

2022-10

Estudio del efecto de calidad de agua en el proceso de flotación de planta concentradora El Soldado

Pizarro Flores, Vania Delia

<https://hdl.handle.net/11673/54648>

Repositorio Digital USM, UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL
VALPARAÍSO – CHILE



ESTUDIO DEL EFECTO DE CALIDAD DE AGUA EN EL PROCESO DE FLOTACIÓN DE PLANTA CONCENTRADORA EL SOLDADO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL QUÍMICO

AUTORA

VANIA DELIA PIZARRO FLORES

PROFESOR GUÍA

DR. JUAN YIANATOS B.

PROFESORA CO-REFERENTE

M. SC. PAULINA VALLEJOS A.

INGENIERO CO-REFERENTE

ING. JAIME ZÚÑIGA A.

OCTUBRE 2022

Agradecimientos

Primero que todo, mis infinitos agradecimientos a mis padres, Ximena Flores Cabrera y Mauricio Pizarro Montiel, por haberme entregado educación y valores durante el transcurso de la vida, gracias a ellos puedo ser la persona que soy hoy. Agradezco las herramientas que me han facilitado para mi desarrollo personal en diferentes ámbitos, y el apoyo que me han entregado siempre. A mi mamá por hacer todo para que tuviera todas las condiciones para desarrollarme. A mi papá por su constante entrega en apoyo emocional y su transmisión de motivación para nunca decaer.

A mi compañero de vida, mi gran equipo, Matías Collao Fariña, quien ha sido un apoyo fundamental en el desarrollo de este trabajo de título, por nunca dejarme sola y estar conmigo en todos los momentos, tanto buenos como malos. Admiro su inteligencia y sus valores con los que enfrenta la vida. Agradezco también a toda su familia, quienes me han hecho sentir parte de ellos sin excepción, entregándome su amor incondicionalmente.

A mi amiga, mi hermana de otra madre, Carolina León Cisternas, quien ha sido mi compañera de las más duras batallas y las mejores alegrías desde que cruzamos nuestros caminos. Agradezco su comprensión y paciencia infinita, sus retos, su apoyo y esa entereza y resiliencia que demuestra ante la vida. Transmito mi profunda admiración por ella.

A todos mis amigos de la universidad, quienes han sido fundamental en este proceso, con esas largas noches de estudio, días y noches de fiestas, salidas a pasear, onces, largas conversaciones de reflexión y muchos otros panoramas. Agradezco por todo lo que tanto explícita como implícitamente me han enseñado en este período universitario.

A todos los profesores y académicos que han aportado en mi aprendizaje durante el transcurso de la carrera. Especialmente, a mi profesor guía, Juan Yianatos, quien me ha entregado su apoyo desde el primer día en que comenzó este trabajo de título, enfocándose siempre en la orientación del trabajo con foco en el aprendizaje, con constante vocación. A mi profesora co-referente, Paulina Vallejos, quien ha sido un modelo en cuanto a la inserción del género femenino en temáticas de investigación en área minera.

Finalmente, agradezco a mis tutores de División El Soldado, Jaime Zúñiga y Nelson Iglesias, quienes siempre tuvieron la disposición de orientarme en este trabajo entregándome sus conocimientos y experiencias relacionadas. También, agradezco a todo el equipo de trabajo de El Soldado que fue parte de este proceso, Raúl Mercado, Juan Barraza, Juan Cabrera, Simón Colileo, Nicolás Zitko; por transmitirme sus conocimientos y su disposición a contribuir desde sus áreas en este trabajo.

Resumen Ejecutivo

En la actualidad existe un déficit de fuentes de agua fresca a nivel mundial, el cual se ha ido incrementando en los últimos años. Por ello, las operaciones de la minería chilena, como Anglo American, División El Soldado, han buscado alternativas de mitigación del impacto ambiental en materia hídrica, donde la más importante y ampliamente utilizada es la recirculación del agua de procesamiento. En El Soldado, la recirculación de agua es de aproximadamente 80%. El alcance de esta investigación fue evaluar el impacto de tres fuentes de agua de El Soldado, correspondientes a Agua Fresca, Agua de Procesos y Agua Balsa Tranque; donde esta última es agua recirculada en su mayor proporción. Un análisis químico de calidad de agua reportó que Agua de Procesos y Agua Balsa Tranque poseen un alto contenido de sulfatos, calcio, magnesio, entre otros componentes inorgánicos y orgánicos, que generan efectos inhibidores en la flotación de sulfuros de cobre.

Según la literatura, los iones de dureza, como calcio y magnesio, son iones que hidrolizan y forman especies complejos de hidróxidos, o también llamados hidroxicomplejos o especies precipitadas. Ambas especies generan efectos negativos en la formación del agregado partícula – burbuja en la flotación, por ende, disminuyen la recuperación del mineral. El Soldado es un yacimiento que tiene alto contenido de minerales silíceos arcillosos, los cuales forman parte de la pulpa mineral que alimenta a la flotación, por lo que, en presencia de iones hidrolizados de calcio y magnesio, se produce un fenómeno coloidal llamado heterocoagulación, donde las partículas de minerales de cobre son recubiertas por las partículas arcillosas, que por naturaleza son más finas, lo cual se genera por diferencias de cargas superficiales. Estas diferencias de cargas son inducidas por la presencia de iones hidrolizados en el medio de flotación, dado que producen modificación en el Potencial Zeta del mineral de cobre, inhibiendo así un buen rendimiento en la flotación. Para mitigar estos efectos, se estudió la factibilidad técnica de implementar pretratamientos de aguas y otras alternativas de flotación. Estas alternativas fueron el aumento de la conductividad del Agua de Procesos y la adición de reactivos dispersantes, las cuales no mostraron efectos positivos, por lo que fueron descartadas. Respecto a los pretratamientos de aguas, se implementó en primera instancia un ablandamiento químico, el cual se centró en la remoción de calcio y magnesio mediante precipitación y filtrado a un pH de operación 11,5 para asegurar la especiación de las moléculas precipitadas. De aquí, al realizar las pruebas de flotación *batch* con dos fuentes minerales, un mineral de sondaje del modelo minero de largo plazo y de un compósito de sondajes del modelo minero de corto plazo, aumentó la recuperación mineral en un 3,7% en el sondaje de largo plazo y 2,9% en el compósito de corto plazo, para el Agua Fresca; las otras fuentes de agua no mostraron mejores resultados. No obstante, se implementó un pretratamiento de remoción de sulfatos, mediante su precipitación química por solución de cloruro de bario, en el Agua de Procesos posterior al ablandamiento químico, donde, al realizar las pruebas de flotación *batch* utilizando mineral de compósito como alimentación, la recuperación aumentó un 3,1% respecto del caso base sin remoción de sulfatos, escogiendo esta última como la mejor alternativa para solución de la problemática. Al respecto, se determinó que el efecto inhibidor de sulfatos es mayor que el producido por los iones hidrolizados.

Índice General

Agradecimientos.....	2
Resumen Ejecutivo.....	3
Índice General	4
Índice de Figuras.....	7
Índice de Tablas	9
Nomenclatura	10
Introducción	11
Objetivos y Alcances	12
Objetivo General	12
Objetivos Específicos.....	12
Capítulo 1: Antecedentes Generales	13
1.1. Minería y mercado del Cobre	13
1.2. División El Soldado	16
1.2.1. Ubicación	16
1.2.2. Mineralogía	18
1.2.3. Proceso productivo	18
1.2.4. Laboratorio Metalúrgico	21
Capítulo 2: El proceso de flotación y la relevancia de la calidad del agua	22
2.1. Fenomenología de flotación de minerales	22
2.1.1. Reactivos de flotación	24
2.1.2. Potencial zeta.....	26
2.1.3. Efecto cubrimiento superficial de mineral	28
2.1.4. Cinética de flotación	28
2.2. Efecto de la calidad de agua en el rendimiento del proceso de flotación	30
2.2.1. Impurezas en el agua en flotación.....	30
2.2.2. Hidrólisis iónica.....	31
2.2.3. Heterocoagulación	32
2.2.4. Efecto de agua salina	33
Capítulo 3: Procedimiento Experimental	36
3.1. Fuentes de Agua El Soldado	36
3.1.1. Agua Fresca	36
3.1.2. Agua Balsa Tranque	36

3.1.3. Agua de Procesos	37
3.2. Pretratamiento de ablandamiento químico de agua	37
3.3. Análisis Químico de Aguas	41
3.4. Matriz de pruebas de flotación <i>batch</i> para evaluar efecto de pretratamiento de ablandamiento de aguas.....	41
3.5. Alternativas de mejora en flotación con agua de procesos	42
3.5.1. Adición de reactivos dispersantes	42
3.5.2. Pruebas con Agua de Procesos salobre	43
3.5.3. Eliminación de Sulfatos en Agua de Procesos	44
3.5.4. Matriz de pruebas de flotación <i>batch</i> para evaluar efecto de remoción de sulfatos...46	
Capítulo 4: Resultados, análisis y discusión de resultados	47
4.1. Aplicación de pretratamiento de ablandamiento químico de aguas	47
4.2. Mineralogía	50
4.3. Matriz de pruebas de flotación para evaluar pretratamiento de ablandamiento de aguas	54
4.4. Adición de reactivos dispersantes en flotación <i>batch</i>	59
4.5. Pruebas de flotación con Agua de Procesos Salobre	60
4.6. Aplicación de pretratamiento de remoción de sulfatos del Agua de Procesos	60
4.7. Matriz de pruebas de flotación <i>batch</i> para evaluar efecto de remoción de sulfatos ..61	
Capítulo 5: Conclusiones y Recomendaciones	64
5.1. Conclusiones	64
5.2. Recomendaciones.....	65
Referencias.....	66
Anexos	70
Anexo 1: Diagrama de flujo de procesos de flotaciones CPF y arenas-lamas de El Soldado.	70
Anexo 2: Diagrama de especiación de iones calcio y magnesio	72
Anexo 3: Curva de Cal en Agua de Procesos.....	73
Anexo 4: Procedimiento estándar prueba de cinética de flotación <i>batch</i> de tipo rougher en Laboratorio Metalúrgico.	74
Anexo 5: Procedimiento Laboratorio Metalúrgico El Soldado para preparación de cargas para molienda.....	76
Anexo 6: Procedimiento Laboratorio Metalúrgico de El Soldado para pruebas de molienda	78
Anexo 7: Estequiometría de reacción de precipitación de sulfato de bario insoluble	80

Anexo 8: Resultados de análisis químico de calidad de aguas y sus pretratamientos de ablandamiento	84
Anexo 9: Resultados de análisis químico de calidad de Agua de Procesos y pretratamiento de remoción de sulfatos.....	86
Anexo 10: Cinéticas de flotación batch considerando pretratamiento de ablandamiento químico.....	88
Anexo 11: Cinéticas de flotación batch considerando pretratamiento de remoción de sulfatos.	91

Índice de Figuras

Figura 1.1. Precios oficiales de Cobre por toneladas en USD en 2021 (London Metal Exchange, 2022).	15
Figura 1.2. Registro de mapa satelital de la ubicación de las dependencias de División El Soldado.	17
Figura 1.3. Representación gráfica de las zonas relevantes en el proceso productivo de El Soldado (Lopez, 2022).	17
Figura 1.4. Proceso productivo de División El Soldado (Anglo American, 2022).	18
Figura 1.5. Diagrama de bloques del proceso en Planta El Soldado.	20
Figura 1.6. Diagrama de flujo de procesos de flotación sulfuros.	21
Figura 2.1. Esquema del principio de separación por flotación de espuma (Yianatos y Vinnett, 2015).	22
Figura 2.2. Esquema del proceso de flotación de espuma (Yianatos & Vinnett, 2015).	23
Figura 2.3. Representación de una celda de flotación como caja negra.	24
Figura 2.4. Adsorción de un reactivo colector en una partícula mineral (Yianatos & Vinnett, 2015).	25
Figura 2.5. Adhesión de un reactivo espumante a la superficie de una burbuja de gas (Yianatos y Vinnett, 2015).	25
Figura 2.6. Representación gráfica de la relación de la teoría de la doble capa eléctrica y el Potencial Zeta (Yianatos y Vinnett, 2015).	27
Figura 2.7. Efecto cubrimiento superficial en una partícula mineral (Jeldres, et. al, 2019).	28
Figura 2.8. Analogía de fenomenología de flotación respecto a una reacción química, para modelar la cinética de flotación (Yianatos & Vinnett, 2015).	29
Figura 2.9. Diagrama general de flujo de suministro de agua para flotación (Türk, et. al., 2019).	31
Figura 3.1. Medición de pH para pretratamiento de aguas en Laboratorio Metalúrgico El Soldado.	39
Figura 3.2. Sistema de filtrado al vacío para pretratamiento de aguas en Laboratorio Metalúrgico El Soldado.	40
Figura 3.3. Solución salina de KCl y NaCl agregada al Agua de Procesos (Biosal).	43
Figura 3.4. Sistema de preparación de Agua de Procesos Salobre.	44
Figura 3.5. Cloruro de bario deshidratado sólido en su formato comercial de 1 [kg].	45
Figura 4.1. Contenido de iones calcio y magnesio en aguas con y sin pretratamiento.	47
Figura 4.2. Concentración de ion sulfato en aguas con y sin pretratamiento.	48
Figura 4.3. Concentración de sodio en aguas con y sin pretratamiento.	49
Figura 4.4. Conductividad en aguas con y sin pretratamiento.	49
Figura 4.5. Minerales de cobre contenidos en <i>MET-01021</i> y <i>CP Matriz</i> .	50
Figura 4.6. Mineralogía de ganga silíceas presente en <i>MET-01021</i> y <i>CP Matriz</i> .	51
Figura 4.7. Distribución de sulfuros de cobre según grados de liberación.	52

Figura 4.8. Porcentaje de minerales de cobre contenidos en muestra mineral <i>MET-01021</i> , según grados de liberación y clases de tamaño.	53
Figura 4.9. Porcentaje de minerales de cobre contenido en muestra mineral <i>CP Matriz</i> , según grados de liberación y clases de tamaño.	53
Figura 4.10. Cinética de recuperación de cobre fino por flotación batch con mineral <i>MET-01021</i>	56
Figura 4.11. Cinética de recuperación de cobre fino por flotación batch con mineral <i>CP Matriz</i>	57
Figura 4.12. Comparación entre cinéticas de flotación batch experimental utilizando Agua Fresca Pretratada.	58
Figura 4.13. Concentración de sulfato en Agua de Procesos ("AP") con y sin tratamiento de remoción de sulfatos con las distintas dosis de cloruro de bario acuoso al 5% en peso.	61
Figura 4.14. Cinética de recuperación de cobre fino en flotación batch, evaluando pretratamientos de remoción de sulfato y de ablandamiento en Agua de Procesos.	63
Figura 6.1. Diagrama de flujo de procesos de flotación <i>CPF</i>	70
Figura 6.2. Diagrama de flujo de procesos de flotación arenas-lamas.	71
Figura 6.3. Diagrama de especiación de ion calcio en presencia de ion carbonato en función del pH (Hirajima, et. al, 2016).	72
Figura 6.4. Diagrama de especiación de ion magnesio en función del pH (Fuente: Simulador de diagramas de equilibrio químico Hydra-Medusa).	72
Figura 6.5. Datos experimentales pH alcanzado según dosis de cal viva para Agua de Procesos.	73
Figura 6.6. Cinética de ley de concentrado de cobre por flotación batch con mineral <i>MET-01021</i>	88
Figura 6.7. Cinética de ley de concentrado de cobre por flotación batch con mineral <i>CP Matriz</i>	89
Figura 6.8. Cinética de recuperación másica por flotación batch con mineral <i>MET-01021</i>	89
Figura 6.9. Cinética de recuperación másica por flotación batch con mineral <i>CP Matriz</i>	90
Figura 6.10. Cinética de ley de concentrado de cobre por flotación batch evaluando pretratamientos en Agua de Procesos de remoción de sulfato y de ablandamiento.	91
Figura 6.11. Cinética de recuperación másica por flotación batch evaluando pretratamientos en Agua de Procesos de remoción de sulfato y de ablandamiento.	92

Índice de Tablas

Tabla 1.1. Propiedades químicas de cobre (Copper Development Association, 2022).....	13
Tabla 1.2. Minerales de Cobre (Okrusch y Frimmel, 2020).	14
Tabla 3.1. Caracterización de minerales de alimentación a utilizar en las pruebas experimentales. .	41
Tabla 3.2. Matriz de pruebas de flotación batch para evaluar pretratamiento de aguas.	42
Tabla 3.3. Reactivos dispersantes estudiados y sus características.	42
Tabla 3.4. Matriz de flotación para evaluar efectos de remoción de sulfatos.	46
Tabla 4.1. Resultados experimentales flotación batch para muestra mineral <i>MET-01021</i> evaluando alternativas con y sin pretratamiento de ablandamiento de aguas.....	54
Tabla 4.2. Resultados experimentales flotación batch para muestra mineral <i>CP Matriz</i> evaluando alternativas con y sin pretratamiento de ablandamiento de aguas.....	54
Tabla 4.3. Resultados experimentales flotación batch para muestra mineral <i>CP Matriz</i> evaluando alternativas adición de dispersantes.	59
Tabla 4.4. Resultados experimentales flotación batch para mineral <i>CP Matriz</i> , evaluando Agua de Procesos Salobre.	60
Tabla 4.5. Efecto en parámetros de flotación con remoción de sulfatos a diferentes dosis de cloruro de bario al 5% en peso y pretratamiento de ablandamiento de aguas.	62
Tabla 6.1. Estándar prueba cinética flotación batch tipo rougher de Laboratorio Metalúrgico (Anglo American División El Soldado, 2021).....	74
Tabla 6.2. Dosificación de reactivos en el tiempo de flotación batch para prueba cinética en Laboratorio Metalúrgico (Anglo American División El Soldado, 2021).....	74
Tabla 6.3. Tiempos de extracción de concentrados en estándar de flotación batch de Laboratorio Metalúrgico.	75
Tabla 6.4. Collar de bolas estándar según diámetro de bola seleccionado.....	78
Tabla 6.5. Análisis químico de aguas disponibles con y sin pretratamiento de ablandamiento, en [mg/L] (SGS, 2022).	84
Tabla 6.6 Análisis químico de Agua de Procesos con y sin pretratamiento de remoción de sulfatos (SGS, 2022).....	86

Nomenclatura

- **F:** Corriente de alimentación [kg/s].
- **C:** Corriente de concentrado [kg/s].
- **T:** Corriente de ganga, o llamada también corriente de cola [kg/s].
- **$x_{j,i}$:** Ley de mineral i en la corriente j .
- **R:** Recuperación de corte de mineral valioso.
- **$R_{m\acute{a}sica}$:** Recuperación másica de mineral valioso.
- **R_{∞} :** Recuperación máxima alcanzable en un tiempo que tiende a infinito.
- **k_{max} :** Constante máxima de cinética de flotación en modelo de Klimpel [min^{-1}].
- **t:** Tiempo de reacción de modelo de cinética de primer orden [s].
- **Me:** Elemento químico metal.
- **n:** magnitud de la carga del metal que va a interactuar en una reacción de hidrólisis iónica.
- **y:** número de moles de iones hidroxilo que reaccionan en una hidrólisis iónica.
- **%p/p:** Porcentaje de concentración en masa de un soluto respecto a la masa total de la solución.
- **A, B:** Reactivos A y B de una reacción química general.
- **a,b:** Número de moles de reactivos A y B de una reacción química general.
- **C, D:** Productos C y D de una reacción química general.
- **c,d:** Número de moles de reactivos C y D de una reacción química general.
- **[]_{eq}:** Concentración de un soluto en equilibrio en una solución.
- **K_{eq} :** Constante de equilibrio químico de una reacción química.
- **K_{ps} :** Constante de producto de solubilidad de una reacción química de precipitación.

Introducción

En el procesamiento de minerales, el proceso de flotación tiene un alto consumo de agua, y la calidad del agua utilizada afecta su rendimiento (Yang, et. al, 2021). En la actualidad existe una escasez crítica de fuentes de agua continental sumado a que se ha incrementado la demanda social por el acceso al agua fresca, lo que implica un déficit de fuentes de agua fresca para las empresas mineras, que han debido adoptar alternativas tales como, recirculación de agua del procesamiento, utilización de agua de mar en los procesos, ingreso de aguas industriales provenientes de residuos de otras industrias (Hirajima et. al, 2016). Las aguas recirculadas de los procesos mineros se saturan con sales solubles después del contacto con los minerales debido a la disolución y/u oxidación de estos durante la conminución, clasificación y flotación. Además, la recirculación de agua va aumentando las concentraciones de iones en el tiempo incrementando así la salinidad del agua, situación causada por los residuos de reactivos de flotación y del balance de aguas recirculadas, donde determinadas especies influyen negativamente en el rendimiento del proceso y en la flotación de minerales (Sinche-Gonzalez y Fornasiero, 2021). No obstante, el agua fresca se utiliza en la industria minera como fuente de agua de reposición, por lo que continúa siendo esencial, a pesar de que su consumo respecto a las fuentes de aguas recicladas sea mucho menor (Liu, et. al, 2013).

