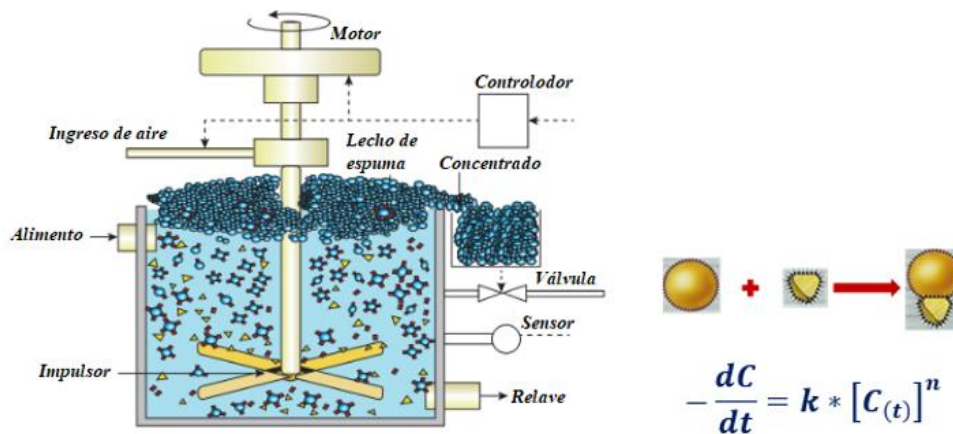
2.2.18. Pruebas de cinéticas de flotación

El tiempo de flotación práctico requerido por un mineral puede ser determinado, en la práctica, mediante la producción de concentrados incrementales, denominada también prueba de flotación fraccionada. Los concentrados separados se retiran en ciertos intervalos de tiempo hasta que la espuma sea completamente estéril. A través del uso de pesos y análisis químico para cada concentrado

incremental, se puede determinar la distribución de metal en cada uno de ellos. Esta información es luego representada gráficamente como recuperación acumulada versus tiempo de flotación acumulado y se usa como una guía para las pruebas posteriores de flotación (ver Figura 8).

Se representa mediante expresiones matemáticas, siendo las de más uso, las siguientes (Wills, 2016; Fuerstenau, 2009; Leja, 1981; Wang, 2016; Bulatovic, 2007).

Figura 8
Esquema operacional y control de la cinética de flotación



Nota: La figura representa un esquema operacional de la celda de flotación. Adaptado de Malm, 2019.

Modelo de García Zúñiga y otros (1935)

$$R = R_{\infty}[1 - \exp(-kt)] \quad [1]$$

Donde:

R = Es la recuperación parcial a cualquier tiempo t.

R_{∞} = Es la recuperación máxima posible.

K = Constante de velocidad de flotabilidad, m^{-1} .

Modelo de Agar-Straton y Bruce (1980)

Un modelo de primer orden modificado que incorpora una corrección para la identificación del tiempo cero ($t = 0$). Este factor de corrección adicional es ϕ , luego el modelo anterior queda así:

$$R = R_{\infty} \{1 - \exp[-k(t + \phi)]\} \quad [2]$$

Modelo de Klimpel

Este modelo tiene una forma matemática idéntica y está dada por:

$$R = R_{\infty} \left\{ 1 - \frac{1}{kt} [1 - \exp(-kt)] \right\} \quad [3]$$

Donde k es la constante de velocidad de flotación que representa el mayor valor permitido de una distribución rectangular, que también describe una reacción de primer orden, sin embargo, la recuperación pronosticada está basada en la recuperación máxima y en la constante de velocidad de la distribución rectangular.

Modelo de Kelsall (1961) modificado

El modelo introduce dos términos de velocidad que describen la flotación rápida y lenta de los componentes. La forma matemática de este modelo está dada por:

$$R = R_{\infty}(1 - \emptyset)[1 - \exp(-k_f t)] + \emptyset[1 - \exp(-k_s t)] \quad [4]$$

Donde:

\emptyset = Fracción de componentes de flotación con constante de velocidad lenta.

k_f = Constante de velocidad rápida (min^{-1}).

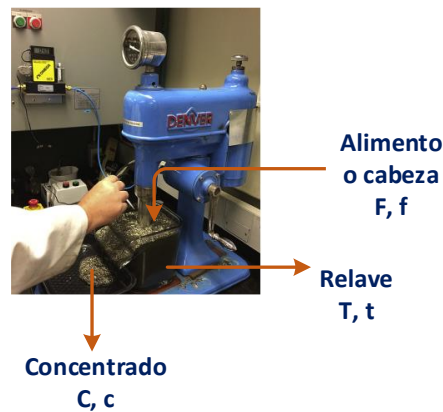
k_s = Constante de velocidad lenta (min^{-1}).

2.2.19. Pruebas de flotación

La flotación en laboratorio es un proceso por lotes que puede consistir en las siguientes etapas de separación: La etapa *rougher-scavenger* es la primera etapa de separación y concentración. La flotación *rougher* permite maximizar la recuperación del mineral mientras que la flotación *scavenger* permite recuperar partículas con especies valiosas asociadas que no fueron recuperadas en la etapa *rougher*. La etapa *cleaner* es la segunda etapa de concentración, que permite maximizar el grado en el concentrado. Generalmente, se realiza una remolienda al concentrado *rougher-scavenger* antes de pasar a la etapa *cleaner* o de limpieza. Sin embargo, realizar pruebas *rougher-scavenger* del tipo “*batch*” y/o de limpieza no

permite recircular los relaves de limpieza y el agua de proceso, por lo tanto, las pruebas de flotación de ciclo cerrado podrían simular de mejor manera el rendimiento de la planta.

Figura 9
Prueba de flotación cuantificada



Nota: Esquema de los productos obtenidos luego de realizada la prueba de flotación en laboratorio.

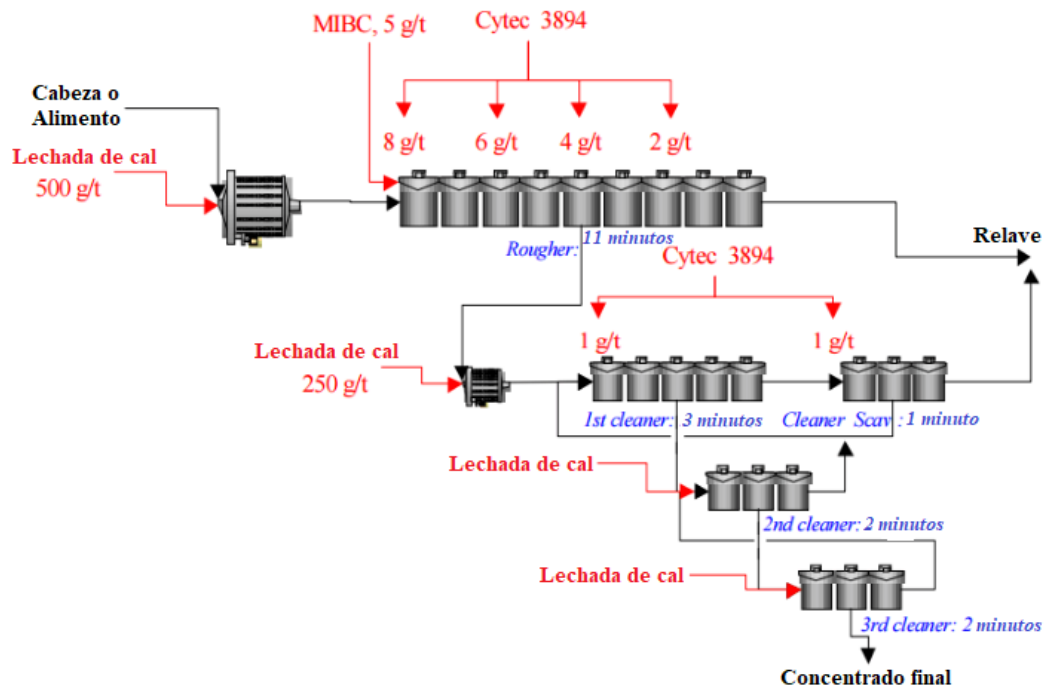
2.2.20. Pruebas de flotación de ciclo cerrado

Con el fin de obtener información metalúrgica sobre el rendimiento esperado de la planta, se deben realizar pruebas de flotación de ciclo cerrado. Antes de realizar las pruebas de ciclo cerrado, se debe establecer las condiciones necesarias de remolienda para los concentrados *rougher* y los productos intermedios (relaves de limpieza). En cada prueba completa de ciclo los productos intermedios (en forma de relaves de limpieza o concentrados de barrido) son recirculados hacia una o más etapas de tratamiento en el siguiente ciclo de pruebas. El equilibrio se alcanza cuando para al menos dos ciclos consecutivos los pesos

combinados del concentrado final más los relaves finales se estabilizan y se aproximan al peso del mineral fresco cargado a cada nuevo ciclo, los ensayos del concentrado final y los relaves finales se estabilizan y el ensayo de cabeza calculado, basados en estos dos productos, son similares al ensayo original con alimentación fresca y se estabiliza la distribución metalúrgica entre el concentrado final y los relaves finales. Si no se establecen condiciones de equilibrio después de seis o siete ciclos, los productos de la flotación se deben revisar nuevamente a través del microscopio para determinar la causa. Se puede estimular el uso de agua de proceso reciclada aclarando los relaves mediante sedimentación para recuperar el agua. El agua del concentrado o de los productos intermedios puede recuperarse de la misma forma o a través del filtrado. El efecto de los reactivos y las sales solubles en un sistema de agua recirculante también se puede evaluar de esta forma (ver Figura 10).

Figura 10

Esquema de una prueba de flotación de ciclo cerrado



Nota: Esquema de una prueba de flotación de ciclo cerrado en laboratorio, la cual permite obtener información metalúrgica sobre el rendimiento esperado a nivel industrial o en la planta concentradora. Adaptada de Kelly et al., 1990.

2.2.21. Manejo de productos de flotación

Los productos de flotación se filtran usando filtros al vacío para los concentrados y un filtro a presión de gran volumen para los relaves. Se puede mejorar el filtrado mediante la floculación de los productos de flotación, lo que es extremadamente útil si el producto contiene una gran cantidad de lamas. Los productos filtrados son posteriormente secados, para ello es importante que la temperatura del horno no exceda los 100 °C de manera de evitar que se calcinen los minerales sulfuros y se pierda parte del azufre. El concentrado y las colas deberían secarse en forma separada ya sea en hornos separados o, si fuera en el mismo horno, ubicando las colas de baja ley en las plataformas superiores y los concentrados de

alta ley en las plataformas inferiores. Después del secado, se registra el peso neto de los productos de flotación para hacer el balance metalúrgico. Los productos son homogenizados antes de que se tomen los cortes representativos para el análisis químico. Es una práctica común pulverizar las muestras antes del análisis. Los resultados de los ensayos y los pesos registrados se usan para generar balances de masa a partir de los cuales se pueden crear los gráficos. Se pueden generar curvas de cinética de recuperación acumulada versus tiempo, curvas de ley de concentrado acumulado versus recuperación acumulada y curvas de selectividad (recuperación acumulada de metal valioso versus % recuperación acumulada de elementos de ganga).

2.2.22. Efecto de las arcillas sobre la flotación de sulfuros de cobre

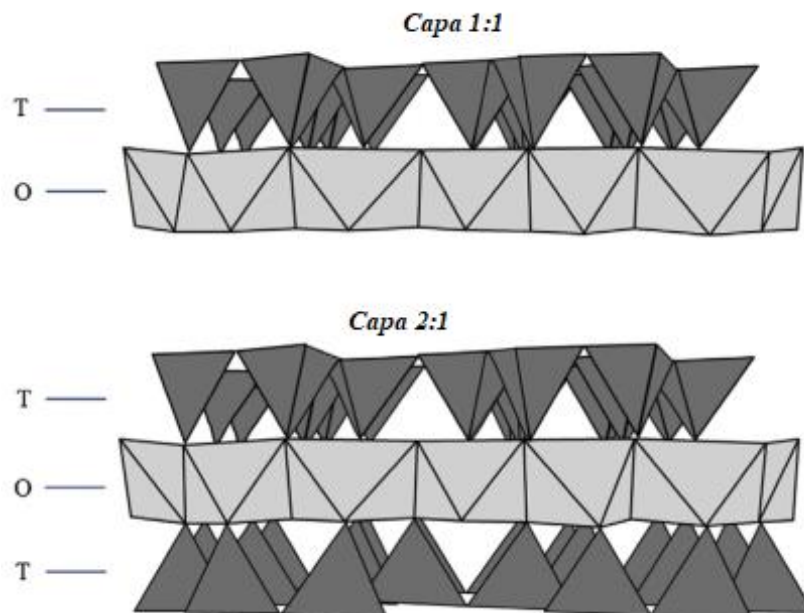
La industria minera enfrenta continuamente desafíos operativos que amenazan la sostenibilidad del sector. Es común que la ley de los minerales haya disminuido, por lo que su procesamiento se vuelve más complicado. En muchos casos, es necesario realizar una molienda exigente para lograr una adecuada liberación de minerales valiosos, lo que inevitablemente trae consecuencias desfavorables como el alto consumo de energía y la generación de cantidades importantes de partículas finas y ultrafinas. La ganga también contiene minerales complejos como arcillas que forman parte de numerosos depósitos, incluidos minerales de cobre, platino, níquel y potasa. Los minerales de arcilla son filosilicatos que tienen una estructura anisotrópica y generalmente abarcan tamaños

coloidales. Están compuestos por capas de sílice tetraédrica (T) y alúmina octaédrica (O), que se unen con proporciones específicas 1:1 (TO) y 2:1 (TOT) (ver Figura 11), presentando dos superficies cristalográficamente diferentes: las caras, que tienden a presentar carga aniónica, y los bordes, que presentan carga aniónica o catiónica dependiendo del pH. Las arcillas se pueden clasificar en dos tipos según su capacidad para absorber agua, arcillas hinchables y no hinchables. La caolinita es un mineral de arcilla que no se hincha, que adopta capas con una estructura de 1:1 y tiene una composición general de $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$. Se caracteriza por el predominio de Al^{+3} en sus sitios octaédricos, donde ocurren sustituciones isomorfas con Mg^{+2} , Fe^{+3} , Ti^{+4} y V^{+3} . Otro mineral de arcilla como la montmorillonita tiene una estructura 2:1 con una composición general descrita por la siguiente composición $(\text{M}_y^+ \text{xnH}_2\text{O}) (\text{Al}_{2-y}^{+3}\text{Mg}_y^{+2}) \text{Si}_4^+ 4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$. El procesamiento de minerales con alto contenido de arcilla suele estar relacionado con efectos negativos, en particular en las etapas de flotación. Una buena descripción se hizo recientemente en el trabajo de Chen y Peng (2018), quienes desarrollaron una revisión general sobre los mecanismos y el comportamiento de las arcillas en la flotación de minerales. Los antecedentes presentados son general y útil para cualquier situación en la que aparezcan arcillas, ya que la mayoría de los desafíos son transversales para cualquier mineral valioso que se procese. En este sentido, los problemas están generalmente relacionados con la estabilidad de la espuma, el

consumo excesivo de reactivos, el arrastre mecánico o incluso las propiedades reológicas de la pulpa pueden cambiar a condiciones prohibitivas para la operación.

Figura 11

Representación esquemática de arcillas con estructuras 1:1 y 2:1



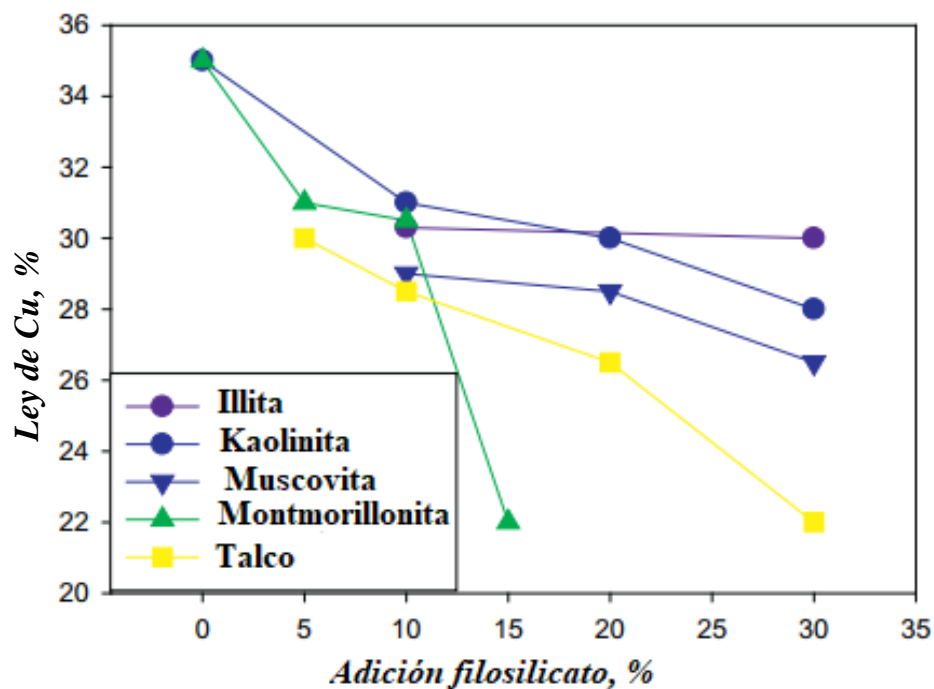
Nota: La figura representa un esquema de las estructuras de las arcillas, las cuales están compuestas de capas de sílice tetraédrico (T) y octaédrico de alúmina (O), que se unen con proporciones específicas 1: 1 (TO) y 2: 1 (TOT). Adaptada de *Representación esquemática de arcillas con estructuras 1: 1 y 2: 1*, de Jeldres et al., 2019.

En la situación particular de flotación del cobre, se pueden encontrar diversos minerales como calcopirita (CuFeS_2), calcosita (Cu_2S), covelita (CuS), bornita (Cu_5FeS_4) y enargita (Cu_3AsS_4). Se encontró que la recuperación de calcopirita se ve afectada por filosilicatos en el siguiente orden talco> montmorillonita> moscovita> caolinita> illita, siendo el talco y la montmorillonita los que tienen el efecto negativo más fuerte, muy probablemente debido a las

diferencias significativas en cristalinidad, capacidad de intercambio catiónico y grado de hinchamiento tal como se muestra en la Figura 12.

Figura 12

Efecto de los filosilicatos sobre la ley de cobre en la flotación de calcopirita



Nota: La figura representa como el grado de concentrado de cobre se ve afectada por mineral con contenido de arcillas a distintas proporciones. Adaptada de *Efecto de los filosilicatos sobre el grado de cobre en la flotación de calcopirita*, de Jeldres et al., 2019.

También se estudió el efecto depresor de los minerales arcillosos sobre la flotabilidad de la calcopirita utilizando PAX como colector a través de pruebas de flotación, tiempo de inducción y mediciones de sedimentación-turbidez. Se encontró que el efecto depresor de los minerales arcillosos era más fuerte a pH 10, lo que se correlacionó con un posible efecto del Ca^{+2} de la cal en el proceso de

heterocoagulación entre los minerales arcillosos y la calcopirita. También se detectó y propuso el recubrimiento de burbujas con arcillas como un mecanismo que podría explicar el efecto depresor de las arcillas sobre la flotabilidad de la calcopirita. Se necesitan más investigaciones para proponer un mecanismo que explique este fenómeno.

Algunas estrategias para reducir el efecto negativo de las arcillas en la flotación es el uso de reactivos modificadores de reología de la pulpa y/o el uso de reactivos que cubren la superficie de las partículas de arcilla evitando que se adhieran al mineral valioso. Una alternativa diferente es reducir la concentración de sólidos de la pulpa para obtener viscosidades bajas y tensiones de fluencia. Sin embargo, esta metodología puede conducir a reducir la producción de metales. El uso de métodos físicos para eliminar las arcillas antes de la etapa de flotación es otra posibilidad. Estudios recientes realizados con carbón mostraron que una agitación de alta intensidad durante el acondicionamiento mejora el rendimiento cuando hay caolinita presente. Por otro lado, Oats et al. (2010) y Quast et al. (2008) encontraron que el deslamado por hidrociclones podría ser más efectivo que la adición de dispersantes. Sin embargo, se puede perder una gran cantidad de minerales valiosos con los lodos, por lo que la recomendación es que el método solo se pueda aplicar cuando la cantidad de minerales valiosos sea insignificante. En el caso del tratamiento ultrasónico, Celik et al. (1998) estudiaron y mostraron que, para la flotación de boro en presencia de altas concentraciones de minerales

arcillosos, el pretratamiento ultrasónico mostró beneficios prometedores en las pruebas de laboratorio, pero indican que la aplicación de esta técnica a escala industrial puede ser un desafío en comparación con la agitación intensa y deslamado de hidrociclones (Jeldres et al, 2019).