En Anglo American División El Soldado, se desarrolló un sistema de agua recirculada que permite reutilizar los recursos hídricos de los procesos mineros. De esta manera, el uso de agua fresca por tonelada de mineral tratado disminuye, logrando una recirculación de aguas de hasta un 80%. Además, se está implementando una Estrategia de Gestión Hídrica, que incorpora la búsqueda constante de soluciones innovadoras para hacer frente a la problemática actual, cuyos efectos son compartidos con las comunidades vecinas a la operación y con el resto del país. Esta estrategia tiene como base el aumento en la eficiencia del consumo de agua, implementando nuevas tecnologías y aumentando el conocimiento de los trabajadores y comunidades aledañas en materia hídrica, a través de la información y transparencia, contribuyendo así a la mejora continua (Anglo American, 2022).

Objetivos y Alcances

Objetivo General

Estudiar la calidad de las aguas disponibles para la operación en planta concentradora de Anglo American División El Soldado y evaluar el impacto que generan en la etapa de flotación de sulfuros de cobre, para proponer soluciones que mitiguen los efectos negativos.

Objetivos Específicos

- Caracterizar las diferentes calidades de agua disponibles según sus fuentes, analizando parámetros como, conductividad, pH, sólidos disueltos, concentración de iones, entre otros.
- Relacionar la calidad de fuentes de agua con el impacto que se puede generar en el procesamiento de minerales, específicamente en la flotación.
- Planificar una matriz de pruebas de flotación de tipo *batch* a escala laboratorio, para evaluar cuantitativamente el efecto de las distintas aguas disponibles en El Soldado, sobre la ley y recuperación del mineral.
- Comprobar la efectividad de alternativas propuestas para mejorar el rendimiento de flotación, a través de resultados experimentales de pruebas de flotación *batch*.

Capítulo 1: Antecedentes Generales

1.1. Minería y mercado del Cobre

El cobre es un elemento químico de tipo metal de color rojizo y brillo metálico, perteneciente a la Tabla Periódica de Elementos Químicos, del grupo de los metales de transición. Sus principales características químicas se muestran en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Propiedades químicas de cobre (Copper Development Association, 2022).

Símbolo Químico	Cu
Grupo (IUPAC)	11
Período	4
Número Atómico	29
Número Másico	63,546
Punto de Fusión [°C]	1.083
Punto de Ebullición [°C]	2.567
Densidad a 20 [°C] [g/cm³]	8,92
Dureza de Mohs	3
Electronegatividad de Pauling	1,90
Radio Atómico [pm]	127,8
Energía de Ionización [eV]	7,7264
Estados de Oxidación	+1 +2

El cobre posee diversas propiedades que hacen que sea un elemento valioso y de amplio uso, por ejemplo: tiene una alta resistencia a la corrosión, es el segundo elemento mejor conductor eléctrico y térmico, posee una alta ductilidad y maleabilidad, y contiene propiedades bactericidas (CODELCO Educa, 2018).

Dada la amplia cantidad de propiedades beneficiosas para el sector industrial, el cobre tiene gran aplicación en diversos sectores, tales como (BHP, 2019):

- Industria eléctrica y electrónica.
- Aire acondicionado.
- Sector automotriz y maquinaria pesada.
- Sector ERNC.
- Tuberías y cañerías.
- Industria de la construcción.
- Industria pecuaria.
- Fabricación de electrodomésticos y artículos de hogar.
- Fabricación de telas antibacterianas.
- Fabricación de aleaciones para aplicaciones industriales específicas.

El cobre se encuentra en la naturaleza contenido en minerales, por lo que se deben realizar determinados procesos industriales a la mena extraída desde los yacimientos mineros de

cobre, para obtener el concentrado de cobre y/o cobre metal de alta pureza (99,9%). Los minerales que contienen cobre en los yacimientos chilenos se muestran en la Tabla 1.2, donde se muestra la ley de cobre que contiene cada mineral.

Tabla 1.2. Minerales de Cobre (Okrusch y Frimmel, 2020).

Clasificación mineral	Mineral de cobre	Fórmula química	Ley de cobre [%]
Minerales primarios	Calcopirita	CuFeS_2	34,6
	Bornita	Cu_5FeS_4	63,3
Minerales secundarios	Calcosina	Cu_2S	79,9
	Covelita	CuS	66,5
	Malaquita	$\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$	57,5
	Azurita	$\text{Cu}_3[\text{CO}_3(\text{OH})]_2$	55,3
	Crisocola	$\text{CuO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	36,2
	Atacamita	$\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$	59,5
	Cuprita	Cu_2O	88,8
	Tenorita	CuO	79,9
	Antlerita	$\text{CuSO}_4 \cdot 2\text{Cu}(\text{OH})_2$	53,7
	Brochantita	$\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2$	56,2
	Enargita	Cu_3AsS_4	48,4

Existen minerales de cobre de tipo sulfurados y oxidados, siendo los minerales de cobre sulfurados el foco de este estudio, debido a que es la mineralogía extraída principalmente en El Soldado, en la actualidad.

La mineralogía de cobre sulfurado está presente en la corteza terrestre en leyes muy bajas en las menas extraídas directamente desde los yacimientos, por lo tanto, en primera instancia se busca concentrar estos minerales a través de procesos de conminución y selectividad del mineral. Aproximadamente el 80% de los minerales de cobre provienen desde menas sulfuradas, con bajas leyes de cobre, alrededor de entre 0,5 a 2%. En el producto del proceso de concentración de cobre por flotación, se obtienen concentrados en el rango aproximado de 20% a 30%. Luego, el concentrado ingresa a procesos de fundición (pirometalurgia), que varían según el concentrado y la planta procesadora, para finalmente culminar en la etapa de electro-refinación, obteniendo cobre metálico de alta pureza (Biswas y Davenport, 1993).

En Chile, la minería participa de forma relevante en la economía nacional. En el año 2020 la participación de la minería en el PIB alcanzó el 12,5% respecto del total de este indicador, y en éste, la participación de la minería del cobre fue de 11,2%. Chile, como mayor productor y exportador de cobre en el mundo, produjo 5.773.000 toneladas en el año 2020, que equivale al 28,5% de la producción mundial (SERNAGEOMIN, 2021). En los balances del año 2020 se reporta que Chile obtuvo el primer lugar en la producción de cobre, así como también en las producciones de renio, yodo y nitratos naturales. Además, se informó que el 23% de las reservas naturales de minerales de cobre están ubicadas en Chile, lo que permitió que la participación en exportaciones de cobre fuera de 29% respecto a las exportaciones a nivel mundial (SONAMI, 2021).

Al año 2021, las exportaciones de cobre, refinados y concentrados, a nivel mundial fueron de 37.408.164 toneladas, donde el aporte de las exportaciones chilenas en esa cifra fue de un 35% del total de las exportaciones mundiales. Este último dato, demuestra que Chile es el primer exportador mundial de cobre, seguido por Perú con un 18% y Australia con un 4,6%. El principal país importador de cobre es China, con una cantidad de 21.359.245 toneladas de cobre total en refinados y concentrados durante el 2021, siendo el 60% de la producción mundial, seguido por Japón con un 14% (Trade Map, 2022).

La bolsa de valores de metales, Bolsa de Comercio de Londres (*London Metal Exchange*, 2022) reportó variabilidad en el precio del cobre durante el año 2021, comportamiento representado en la Figura 1.1. En general, el precio del cobre refinado se define por variables internas y externas a la producción del mineral. En las internas, se define por factores que determinan los costos operacionales de los yacimientos mineros explotados y las plantas de procesamiento, donde el costo más destacado corresponde al de la mano de obra, con un 60% del total de costos operacionales (COCHILCO, 2015). Por otro lado, en factores externos se encuentran el precio del dólar, el precio del petróleo, la regulación de las bolsas de valores internacionales para metales, la situación *COVID-19*, entre otros factores macroeconómicos (COCHILCO, 2022).



Figura 1.1. Precios oficiales de Cobre por toneladas en USD en 2021 (London Metal Exchange, 2022).

Se proyecta que a fines del 2022 el cobre concluiría con un valor promedio anual de cobre refinado de 4,4 [USD/lb], mientras que en el 2023 se presentaría una baja en el valor promedio anual resultando en 3,95 [USD/lb] (COCHILCO, 2022). Según reporta COCHILCO en el Informe de Tendencias Mercado del Cobre perteneciente al análisis realizado en el primer trimestre de 2022, los principales factores que influyen en esta determinación son los siguientes:

- “Reducción de la tasa de expansión de la oferta mundial de cobre proyectada para 2022, desde 4,1% prevista el cuarto trimestre de 2021 a 3,6% en la presente actualización.
- A Febrero de 2022 la producción mundial de cobre no ha cumplido las expectativas generadas en el cuarto trimestre de 2021.
- La proyección de déficit de cobre para 2022 pasó de 31.000 toneladas (el cuarto trimestre de 2021) a 104.000 en la presente actualización.
- Durante el primer trimestre de 2022 los inventarios de cobre refinado disponibles en la Bolsa de Metales de Londres se han reducido más rápido que lo previsto.
- Rebotes de *COVID-19* en China estarían colapsando las cadenas de suministros.
- No se anticipó la guerra entre Rusia y Ucrania, la que aumentó abruptamente las expectativas de escasez de metal y elevó entre 15 y 20 centavos de dólar el promedio del precio *spot* del cobre.
- En 2021 Rusia produjo más de un millón de toneladas de cobre refinado. Actualmente las expectativas para 2022 son inciertas debido a los efectos de las sanciones económicas.
- El alza de la inflación global impulsada por el conflicto en Europa ha potenciado al cobre como un “activo de refugio”.”

1.2. División El Soldado

1.2.1. Ubicación

Empresa Anglo American Sur S.A. tiene domicilio oficial en Avenida Isidora Goyenechea 2800, Edificio Titanium piso 47, comuna Las Condes, Santiago, Chile. La División El Soldado está ubicada en la comuna de Nogales, en la zona de Cordillera de la Costa de El Melón, a 125 [km] al norte de Santiago (Figura 1.2.) y a una altura de 1000 [m] sobre el nivel del mar (Anglo American, 2022).



Figura 1.2. Registro de mapa satelital de la ubicación de las dependencias de División El Soldado.

El yacimiento mineral de la operación El Soldado es un depósito metalífero de cobre sulfurado de tamaño mediano. La operación es mayoritariamente propiedad de Anglo American. La mina de tipo rajo abierto, la planta concentradora y el tranque de relaves están ubicados dentro de las dependencias de la operación. En la Figura 1.3. se indican las ubicaciones geográficas de estas zonas relevantes (Lopez, 2022).

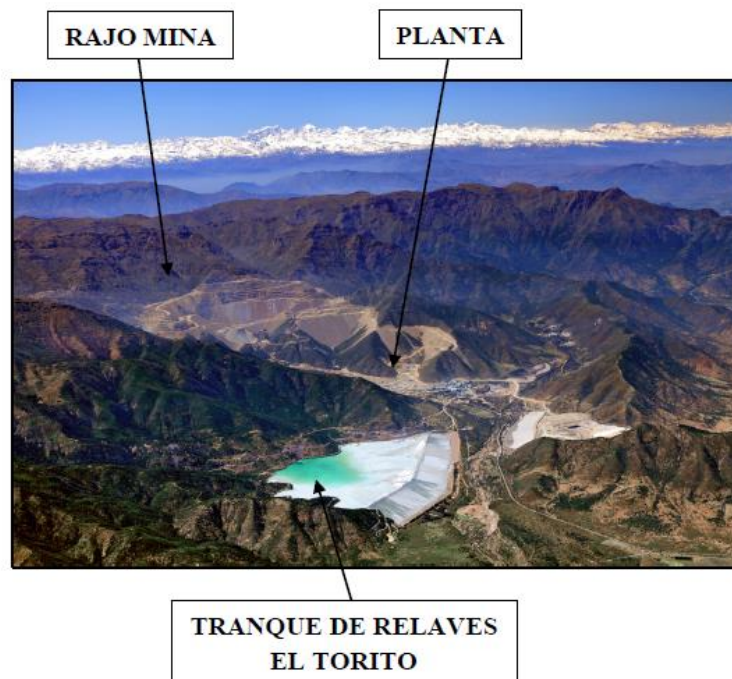


Figura 1.3. Representación gráfica de las zonas relevantes en el proceso productivo de El Soldado (Lopez, 2022).

1.2.2. Mineralogía

En la Mina El Soldado se ha registrado la existencia de determinados minerales de cobre, que son: calcopirita en mayor proporción, bornita, calcosina, y un escaso contenido de covelita; cuyas ocurrencias pueden estar diseminadas o concentradas en venillas.

Respecto a los minerales de ganga, hay presencia de alto contenido sílice, así como también en menor proporción pirita, calcita, clorita, feldespatos potásicos, hematita, cuarzo, rutilo, titanita y arcillas (Holmgren, 1987).

1.2.3. Proceso productivo

El proceso productivo de la Planta El Soldado tiene como objetivo producir concentrados de cobre, los cuales deben cumplir con determinados requisitos en cuanto a ley, contenido de hierro, humedad, entre otros. En promedio, los concentrados producidos contienen un 20% de ley, el cual puede ser levemente variable según el rendimiento de la planta.

La Figura 1.4. esquematiza el proceso productivo de El Soldado. Como paso final, se muestra que el concentrado de cobre es trasladado a las dependencias de División Fundición Chagres, perteneciente también a Anglo American, siendo una planta de fundición de concentrado de cobre que tiene como producto cobre metálico de alta pureza (Anglo American, 2022).

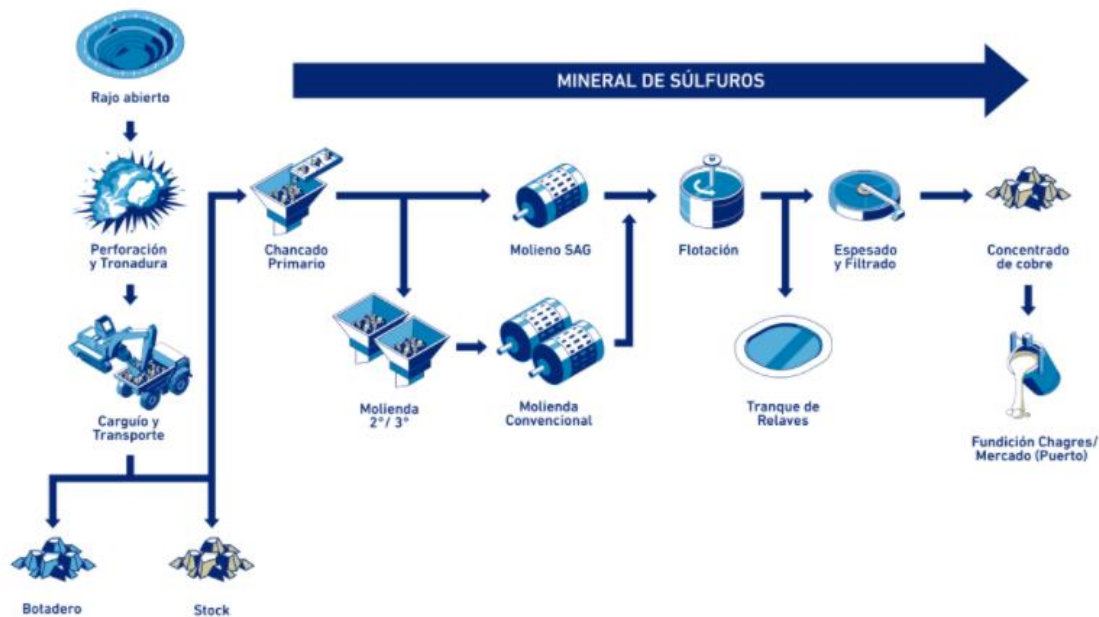


Figura 1.4. Proceso productivo de División El Soldado (Anglo American, 2022).

Respecto a las operaciones involucradas en el proceso general de la planta, la Figura 1.5. muestra el diagrama de bloques representativo del proceso. De aquí, se verifican tres principales etapas:

- **Conminución:** Corresponden a todas las operaciones de chancado y molienda involucradas en el proceso. Esta etapa tiene como objetivo reducir el tamaño del mineral de alimentación a una granulometría óptima definida según requerimientos metalúrgicos. En esta etapa están presentes las siguientes operaciones:
 - Chancado primario.
 - Chancado secundario y terciario.
 - Molienda Convencional.
 - Molienda SAG.
- **Flotación:** El objetivo es recuperar concentrado de cobre mediante la operación unitaria de flotación de espuma, que para el caso de la Planta El Soldado, hay tres etapas de flotación:
 - Flotación de sulfuros (flotación principal convencional con circuito RCS).
 - Flotación de partículas gruesas, *CPF* por sus siglas en inglés (*Coarse Particle Flotation*).
 - Flotación arenas-lamas.

La operación de los tres tipos de flotación en Planta El Soldado, tiene como objetivo aumentar recuperación global de concentrado de cobre.

- **Espesador y filtrado:** En esta etapa se elimina la humedad del concentrado de cobre, para trasladarlo hacia las canchas de acopio de concentrado, donde posteriormente es testeada la calidad de producto, que cumpliendo los parámetros de aseguramiento de calidad, es enviado hacia Fundición Chagres.

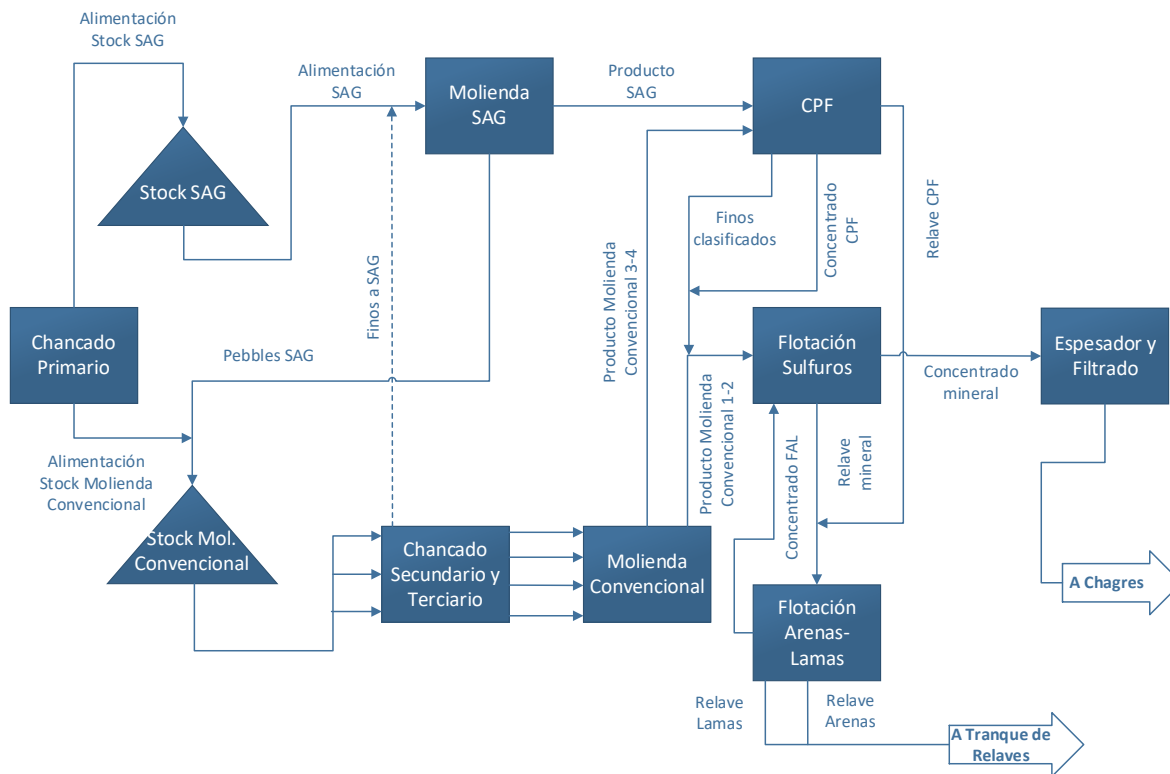


Figura 1.5. Diagrama de bloques del proceso en Planta El Soldado.