2.2.23. Efecto de las cloritas en la flotación de sulfuros de cobre

Los minerales de aluminosilicato son minerales de ganga que están presentes en muchos sistemas de flotación de óxidos y sulfuros de metales base y su eliminación es crítica para lograr leyes aceptables para el procesamiento posterior de los concentrados. De ahí que sus propiedades químicas de flotación, depresión y superficie sean de gran interés en las operaciones de procesamiento de minerales. Si bien hay muchas referencias en la literatura a la flotación de aluminosilicatos, incluidos minerales de caolín, illita, cianita y mica, talco y pirofilita, y sobre las condiciones para flotar caolinita, pirofilita e illita de bauxitas diaspóricas, hay menos referencias a las propiedades químicas específicas de flotación y superficie de la clorita que podrían ser útiles en el desarrollo de técnicas de separación selectiva y esquemas de reactivos (modificadores de colectores y valores de pH) para este aluminosilicato que podrían ser útiles en lograr una metalurgia aceptable. En consecuencia, se ha realizado una revisión de la literatura respecto a las propiedades de flotación, depresión y superficie de la clorita y minerales relacionados, con el fin de utilizar esta información para ayudar a desarrollar esquemas de reactivos adecuados que podrían permitir la eliminación

selectiva de clorita en sistemas de flotación de sulfuros y óxidos. La depresión del clorito se puede lograr con silicato de sodio, fluoruro de hidrógeno, hexafluorosilicato de sodio, polisacáridos y una variedad de otros depresores, entre ellos el quebracho (Silvester et al, 2013).

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. Tipo y diseño de la investigación

3.1.1. Tipo

Pimienta y de la Orden (2017) definen que la investigación aplicada tiene como objetivo la búsqueda y consolidación del saber, la aplicación de los conocimientos culturales, científicos y la producción de tecnología. En concordancia con los autores, el tipo de trabajo realizado corresponde a una investigación aplicada, para generar una tecnología que resuelva el problema planteado.

En consecuencia, el presente estudio se orienta a la resolución de un problema específico como lo es la mejora de la recuperación del mineral de sulfuro de cobre, usando una metodología de investigación experimental dado que se trata de un conjunto de pruebas a nivel de Laboratorio cuyos resultados puedan ser escalados posteriormente a la Planta Concentradora.

3.1.2. Diseño

Bairagi y Munot (2019) sostienen que el diseño de la investigación ayuda al investigador a comprender las dependencias y considerar la hoja de ruta general

para llevar a cabo la investigación junto con identificar los detalles minuciosos. En concordancia con este concepto, se ha realizado una serie de pruebas con las muestras del mineral en estudio a efecto de evaluar las principales variables que están afectando la recuperación del mineral sulfuro proveniente de la zona de brecha alterada. Luego se ha optado por el diseño de tipo experimental variable por variable.

3.2. Población y muestra

3.2.1. Población

La población está constituida por la cantidad de mineral que se encuentra en la brecha alterada que conforma un yacimiento minero metálico de cobre de tipo porfirítico

3.2.2. Muestra

Del mineral ROM por cuarteos sucesivos se tomó una muestra representativa de 200 kg La cual fue preparada mecánicamente a 100 % -m10. Seguidamente, debidamente homogenizada por cuarteo se tomó 80 muestras de 1000 g c/u para realizar 80 pruebas de flotación, cuyos resultados formarán la muestra del estudio.

La muestra ROM se obtuvo por medio de muestreo en los stocks de brecha en estudio de la mina, directamente del frente explotable del stock.

3.3. Operacionalización de variables

Todas las variables pueden ser medidas directamente con instrumentos y análisis:

Variable independiente

- Granulometría (um)
- Porcentaje de Sólidos (%)
- pH
- Reactivos (g/t)
- *Blending* o mezcla (%)

Variable dependiente

- Recuperación (%)

3.4. Técnicas e instrumentos para recolección de datos

Para la generación de datos se realizarán pruebas en Laboratorio donde será evaluado el efecto de las variables dependientes sobre la recuperación (variable independiente). Los datos serán recolectados por medio de instrumentos de medición de Laboratorio y la recuperación de cada prueba será calculada por medio de los ensayos químicos de cabeza, cola y concentrado.

3.5. Materiales, equipos y reactivos

Materiales

- Muestras de mineral
- Agua de proceso
- Piseta
- Vaso de precipitado
- Probeta
- Luna de reloj
- Mallas: set de mallas
- Espátula
- Bandejas
- Paletas para retirar las espumas
- Micropipeta

Equipos

- Celda de flotación Denver D-12
- Molino de bolas
- Medidor de pH
- Ro-Tap
- Divisor rotatorio
- Homogenizador

- Balanza analítica
- Horno eléctrico
- Filtro
- Cronómetro

Reactivos requeridos para pruebas

- Modificador de pH (Hidróxido de calcio, $\text{Ca}(\text{OH})_2$)
- Espumante (F-501)
- Colectores (PAX, AP 3894, AP 9863, AP 8761, AP 7291, AP 404)
- Dispersantes (Gelymin-5, D-325, RD-250, Na_2SiO_3 , DP-900, MIN 1600)

3.6. Procesamiento y análisis de datos

3.6.1. Procedimiento para la caracterización mineralógica

Para el procesamiento y análisis de datos se realizaron diversos procedimientos que a continuación se mencionan:

Ensaye químico

Para la determinación de elementos Cu, Fe, CuSAc, CuSCN, e Insolubles, se envía al Laboratorio Químico una muestra de aproximadamente 200 g para análisis químico.

Difracción de rayos x

Para la determinación de especies mineralógicas: calcopirita, bornita, calcosina, covelita, pirita y gangas como feldespato, plagioclasa, biotita, arcillas, carbonatos, etc, se envía al Laboratorio de Geometalurgia una muestra representativa de aproximadamente 500 g para difracción de rayos x.

Microscopía

Se hace un análisis de mallas valoradas y se separa 10 g por cada malla para la preparación de briquetas. Se hace la lectura de las briquetas para poder determinar la ocurrencia mineralógica de las especies valiosas mediante el grado de liberación y los tipos de asociaciones que se presentan.

3.6.2. Procedimiento para pruebas de flotación

Preparación de reactivos

Generalmente los reactivos en estado sólido se preparan como soluciones acuosas en concentraciones que varían entre 1% - 10%.

Los reactivos líquidos se adicionan de manera directa considerando su densidad, como los colectores líquidos y espumantes.

Molienda del mineral

Seleccionar el mineral de estudio y moler a tres tiempos (3, 6 y 9 minutos), para poder determinar el tiempo necesario para un P_{80} determinado. Con el tiempo

requerido, adicionar el colector secundario y la cal al molino. Descargar la pulpa en la celda de flotación, evitando tener pérdida de pulpa por derrame o salpicadura.

Acondicionamiento de la pulpa

La celda conteniendo la pulpa se monta sobre la base del equipo y se coloca el rotor. Se procede a encender el equipo de flotación sin suministrar aire a la pulpa y se gradúan los RPM del rotor (800 a 1200 RPM), de tal forma que no se produzca sedimentación de ninguna partícula sólida. Luego se mide el pH inicial de la pulpa y se le agrega cal hasta llegar al pH indicado. Se adicionan los reactivos (colector primario y espumante).

Cumplido el tiempo de acondicionamiento se abre poco a poco la válvula de alimentación de aire (hasta un flujo de 6 lpm) para facilitar la formación del colchón de espuma.

Flotación y recolección del concentrado

Verificando que la mineralización de las espumas y consistencia del colchón de espumas sea la adecuada se procede a recolectar la espuma mineralizada manteniendo la frecuencia del paleteo constante (21 paleteos por minuto). Mantener constante el nivel de pulpa de la celda, para esto se adiciona agua de reposición preparada al pH de trabajo. Las espumas se colectan en una bandeja que está ubicada a la caída del labio de descarga de la celda.

Finalizado el proceso se cierra el paso de aire y luego se detiene el equipo, obteniendo un concentrado depositado en la bandeja y un relave que es la pulpa contenido en la celda de flotación.

Filtrado y secado de productos

Se procede a realizar la limpieza de rotor y difusor de la máquina de flotación teniendo cuidado en no dejar residuos de mineral que puedan contaminar la siguiente muestra a flotar. A continuación, ambos productos se filtran cada uno por separado y las tortas se introducen al horno para su secado.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1. Resultados de la caracterización mineralógica

4.1.1. Resultados de ensaye químico

Tabla 1

Resultados de ensaye químico

N° pruebas	% Cu	% Fe	%CuSAc	%CuSCN
TNG 1	1,21	5,65	0,27	0,55
TNG 2	0,41	4,15	0,03	0,25
TNG 3	0,52	5,46	0,02	0,22
TNG 4	0,67	3,47	0,06	0,51
TNG 5	0,32	3,25	0,01	0,14
TNG 6	0,36	2,90	0,03	0,11
TNG 7	0,36	3,45	0,05	0,10
TNG 8	0,50	4,57	0,07	0,24
TNG 9	0,24	3,75	0,02	0,09
TNG 10	0,67	6,24	0,07	0,53
TNG 11	0,35	3,10	0,02	0,29
TNG 12	0,21	3,77	0,01	0,08
TNG 13	1,32	5,16	0,12	1,10
TNG 14	0,67	2,99	0,03	0,40
TNG 15	0,74	13,71	0,10	0,57
TNG 16	0,96	27,83	0,10	0,54
TNG 17	0,86	10,00	0,13	0,28
TNG 18	0,18	2,74	0,01	0,07
TNG 19	1,30	8,24	0,25	0,91
TNG 20	0,14	2,61	0,01	0,02

Fuente: Elaboración propia

Previo a las pruebas de flotación se realizó la caracterización del mineral de brecha alterada, el cual consistió en: ensaye químico, difracción de rayos x y microscopía. Esto se realizó en base a muestras de taladros de geología.

4.1.2. Resultados de difracción por rayos x

Tabla 2

Resultados de difracción de rayos x

Nº pruebas	% Arcillas	% Carbonatos	% Cloritas
TNG 1	7,55	19,55	4,75
TNG 2	7,97	25,22	7,08
TNG 3	10,23	22,40	18,28
TNG 4	10,11	8,26	3,12
TNG 5	6,38	9,42	8,48
TNG 6	4,95	52,04	6,82
TNG 7	6,11	59,97	8,38
TNG 8	13,45	26,03	13,43
TNG 9	7,08	13,88	5,12
TNG 10	4,00	23,03	4,78
TNG 11	5,12	15,08	15,11
TNG 12	10,91	21,29	12,70
TNG 13	5,13	26,69	2,70
TNG 14	13,98	9,29	0,73
TNG 15	4,70	48,64	1,17
TNG 16	5,89	10,30	6,03
TNG 17	8,90	31,42	5,87
TNG 18	10,62	22,37	10,18
TNG 19	3,24	46,92	3,73
TNG 20	6,45	24,82	12,00

Fuente: Elaboración propia

4.1.3. Resultados de microscopía

Se realizó la microscopía con un compósito del mineral de brecha alterada, siendo analizadas las siguientes fracciones +m50, +m100, +m140 y +m270, de cada una de las cuales se preparó una briqueta pulida. Se determinó los tipos de asociaciones y se cuantificó el grado de liberación de las diversas especies mineralógicas presentes, con especial énfasis en la definición de aquellos factores mineralógicos que pudieran ser considerados como responsables de la notoria diferencia en la recuperación.

4.1.4. Aspectos cualitativos

Los minerales metálicos identificados durante el estudio son: bornita (Cu_5FeS_4), Calcosita (CuS_2), calcopirita (CuFeS_2), covelita (CuS), digenita (Cu_9S_5), esfalerita (ZnS), magnetita (Fe_3O_4) y pirita (FeS_2). La magnetita es bastante significativa en la muestra, se presenta mayormente libre o bien asociada con las gangas. La pirita es algo escasa y se presenta en variedad de tamaños, unas veces libre pero más frecuentemente amarrada con bornita o magnetita, o con las gangas.

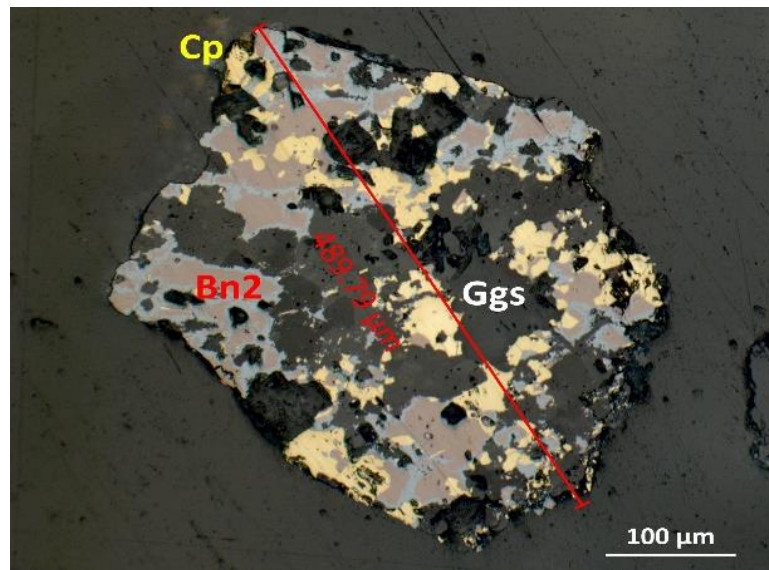
La covelita es algo escasa y generalmente se presenta asociada con digenita, que es algo más abundante, o simplemente como delgadas películas que parecen teñir a los minerales asociados, especialmente a la calcosita, bornita y/o a las gangas. Por razones prácticas, las ocurrencias de calcosita, covelita y digenita,

individualmente o asociadas entre sí, se las ha denominado colectivamente como sulfuros secundarios de cobre.

Las imágenes que siguen, ilustran los tipos y características morfológicas de las partículas observadas, en las diferentes fracciones granulométricas.

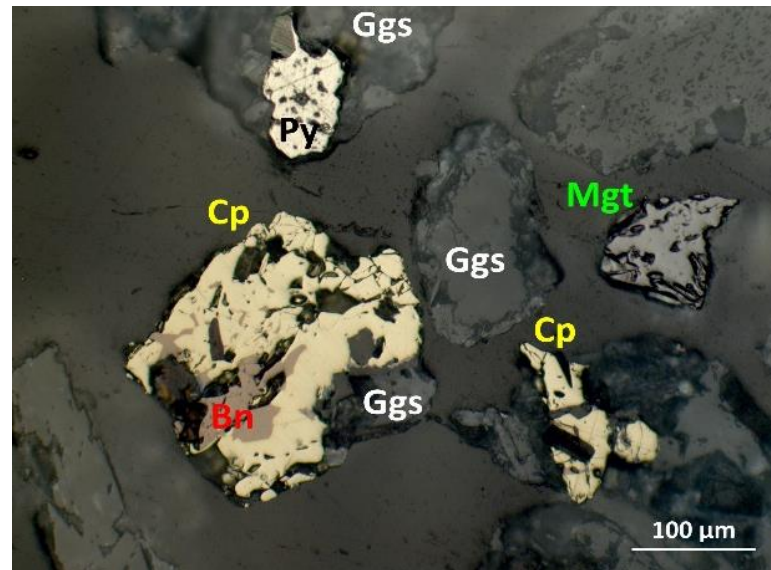
Figura 13

Fracción +m50



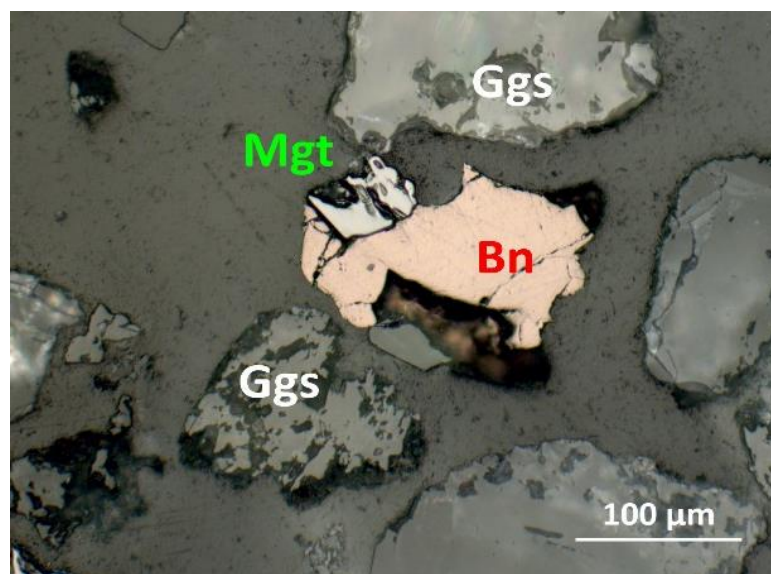
Nota: Partícula mixta: calcopirita/bornita secundaria/ganga.

Figura 14
Fracción +m100



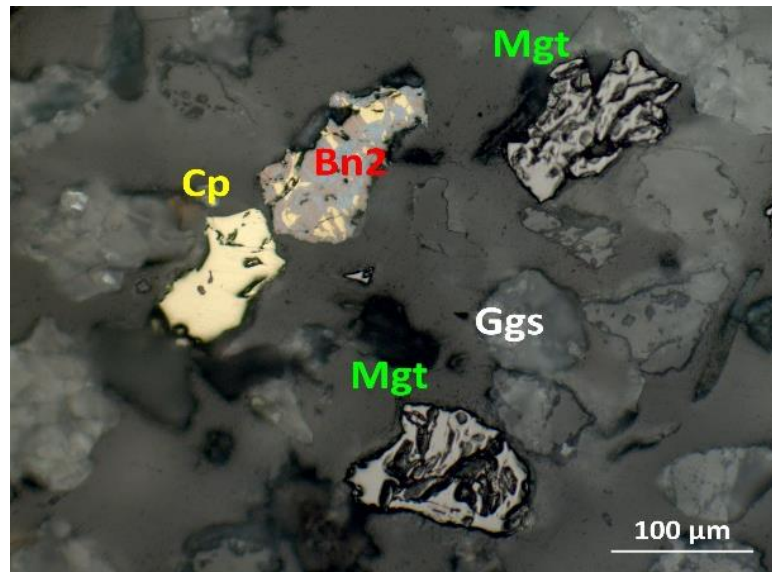
Nota: Partículas libres: gangas y magnetita. Partícula mixta: pirita/ganga, calcopirita/ganga y calcopirita/bornita/ganga.

Figura 15
Fracción +m140



Nota: Partículas libres: gangas. Partícula mixta: bornita/magnetita.

Figura 16
Fracción + m270



Nota: Partículas libres: gangas, calcopirita y magnetita. Partícula mixta: calcopirita/bornita secundaria.

4.1.5. Aspectos cuantitativos

Los minerales metálicos presentes como partículas libres consisten de ocurrencias algo significativas de sulfuros secundarios de cobre, algo menos de calcopirita y esfalerita y sumamente escasa de pirita, pero ninguno de ellos alcanza niveles registrables en la fracción +m50. Los porcentajes de todos ellos aumentan constantemente conforme disminuye el tamaño de grano. Las gangas en forma de partículas libres alcanzan porcentajes muy elevados en la fracción +m50, porcentajes que luego disminuyen lenta pero constantemente hacia la fracción +m270. Las partículas mixtas son algo variadas (se registra hasta 8 tipos de amarres). Los amarres más importantes y refractarios a la liberación son los tipos:

magnetita/gangas y sulfuros secundarios de cobre/gangas. Es posible afirmar que las menas de cobre de esta muestra ocurren en partículas bastante finas, con marcado encapsulamiento dentro de las gangas, por lo que su liberación recién alcanza valores aceptables a tamaños por debajo de +m140.

Tabla 3

Resultados de la determinación del grado de liberación

Malla	cp	bn	bn2	cs	py	mgt	ef	Ggs
50	74,0	75,6	73,6	-	80,3	79,5	16,7	88,7
100	86,7	84,4	82,1	67,1	86,8	88,6	-	97,1
140	92,3	97,0	94,3	75,3	92,7	95,5	-	98,5
270	96,3	97,8	96,9	91,1	94,5	98,7	90,0	99,4

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4

Resultados de los tipos de asociaciones

Asociación	cp/Ggs	cp2/ Ggs	bn/Ggs	bn2/ Ggs	cs/Ggs	py/Ggs	mgt/Ggs	ef/Ggs
Lateral	75	67	73	72	75	69	61	93
Ocluida	3	33	4	8	5	10	7	7
Diseminada	21	0	23	19	20	21	31	0
Corona	0	0	0	0	0	0	1	0
Vetillas	1	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: Elaboración propia

4.2. Resultados de pruebas de flotación

La primera etapa de las pruebas de flotación consistió en la realización de pruebas cinéticas de los 20 taladros. Para ello se usó los mismos parámetros operacionales de la planta. En una segunda etapa, se realizó pruebas de flotación verificando el efecto de las variables de planta: granulometría, % sólidos, pH.

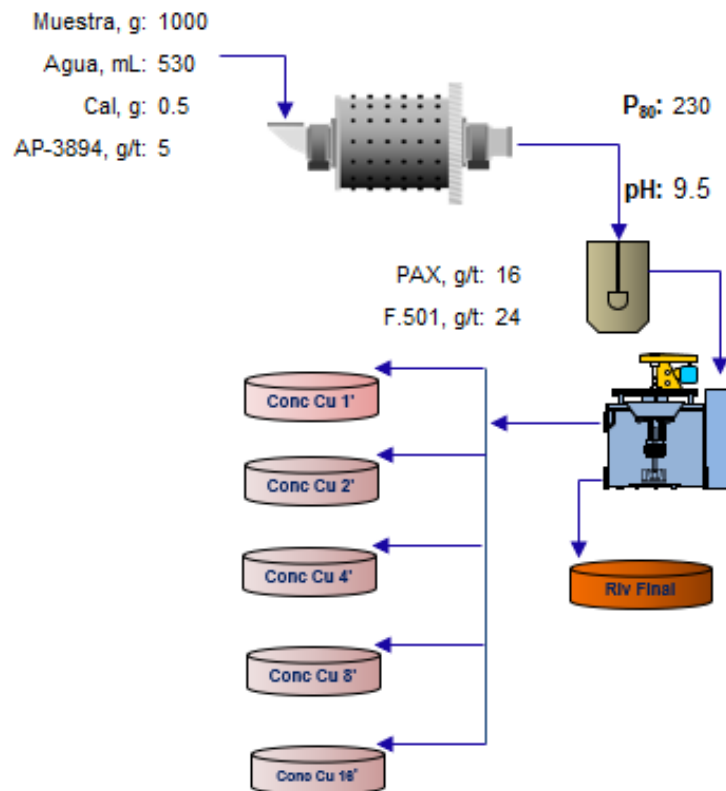
Asimismo, se probaron reactivos y se realizó pruebas de flotación haciendo *blendings*. Para estas pruebas de flotación se hizo un *blending* 50 % de mineral de brecha alterada y 50 % mineral estándar. A continuación, se detalla los resultados:

4.2.1. Resultados de pruebas de cinética de flotación

En el esquema de la Figura 8 se dan los parámetros con lo que se realizaron, las pruebas de flotación fraccionada para evaluar la cinética de flotación de 20 muestra de taladros de perforación diamantina.