A continuación, en la Figura 1.6. se detalla el diagrama de flujo de procesos para la etapa de flotación sulfuros. En el Anexo 1 se representan los diagramas para las flotaciones CPF y arenas-lamas, a modo de complementar la comprensión de la conexión entre los procesos.

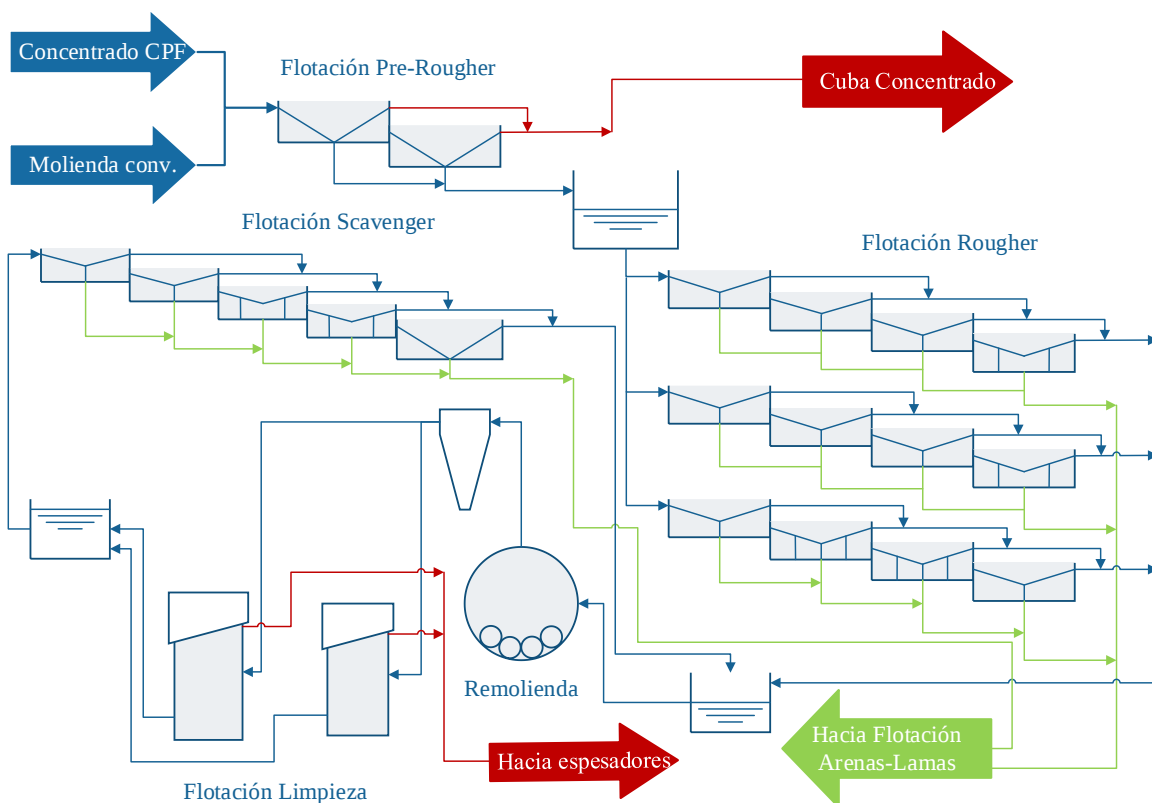


Figura 1.6. Diagrama de flujo de procesos de flotación sulfuros.

1.2.4. Laboratorio Metalúrgico

La operación El Soldado cuenta con un laboratorio metalúrgico que se emplaza en un edificio que se ubica aledaño a la planta concentradora, cuyas funciones principales corresponden al control y aseguramiento de calidad del concentrado, estimación de granulometría en planta, determinación del rendimiento de la planta, comprobar el funcionamiento de sensores de leyes industriales, entre otras. Para los controles de calidad respectivos se aplican operaciones de chancado, molienda, flotación, filtrado, secado, homogenización de compósitos minerales, entre otras; las cuales son realizadas a escala laboratorio representando el comportamiento metalúrgico de la planta, en forma estandarizada.

La distribución del laboratorio comprende áreas tales como, bodega de testigos, sala de chancado, sala de clasificación y homogenización de muestras, área de flotación *batch*, área de filtrado, área de secado, área compartida de tareas comunes, oficinas y bodega de reactivos e insumos.

Capítulo 2: El proceso de flotación y la relevancia de la calidad del agua

2.1. Fenomenología de flotación de minerales

La flotación de espuma, o simplemente “flotación”, es un proceso de separación fisicoquímica que ha sido aplicada en el procesamiento de minerales como principal método de concentración de minerales, así también como en otras industrias tales como, tratamiento de aguas, industria celulosa, reciclaje, entre otras. Este proceso se basa en la interacción entre burbujas y partículas finas de sólido suspendidas en agua, donde las partículas que ingresan al sistema colisionan con las burbujas por la acción de la disipación de energía agregada; de manera selectiva se adhieren para formar el agregado partícula-burbuja, acción denominada “colección”, llevándose a cabo en la zona donde se ubica la pulpa, denominada zona de colección. Una vez colectadas las partículas se transportan a la zona de espuma, donde se separan del mineral de ganga y se recuperan en la corriente de concentrado, siendo la corriente superior a la celda donde se extrae el mineral flotado (Yianatos y Vinnett, 2015).

La separación de minerales por flotación busca obtener el mineral de interés separado de los minerales de ganga, en base a la diferencia de propiedades superficiales de las partículas de los minerales contenidos en la pulpa a tratar. Estas diferencias permiten clasificar a las partículas como hidrófilas o hidrófobas, debiendo adoptar esta última característica el mineral de interés, dado que permite la acción de flotar al repeler el agua (Gao, et. al, 2021). En la Figura 2.1. se muestra esquemáticamente la adhesión de las partículas hidrófobas a la burbuja del sistema, generando el agregado partícula-burbuja y separándose así de las partículas hidrófilas.

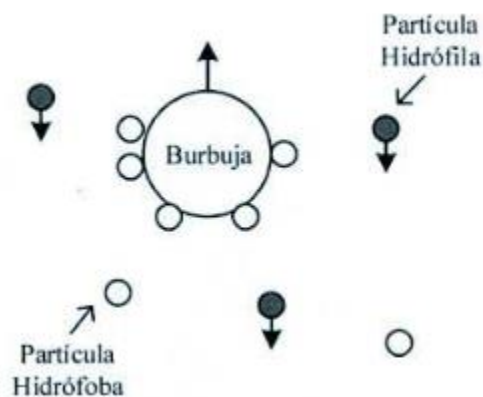


Figura 2.1. Esquema del principio de separación por flotación de espuma (Yianatos y Vinnett, 2015).

Una vez que las partículas se trasladan desde la pulpa hacia la espuma, en la zona de espuma se genera una segunda selectividad y recuperación de minerales, a través del drenaje de las partículas hidrófilas de ganga por retorno hacia la pulpa; para ello se requiere una espuma estable en términos de tamaño de burbuja y tensión superficial. Por lo tanto, la eficiencia total del proceso de flotación está determinada por las eficiencias de las zonas de colección y de

espuma, simultáneamente (Wang y Peng, 2014). En la Figura 2.2. se esquematiza la operación de una celda de flotación, considerando las zonas mencionadas y las corrientes principales.

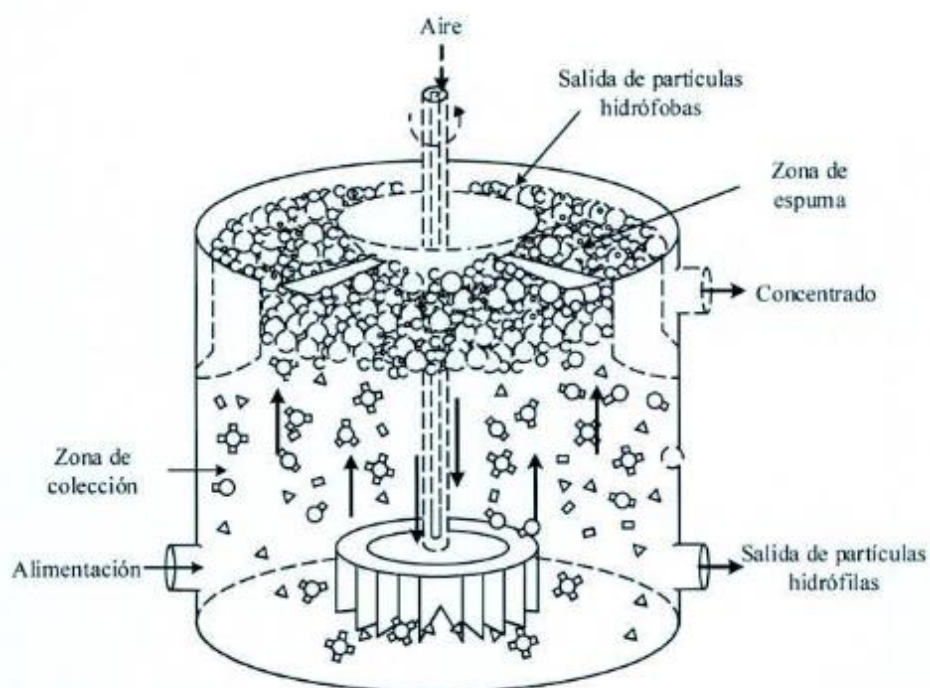


Figura 2.2. Esquema del proceso de flotación de espuma (Yianatos & Vinnett, 2015).

Del balance de masa de una celda de flotación, se puede determinar el parámetro más relevante en términos de obtención de mineral valioso, que es la recuperación de mineral. Este parámetro puede estar definido en función de la masa, representada por la ecuación 1, o en términos de recuperación de mineral fino, definida por la ecuación 2; siendo esta última la más determinante del rendimiento de flotación (Yianatos y Vinnett, 2015). En la Figura 2.3. se representa una celda de flotación como una caja negra, donde se describen las corrientes de alimentación, concentrado y cola, con las respectivas leyes medidas en cada una.

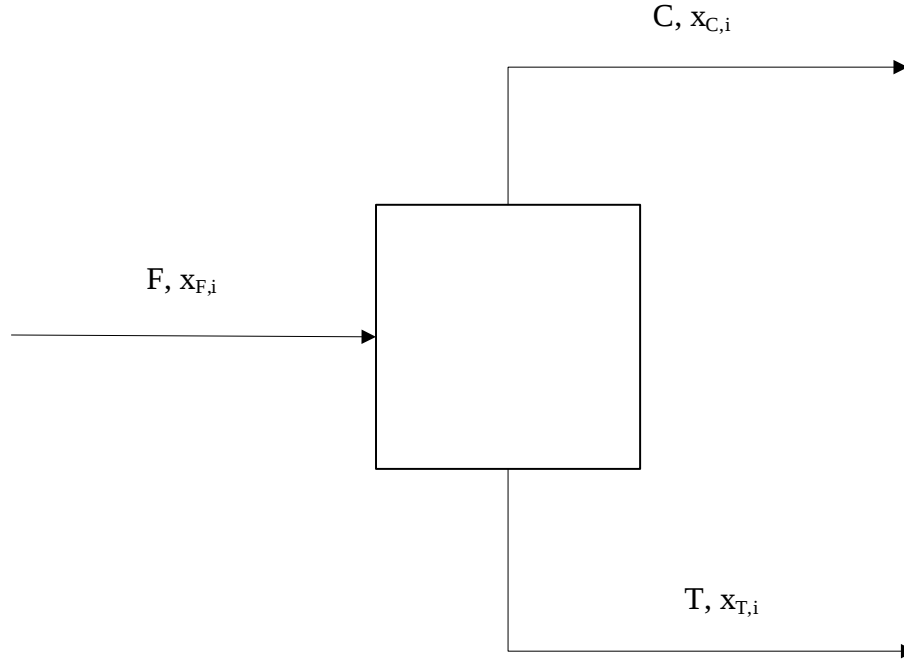


Figura 2.3. Representación de una celda de flotación como caja negra.

$$R_{m\acute{a}sica} = \frac{\text{masa de concentrado}}{\text{masa de alimentaci3n}} = \frac{C}{F} \quad [1]$$

$$R = \frac{\text{masa de mineral en conc.}}{\text{masa de mineral en alim.}} = \frac{C \cdot x_{C,i}}{F \cdot x_{F,i}} = \frac{x_{C,i} \cdot (x_{F,i} \cdot x_{T,i})}{x_{F,i} \cdot (x_{C,i} - x_{T,i})} \quad [2]$$

2.1.1. Reactivos de flotaci3n

En la flotaci3n de minerales sulfurados se utilizan distintos tipos de reactivos qu4micos para mejorar la selectividad y estabilidad del proceso (Yianatos y Vinnett, 2015). Estos pueden ser tanto org4nicos como inorg4nicos, dependiendo de la naturaleza del mineral a tratar y las caracter4sticas superficiales de 4ste. Estos reactivos se clasifican en colectores, espumantes, activadores, depresantes, dispersantes, floculantes y modificadores de pH (Fuerstenau y Han, 2003). A continuaci3n, se definen los m4s relevantes para el alcance de esta investigaci3n.

- *Colectores*

Los reactivos colectores tienen como objetivo promover la hidrofobicidad de un mineral de manera selectiva. Generalmente son sustancias org4nicas formadas con una cadena hidrocarbonatada, que es la parte apolar y un grupo funcional, que es la parte polar, los cuales pueden ser sulfonatos, fosfatos, carboxilatos, oximas, tiocarbonatos o aminas cati3nicas; dependiendo del grupo funcional, los colectores se clasifican en cati3nicos o ani3nicos. La

parte polar del colector se adsorbe en la superficie del mineral y la parte apolar queda orientada hacia la fase acuosa, otorgando de esta manera el carácter hidrófobo al mineral. Las partículas de mineral convertidas en hidrófobas por acción del colector se adhieren con mayor probabilidad a las burbujas de gas que ascienden en la pulpa (Yianatos y Vinnett, 2015; Fuerstenau y Han, 2003). En el caso de flotación de minerales sulfurados, se utilizan colectores aniónicos, caracterizados por la presencia de grupos tioles (McFadzean, et. al, 2015). En la Figura 2.4. se muestra la acción de los colectores.

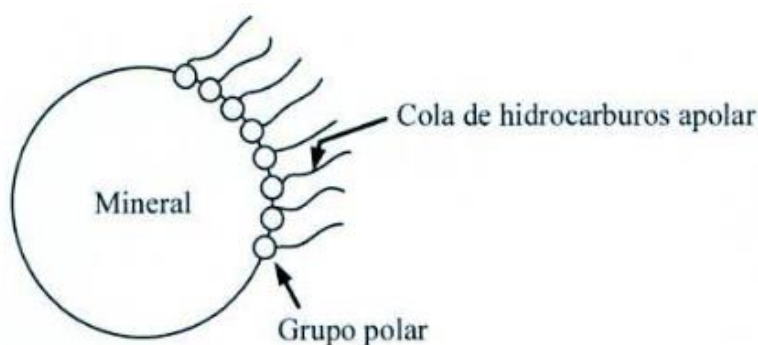


Figura 2.4. Adsorción de un reactivo colector en una partícula mineral (Yianatos & Vinnett, 2015).

- **Espumantes**

Los reactivos espumantes son compuestos surfactantes activos, es decir, modifican propiedades superficiales, en este caso de las burbujas de gas. Su función es disminuir la tensión superficial del agua y tienen la habilidad de adsorberse en la interfase entre la burbuja y el agua. Su presencia en la fase líquida incrementa la resistencia de película que rodea a las burbujas de gas, lo que genera una mayor adhesión de las partículas hidrófobas a las burbujas. La tensión superficial afecta también al tamaño de burbuja, por lo que la acción del espumante genera burbujas de menor tamaño, reduciendo el efecto de coalescencia (Bulatovic, 2007). Los espumantes están constituidos por una parte polar, formada principalmente por iones hidroxilo (OH^-) que se orienta hacia la fase líquida y una parte apolar de cadena de hidrocarburos que se orienta hacia la fase gaseosa. En la Figura 2.5. se muestra la acción de los espumantes.

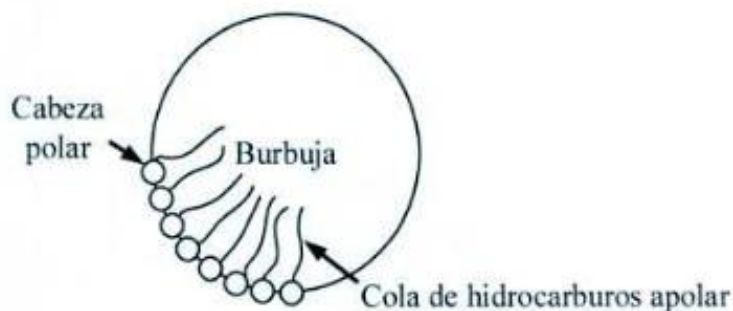


Figura 2.5. Adhesión de un reactivo espumante a la superficie de una burbuja de gas (Yianatos y Vinnett, 2015).

- *Dispersantes*

La flotación suele estar en parte obstaculizada por la presencia de partículas ultrafinas denominadas “lamas”. Estas lamas recubren la superficie de los minerales y genera una menor área de adsorción disponible para los reactivos colectores (Fuerstenau y Han, 2003). Los reactivos de flotación del tipo dispersantes son compuestos químicos que tienen la capacidad de disminuir la viscosidad de una suspensión, mediante el aumento de repulsión por fuerzas electrostáticas o interacciones de tipo *Van der Waals* entre partículas. Este efecto permite que la pulpa sea más dispersa, inhibiendo de esta manera los efectos negativos producidos por las cargas y/o morfología de las partículas finas que conforman la pulpa mineral, mejorando la recuperación y selectividad del mineral de interés (Yu, et. al, 2017). La naturaleza química del dispersante es esencial en la dispersión de la pulpa mineral, y su elección debe ser acorde a la mineralogía de la pulpa (Farrokhpay, et al., 2005).

- *Modificadores de pH*

El pH del medio de flotación debe ser continuamente controlado para maximizar la recuperación y selectividad. Para ello, se agregan dosis de reactivos que modifiquen el pH, es decir, se agregan bases o ácidos al sistema, según el requerimiento que corresponda. Los reactivos más utilizados en la industria corresponden a lechada de cal, hidróxido de sodio, carbonato de sodio, amoníaco, ácido clorhídrico, ácido sulfúrico, entre otros (Fuerstenau y Han, 2003). Para el caso del procesamiento de minerales sulfurados de cobre, se requiere llevar a cabo la flotación en un medio alcalino con un pH de aproximadamente 10, dado que en esta condición se depresa la pirita y se activa la calcopirita y otros minerales sulfurados de cobre, además que los colectores utilizados se tornan más estables en este pH. Para alcanzar pH 10 en el medio de flotación, se utiliza mayormente lechada de cal (o cal apagada), para adquirir dicha característica alcalina en el medio de flotación. Se escoge la lechada de cal como el mejor modificador de pH en estos casos debido a su bajo costo y alta disponibilidad. En la operación se requiere de un control continuo de la dosis de lechada de cal y del pH del medio de flotación, de manera que el pH de operación se mantenga aproximadamente constante. Además, cabe destacar que la adición de lechada de cal al sistema deja como residuo en el medio de flotación iones calcio, aumentando la concentración de este ion en el agua de recirculación (Zanin, et. al, 2019). La reacción exotérmica de formación de lechada de cal a partir de cal viva se representa en la ecuación 3. La razón cal viva/agua suele ser 1:4 o 1:6, dependiendo del proceso, para asegurar una adecuada conversión (Ineich, et al., 2017).



2.1.2. Potencial zeta

Las partículas de minerales sulfurados presentan generalmente un carácter hidrófobo. Sin embargo, existen sitios en la superficie del mineral que presentan carácter hidrófilo, dado que los minerales suelen estar naturalmente asociados con otros que no son de interés en la flotación. Para ello, se deben considerar las variables de liberación mineral, tamaño de

partícula, rugosidad y porosidad de la superficie mineral; y también la forma que adopta el mineral posterior a la conminución. Estas variables relacionan directamente el área de contacto del mineral hidrófobo con el colector y la disponibilidad de éste para formar el agregado partícula-burbuja (Fuerstenau y Han, 2003).

Las propiedades hidrófobas del mineral a flotar se explican principalmente por dos potenciales eléctricos en la pulpa, que corresponden al potencial electroquímico y al electrocinético, siendo este último el Potencial Zeta. Dicho potencial corresponde a la perturbación de la electroneutralidad generada entre las cargas de la doble capa eléctrica del mineral (Bulatovic, 2007). La fenomenología de la doble capa eléctrica se representa en la Figura 2.6., donde se muestra que la carga intrínseca del mineral es recubierta por una capa rígida de iones de carga opuesta, denominada capa Stern (o Potencial Stern); y se genera una distancia determinada entre esta capa y la capa difusa formada por los iones del medio, los cuales varían según el equilibrio electroquímico generado por los iones atraídos por la capa superficial y los iones rechazados por la capa Stern. Además, es dinámico en cuanto a posibles perturbaciones en el potencial electroquímico, por ejemplo, la variación de pH de la pulpa o la sobrecarga de contra-iones, puede ocasionar la inversión de carga del Potencial Zeta (Weber y Peuker, 2020). El plano de deslizamiento corresponde al límite de la capa difusa, es decir, el límite del movimiento de los iones que generan el equilibrio electroquímico, siendo este el punto en que se puede medir el potencial electrocinético, o potencial zeta (Yianatos y Vinnett, 2015).

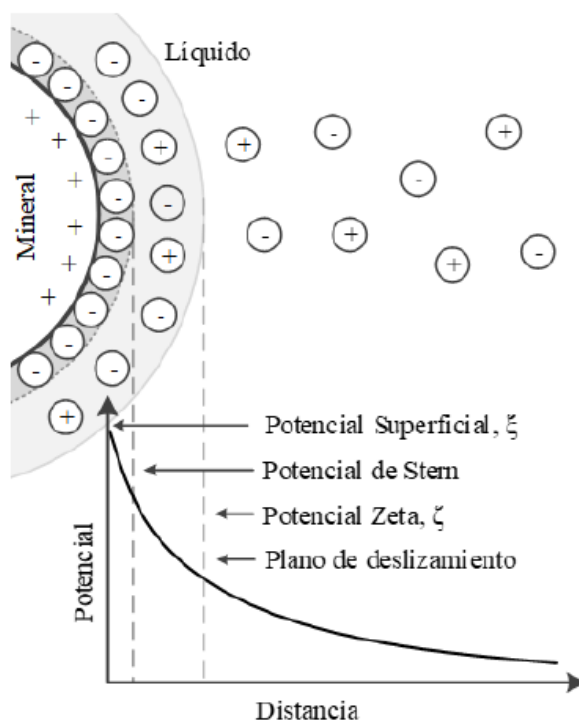


Figura 2.6. Representación gráfica de la relación de la teoría de la doble capa eléctrica y el Potencial Zeta (Yianatos y Vinnett, 2015).

El valor del Potencial Zeta es fundamental en la fenomenología de flotación, dado que determina el comportamiento de este proceso definiendo la adsorción iónica del colector u otro reactivo, o simplemente representa la intensidad de la hidrofobicidad del mineral (Hunter, 1988).

2.1.3. Efecto cubrimiento superficial de mineral

El proceso previo a la flotación, que es la etapa de molienda, tiene como objetivo disminuir el tamaño de partículas de la mena alimentada, de manera de promover una mayor liberación mineral, que se reflejará en una mayor recuperación del mineral en la flotación. Dado que las menas extraídas de minerales sulfurados suelen tener una naturaleza arcillosa, en la molienda se generan partículas muy finas de ganga, denominadas “lamas”. Estas lamas producen un efecto negativo en la flotación, puesto que, por diferencias de cargas y atracción electrostática, recubren la superficie del mineral de interés generando una capa hidrófila, tal como se representa en la Figura 2.7., donde las lamas están representadas por los círculos en color verde (Yu, et. al, 2017). Este fenómeno es conocido como cubrimiento superficial.

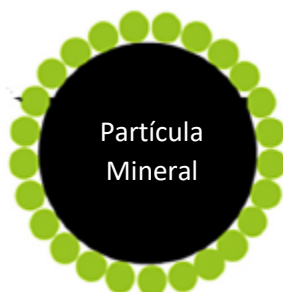


Figura 2.7. Efecto cubrimiento superficial en una partícula mineral (Jeldres, et. al, 2019).

El cubrimiento superficial tiene como consecuencia la disminución en la recuperación mineral y se refleja también en el impedimento del funcionamiento de los reactivos colectores (Forbes, et. al, 2014).

2.1.4. Cinética de flotación

La flotabilidad no es una propiedad solamente intrínseca de las especies mineralógicas, sino que también depende de las condiciones de operación del proceso de flotación (Yianatos y Vinnett, 2015). Para su representación, se modela el proceso en términos cinéticos, donde se considera análogamente la formación del agregado partícula-burbuja como una reacción química de primer orden (Wills y Finch, 2016). En la Figura 2.8. se representa gráficamente esta analogía.

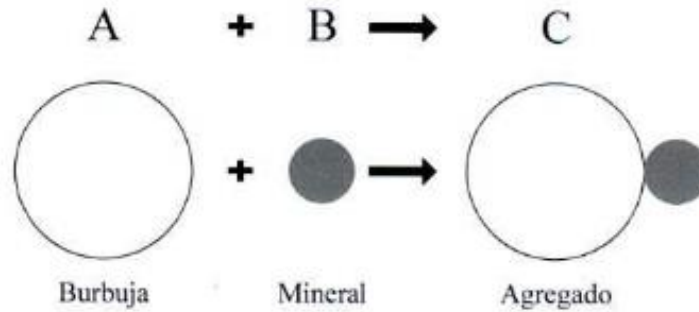


Figura 2.8. Analogía de fenomenología de flotación respecto a una reacción química, para modelar la cinética de flotación (Yianatos & Vinnett, 2015).

Dado que en un proceso de colección se tienen minerales variados en cuanto a su naturaleza, tamaño de partícula, liberación, morfología, asociaciones, entre otras; la constante cinética de flotación es única para cada partícula, resultando para la modelación del proceso de flotación, en una distribución de constantes cinéticas en el proceso.

La flotación puede ser modelada como un proceso *batch* o continuo. Este último está centrado en la flotación de la planta industrial, donde se considera el tiempo de residencia y la cantidad de celdas óptima para obtener una recuperación esperada. Se busca aproximar el comportamiento cinético desde una operación análoga a un reactor mezclador perfecto hacia lo más cercano a una flotación *batch*, aumentando el número de celdas de flotación en serie. Respecto a la flotación *batch*, corresponde al proceso de flotación en una celda única con agitación mecánica, donde no hay modificación en las variables operacionales; representan un mayor rendimiento de flotación respecto a la flotación continua, dado que el proceso está más confinado, permitiendo un mayor control y evitando pérdidas de energía (Yianatos y Vinnett, 2015).

Para efectos de la presente investigación, se considerarán flotaciones *batch*, con una constante cinética única representativa en la modelación cinética. Según estudios previos de flotaciones en laboratorio, se determinó que el modelo cinético que mejor se ajusta a las curvas de recuperación mineral experimentales es el modelo cinético de primer orden de Klimpel (Zhu, et al, 2020, Ni, et. al, 2016). Este modelo considera una distribución rectangular de constantes cinéticas, con una constante cinética máxima (Yianatos y Vinnett, 2015). El modelo cinético de Klimpel en términos de recuperación en flotación *batch* está definido por la ecuación 4 (Yianatos, et. al, 2010).

$$R = R_{\infty} \cdot \left(1 - \frac{(1 - e^{-k_{max} \cdot t})}{k_{max} \cdot t} \right) \quad [4]$$

2.2. Efecto de la calidad de agua en el rendimiento del proceso de flotación

2.2.1. Impurezas en el agua en flotación

La calidad del recurso hídrico disponible para flotación en procesamiento de minerales varía significativamente a lo largo del tiempo. Su composición depende de la mineralogía de la mena a procesar, los reactivos de flotación utilizados, las fuentes de agua disponibles y el sistema en que las corrientes de agua son gestionadas hacia el proceso. Además, todo el sistema de disponibilidad de agua es afectado por el clima (Liu, et. al, 2013). Por lo tanto, el agua utilizada en el procesamiento de minerales contiene alta cantidad de impurezas, cuya presencia genera efectos reflejados en el rendimiento de flotación. Por esta razón, se deben estudiar los procesos de manera particular, considerando la calidad de agua utilizada (Bulatovic, 2007).

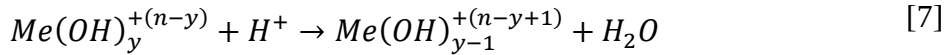
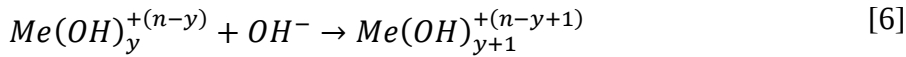
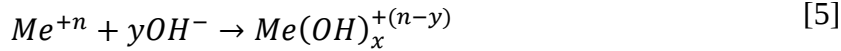
El consumo de agua es uno de los mayores desafíos de la industria minera en la actualidad, por ende, en la flotación se han implementado nuevas estrategias, tal como el suministro de agua para el proceso con una razón entre agua fresca y agua recirculada del mismo proceso. Esto, debido al alto costo de suministrar sólo agua fresca al proceso, además de la actual escasez hídrica que se conoce a nivel mundial, lo que limita dicha opción (Türk, et al., 2019). En la búsqueda de minimizar el uso de agua fresca, muchos recintos mineros han introducido la alternativa de reutilización de aguas internas (del mismo proceso) o externas (aguas residuales de otras industrias), agua subterránea o agua de mar, como una práctica convencional. Una de las consecuencias es el aumento progresivo en la salinidad del agua que puede afectar al mineral y, en consecuencia, la flotación (Wang y Peng, 2014). Normalmente el sistema de aguas alcanza un equilibrio y se estabiliza.

Además, se han implementado alternativas de tratamiento de las aguas que ingresan a la flotación, según el requerimiento esperado de la calidad del recurso hídrico. Cabe destacar que las alternativas mencionadas también pueden aplicarse a fuentes internas o externas de agua, respecto al proceso de flotación (Liu, et. al., 2013). Los tratamientos de agua implementados pueden estar enfocados a componentes orgánicos o inorgánicos; para efectos de la presente investigación el enfoque se centra en los componentes inorgánicos. En la Figura 2.9. se muestra esquemáticamente cómo se relacionan las fuentes de agua para ingresar al proceso de flotación, considerando las alternativas ya mencionadas.



2.2.2. Hidrólisis iónica

31



Las especies formadas desde la hidrólisis de iones metálicos polivalentes dependen del pH del medio en el que se encuentren y su respectiva concentración, las especies Me^{+2} predominan en soluciones ácidas, mientras que las especies de tipo $MeOH^{+}$, $Me(OH)_2$, $Me(OH)_2^{-}$ aparecen cuando el pH se torna alcalino. Estos productos pueden activar la flotación mineral, o bien, inducir activación de partículas de ganga y/o depresar la flotación del mineral valioso. La activación o depresión de determinados minerales por formación de especies hidrolizadas de iones metálicos se debe a que las especies formadas de estos últimos se adsorbe en la superficie mineral, modificando así el Potencial Zeta; esta adsorción ocurre en determinados rangos de pH, generalmente alcalinos, donde los hidroxicomplejos naturalmente se forman. (Laskowski y Castro, 2017).

2.2.3. Heterocoagulación

El fenómeno de heterocoagulación hace referencia a la deposición de partículas pequeñas cargadas eléctricamente en la superficie de una partícula más grande con carga opuesta, y generalmente ambos tipos de partículas poseen naturalezas distintas (Al-Saleh y Sundararaj, 2009). En el caso de la flotación de sulfuros de cobre se ha demostrado que se genera heterocoagulación de calcopirita con partículas finas de arcillas, en operaciones con pH 10 o mayores, situación que se acentúa en presencia de agua para flotación con alta concentración de iones divalentes, dado que a dicho pH de operación las especies hidrolizadas de estos iones modifican el potencial electrocinético de las arcillas anfóteras, acentuando la atracción electrostática para depositarse en la superficie de las partículas de calcopirita; por lo que los iones metálicos de este tipo actúan como activadores del fenómeno de heterocoagulación (Jeldres, et. al).

Este fenómeno produce aglomeración entre los minerales de la pulpa, que en consecuencia produce un aumento en la viscosidad. Esta fenomenología modifica el comportamiento reológico de la pulpa, siendo una variable de operación del proceso de flotación. El aumento de viscosidad puede ocasionar que la pulpa adopte un comportamiento de fluido no newtoniano, lo que además de impactar negativamente en la respuesta metalúrgica de la flotación, se generan problemas de bombeo en el transporte de la pulpa (Farrokhpay, et. al, 2012). En este caso, se ha demostrado que el aumento de sólidos en la pulpa promueve la transición de fluido newtoniano a no newtoniano, generando un aumento exponencial en la viscosidad; mismo caso ocurre en mayores tamaños de partículas (Prestidge, 1997). Esto, puede ser mitigado con la adición de un dispersante apropiado a la naturaleza de la pulpa.

2.2.4. Efecto de agua salina

En este contexto, hacer referencia a “agua salina” corresponde a un contenido de iones inorgánicos en el agua destinada a flotación, tal que sea considerable en cuanto a generar efectos en el rendimiento. Cuando existe una alta concentración iónica en esta agua, la densidad de los iones en la doble capa eléctrica aumenta, lo que produce que los contra-iones en la capa difusa penetren hacia la capa de Stern dada una mayor fuerza de atracción y una menor fuerza de repulsión, generando así una capa difusa más delgada. Esta compresión de la doble capa eléctrica en aguas salinas promueve el adelgazamiento y ruptura de la película formada entre partículas y burbujas en el agregado inicial formado para flotación, resultando en la apertura de más sitios hidrófobos del mineral, favoreciendo la adhesión de burbujas dada la mayor área de contacto, que en consecuencia resulta un mejor rendimiento de flotación (Wang y Peng, 2014).

Además, en un estudio de flotabilidad de minerales de carbón, se comprobó que la alta presencia de iones inorgánicos genera una mayor estabilidad en las burbujas que retrasa el efecto de coalescencia dado que aumenta la tensión superficial del sistema. Cabe destacar que en este caso ocurre el efecto contrario a los reactivos espumantes, los cuales disminuyen la tensión superficial de las burbujas y promueven la formación de espuma. De esta manera, se considera necesaria la presencia de altas concentraciones de sales inorgánicas, en conjunto con la acción de los espumantes, para así inhibir la coalescencia de burbujas (Lessard y Zieminski, 1971). En consecuencia, con el incremento de la fuerza iónica en el agua de flotación producto de la concentración de iones inorgánicos, se genera un aumento en la estabilidad de la espuma que refleja una mayor recuperación de agua desde la zona espuma y una mayor flotabilidad de masa mineral, siendo esto comprobado para casos de flotación de minerales de platino (Corin, et. al, 2011). Estudios realizados para calcopirita, afirman lo anterior para este mineral y se perciben beneficios como aumento en la retención de gas, en el sistema de flotación, reducción de atracción electrostática entre minerales de arcilla y minerales de cobre, mayor estabilidad de espuma y disminución de las cargas superficiales de los minerales (Yang, et. al, 2021).

No obstante, existen otros estudios que demuestran efectos negativos de la presencia de iones inorgánicos. De aquí, se ha validado que los minerales de arcillas, específicamente estudiada la caolinita, producen un efecto depresor en la recuperación de calcopirita cuando está en presencia de un medio que contiene iones divalentes tales como magnesio y calcio, efecto que se acentúa en valores de pH sobre 10; lo cual está relacionado por el efecto de formación de hidroxicomplejos, ya que, estas especies inducen heterocoagulación entre las partículas de arcillas y las partículas de calcopirita, que en consecuencia provoca el efecto de recubrimiento superficial de mineral. (Uribe, et. al., 2017; Cruz, et. al., 2020; October, et. al., 2020). Además, se ha comprobado que a dichos valores de pH las precipitadas e hidroxicomplejos de iones metálicos se adsorben en la superficie de la calcopirita, lo que induce que el Potencial Zeta de este mineral invierta su carga, adquiriendo así un carácter hidrófilo, que afecta negativamente al rendimiento de la flotación (Hirajima, et. al, 2016). Los iones metálicos divalentes suelen estar contenidos en el agua, y, en cuanto al calcio, en el agua de recirculación de flotación está considerablemente presente, entre otros residuos de

reactivos adicionados, puesto que es un ion residual de la adición de cal, Ca(OH)_2 , que es el modificador de pH comúnmente usado en flotación de sulfuros de cobre (Zanin, et. al, 2019).

El contexto de esta investigación se centra en el estudio de la depresión de minerales sulfurados de cobre a causa de especies hidrolizadas de los iones de calcio y magnesio, considerando como base teórica los estudios mencionados extrapolando el comportamiento mineral a minerales sulfurados de cobre. El efecto depresor de los productos de hidrólisis de iones metálicos se puede inhibir a través de la remoción de los iones y/o sus productos hidrolizados del sistema de flotación, o bien, llevar a cabo la flotación con un pH de operación en que dichas especies no logren formarse (Laskowski y Castro, 2017). En el Anexo 2 se representan los diagramas de especiación para los iones calcio y magnesio, notándose que a valores de pH 9 y 11, se forman las especies precipitadas, respectivamente.

Para mitigar los efectos de la hidrólisis de iones de calcio y magnesio, se ha estudiado la aplicación de un tratamiento de remoción parcial de las especies hidrolizadas de estos elementos en el agua de flotación, el cual consta en un tratamiento de ablandamiento químico, dado que su objetivo es remover principalmente iones de dureza del agua. Para ello, se implementó la adición de dióxido de carbono puro gaseoso y la adición de un agente alcalinizante siendo el hidróxido de sodio. De aquí, el sistema de agua a tratar debe adoptar un pH de aproximadamente 11, donde en este medio alcalino ocurre la disolución del dióxido de carbono (CO_2), explicado por la fenomenología del sistema de ion carbonato, cuyo objetivo es generar las especies precipitadas de calcio y magnesio, así como también lo genera la disolución del ion hidroxilo entregado por el hidróxido de sodio (NaOH). En este estudio, los casos de máxima remoción que se obtuvieron fueron un 60,5% para el calcio y de un 98,3% para el magnesio. De esta manera, se reduce el fenómeno de heterocoagulación entre calcopirita y los minerales de arcilla presentes en la mena; no obstante, en los resultados del estudio se percibió baja ley de concentrado, lo cual se relaciona al arrastre de ganga generado por las arcillas presentes y no al tratamiento de agua implementado. (Cruz, et. al, 2020).

Por otro lado, las fuentes de agua recirculada desde el procesamiento de minerales se ven afectadas también por reacciones de disolución oxidativa de la mena a procesar y la mineralogía de esta, dado que aumenta considerablemente la concentración de sales solubles. En el caso del procesamiento de minerales sulfurados, o con alto contenido de sales de sulfato y/o carbonato, el agua recuperada posterior al proceso, adopta una alta concentración de iones sulfatos, los cuales se acumulan en el tiempo alterando la calidad de agua de flotación (Sinche-Gonzalez y Fornasiero, 2021). Altas concentraciones de iones sulfato pueden reducir la eficiencia de la flotación mineral debido a las incrustaciones que se generan al formar sales insolubles con otros iones contenidos en el agua de proceso, donde la formación más común es el sulfato de calcio (o yeso), CaSO_4 , dada las concentraciones de iones de calcio y sulfato (Can, et al., 2020; Zanin, et al., 2019). Además, la formación y precipitación de yeso incrementa considerablemente el gasto de capital de la planta procesadora, debido al impacto en cuanto a corrosión y ensuciamiento de cañerías (Sinche-Gonzalez y Fornasiero, 2021).

Los iones sulfato tienden a formar sales complejas con cationes metálicos, entre ellos con calcio generando la precipitación de yeso mencionada recientemente, que precipitan en partículas finas, los cuales pueden recubrir la partícula de mineral de interés mientras exista diferencia electrostática entre las partículas, generando así efecto de recubrimiento superficial de mineral por heterocoagulación entre partículas, análogo a lo explicado previamente (Grano, et. al, 1995). En este caso, se ha demostrado que los iones sulfatos se adsorben químicamente por enlaces iónicos en la superficie del mineral, lo que provoca que tengan un efecto aún más depresor e inhibe una adecuada adsorción de colector, que se refleja en un menor rendimiento de flotación (Wang, 2016). Investigaciones que estudiaron este efecto, reportaron que en el caso de la calcopirita la recuperación de cobre disminuye en un 17% con una concentración de 0,01 [M] de iones sulfato, comparado con el caso de estudio de agua pura con 0 [M]. Cabe destacar que los experimentos de dicha investigación fueron realizados en condiciones aisladas, con agua pura y con adición de sulfato de calcio soluble para alcanzar la concentración mencionada (Sinche-Gonzalez y Fornasiero, 2021).