Figura 17

Esquema del proceso de evaluación de la cinética de flotación



A manera de ejemplo se muestra el desarrollo de cálculo de la cinética de una muestra, donde las constantes experimentales se dan en la Tabla 5.

Tabla 5

Constantes experimentales del estudio

CONDICIONES DE MOLIENDA				CONDICIONES DE FLOTACIÓN	
Molino:	8" x 11"			Celda:	Denver D-12
			Tamaño		
Nº Molino:	Nº Bolas:	Peso Bolas:	Bola:	Vol. De celda, mL:	2600
1	133	9786,8	1"	Velocidad, (rpm):	1200
2	134	9774,7	1"	Aire, L/min:	5-10
V. Crítica:	93.8 rpm			% Sol. (Flot):	35
V. operación:	70	75 %		Paletada/min:	21
Tamaño Alimentación:	100% -m10				
% Sol. (Molienda):	65				
Tipo de Agua:	Agua de Laboratorio.				
Mineral, g:	1000				
Agua, mL:	530				
Molienda P ₈₀ , µm:	230				
Remolienda P ₈₀ , µm:	40				

Fuente: Elaboración propia

Después de llevada a cabo la prueba de flotación fraccionada, se obtiene los datos que se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6
Balance metalúrgico acumulado

Productos	Tiempo	Peso		Leyes					
	acumulado	(g)		Cu, %		Fe, %		Ins, %	
	min.	Parcial	Acum.	Parcial	Acum.	Parcial	Acum.	Parcial	Acum.
Cabeza Calc	0	1000,00	1000,00	1,20	1,20	5,59	5,59	58,43	58,43
Conc.1	1	12,20	12,20	25,88	25,88	14,581	14,581	27,63	27,63
Conc. 2	2	9,90	22,10	19,29	22,93	12,069	13,456	34,66	30,78
Conc. 3	4	13,30	35,40	13,11	19,24	10,021	12,165	40,75	34,52
Conc. 4	8	21,90	57,30	6,76	14,47	7,998	10,573	47,05	39,31
Conc. 5	16	29,70	87,00	4,49	11,06	6,958	9,339	50,17	43,02
Relave		913,00	913,00	0,265	0,265	5,228	5,228	59,90	59,90

Fuente: Elaboración propia

Con los datos de la Tabla 6 se construye la Tabla 7 y 8.

Tabla 7
Valores acumulados de tiempo y distribución

Productos	Tiempo acumulado		Distribución, %		
	min	Peso	Cu	Fe	Ins
	0	0	0	0	0
Conc.1	1	1,22	26,22	3,18	0,58
Conc. 2	2	2,21	42,07	5,32	1,16
Conc. 3	4	3,54	56,55	7,71	2,09
Conc. 4	8	5,73	68,85	10,85	3,86
Conc. 5	16	8,70	79,91	14,55	6,41
Relave		91,30	20,09	85,45	93,59
Cabeza Calculada		100,00	100,00	100,00	100,00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 8*Valores de recuperación real y ajustada al modelo de Klimpel*

Tiempo de flotación (min)	% Rec. Real	% Rec. ajustada	Dif. Cuad.
0,0	00,00	00,00	0,000
1,0	26,22	25,20	1,033
2,0	42,07	40,97	1,213
4,0	56,55	58,06	2,275
8,0	68,85	70,84	3,965
16,0	79,91	77,88	4,111
			12,596

Fuente: Elaboración propia

A partir de los datos de la Tabla 8 y con el uso del solver, se determina las constantes del modelo cinético de Klimpel, donde $k = 0,75$, $R_{\max} = 84,96$ y $R^2 = 0,99857$.

Luego el modelo de Klimpel es:

$$R_{Cu} = 84,86 \left\{ 1 - \frac{1}{0,75t} [1 - \exp(-0,75t)] \right\} \quad [5]$$

$$R^2 = 99,86 \%$$

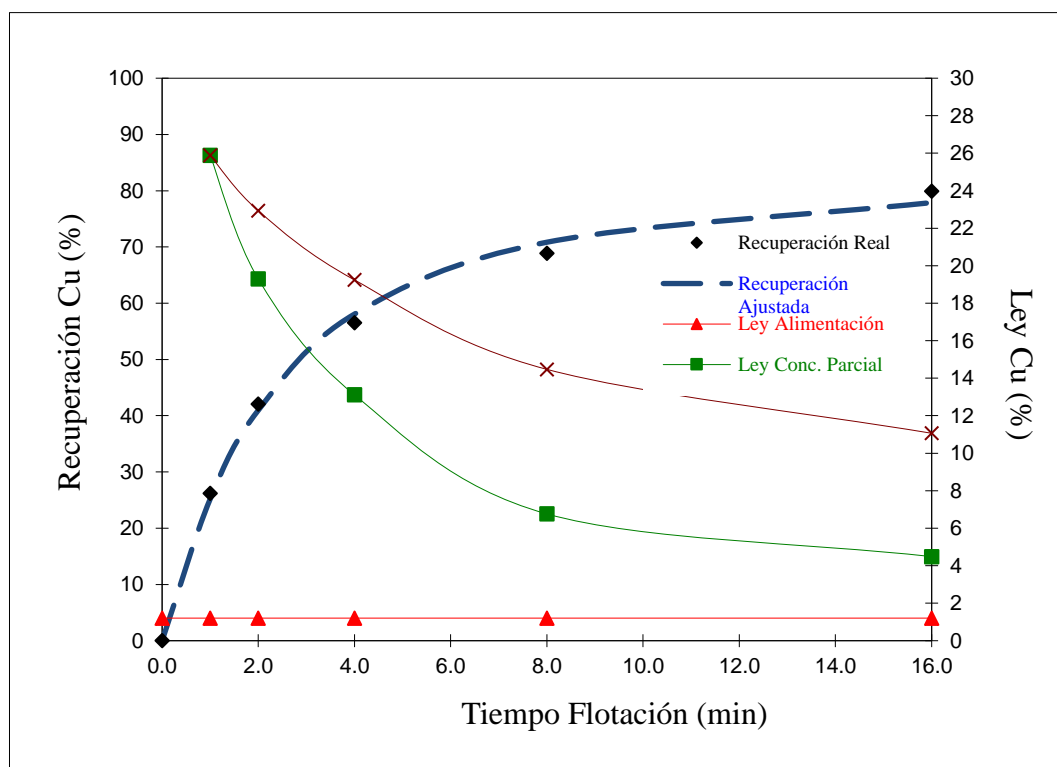
Ahora, con los datos de las Tablas 6 y 7 se obtiene la Tabla 9, a partir de la cual, se obtiene la Figura 9, que muestra la curva cinética y las leyes parciales y acumuladas.

Tabla 9
Valores de recuperaciones y leyes de cobre

Tiempo de flotación (min)	Recup. Cu (%)		Leyes		
	Real	Mod.	Ley de cabeza	Parcial	Acum.
0.0	0.00	0.00	1,2		
1.0	26.22	25.20	1,2	25.88	25.88
2.0	42.07	40.97	1,2	19.29	22.93
4.0	56.55	58.06	1,2	13.11	19.24
8.0	68.85	70.84	1,2	6.76	14.47
16.0	79.91	77.88	1,2	4.49	11.06

Fuente: Elaboración propia

Figura 18
Curvas cinéticas real y ajustada y leyes parciales y acumuladas



De este modo, se ha obtenido los datos de la Tabla 10, para cada muestra de sondeo.

Tabla 10*Resultados de pruebas de cinética de flotación*

N° pruebas	% Mass pull	Ley, % Cu	% Recuperación Cu
TNG 1	6,47	13,70	73,64
TNG 2	13,29	0,54	18,27
TNG 3	7,81	5,08	79,62
TNG 4	2,94	7,76	33,89
TNG 5	9,07	1,65	45,83
TNG 6	6,44	2,89	49,79
TNG 7	5,48	4,10	59,95
TNG 8	4,16	5,04	40,78
TNG 9	2,78	5,16	68,20
TNG 10	4,92	5,43	42,58
TNG 11	8,35	0,75	19,15
TNG 12	7,30	1,62	57,11
TNG 13	4,56	4,15	14,17
TNG 14	4,15	13,07	80,46
TNG 15	1,93	10,11	25,60
TNG 16	3,12	16,58	53,47
TNG 17	6,17	11,31	81,55
TNG 18	4,42	1,97	48,04
TNG 19	5,26	5,43	21,20
TNG 20	4,35	1,41	44,01

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de las pruebas cinéticas muestran valores bajos de recuperación en algunos taladros. Esto se debe a la presencia de carbonatos y arcillas que actúan recubriendo la partícula y evitando su flotación. Otra característica fue la formación de espumas blancas muy poco mineralizadas en especial en los taladros que obtuvieron menor recuperación.

4.2.2. Resultados de pruebas *batch* de flotación

Variando la granulometría

El efecto de la granulometría se relaciona con el grado de diseminación del mineral. Minerales más diseminados tienen mejor respuesta ante una mejora en la liberación. Se realizaron pruebas de granulometría en este mineral problema con los siguientes resultados.