Para mitigar los efectos negativos generados por una alta concentración de sulfatos se aplican tratamientos de remoción al agua utilizada en flotación, similar al pretratamiento de ablandamiento mencionado anteriormente, los cuales son: remoción por precipitación química, separación por membrana de osmosis inversa, resinas de intercambio iónico, electrodiálisis, precipitación mediante formación de ettringita, y reducción biológica de sulfatos con microorganismos afines (Bowell, 2004).

Capítulo 3: Procedimiento Experimental

Para analizar el impacto de la calidad de agua en la flotación de la planta de El Soldado, se propuso implementar un tratamiento de ablandamiento químico, similar al de los estudios mencionados previamente, en el agua utilizada en las pruebas experimentales de flotación. El objetivo de este tratamiento de aguas fue evaluar un posible aumento de recuperación de cobre fino, mediante flotaciones *batch* realizadas en el Laboratorio Metalúrgico, utilizando el agua tratada, como método de mitigación de los efectos negativos de los iones de dureza. En adelante, el tratamiento de ablandamiento químico de aguas se denomina “pretratamiento de ablandamiento”, ya que la operación central a evaluar fue la flotación *batch* y su respuesta metalúrgica ante variaciones en la calidad del agua, siendo el tratamiento de aguas un proceso previo.

Para estudiar el efecto de la implementación del pretratamiento de ablandamiento de agua en el rendimiento de la flotación, se evaluó una matriz de pruebas de flotación *batch*, donde se comparó el efecto entre las aguas disponibles (Fresca, Balsa Tranque y de Procesos) con y sin pretratamiento de ablandamiento. Los parámetros de calidad de las aguas a analizar en la matriz de flotación fueron determinados y/o modificados previamente a las pruebas de flotación.

No obstante, también se analizaron otras alternativas para mejorar el rendimiento de la flotación, tales como la adición de nuevos reactivos de flotación de tipo dispersantes, el aumento de la conductividad en el Agua de Procesos y el pretratamiento de remoción de sulfatos en el Agua de Procesos. Cabe destacar que, en estas alternativas, la única fuente de agua fue Agua de Procesos, es decir, el agua que ingresa al proceso de flotación en planta, con el fin de disminuir variables y centrar el análisis en un comportamiento representativo de la realidad de la planta.

3.1. Fuentes de Agua El Soldado

Las fuentes de aguas disponibles en El Soldado, y utilizadas en el marco de la investigación, se describen a continuación:

3.1.1. Agua Fresca

Corresponde al agua subterránea extraída particularmente de dos campos de pozos proveedores, denominados “Melón” y “Los Litres”. Estas aguas se recolectan en un estanque común denominado “Estanque El Melón”, lugar en el cual está ubicado el punto de muestreo, desde donde se extrae el agua para los estudios a realizar.

3.1.2. Agua Balsa Tranque

Corresponde al agua acumulada en el tranque de relaves principal de El Soldado, denominado “Tranque El Torito”, en el sector de recopilación de lamas del tranque. Esta laguna está formada mayoritariamente con agua que proviene del proceso productivo, es decir, agua de recirculación. Sin embargo, el balance de agua de la laguna también involucra la adición de aguas lluvias y las pérdidas por evaporación o percolación, pero en una menor proporción.

Para efectos de esta investigación, estos flujos fueron considerados despreciables, por lo que sólo se considera el agua recirculada desde el proceso productivo de la Planta El Soldado.

3.1.3. Agua de Procesos

Es el agua utilizada en el proceso de flotación, cuyo flujo está conformado principalmente por Agua Balsa Tranque y Agua Fresca, en una proporción aproximada de 4:1. No obstante, el Agua de Procesos también incluye otros tipos de aguas, tales como agua de drenaje mina subterránea y/o agua industrial desde proveedores externos, en proporciones variables y bajas. Con el fin de acotar el parámetro de estudio, se considerará la razón aproximada mencionada de 4:1 (Agua Balsa Tranque : Agua Fresca) como la composición del agua de procesos en esta investigación, de tal manera que exista una comparación definida entre las aguas.

Cabe destacar que el estudio se centra en la flotación, por lo que las propuestas de mejora en el rendimiento metalúrgico se centran en esta operación y en el agua que allí se utiliza, es decir, Agua de Procesos.

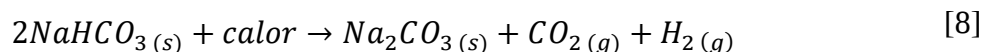
3.2. Pretratamiento de ablandamiento químico de agua

Se propuso implementar un pretratamiento de ablandamiento químico en el agua antes de ser ingresada al proceso de flotación, analizando las tres fuentes de agua disponibles en esta investigación. El objetivo principal fue realizar una remoción parcial de los iones divalentes metálicos contenidos que causan la dureza del agua, principalmente calcio y magnesio. Para ello, se utilizaron dos reactivos, cal apagada (o llamada también “lechada de cal”) y carbonato de calcio, cuya función fue precipitar los iones magnesio y calcio, respectivamente, en sus especies precipitadas. Estos reactivos difieren del tratamiento estudiado en otras investigaciones, que fue mencionado en Capítulo 2, pero cumplen la misma función, es decir, permiten alcalinizar el medio con la acción de los iones hidroxilo, y entregar iones carbonato al sistema. Para asegurar la precipitación de las especies hidrolizadas de dichos iones, en forma de hidróxido de magnesio e hidróxido de calcio, el pretratamiento consta de inducir, con una dosis necesaria de hidróxido de calcio, un pH de 11,5 en el agua a tratar; y agregar iones carbonato desde carbonato de sodio, para asegurar una mayor precipitación de calcio en forma de carbonato de calcio. En el Anexo 2 se muestran los diagramas de especiación para las especies de los iones calcio y magnesio.

En primera instancia, se preparó la lechada de cal con una proporción en peso de 1:4 de cal viva sólida y agua. En esta preparación, se agregaron 200 [g] de cal viva en un vaso precipitado y 800 [mL] de Agua de Procesos (según estándar de preparación de Laboratorio Metalúrgico), agitando la solución hasta notar un aumento de temperatura en el vaso, lo que representa la reacción exotérmica de formación de cal apagada, según la Ecuación 3 mencionada en el Capítulo 2 (Zanin, et. al, 2019). Para efectos de cálculo, se consideró una densidad del agua equivalente a 1 [g/mL].

Luego, se preparó el carbonato de sodio a partir del bicarbonato de sodio sólido pulverizado, a través de la reacción química de descomposición presentada en la Ecuación 8. De esta

manera, se forma el carbonato de sodio y se libera dióxido de carbono e hidrógeno molecular en forma gaseosa.

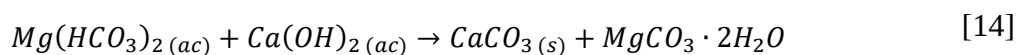
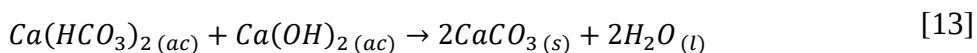
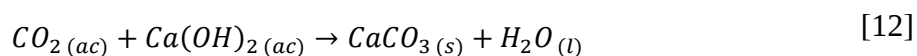
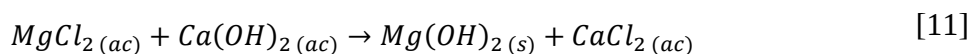
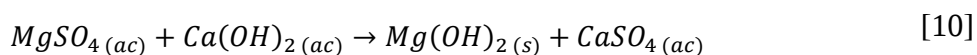
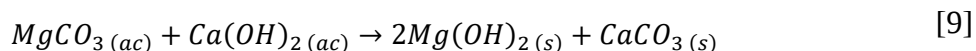


Esta reacción se llevó a cabo en un recipiente de acero inoxidable, ubicado sobre un quemador, adicionando calor por convección al bicarbonato de sodio pulverizado y aplicando agitación constante durante 8 [min], para asegurar la homogenización. Se observó la formación de orificios en la solución pulverizada alrededor del minuto 5, lo cual representa la liberación de hidrógeno molecular y dióxido de carbono gaseosos. Una vez finalizado el proceso, se esperó para que el producto alcanzase la temperatura ambiente y, posteriormente, se envasó el carbonato de sodio sólido pulverizado en un recipiente hermético de vidrio.

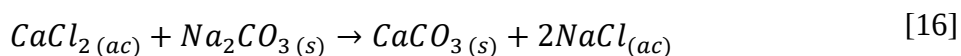
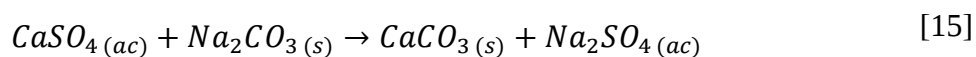
Una vez que ambos reactivos estaban listos para ser utilizados en el pretratamiento, se dispuso de los diferentes tipos de agua a tratar, contenidos en baldes plásticos de 20 [L], con un volumen de agua de 10 [L]. Además, se dispuso de un pH-metro de laboratorio de marca *Hannah Instruments*, que mide continuamente el pH del agua. Como primer paso, se adicionó lechada de cal al agua a tratar, en intervalos de dosis de 1 [mL], controlando el pH hasta alcanzar un valor aproximado de 11,5. En la Figura 3.1. se muestra el sistema de control de pH que se aplicó en el Laboratorio Metalúrgico, donde se obtuvo un pH final del agua a tratar cercano a 11,5. Cabe destacar que, experimentalmente, es difícil lograr el valor exacto de pH debido a posibles descalibraciones y/o demoras en la entrega del valor medido por el pH-metro, requerimiento de un intervalo de dosis menor para mayor exactitud, entre otros posibles errores experimentales y/o instrumentales. En las Ecuaciones 9, 10 y 11 se muestran las reacciones de precipitación llevadas a cabo en medio alcalino, que prácticamente promueven la precipitación del ion magnesio en forma de hidróxido de magnesio ($Mg(OH)_2$). En caso de que el agua a tratar contenga iones carbonatos, se generan las reacciones presentadas en las Ecuaciones 12, 13 y 14; las cuales también son reacciones de precipitación, sin embargo, el producto precipitado es carbonato de calcio ($CaCO_3$). La Ecuación 12 tiene como reactivo una molécula de CO_2 disuelto en agua, cabe destacar que corresponde a una especiación del sistema ion carbonato. Además, las ecuaciones mencionadas pueden ocurrir simultáneamente todas o algunas de ellas, puesto que depende de los iones contenidos en el agua a estudiar, es decir, depende de la calidad de agua.



Figura 3.1. Medición de pH para pretratamiento de aguas en Laboratorio Metalúrgico El Soldado.



Para asegurar la precipitación de iones calcio y magnesio, se adiciona una fuente extra del ion carbonato. En este caso, se utiliza carbonato de sodio (Na_2CO_3). Según estudios previos, una proporción entre lechada de cal y carbonato de sodio, en proporción 1:1, presenta buenos resultados en el pretratamiento (Jeldres, y otros, 2017). En las Ecuaciones 15 y 16 se muestran las reacciones adicionales que se generan con la adición de carbonato de sodio.



Para determinar la cantidad de estos reactivos, se realizó una curva de cal, mostrada en el Anexo 3. El carbonato de calcio se agregó en estado sólido al agua en el pretratamiento, por lo tanto, la curva de cal fue realizada con cal viva, es decir, en estado sólido también. De esta manera, se determina una dosis adecuada, considerando el mismo estado de agregación. Esta curva considera una muestra de agua de 1 [L], donde, con diferentes dosis de cal viva, se registran los valores de pH resultantes. Se estima que con 800 [mg/L] aproximadamente de cal viva sólida, se alcanza el pH 11,5. Por lo tanto, la cantidad de carbonato de sodio que se debió agregar, luego de haber alcanzado el pH requerido con la adición de lechada de cal, consideró la misma dosis.

Una vez agregados ambos reactivos, se aplicó una filtración al vacío del agua pretratada, de manera de retener los sólidos precipitados de los iones de calcio y magnesio, principalmente. El sistema de filtración que se utilizó en el Laboratorio Metalúrgico se muestra en la Figura 3.2., el cual está compuesto de un embudo *büchner* de cerámica, un matraz *kitasato* de 3 [L] de capacidad, una bomba de vacío de 186 [W], una manguera de plástico maleable apta para el matraz, y papel filtro *Whatman* n°40.



Figura 3.2. Sistema de filtrado al vacío para pretratamiento de aguas en Laboratorio Metalúrgico El Soldado.

Al culminar el filtrado del volumen de agua pretratada, se considera realizado el pretratamiento de ablandamiento de agua, cuyo propósito, en el alcance del presente estudio, fue realizar flotaciones *batch* utilizando estas aguas para evaluar el impacto en la respuesta metalúrgica.

3.3. Análisis Químico de Aguas

Se realizó un análisis químico a cada fuente de agua disponible en El Soldado (Agua Fresca, Agua Balsa Tranque y Agua de Procesos) con y sin pretratamiento de ablandamiento, para verificar la eficacia en la remoción de los iones de dureza al aplicar el pretratamiento de ablandamiento, resultando en un total de seis muestras de agua a analizar. El análisis químico fue realizado por un laboratorio externo a El Soldado, quienes reportaron la calidad de cada agua en términos de su composición iónica y materia orgánica contenida.

3.4. Matriz de pruebas de flotación *batch* para evaluar efecto de pretratamiento de ablandamiento de aguas.

Se realizó una matriz de pruebas de flotación, considerando el estándar de flotación *batch* del Laboratorio Metalúrgico, especificado en el Anexo 4, cuyo objetivo fue evaluar las cinéticas de flotación, la recuperación másica y de finos, así como también de ley de concentrado, para las seis muestras de aguas que fueron estudiadas.

En primera instancia, se escogen dos muestras minerales destinadas a flotación *batch*, de manera de comparar el impacto metalúrgico que resulta de cada muestra y evaluar diferencias o similitudes. Para robustecer esta comparación, se utilizaron dos casos específicos de muestras minerales, una muestra mineral de sondaje del plan minero de largo plazo (*MET-01021*) y un compósito de sondajes del plan minero de corto plazo (*CP Matriz*). Al hacer referencia a corto o largo plazo, se apunta a las campañas realizadas y proyectadas por la Gerencia de Minas de El Soldado, cuya función es modelar la naturaleza del yacimiento El Soldado y determinar cómo impacta la mena extraída en la flotación. En la Tabla 3.1. se resume la información de cada muestra mineral destinada a estudiar en matriz de flotación.

Tabla 3.1. Caracterización de minerales de alimentación a utilizar en las pruebas experimentales.

Mineral de alimentación (codificación El Soldado)	Plan minero	Descripción
<i>MET-01021</i>	Largo Plazo	Sondaje único de tipo diamantino
<i>CP Matriz</i>	Corto Plazo	Agrupación de varios sondajes de tipo aire reverso

Para acondicionar las muestras minerales para ser estudiadas en flotación *batch*, se le aplicó el estándar de molienda y acondicionamiento del Laboratorio Metalúrgico para muestras minerales, descrito en los Anexos 5 y 6.

Una vez que fue validada la granulometría de cada muestra para los estándares de molienda y acondicionamiento, la muestra mineral está apta para operar bajo el estándar de flotación *batch* del Laboratorio Metalúrgico (Anexo 4).

La tabla 3.2. representa la matriz de pruebas de flotación *batch*, clasificando las pruebas por el tipo de fuente de agua, el mineral utilizado, y las variables a estudiar que son diferentes al estándar de flotación del Laboratorio Metalúrgico. Cabe destacar, que para la muestra mineral de largo plazo *MET-01021* no fue estudiado el caso de Agua de Procesos Tratada, debido a la escasez de muestra; por ello, se escogieron los otros casos por sobre el mencionado debido a la composición del Agua de Procesos considerada en esta investigación (4:1 en términos de Agua Balsa Tranque y Agua Fresca, respectivamente).

Tabla 3.2. Matriz de pruebas de flotación *batch* para evaluar pretratamiento de aguas.

Tipo de agua	Mineral	Variable (respecto al estándar)
Agua de Procesos	<i>MET-01021</i>	-
Agua Fresca	<i>MET-01021</i>	Tipo de agua
Agua Balsa Tranque	<i>MET-01021</i>	Tipo de agua
Agua Fresca tratada	<i>MET-01021</i>	Tipo de agua + pretratamiento
Agua Balsa Tranque tratada	<i>MET-01021</i>	Tipo de agua + pretratamiento
Agua de Procesos	<i>CP Matriz</i>	-
Agua Fresca	<i>CP Matriz</i>	Tipo de agua
Agua Balsa Tranque	<i>CP Matriz</i>	Tipo de agua
Agua de Procesos tratada	<i>CP Matriz</i>	Tratamiento de agua
Agua Fresca tratada	<i>CP Matriz</i>	Tipo de agua + pretratamiento
Agua Balsa Tranque tratada	<i>CP Matriz</i>	Tipo de agua + pretratamiento

3.5. Alternativas de mejora en flotación con agua de procesos

3.5.1. Adición de reactivos dispersantes

Se estudió el efecto de dos tipos de reactivos de la categoría dispersantes: silicato de sodio y una cadena de policarboxilato, los cuales son compuestos químicos inorgánicos y orgánicos, respectivamente. En la Tabla 3.3. se especifica el código comercial de cada reactivo, desde el cual se identificarán las muestras, y las dosis recomendadas por los proveedores para cada reactivo dispersante.

Tabla 3.3. Reactivos dispersantes estudiados y sus características.

Reactivo dispersante	Código comercial	Momento de adición	Dosis recomendada [g/ton]
Silicato de sodio	<i>PRODEP-610¹</i>	Molienda	100
Cadena de policarboxilato	<i>XP-3841</i>	Flotación en minuto 0	70

¹ Se diluye al 50% previamente, para su utilización.

El objetivo de la adición de estos reactivos en la flotación *batch* es evaluar si se percibe mejoras en la recuperación de cobre fino, bajo la base teórica de la disminución de viscosidad por mitigación de efecto de cubrimiento superficial de mineral por arcillas ultrafinas.

3.5.2. Pruebas con Agua de Procesos salobre

De estudios anteriores realizados por El Soldado y servicios externos, se reportó que la conductividad promedio del Agua de Procesos es 2.500 [$\mu\text{S}/\text{cm}$]. Por esto, a modo de propuesta alternativa, se planificó una prueba de flotación *batch*, utilizando Agua de Procesos con un previo aumento de conductividad, hasta alrededor de 8.000 [$\mu\text{S}/\text{cm}$], adoptando el nombre de “Agua de Procesos Salobre”. La finalidad fue verificar si se percibe un aumento en la recuperación de cobre fino, apelando al efecto de compresión de la doble capa eléctrica por una mayor concentración iónica, descrito en el Capítulo 2. Además, se determinó esa magnitud de conductividad, de tal manera que no alcanzase valores de conductividad de agua de mar, que en promedio es 45.000 [$\mu\text{S}/\text{cm}$] (Zheng, et. al., 2018), puesto que diversas investigaciones han demostrado que la recuperación es considerablemente inhibida a estos niveles de salinidad (Liu, et. al, 2013).

Para aumentar la conductividad del Agua de Procesos, se le adicionó una solución salina de cloruro de potasio (KCl) y cloruro de sodio (NaCl), cuya composición en masa es de 72,1% y 27,9 %, respectivamente. Esta solución es conocida comercialmente en la industria alimentaria como “Biosal”. Uno de sus formatos de venta se muestra en la Figura 3.3. La preparación del Agua de Procesos Salobre fue realizada en el Laboratorio de Transferencia de Masa, perteneciente al Laboratorio de Operaciones Unitarias, ubicado en la Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM), Campus Casa Central, Valparaíso. El Agua de Procesos fue recopilada desde la Planta El Soldado y posteriormente trasladada a dicho laboratorio.



Figura 3.3. Solución salina de KCl y NaCl agregada al Agua de Procesos (Biosal).

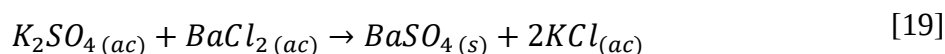
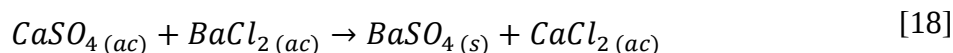
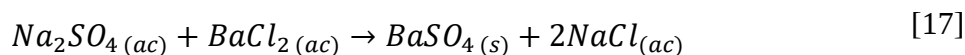
Se prepararon dos muestras de Agua de Procesos de 6 [L] cada una, a las cuales se les midió la conductividad inicial con un conductímetro portátil de marca *Oakton*. Luego, se adicionó la solución salina al Agua de Procesos, en intervalos de 1 [g], cuya masa fue previamente medida en una balanza de alta precisión, con un pesasustancia. Se agitó constantemente la solución acuosa y, paralelamente, se verificó la conductividad, hasta lograr aproximadamente el valor objetivo. De esta forma, se registra el valor exacto que informa el instrumento y la cantidad de sal agregada. En la Figura 3.4. se representa el sistema de preparación de Agua de Procesos Salobre, emplazado en el Laboratorio de Transferencia de Masa de la UTFSM.



Figura 3.4. Sistema de preparación de Agua de Procesos Salobre.

3.5.3. Eliminación de Sulfatos en Agua de Procesos

Con la finalidad de verificar los efectos de la presencia de sulfatos en el proceso de flotación, se propuso realizar un pretratamiento de remoción de sulfatos del Agua de Procesos, por precipitación química, para evaluar su efecto en los resultados metalúrgicos en pruebas de flotación *batch*. Este pretratamiento fue similar al de ablandamiento de aguas, puesto que se utilizó la misma metodología de precipitación y filtrado al vacío, mediante la formación de sulfato de bario insoluble ($BaSO_4$). La diferencia radica en que, en este pretratamiento, se utilizó como reactivo cloruro de bario acuoso ($BaCl_2$), cuya reacción con el sulfato soluble se presenta en las Ecuaciones 17, 18 y 19, dependiendo del catión presente en la sal de sulfato que fue reaccionando. Dichas ecuaciones son de precipitación, y pueden ocurrir simultáneamente todas o algunas de ellas.



El cloruro de bario acuoso (BaCl_2) se obtuvo desde el cloruro de bario dihidratado sólido ($\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), cuyo formato comercializado se muestra en la Figura 3.5. Dicha sal se diluyó en el Agua de Procesos, formando una solución al 5% en peso (cloruro de bario acuoso), equivalente a una concentración de 0,205 [M], según lo recomendado por el proveedor (MERCK Millipore, 2022).

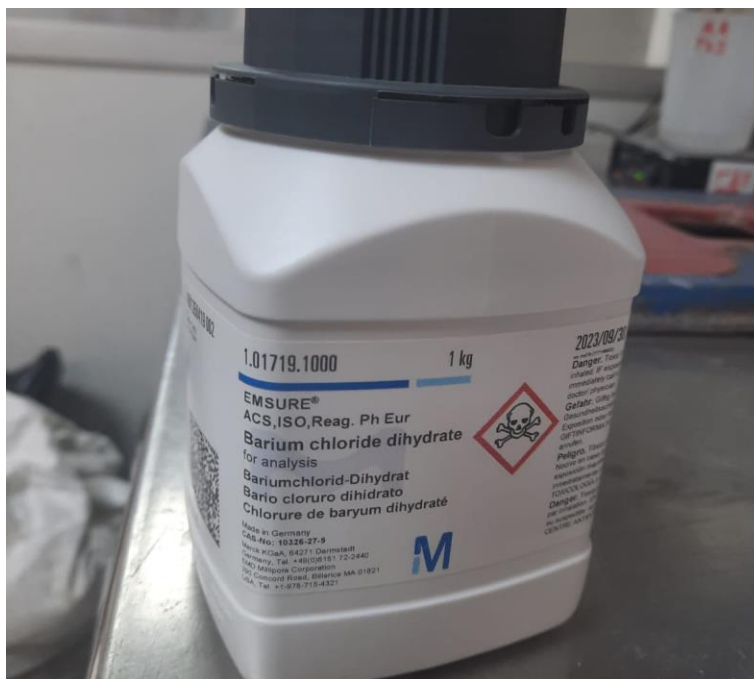


Figura 3.5. Cloruro de bario deshidratado sólido en su formato comercial de 1 [kg].

Este pretratamiento se realizó de igual manera que el pretratamiento de ablandamiento descrito anteriormente en cuanto al uso del mismo sistema de filtrado, en las dependencias del Laboratorio Metalúrgico de El Soldado. Se trató un volumen de Agua de Procesos de 10 [L], por lo que los cálculos estequiométricos y la estimación de la dosis de cloruro de bario requerida estequiométricamente fue determinada en esta base de cálculo.

Se ambientó un medio ácido en el agua a tratar, que fue preparado mediante la adición de ácido sulfúrico, siendo agregado cuidadosamente mediante un gotario, hasta lograr un pH cercano a 4. En el Anexo 7 se muestra el cálculo para la formación de la solución acuosa de cloruro de bario (BaCl_2) y el cálculo estequiométrico para determinar la dosis óptima requerida de cloruro de bario dihidratado ($\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Considerando los cálculos estequiométricos, se determinó analizar el efecto de la precipitación de sulfatos con tres dosis de cloruro de bario acuoso de concentración 5% en peso: 500 [mL], 750 [mL] y 1000 [mL].

Cabe destacar que el cloruro de bario es clasificado como un compuesto tóxico de grado n°3 según el proveedor, por lo que su consumo y/o contacto con cualquier organismo vivo es riesgoso (MERCK Millipore, 2022). Dada esta característica se torna poco sustentable, por lo que será utilizado en este estudio exclusivamente para verificar resultados obtenidos del pretratamiento de remoción de sulfatos, considerando todas las precauciones recomendadas en la manipulación de esta sustancia.

3.5.4. Matriz de pruebas de flotación batch para evaluar efecto de remoción de sulfatos

Dado que se buscó estudiar el efecto de remoción de sulfatos al aplicar tres diferentes dosis de cloruro de bario acuoso (BaCl_2), se aplicó el pretratamiento a tres muestras de Agua de Procesos de igual volumen (10 [L]), a las cuales previamente se les aplicó además un tratamiento de ablandamiento. La finalidad de combinar ambos tratamientos es que las especies de calcio y magnesio no ocasionen efectos que contrarresten el efecto de la remoción de sulfatos en los resultados de la flotación *batch*.

En la Tabla 3.4. se presenta la matriz de flotación a estudiar con enfoque en la remoción de sulfatos. Además, se mencionan las variables que difieren del estándar de pruebas de flotación del Laboratorio Metalúrgico.

Tabla 3.4. Matriz de flotación para evaluar efectos de remoción de sulfatos.

Tipo de Agua	Mineral	Dosis BaCl_2 (ac) [mL]	Variable respecto al estándar
Agua de Procesos	CP Matriz	-	-
Agua de Procesos	CP Matriz	500	Remoción sulfatos + pretratamiento de ablandamiento
Agua de Procesos	CP Matriz	750	Remoción sulfatos + pretratamiento de ablandamiento
Agua de Procesos	CP Matriz	1000	Remoción sulfatos + pretratamiento de ablandamiento

Cabe destacar que, para las pruebas de flotación de esta matriz, se utilizó mineral del compuesto de corto plazo *CP Matriz*, por disponibilidad másica de mineral. Por lo tanto, los resultados obtenidos se compararon con la condición estándar para este mineral, la cual fue evaluada previamente en la matriz de flotación para evaluación de pretratamiento de ablandamiento (Tabla 3.2.).

Capítulo 4: Resultados, análisis y discusión de resultados

4.1. Aplicación de pretratamiento de ablandamiento químico de aguas

Dado que el pretratamiento de ablandamiento de aguas se encarga de la eliminación parcial de los iones de calcio y magnesio, el análisis químico se centra en dichos parámetros y en la comparación entre el agua tratada y sin tratar. En la Figura 4.1. se muestra esta comparación.

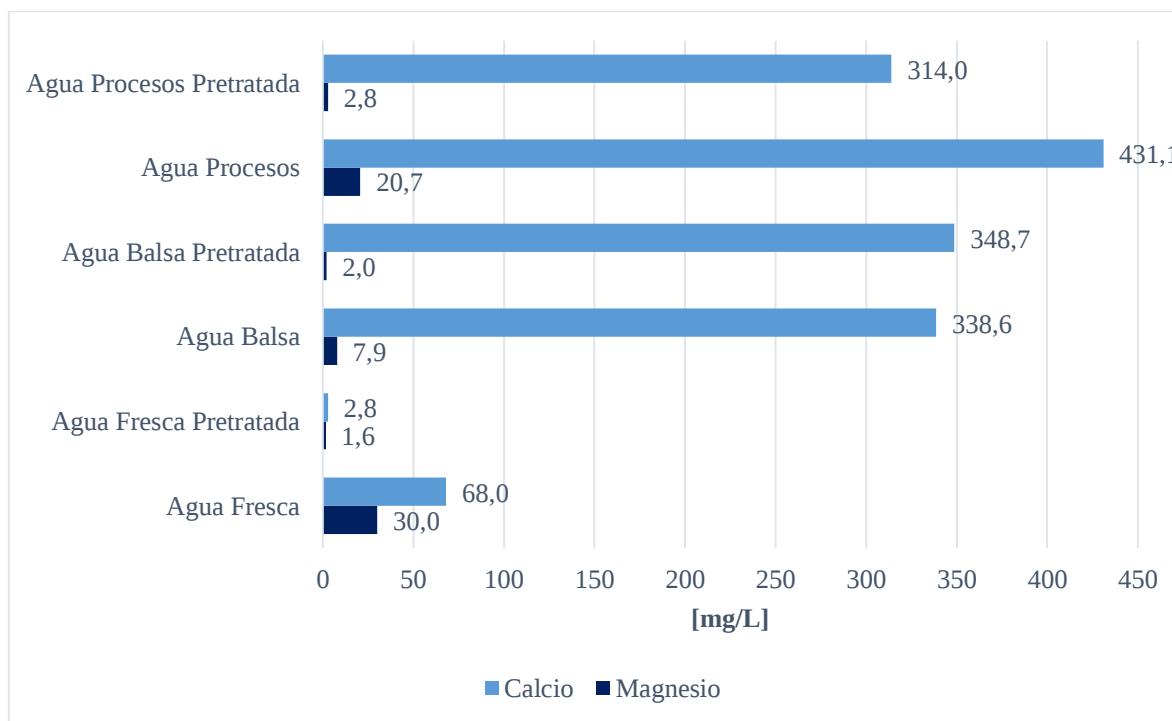


Figura 4.1. Contenido de iones calcio y magnesio en aguas con y sin pretratamiento.

Se observa que, con el pretratamiento de ablandamiento, existe una remoción de 27,2% y 95,9% del calcio en el Agua de Procesos y el Agua Fresca, respectivamente. Por otra parte, para el Agua Balsa Tranque, se percibe un aumento de este metal en un 3,0%. Se desconoce el motivo exacto del aumento de calcio en Agua Balsa Tranque, dado que por su calidad de agua se esperaba una remoción similar a la del Agua de Procesos (Anexo 8), pero puede ser a causa de un error experimental en la realización del pretratamiento. Por otro lado, se produjo una remoción de magnesio de 74,3%, 86,3% y 94,6%, para las aguas Balsa Tranque, de Procesos y Fresca, respectivamente. Se observó que el Agua Fresca adquiere el mayor porcentaje de remoción de iones de dureza (calcio y magnesio).

Según el análisis químico de aguas, tabulado en Anexo 8, se reportó que el ion más concentrado es el sulfato, tal como se muestra gráficamente en la Figura 4.2., donde se percibe que el Agua de Procesos y Agua Balsa contienen aproximadamente diez veces más sulfato que el Agua Fresca. Un efecto secundario percibido en el pretratamiento de ablandamiento fue una leve reducción de sulfatos, que se estima que ocurre producto de la formación de yeso precipitado, dada la presencia de calcio, debido a la adición de cal, y de los sulfatos disueltos en el agua; la Ecuación 20 representa esta reacción de precipitación.

Los porcentajes de remoción de sulfatos fueron 11,6%, 10,4% y 14,9% para el Agua Balsa Tranque, Agua de Procesos y Agua Fresca, respectivamente.

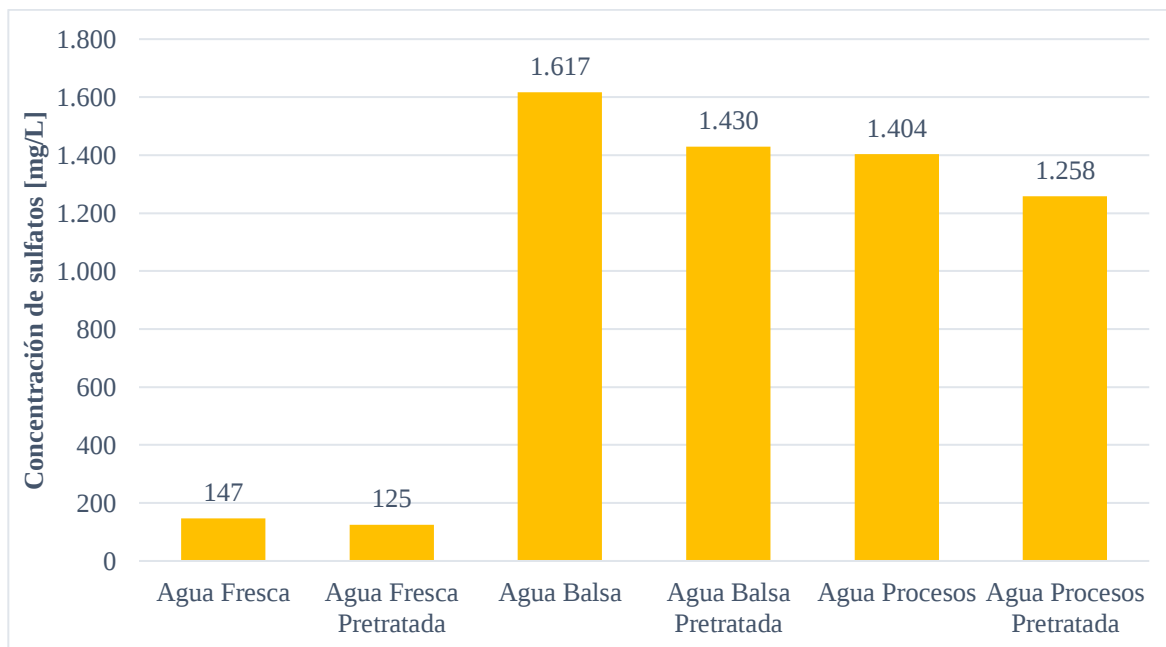


Figura 4.2. Concentración de ion sulfato en aguas con y sin pretratamiento.



También, se produjo un aumento considerable en la concentración de sodio luego del pretratamiento de ablandamiento, donde el incremento más crítico se percibió en el Agua Fresca, en un 1.067%, lo que produjo un aumento de aproximadamente el doble de la conductividad de dicha agua. En la figura 4.3. se representan los aumentos de concentración de sodio con la implementación del pretratamiento de ablandamiento para cada fuente de agua, y en la figura 4.4 se representan los aumentos de conductividad, donde una de las causas de este aumento hace referencia al incremento de la concentración de ion sodio debido a que el reactivo carbonato de sodio (Na_2CO_3) agrega este ion. Los valores de concentración de sodio y conductividad, para cada muestra de agua analizada, se encuentran resumidos en el Anexo 8.

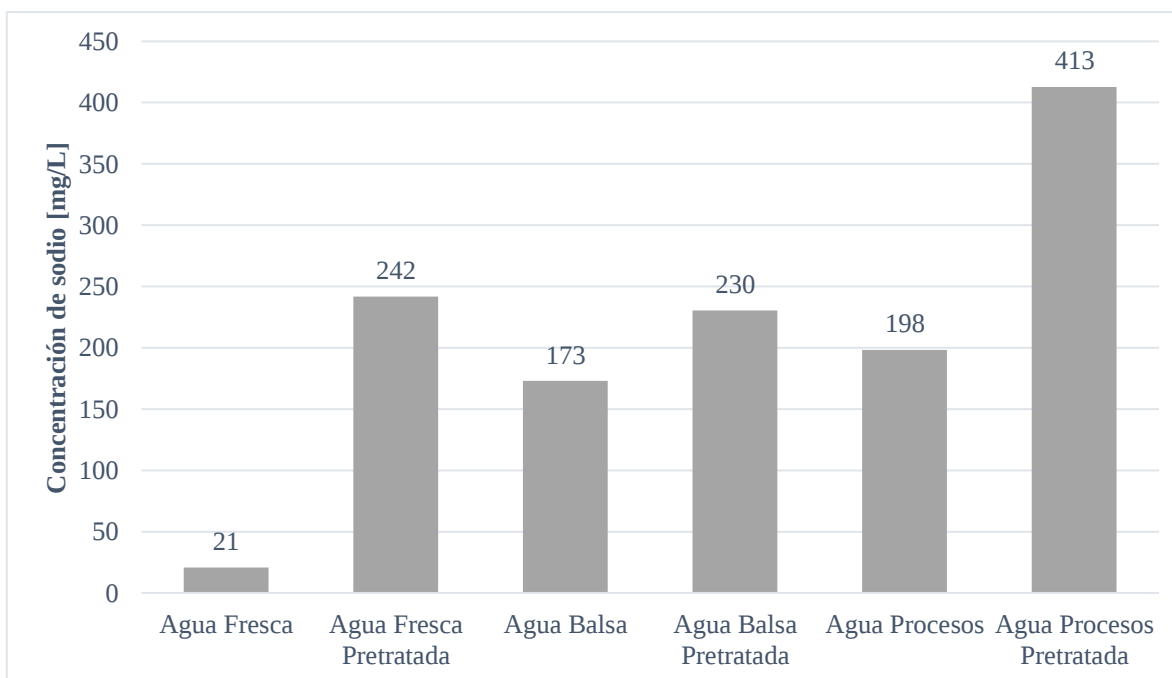


Figura 4.3. Concentración de sodio en aguas con y sin pretratamiento.

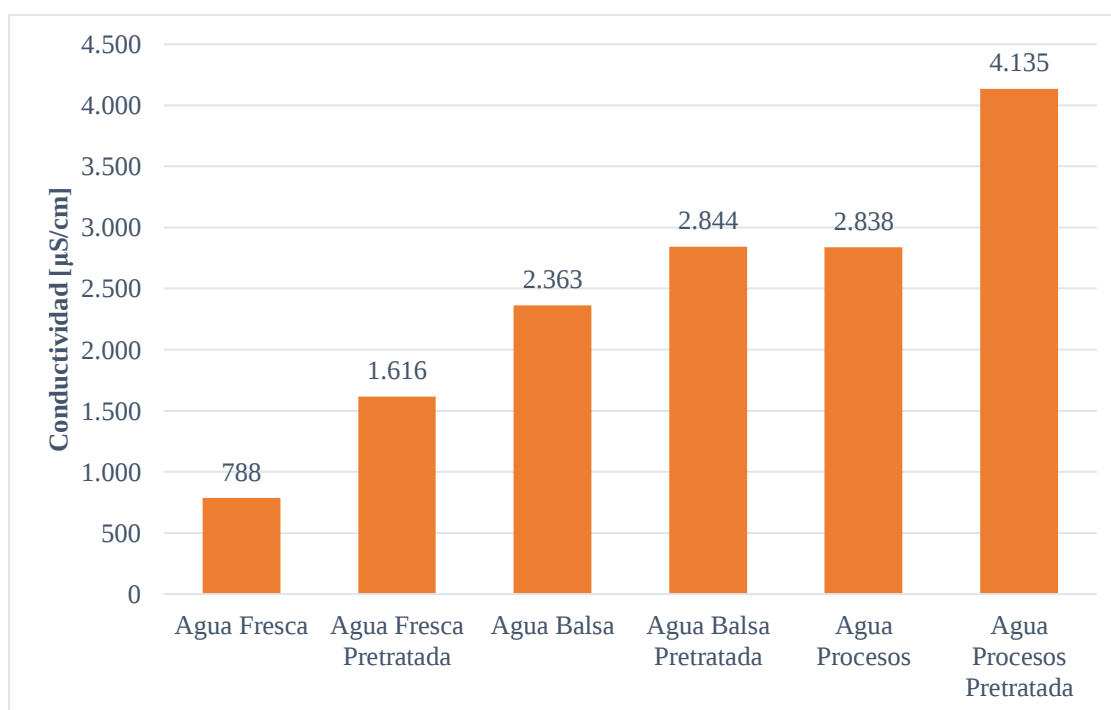


Figura 4.4. Conductividad en aguas con y sin pretratamiento.

4.2. Mineralogía

Mediante análisis mineralógico *QEMSCAN PMA* aplicado a la muestra mineral *MET-01021* y a la muestra mineral *CP Matriz*, se obtuvo la mineralogía modal de cada uno, las asociaciones entre minerales, el grado de liberación, la liberación por fracciones de tamaño, entre otros. En cuanto a la mineralogía modal, en la Figura 4.5. se comparan los minerales de cobre presentes en ambas muestras. De aquí, se destaca que la calcopirita es el sulfuro de cobre cuya composición está en mayor porcentaje en comparación a los otros minerales sulfurados de cobre presentes (calcosina y bornita). Adicionalmente, la muestra *MET-01021* contiene una composición de calcopirita mayor que la de *CP Matriz*, lo que eventualmente puede reflejar un mayor contenido de cobre en la muestra mineral.