Tabla 11

Resultados variando la granulometría

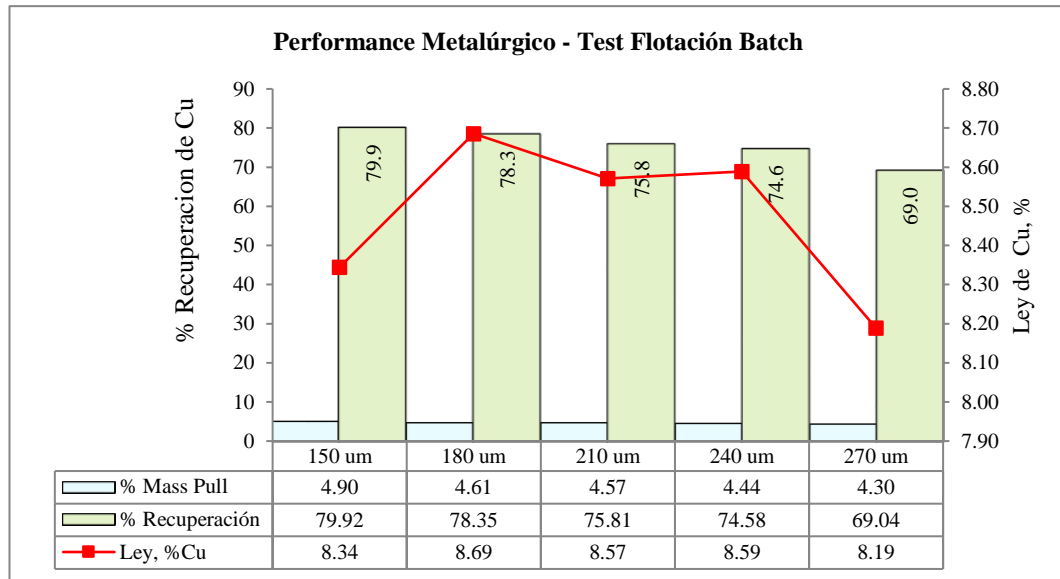
Granulometría μm	% Mass pull	% Cu	% Recuperación
P ₈₀ =150	4,90	8,34	79,92
P ₈₀ =180	4,61	8,69	78,35
P ₈₀ =210	4,57	8,57	75,81
P ₈₀ =240	4,44	8,59	74,58
P ₈₀ =270	4,30	8,19	69,04

Fuente: Elaboración propia

Para el P₈₀ de 240 μm en planta, se tiene una recuperación de 74,58 %. Llevar el P₈₀ a 180 μm origina un incremento de la recuperación hasta 78,35 % por lo que se evidencia un efecto en la recuperación mejorando el grado de liberación.

Figura 19

Rendimiento metalúrgico variando la granulometría



Variando el % de sólidos

Es conocido que la dilución disminuye la viscosidad de las pulpas y mejora la recuperación cuando ésta es afectada por arcillas. Se realizaron pruebas variando el porcentaje de sólidos en este mineral problema con los siguientes resultados.

Tabla 12

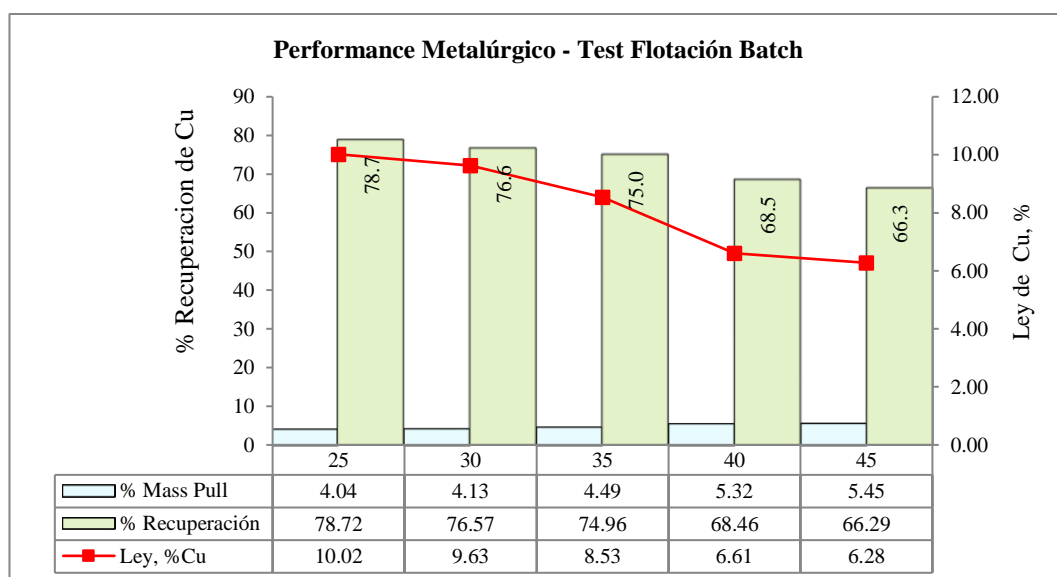
Resultados variando el % de sólidos

% Sólidos	% Mass pull	% Cu	% Recuperación
25	4,04	10,02	78,72
30	4,13	9,63	76,57
35	4,49	8,53	74,96
40	5,32	6,61	68,46
45	5,45	6,28	66,29

Fuente: Elaboración propia

Los resultados indican que las pulpas más diluidas mejoran la recuperación. Para sólidos de 35 % en planta, se tiene una recuperación de 74,96 %. Al diluir la pulpa a 25 % se mejora la recuperación a 78,72 %.

Figura 20
Rendimiento metalúrgico variando el porcentaje de sólidos



Variando el pH

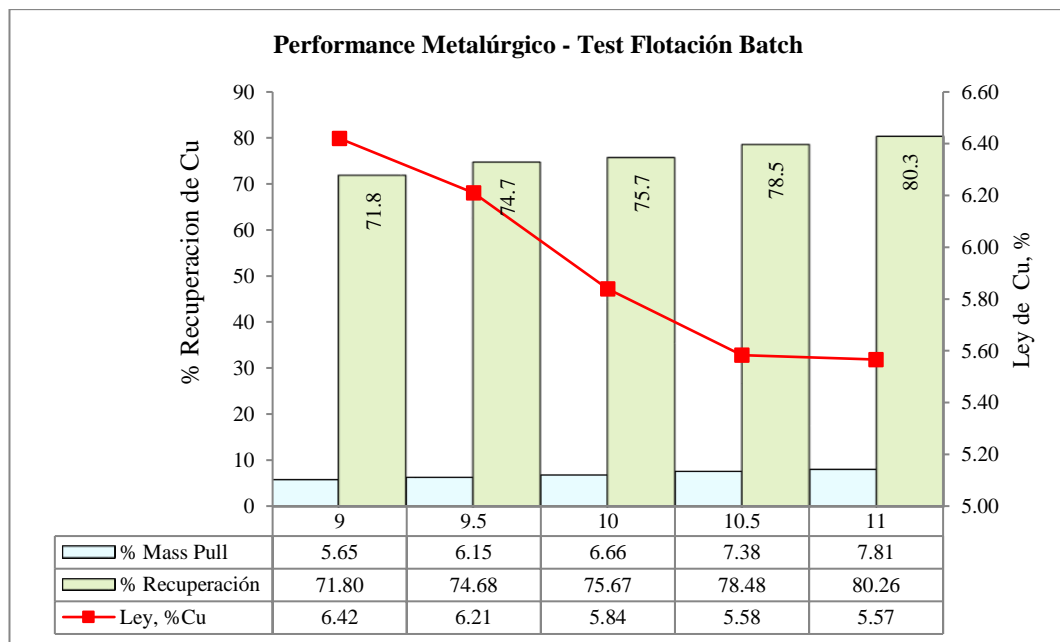
Otra de las variables de manejo en planta es el pH. Se realizaron pruebas de mayor y menor pH respecto al de planta 9,5 obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 13*Resultados modificando pH*

pH	% Mass pull	% Grado	% Recuperación
9,0	5,65	6,42	71,80
9,5	6,15	6,21	74,68
10,0	6,66	5,84	75,67
10,5	7,38	5,58	78,48
11,0	7,81	5,57	80,26

Fuente: Elaboración propia

Para el caso del mineral de brecha alterada, se tiene un efecto positivo en el incremento del pH. Elevando el pH de 9,50 a 11,00 se incrementa la recuperación de 74,68 % a 80,26 %. Tal como se muestra en la Figura 12.

Figura 21*Rendimiento metalúrgico variando el pH*

Evaluación de colectores

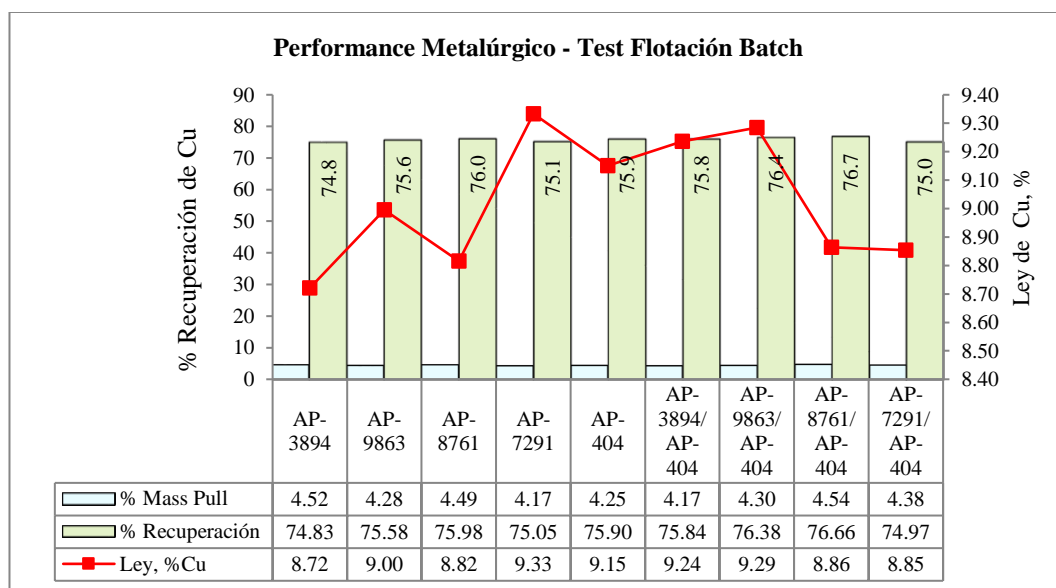
Dada la diferente mineralogía se han evaluado diferentes formulaciones de colectores. Para los colectores evaluados se tuvieron los siguientes resultados.

Tabla 14
Resultados evaluando colectores

Colectores	% Mass pull	% Cu	% Recuperación Cu
STD: AP 3894	4,52	8,72	74,83
AP 9863	4,28	9,00	75,58
AP 8761	4,49	8,82	75,98
AP 7291	4,17	9,33	75,05
AP 404	4,25	9,15	75,90
AP 3894/AP 404	4,17	9,24	75,84
AP 9863/AP 404	4,30	9,29	76,38
AP 8761/AP 404	4,54	8,86	76,66
AP 7291/AP 404	4,38	8,85	74,97

Fuente: Elaboración propia

Figura 22
Rendimiento metalúrgico variando el tipo mezcla de colectores



Para los colectores evaluados, el mejor resultado se obtuvo con la combinación AP 8761 como secundario y AP 404 como terciario. La combinación de ambos produce una sinergia muy favorable para la recuperación del sulfuro de cobre. Tal como se muestra en la Figura 13.