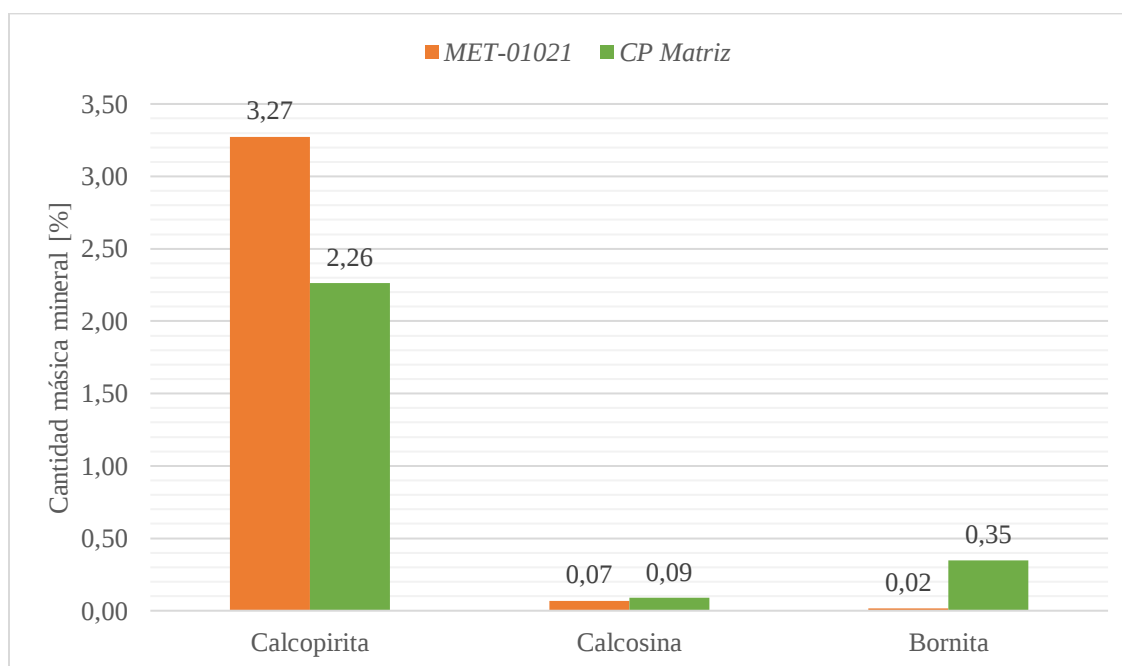


Figura 4.5. Minerales de cobre contenidos en *MET-01021* y *CP Matriz*.

Además, se compara el contenido de silicatos presentes en ambas muestras de mineral, clasificados en alta flotabilidad, baja flotabilidad y flotabilidad variable. Se consideran estos minerales como la ganga más significativa en el contexto del estudio de la presente investigación, dado los efectos negativos que generan en la flotación a través del efecto de cubrimiento superficial de mineral. En la Figura 4.6. se muestra esta mineralogía de ganga presente en cada muestra mineral, donde se destaca un alto contenido de feldespatos potásicos en la muestra *MET-01021*, siendo clasificado como ganga de baja flotabilidad. Esto implica que el cubrimiento superficial que puede ocurrir debido al efecto activador de los iones divalentes (calcio y magnesio, según lo estudiado) sobre la ganga que recubre al mineral de interés, sea más notorio, es decir, que tenga un mayor impacto en la flotación en términos de una menor recuperación de cobre fino.

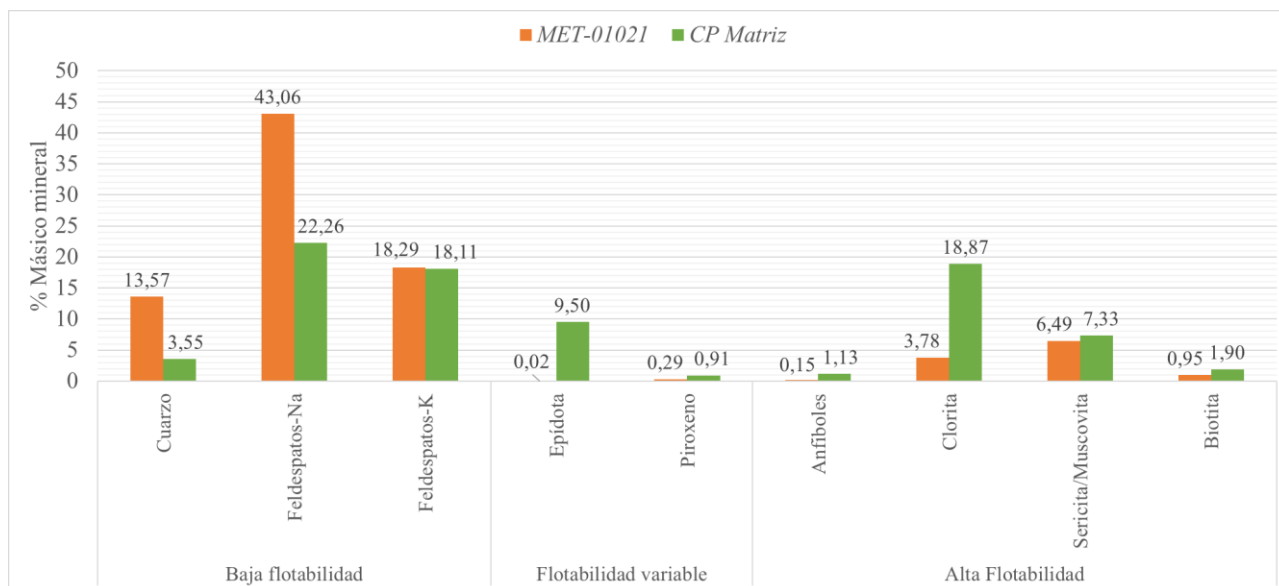


Figura 4.6. Mineralogía de ganga silícea presente en MET-01021 y CP Matriz.

Por otro lado, la Figura 4.7. muestra los grados de liberación de minerales de cobre en cada muestra mineral. A partir de los resultados se obtiene que la muestra *MET-01021* contiene un grado mayor de liberación, es decir, de los minerales de cobre contenidos en la muestra un 67,8% posee un grado de liberación mayor al 95%. Mientras que, para la muestra *CP Matriz*, si bien el porcentaje de grado de liberación mayor se encuentra en la categoría de liberación sobre 95%, en este caso el 38,4% de los minerales de cobre contenidos en la muestra *CP Matriz* pertenecen a esta categoría.

Debido al mayor porcentaje de liberación y mayor contenido de calcopirita en la muestra *MET-01021*, es esperable que la recuperación de cobre fino para esta muestra mineral sea mayor en todas las muestras de aguas a estudiar en la flotación *batch*, en comparación a los resultados de recuperación de cobre fino utilizando la muestra *CP Matriz* en la matriz de flotación a estudiar.

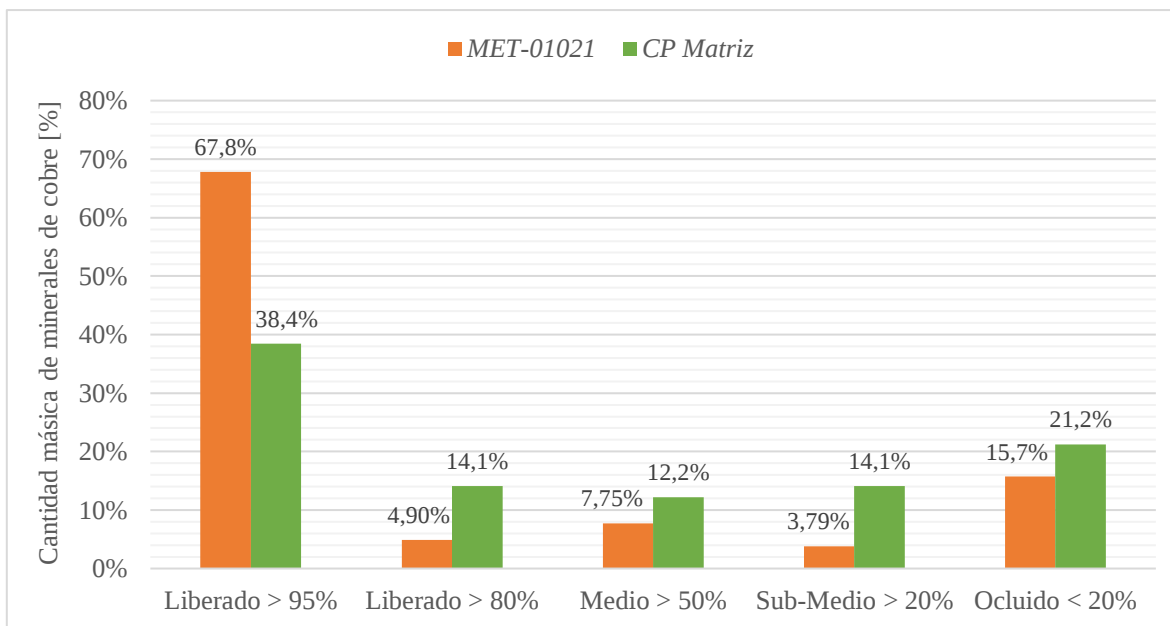


Figura 4.7. Distribución de sulfuros de cobre según grados de liberación.

Además, se reportó también la liberación por clases de tamaño de los minerales de cobre para cada muestra mineral, *MET-01021* y *CP Matriz*, las cuales se muestran en las Figuras 4.8. y 4.9, respectivamente. De estos resultados se demuestra que, en la muestra *MET-01021* la mayor fracción de minerales de cobre con grado de liberación sobre 95%, se encuentra en una clase de tamaño de granulometría menor a 38 micrones, lo cual es un antecedente de que podría aumentar las probabilidades de flotabilidad de los minerales de cobre, lo cual puede repercutir en una mayor recuperación de cobre fino. Por otro lado, para la muestra *CP Matriz* se representa una mayor distribución en cuanto a los grados de liberación por fracción de tamaño, por lo que la probabilidad de flotabilidad de minerales de cobre, en comparación al comportamiento en *MET-01021*, podría ser menor.

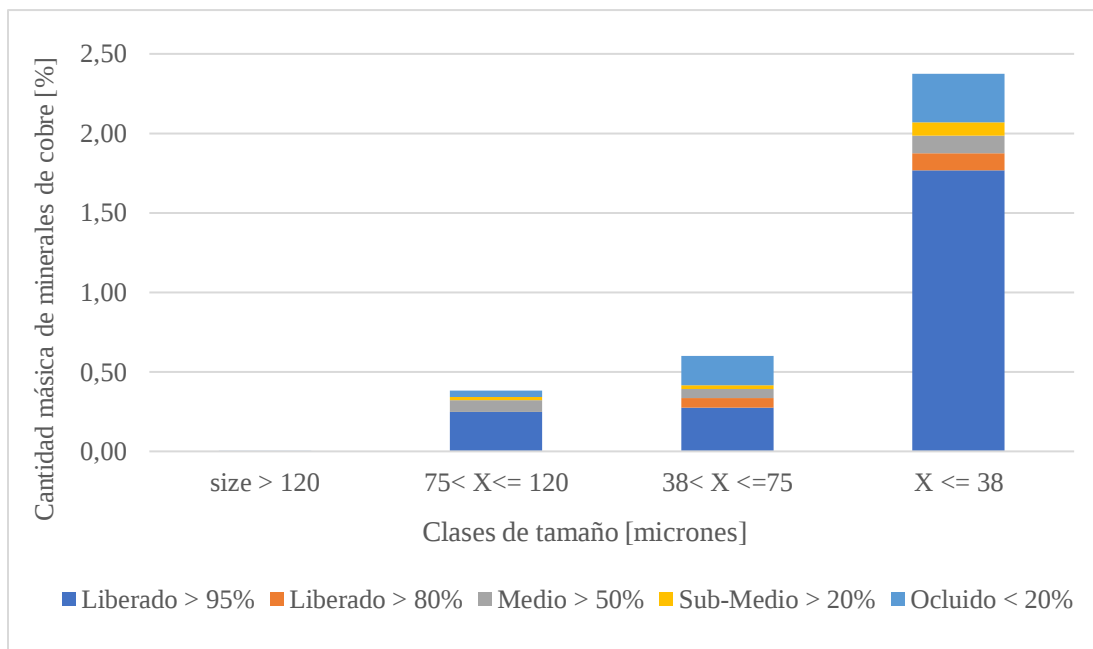


Figura 4.8. Porcentaje de minerales de cobre contenidos en muestra mineral MET-01021, según grados de liberación y clases de tamaño.

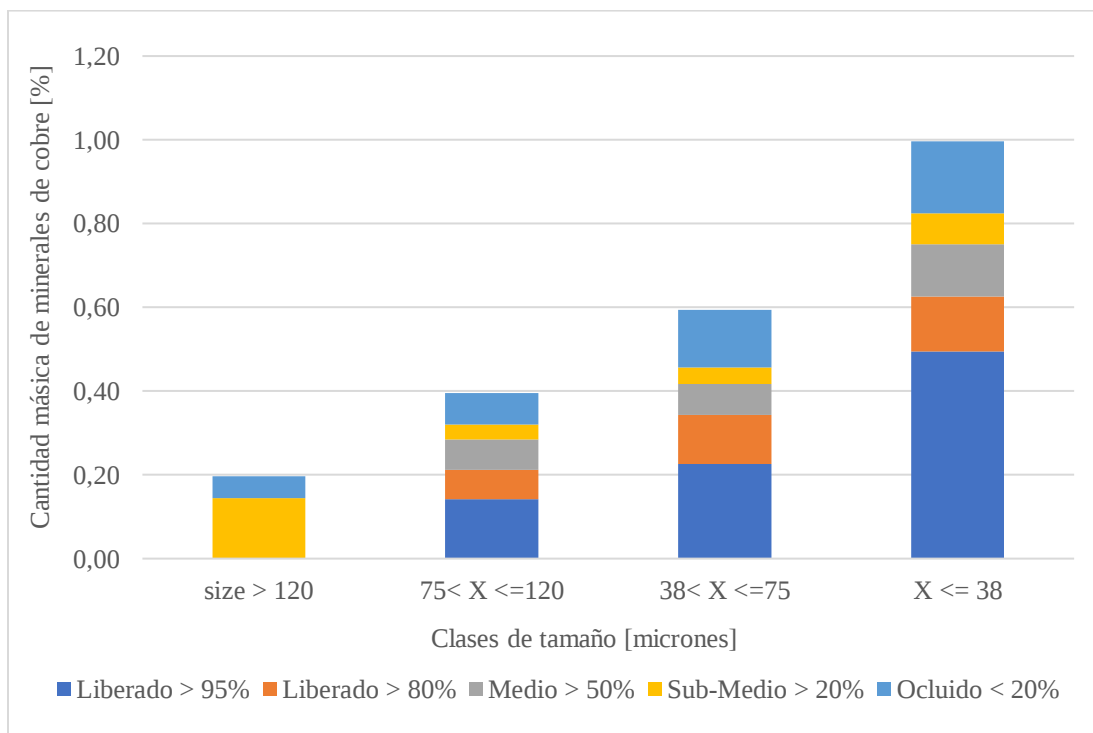


Figura 4.9. Porcentaje de minerales de cobre contenido en muestra mineral CP Matriz, según grados de liberación y clases de tamaño.

4.3. Matriz de pruebas de flotación para evaluar pretratamiento de ablandamiento de aguas

Al realizar la matriz de pruebas de flotación *batch*, se obtienen los resultados experimentales de recuperación de cobre fino, ley de concentrado y recuperación másica, para cada mineral y cada tipo de agua evaluada. En las Tablas 4.1. y 4.2. se reportan los resultados correspondientes a los minerales y las alternativas estudiadas. Cabe destacar, que cada prueba fue realizada en duplicado, de las cuales, se aplicó criterio metalúrgico con apoyo de personal de Anglo American, de manera que se determinó si era factible promediar los resultados, o bien, descartar resultados anómalos según criterio, de alguna de las pruebas del duplicado.

Es importante mencionar que la evaluación del caso de “Agua de Procesos Pretratada” no fue posible experimentarlo en el mineral *MET-01021* por disponibilidad másica del sondaje.

Tabla 4.1. Resultados experimentales flotación *batch* para muestra mineral *MET-01021* evaluando alternativas con y sin pretratamiento de ablandamiento de aguas.

	Agua de Procesos	Agua Fresca	Agua Balsa Tranque	Agua Fresca Pretratada	Agua B. Tranque Pretratada
Recuperación Cobre Fino [%]	80,8	80,6	80,2	84,5	80,8
Ley de Concentrado [%]	4,78	5,39	5,38	5,08	5,52
Recuperación en Peso [%]	21,0	18,6	18,6	21,1	17,5

Tabla 4.2. Resultados experimentales flotación *batch* para muestra mineral *CP Matriz* evaluando alternativas con y sin pretratamiento de ablandamiento de aguas.

	A g u a A a g u a a l F s r a e T s r c a n q u e			
Agua de Procesos		Agua Procesos Pretratada	Agua Fresca Pretratada	Agua B. Tranque Pretratada

Recuperación Cobre Fino [%]	79,2	7 7 9 8 , , 8 3	75,9	82,1	78,1
Ley de Concentrado [%]	2,99	2 3 , , 3 2 3 4	2,71	2,78	3,30
Recuperación en Peso [%]	24,7	3 2 1 2 , , 8 8	22,9	27,6	22,4

Por otro lado, las Figuras 4.10. y 4.11. muestran las curvas cinéticas de flotación en función de la recuperación de cobre fino para *MET-01021* y *CP Matriz*, respectivamente. Las curvas cinéticas de ley de concentrado y de recuperación másica se reportan en el Anexo 10.

De los resultados representados en las tablas 4.1. y 4.2. y en las Figuras 4.10. y 4.11. se observó que el uso de Agua Fresca Pretratada en flotación *batch* generó el mejor rendimiento en cuanto a recuperación de cobre fino al flotar las dos muestras minerales disponibles para el estudio (*MET-01021* y *CP Matriz*). En cuanto a sus cinéticas, no necesariamente fueron más rápidas que las cinéticas de las flotaciones que utilizaron las otras muestras de aguas, tratadas y sin tratar; sin embargo, alcanzaron una mayor recuperación al minuto 17 (minuto en que se considera representativo al tiempo de residencia de una flotación *rougher* en El Soldado, según estándar de flotación de Laboratorio Metalúrgico).

A partir del estándar de flotación *batch* de Laboratorio Metalúrgico de El Soldado (descrito en Anexo 4), el agua utilizada en estándar es Agua de Procesos. Por lo tanto, en adelante se menciona la “condición estándar” (codificada como “STD”) como una prueba representativa del comportamiento de flotación *rougher* en planta El Soldado, bajo las directrices del estándar mencionado, por lo que será el caso base para comparar con las otras pruebas de flotación *batch* que componen la matriz.