Evaluación de dispersantes

Parte de las estrategias para el manejo de arcillas involucra la realización de pruebas con dispersantes. El plan de pruebas del mineral problema tipo brecha incluyó la realización de pruebas con dispersantes obteniéndose los resultados a continuación.

Tabla 15
Resultados evaluando dispersantes

Dispersantes	% Mass pull	Ley, % Cu	% Recuperación Cu
STD	4,54	9,61	74,73
Gelymin-5 (400)	4,77	8,90	76,41
D-325 (100)	4,59	9,30	75,42
RD-250 (12)	4,34	9,82	75,74
Silicato (100)	4,54	9,43	74,57
DP-900 (20)	4,29	9,00	71,23
MIN-1600 (10)	4,30	10,19	75,72

Fuente: Elaboración propia

Casi no se obtiene ventaja significativa en el uso de dispersantes en las dosificaciones utilizadas en la prueba por lo que su uso no sería beneficioso.

Efecto del *blending*

Una de las estrategias para el tratamiento de este mineral alterado es la formación de *blending* o mezcla de mineral de brecha con mineral estándar. Este se basa en el hecho de disminuir elementos perjudiciales para el proceso. A continuación, se detalla los resultados.

Tabla 16
Resultados efecto del blending

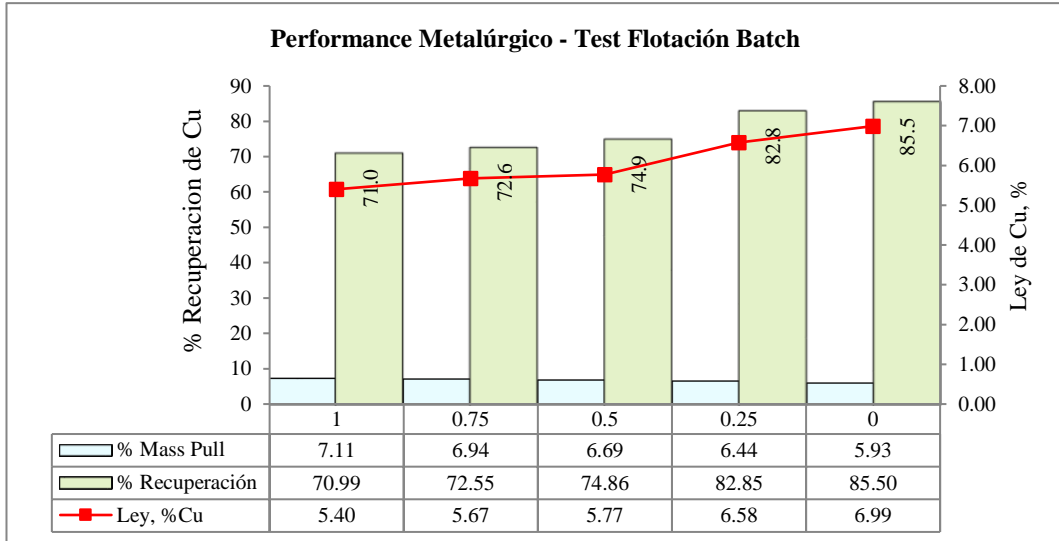
Blending	% Mass pull	Ley, % Cu	% Recuperación Cu
100%	7,11	5,40	70,99
75%	6,94	5,67	72,55
50%	6,69	5,77	74,86
25%	6,44	6,58	82,85
0%	5,93	6,99	85,50

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a los resultados obtenidos, para lograr una recuperación por encima de 83 % se debe alimentar a la planta una proporción de mineral de brecha alterada no mayor al 15 %.

Figura 23

Rendimiento metalúrgico a diferentes mezclas o blendings



CAPÍTULO V

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

5.1. Análisis de resultados

Variando las variables operacionales, se observa que la planta no es capaz de hacer modificaciones mayores de sólidos, por la capacidad de flujo de las celdas, pudiendo llegar solo a 32 %. Del mismo modo para el pH, por la capacidad de la planta de preparación de cal solo es posible subir el pH a 10. Considerando las restricciones antes mencionadas, la planta solo es capaz de mejorar la recuperación en 1,80 % disminuyendo los sólidos.

Reducir la granulometría también es una opción para mejorar la recuperación, pero no es viable porque significaría pérdidas de tonelaje que afectarían la producción y rentabilidad de la Planta Concentradora.

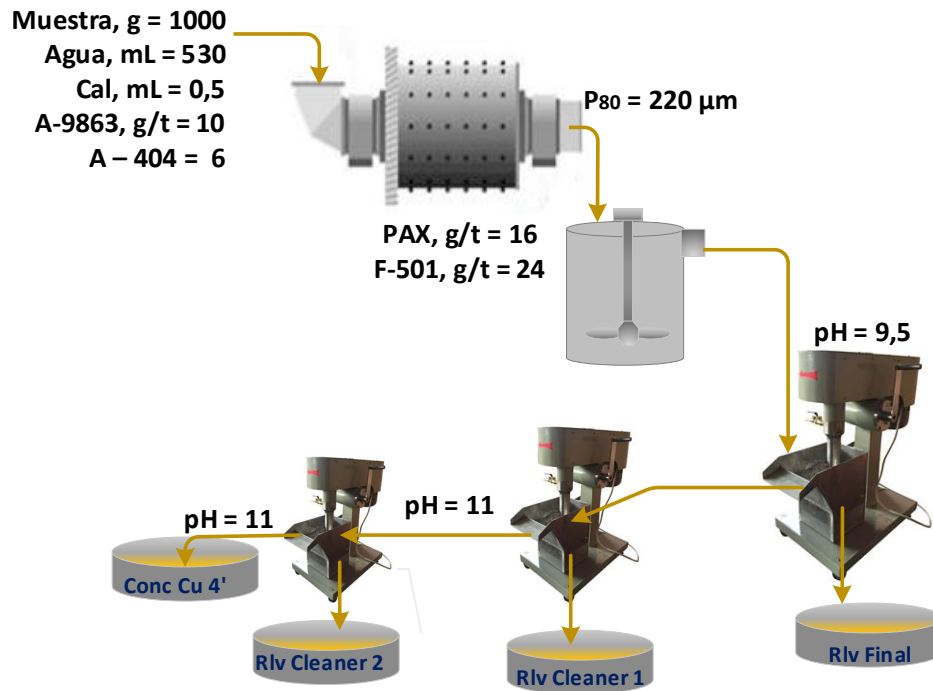
Con respecto a la evaluación de reactivos, se encontró que la fórmula colectora con efectos positivos en reemplazo del colector secundario estándar, obteniendo una mejora en recuperación de 1,83 %. Esta fórmula debe ser evaluada con protocolos de prueba en planta.

Respecto a la evaluación de dispersantes, para el rango analizado no se observa beneficio significativo.

Los mayores efectos se logran con el *blending*. Un *blending* de hasta 15 % de mineral de brecha alterada tendría una recuperación mayor a 83 %. Esto hecho da una alternativa tentativa de poder aplicarlo, sin embargo, se requiere un control diario del *blending* de mina, el cual tendría que automatizarse, para mantener invariable la calidad del mineral de cabeza de alimento a la Planta Concentradora.

Para validar lo antes mencionado, se realizaron pruebas de flotación con etapas de limpiezas. Las condiciones de la prueba 1 es 100 % mineral de brecha alterada y condiciones estándar (Colector secundario: AP 3894 y sólidos 35 %), mientras que para la prueba 2 se hizo un *blending* 85 % de mineral estándar y 15 % de mineral de brecha alterada y condiciones óptimas de acuerdo a las pruebas realizadas (Colector secundario: AP 8761, AP 404 y sólidos 32 %). El esquema de las pruebas de flotación *Rougher-Cleaner-Re-Cleaner*, se muestra en la Figura 24.

Figura 24
Diagrama de las pruebas de validación



Obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 17
Resultados optimización de variables

N° prueba	% Mass pull	% Cu	% Recuperación
1	10,0	22,75	72,34
2	9,8	30,82	88,76

Fuente: Elaboración propia

Queda comprobado entonces que la mejor estrategia para tratar este mineral apunta a realizar un *blending* y el cambio del colector secundario estándar.

Adicionalmente, como una opción secundaria disminuir el % de sólidos. El pH se mantuvo constante en ambas pruebas al igual que la granulometría.

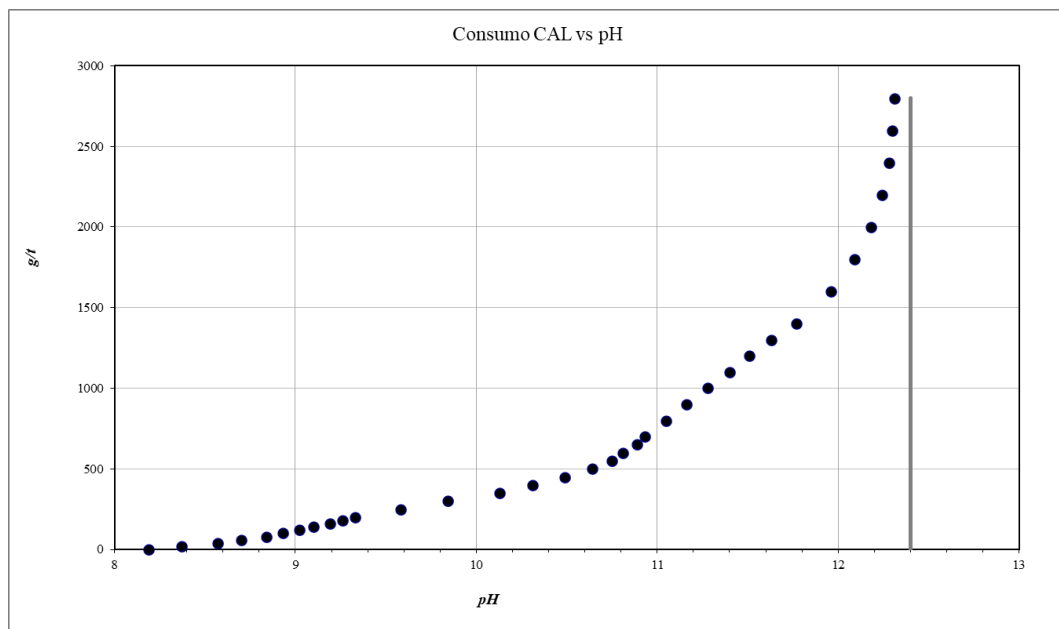
5.2. Discusión de resultados

Otros autores, frente a la presencia de arcillas recomiendan el uso de dispersantes como primera línea de acción. En las pruebas realizadas se observa que no tuvo un efecto beneficioso en la recuperación. Adicionalmente también en otros estudios se recomienda el uso del NaSH como elemento activador de los sulfuros de cobre alterados promoviendo de esta forma una mejora en la recuperación. Para el uso del NaSH, por la peligrosidad que tiene, es necesario un análisis ambiental y seguridad exhaustivo por lo cual no se incluye en este estudio como alternativa dado que la planta ya se encuentra en operación.

Otra recomendación que normalmente se tiene por diferentes autores es la dilución. En nuestro estudio si se encontró efecto en la dilución, pero a valores inferiores al 30 %. Mayor dilución también implica menor tiempo de residencia lo cual también es perjudicial para la recuperación. Adicionalmente, mayor dilución implica mayores flujos, lo cual implica en el caso de las *rougher*, mayor tamaño de válvulas de transferencia y canaletas. Este tipo de consideraciones normalmente no se tienen en cuenta en los estudios técnicos, razón por lo cual muchas veces estas iniciativas no son posibles.

Un caso similar sucede con el pH, puesto que en la mayoría de las plantas concentradoras se preparan por medio de apagadores, los cuales tienen una capacidad diseñada para llegar a una temperatura de apagado. La necesidad de adicionar la cal para llegar a un pH mayor no es lineal si no exponencial, tal como se muestra en la Figura 25. Llegar a un pH alto de 11 puede requerir 4 a 5 veces el consumo de cal estándar. La implementación de propuestas de este tipo puede tener un CAPEX muy elevado incluyendo ampliaciones de plantas de cal y sistemas de apagado.

Figura 25
Consumo de cal vs pH



La mayor liberación siempre significará sacrificio de tonelaje. Estudios realizados por muchos autores indican como línea de acción mejorar la liberación.

La mayor parte de veces se tiene un efecto positivo, pero en todo sistema de molienda reducir el P_{80} necesariamente implica un sacrificio en tonelaje que normalmente en los análisis económicos tiende a ser más perjudicial que la pérdida en recuperación.

CONCLUSIONES

Tras la evaluación de los resultados y en base a los objetivos de la investigación, se concluye:

1. La estrategia analizada para este mineral mejoró significativamente la recuperación de cobre de 72.3 % a 88.7 %, a través de la realización de *blendings*, o mezclas controladas, en el cual este mineral de metalurgia complicada se mezcle con mineral de buena respuesta metalúrgica en proporción no mayor a 15%. Junto con esto también se determina la respuesta positiva en la recuperación de Cobre con el cambio en la fórmula colectora a una base de Tionocarbamato.
2. La presencia de arcillas, carbonatos y cloritas perjudican significativamente la recuperación. Estas recubren las partículas impidiendo la buena adsorción de los colectores, evitando la flotabilidad de los sulfuros de cobre.
3. Respecto a las variables operacionales como la granulometría, porcentaje de sólidos y pH, se tiene el mayor efecto en la granulometría. El mineral es sensible a la liberación, pero esto en aplicación industrial significa pérdida de tonelaje que debe ser evaluada. El pH obtiene buena respuesta por encima de 11, lo cual

implica altas tasas de preparación de lechada. El sólido obtiene buena respuesta en diluciones de 25 % lo cual también debe ser evaluado en costo beneficio por el impacto en el tiempo de residencia.

4. El cambio de colectores logro una mejora en la recuperación de cobre, obteniendo una mejora de 2 % con la combinación de colectores AP 8761 como secundario y AP 404 como terciario a base de Tionocarbamato. Esta opción es de inmediata aplicación y con efecto económico positivo.

5. El *blending* del mineral de brecha alterada con mineral de buena respuesta metalúrgica a una proporción de 25 % : 75 % respectivamente mejoró de manera significativa la recuperación de cobre de 70.99 % a 82.85 %. De acuerdo a los resultados de las pruebas se sugiere un *blending* máximo de 15 % para obtener recuperaciones por encima de 83 % dentro de lo esperado por los planes de producción.

RECOMENDACIONES

A continuación, se presenta algunas recomendaciones para ser consideradas para la optimización en el tratamiento de minerales tipo brecha alterada:

1. Dado la complejidad de los minerales en el Perú debido a la variada geología, se recomienda extender los estudios de estos minerales problema a lo referido a las respuestas metalúrgicas. El logro de buenas respuestas metalúrgicas puede significar hacer económicos yacimientos que en la actualidad no lo son.
2. En este estudio se hace uso de la difracción de rayos x como herramientas de caracterización y de predicción de propiedades geometalúrgicas de las muestras analizadas. Esta práctica de uso de la difracción de rayos x trae mucho valor y su uso debería ser fomentado y su costo beneficio continuar siendo analizado.
3. Es necesario continuar con la investigación a nivel académico empresarial de nuevas fórmulas colectoras adaptadas a la realidad de nuestros minerales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Libros, Revistas y Tesis

Azañero, O. (2015). Flotación y Concentración de minerales. Editorial Colecciones Jóvic.

Bairagi, V. y Munot, M. (2019). Research Methodology: A Practical and Scientific Approach. New York, EEUU: Taylor & Francis Group. 1 Ed.

Bulatovic, S. (2007). Handbook of flotation reagents. Publisher by Elsevier.

Cánepa, C. y Manzaneda, J. (2005). La microscopia Óptica y los Procesos Metalúrgicos XXVII Convención Minera. Trabajo Técnico TT-105.

Celik, M., Elma, I., Hancer, M. y Miller, J. (1998). Effect of insitu ultrasonic treatment on the floatability of slime coated colemanite. In: Proceedings of the International Mineral Processing 7th Symposium.

Cytec. (2002). Manual de Productos Químicos para Minería. Cytec Industries Inc.

Davenport, W. (2002). Extractive Metallurgy of Copper. 4 Ed., 460 pp.

Fuerstenau, M., Graeme, J. y Yoon, R. (2009). Froth flotation: A century of innovation. Edited by SMME.

- Ipanaqué, O. y López, P. (2008). Caracterización y optimización de flotación a nivel laboratorio del mineral de cobre de la minera Candelaria. Universidad Nacional Mayor De San Marcos. Perú.
- Kelly, E. y Spottiswood, D. (1990). Introducción al procesamiento de minerales. Editorial LIMUSA.
- Klimpel, R., Dhansen, R. y Fee, B. (1986). Selection of Flotation Reagents for Mineral Flotation. En su: Design and Installation of Concentration and Dewatering Circuit, Ed. A.L. Mular and M.A. Anderson, Capítulo 26: 384-404.
- Leja, J. (1981). Surface Chemistry of froth flotation. Edited by SMME.
- Linares, N. (2004). Curso de Flotación. Capítulo 2: Agentes Químicos para flotación de espumas. En Curso de Capacitación de Flotación. South Service Engineers. Cuajone, Perú.
- Lobos, L. (2015). Evaluación del Uso de Nash en el Circuito de Flotación Selectiva de Molibdeno de los Pelambres. Universidad de Chile. Chile.
- Morell, S., Dondero, A. y Fernández, J. (2014). Propuesta modificación circuito planta flotación colectiva Cu-Mo en planta concentrado el Chavay, MLP. Pontificia Universidad Católica de Valparaiso. Chile.

- Ndoro, T. y Witika, L. (2017). A Review of the Flotation of Copper Minerals. *International Journal of Sciences: Basic and Applied Research (IJSBAR)*. 34. 145-165.
- Pimienta, J. y De la Orden, A. (2017). *Metodología de la Investigación*. México: Grupo Editorial Patria. 3 Ed.
- Quast, K., Ding, L., Fornasiero, D. y Ralston, J. (2008). Effect of slime clay particles on coal flotation. In: *Proceedings of Chemeca 2008*, Newcastle, September 28– October 1, Australia.
- Vianna, S. (2004). *The Effect of Particle Size, Collector Coverage and Liberation on the Floatability of Galena Particles in an Ore*. University of Queensland. Australia.
- Wang, D. (2016). *Flotation Reagents: Applied surface chemistry on minerals flotation and energy resources beneficiation*. Volume 1. Elsevier.
- Wills, B. y Finch, J. (2016). *Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery*. Eighth Edition. Elsevier.
- Yianatos, J. (2005). *Flotación de Minerales*. Universidad Técnica Federico Santa María. Chile.

Webgrafía.

Cedillo, P. (1980). Control mineralógico de procesos metalúrgicos. Recuperado de https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/publicaciones/ing_geologo/n17_1980/a02.pdf

Chen, X. y Peng, Y. (2018). Managing clay minerals in froth flotation - A critical review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 39. 1-19. 10.1080/08827508.2018.1433175.

Del Ramo, A. y Guillen, F. (2007). Los minerales. Recuperado de https://www.regmurcia.com/servlet/s.SI?sit=c,365,m,108&r=ReP-8189-DETALLE_REPORTAJESPADRE.

Farrokhpay, S. y Bradshaw, D. (2012). Effect of clay minerals on froth stability in mineral flotation: a review. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/256465368_Effect_of_clay_minerals_on_froth_stability_in_mineral_flotation_a_review

Gil, P. (2013). Microscopio Petrográfico. Recuperado de <http://www.ehu.eus/mineralogiaoptica/el-microscopio-petrografico.html>.

Jeldres, R., Uribe, L., Cisternas, A., Gutiérrez, L., Leiva, W. y Valenzuela, J. (2019). The effect of clay minerals on the process of flotation of copper ores – A critical review. Recuperado de

https://www.researchgate.net/publication/330662071_The_effect_of_clay_minerals_on_the_process_of_flotation_of_copper_ores-A_critical_review/link/5d3b42ba299bf1995b4e3b03/download

Juan, Á., Sedano, M., y Vila, A. (2015). “Distribuciones muestrales”. Proyecto Math. Universitat Oberta de Catalunya. España. Recuperado de https://moodle2.unid.edu.mx/dts_cursos_mdl/pos/ME/TD/AM/07/La_distribucion_normal.pdf

Maksaev, V. (2015). Brechas Relacionadas a Mineralización. URL <https://www.medellin.unal.edu.co/~rrodriguez/victor-maksaev/BRECHA-RELACIONADAS-a-MINERALIZACION.pdf>.

Malm, L. (2019). Sampling from large flotation cells. Recuperado de <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1287186/FULLTEXT01.pdf>

Nagaraj, D. (2005). Minerals recovery and processing. Recuperado de <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/0471238961.1309140514010701.a01.pub2>

Oats, W., Ozdemir, O. y Nguyen, A. (2010). Effect of mechanical and chemical clay removals by hydrocyclone and dispersants on coal flotation. *Miner. Eng.* 23, 413–419. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2009.12.002>.

Pozo, M. (2019). El papel de la caracterización mineralógica y geoquímica en el estudio de las culturas antiguas: ejemplos de excavaciones españolas en Oriente. *ISIMU*, 22, 93–106. Recuperado de <https://doi.org/10.15366/isimu2019.22.004>.

SGS. (2005). Capacidad de la Mineralogía. Recuperado de <https://www.sgs.pe/-/media/local/mexico/documents/flyers-and-leaflets/sgs-min-357-mineralogy-capabilities-sp-05-05.pdf>.

Silvester, E. y Bruckard, W. (2013). Surface and chemical properties of chlorite in relation to its flotation and depression. Recuperado de <https://doi.org/10.1179/1743285510Y.0000000009>.