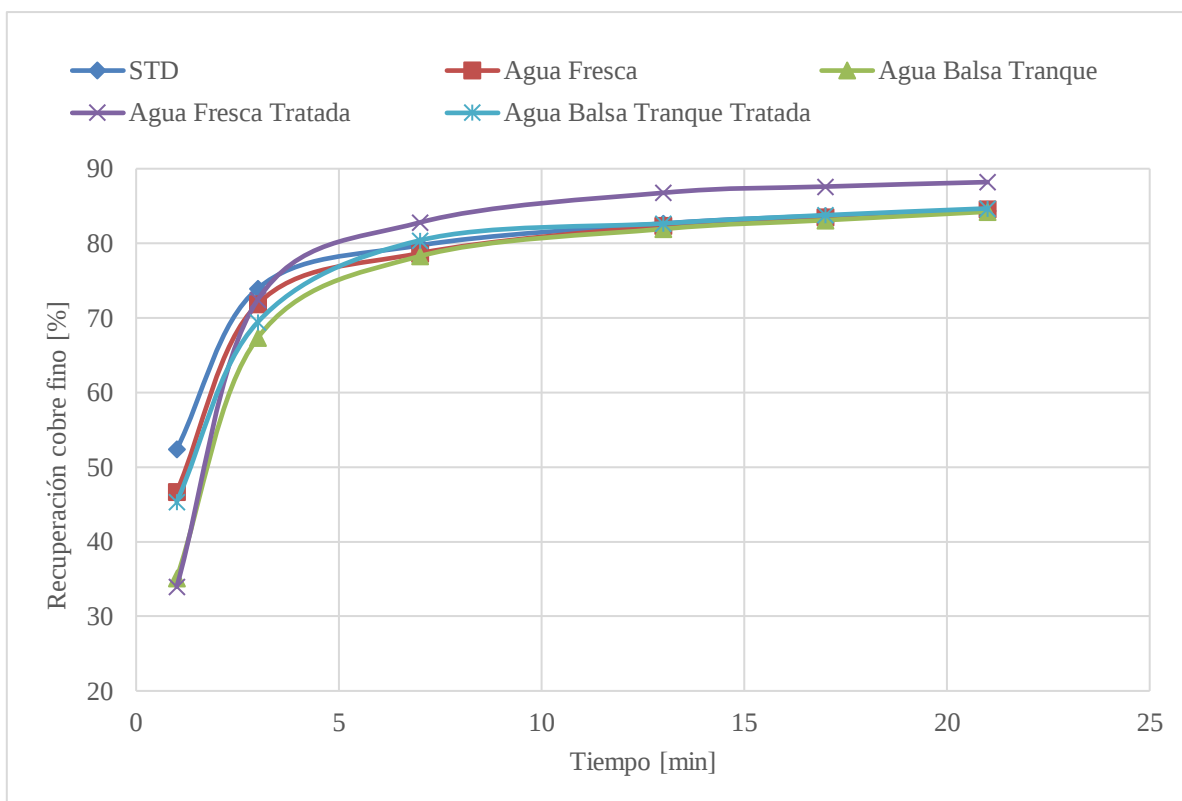


Figura 4.10. Cinética de recuperación de cobre fino por flotación batch con mineral MET-01021.

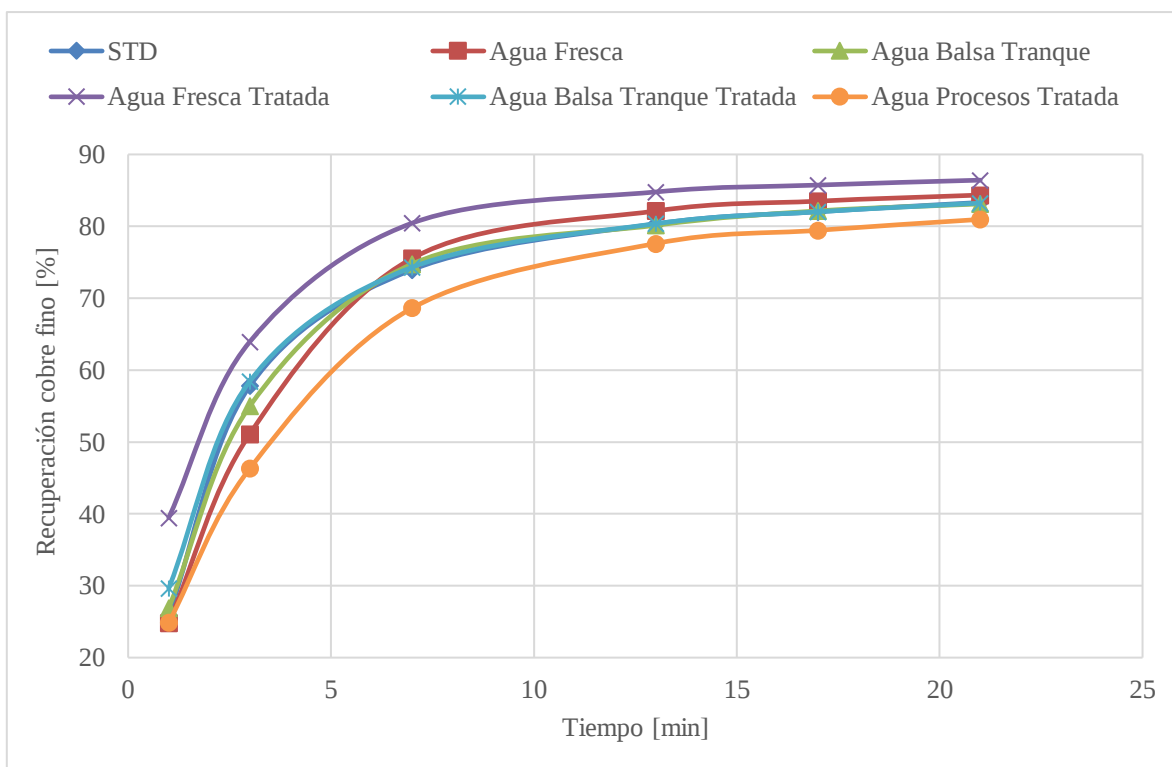


Figura 4.11. Cinética de recuperación de cobre fino por flotación batch con mineral CP Matriz.

Como se mencionó anteriormente, el aumento en recuperación de cobre fino se percibió para las pruebas de flotación en que se utilizó Agua Fresca Pretratada. Para el caso de la muestra *MET-01021*, se percibió un aumento en la recuperación de cobre fino, desde la condición estándar con un 80,8% hasta un 84,5%. En la muestra *CP Matriz*, se reportó un aumento de recuperación desde la condición estándar con un 79,2% hasta un 82,1%. Por ende, al realizar la comparación entre la condición estándar y la condición de Agua Fresca Pretratada, existe un aumento de la recuperación de cobre fino de un 3,7% en muestra *MET-01021* y un 2,9% para muestra *CP Matriz*. Análogo a lo anterior, se realizó la comparación entre los casos de flotación *batch* utilizando Agua Fresca y Agua Fresca Pretratada, los aumentos de recuperación percibidos son de 3,9% para *MET-01021* y 2,3% para *CP Matriz*, cuyas cinéticas de flotación se representan en la Figura 4.12.

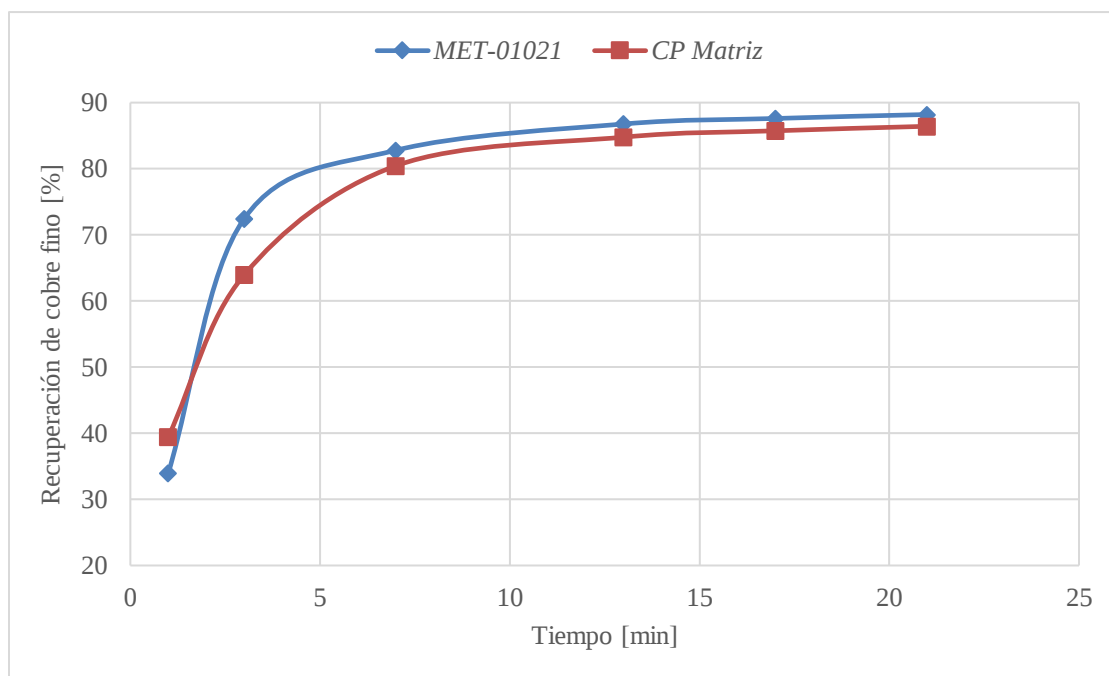


Figura 4.12. Comparación entre cinéticas de flotación batch experimental utilizando Agua Fresca Pretratada.

Considerando lo discutido en sección 4.2., las diferencias en las cinéticas se relacionan directamente con la naturaleza de cada muestra mineral alimentada a flotación, por ejemplo, la mayor recuperación alcanzada por *MET-01021* se debe a que contiene una mayor cantidad de minerales de cobre, específicamente de calcopirita, con un 3,27%, en comparación a *CP Matriz* que contiene 2,26% del mismo mineral de cobre. La calcopirita es el mineral de mayor presencia en ambos minerales de alimentación, en cuanto a mineralogía de cobre. Otro factor que explica la mayor recuperación obtenida en *MET-01021* es el grado de liberación de este mineral, ya que es considerablemente mayor que para *CP Matriz*. A partir de esto, se observa que la mayor cantidad de mineral de cobre en *MET-01021* está liberado y en fracciones muy finas, lo que permite una mayor adhesión del agregado partícula-burbuja. En el caso de *CP Matriz*, existe una mayor distribución en las clases de tamaños y también en los grados de liberación.

Un alto contenido de ganga en un medio con iones metálicos divalentes, tal como se explicó en el Capítulo 2, genera efectos negativos en el rendimiento de la flotación, dado el fenómeno de heterocoagulación entre minerales de cobre y minerales de ganga, puesto que los iones de dureza (calcio y magnesio) activan el fenómeno y producen el efecto de cubrimiento superficial. Por ello, al aplicar el pretratamiento de ablandamiento que remueve dichos iones en las muestras de aguas a estudiar (Fresca, Balsa Tranque y Procesos, con y sin tratamiento), se genera un efecto positivo aún más notorio en los resultados de las flotaciones con el mineral *MET-01021*, dado que esta muestra mineral contenía una cantidad considerablemente alta de feldespatos potásicos (clasificados como ganga de baja flotabilidad), por lo que al remover los agentes activadores del efecto de cubrimiento superficial, se tiene un aumento en recuperación de cobre fino mucho mayor.

A pesar de que se tuvo resultados beneficiosos en términos de recuperación de cobre fino en las pruebas de flotación *batch* utilizando Agua Fresca Pretratada, se debe tener en consideración que la fuente de agua que ingresa a flotación en planta El Soldado es Agua de Procesos, la cual está compuesta por Agua Fresca en un 20% aproximadamente de su composición total. Bajo esta premisa, implementar el pretratamiento de ablandamiento en la fuente de Agua Fresca en El Soldado no impactaría en la planta de la misma manera que se reportó en las pruebas de flotación *batch*. A raíz de esto, se estudiaron tres alternativas en las cuales se espera un impacto positivo en el rendimiento de la flotación, de manera de analizar los resultados de flotaciones *batch* para cada alternativa, con uso exclusivo de Agua de Procesos.

4.4. Adición de reactivos dispersantes en flotación batch

Se evaluaron los reactivos dispersantes según las dosis recomendadas, informadas por cada proveedor, siendo 100 [g/ton] y 70 [g/ton] para los reactivos silicato de sodio (*PRODEP-610*) y cadena de policarboxilato (*XP-3841*), respectivamente. En la Tabla 4.3. se reportan los resultados de las flotaciones con adición de ambos reactivos dispersantes, incluyendo la flotación *batch* estándar a modo de comparación. Cabe destacar, que para estas pruebas de flotación *batch* se ingresó exclusivamente muestra *CP Matriz* como mineral de alimentación, debido a la disponibilidad de mineral en Laboratorio Metalúrgico.

Tabla 4.3. Resultados experimentales flotación batch para muestra mineral *CP Matriz* evaluando alternativas adición de dispersantes.

	STD	PRODEP-610	XP-3841
Recuperación Cobre Fino [%]	79,2	78,8	79,1
Ley de Concentrado [%]	2,99	3,20	2,92
Recuperación en Peso [%]	24,7	22,8	24,8

Se observó que los resultados de la evaluación de las alternativas de dispersantes, no son beneficiosos en términos de recuperación de cobre fino. Si bien la adición de silicato de sodio mostró mejores resultados en términos de ley de concentrado de cobre, no cumplen con el objetivo general de aumentar la recuperación en la flotación *batch*. Por lo tanto, se descarta la alternativa de adición de reactivos dispersantes estudiados (silicato de sodio y cadena de policarboxilato) para mejoras en recuperación de cobre fino en flotación. No obstante, se podría dejar abierta esta alternativa para futuros estudios en que se evalúen otro tipo de reactivos dispersantes, donde es posible encontrar uno que se adapte a las características mineralógicas del mineral de alimentación a flotación en planta El Soldado.

4.5. Pruebas de flotación con Agua de Procesos Salobre

Al preparar el Agua de Procesos Salobre, se utilizaron 12,5 [g] de sal, alcanzando, de esta manera, un valor de conductividad de 8.010 [$\mu\text{S}/\text{cm}$]. En la Tabla 4.4. se reportan los resultados obtenidos de la flotación *batch* utilizando esta agua.

Tabla 4.4. Resultados experimentales flotación *batch* para mineral CP Matriz, evaluando Agua de Procesos Salobre.

	STD	Agua Salobre
Recuperación Cobre Fino [%]	79,2	78,5
Ley de Concentrado [%]	2,99	2,87
Recuperación en Peso [%]	24,7	24,9

Al igual que en los resultados obtenidos en la alternativa de adición de reactivos dispersantes a la flotación *batch*, en este caso tampoco se obtiene una mejora en la recuperación de cobre fino, al contrario, disminuye. Por ello, se puede definir que para el estándar de flotación aplicado y la mineralogía estudiada, el valor de conductividad definido para Agua de Procesos Salobre (8.010 [$\mu\text{S}/\text{cm}$]) no beneficia la operación, por lo que se descarta como alternativa de mejora en flotación. Sin embargo, esto da paso a una propuesta de estudio futuro, para analizar el impacto de rangos de conductividad en flotación (menores a 8.000 [$\mu\text{S}/\text{cm}$] y mayores a 2.500 [$\mu\text{S}/\text{cm}$]) apelando al efecto de compresión de doble capa eléctrica descrito en Capítulo 2.

4.6. Aplicación de pretratamiento de remoción de sulfatos del Agua de Procesos

De la sección 4.3. se definió que el uso de Agua de Procesos Pretratada y el Agua Balsa Pretratada en las pruebas de flotación *batch* no perciben un comportamiento positivo en términos de aumento de recuperación de cobre fino, lo que, al comparar con Agua Fresca Pretratada, que fue el caso en que si se mostró aumento en la recuperación respecto a la condición estándar, la principal causa se estima que es la gran diferencia de sulfatos contenidos, según lo indicado en el análisis químico de calidad de aguas (Anexo 8). Esto da paso a que exista una probabilidad de que la alta concentración de sulfatos tenga un efecto mayor que el efecto inhibidor de recuperación de los iones de dureza (calcio y magnesio), potenciándose así un efecto inhibidor en recuperación de cobre fino producido por los iones sulfatos.

Para corroborar lo mencionado en el párrafo anterior, se aplica el pretratamiento de eliminación de sulfatos para el Agua de Procesos, bajo la metodología descrita en el Capítulo 3, probando las tres dosis definidas de cloruro de bario acuoso al 5% en peso (500, 750 y 1000 [mL]). Se realiza un análisis químico para cada caso, en el cual se comprueba la remoción de sulfatos, cuyos resultados están tabulados en el Anexo 9, mientras que en la Figura 4.13. se resume la variación de la concentración de sulfatos, según las dosis de cloruro

de bario acuoso agregadas, comparándolo con el caso base de la concentración en Agua de Procesos sin tratar.

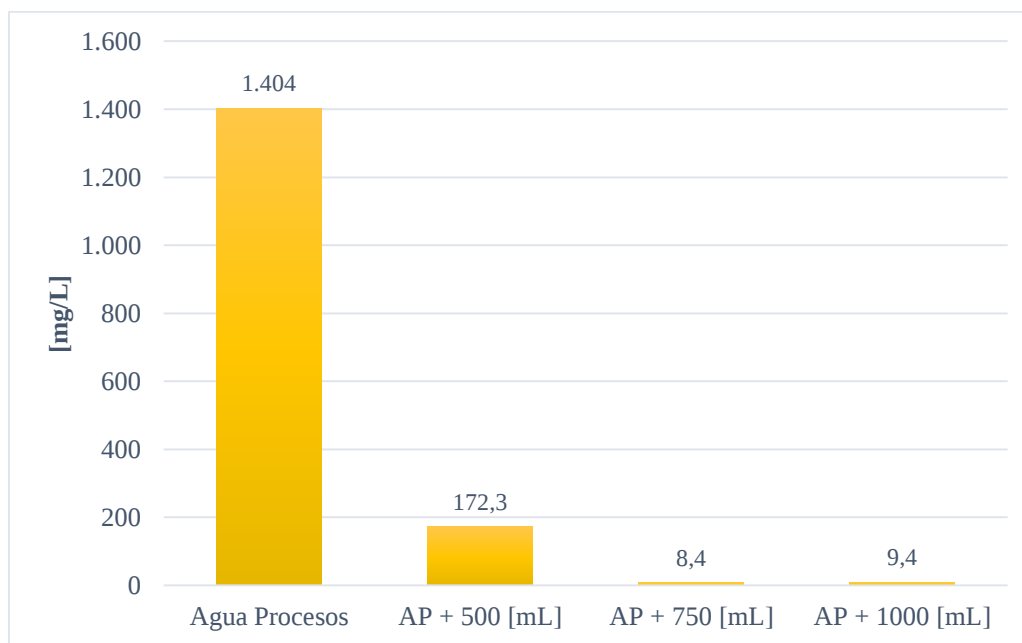


Figura 4.13. Concentración de sulfato en Agua de Procesos ("AP") con y sin tratamiento de remoción de sulfatos con las distintas dosis de cloruro de bario acuoso al 5% en peso.

4.7. Matriz de pruebas de flotación *batch* para evaluar efecto de remoción de sulfatos

Para evaluar la influencia del pretratamiento de remoción de sulfatos en el Agua de Procesos a partir de los resultados de las flotaciones *batch*, se aplicó previamente el pretratamiento de ablandamiento, de manera que los resultados pudiesen ser comparables con los datos obtenidos en la realización de las pruebas de la matriz de flotación descritos en la sección 4.3.; y así también, evitar posibles interferencias entre los efectos inhibidores producidos por iones de dureza (calcio y magnesio) y de sulfatos. Cabe destacar que se utilizó la muestra mineral *CP Matriz* como mineral de alimentación a las pruebas de flotación *batch*, debido a la disponibilidad de muestras a flotar.

Por disponibilidad de reactivo cloruro de bario, se realizaron las pruebas de flotación de esta matriz sólo una vez por prueba, es decir, sin duplicado; por lo que se reportaron los resultados tal cual fueron informados en la realización de las pruebas. Se utilizó la condición estándar de flotación *batch* como el caso base, y se comparó con los resultados de las pruebas de flotación *batch* utilizando agua con pretratamiento de remoción de sulfatos, considerando las tres dosis de cloruro de bario acuoso, según la metodología propuesta en Capítulo 3. En la Tabla 4.5. se reportaron los resultados experimentales obtenidos, donde se destaca que para los tres casos de uso de agua pretratada para remoción de sulfatos resultan en un aumento de

recuperación de cobre fino, donde el mayor incremento se obtuvo al agregar la mayor dosis de cloruro de bario acuoso, aumentando en 3,1%.

Tabla 4.5. Efecto en parámetros de flotación con remoción de sulfatos a diferentes dosis de cloruro de bario al 5% en peso y pretratamiento de ablandamiento de aguas.

	STD	500 mL BaCl ₂ + abland.	750 mL BaCl ₂ + abland.	1000 mL BaCl ₂ + abland.
Recuperación Cobre Fino [%]	79,2	81,0	81,5	82,3
Ley de Concentrado [%]	2,99	2,21	2,28	2,20
Recuperación en Peso [%]	24,7	33,7	33,3	33,9

Además, las cinéticas de flotación *batch* reportadas para cada prueba de la matriz, en términos de recuperación de cobre fino, se muestran en la Figura 4.14. Las cinéticas según ley de concentrado y recuperación másica se representan en el Anexo 11. De las curvas se extrae que el comportamiento cinético varía según la prueba, pero careciendo de duplicados no se puede definir dichas cinéticas como las definitivas de cada prueba, dado que está sujeto a errores experimentales en su realización. Sin embargo, todas las pruebas de flotación *batch* con Agua de Procesos Pretratada (con las tres dosis de cloruro de bario acuoso) convergen a una recuperación de cobre fino mayor a la condición estándar.

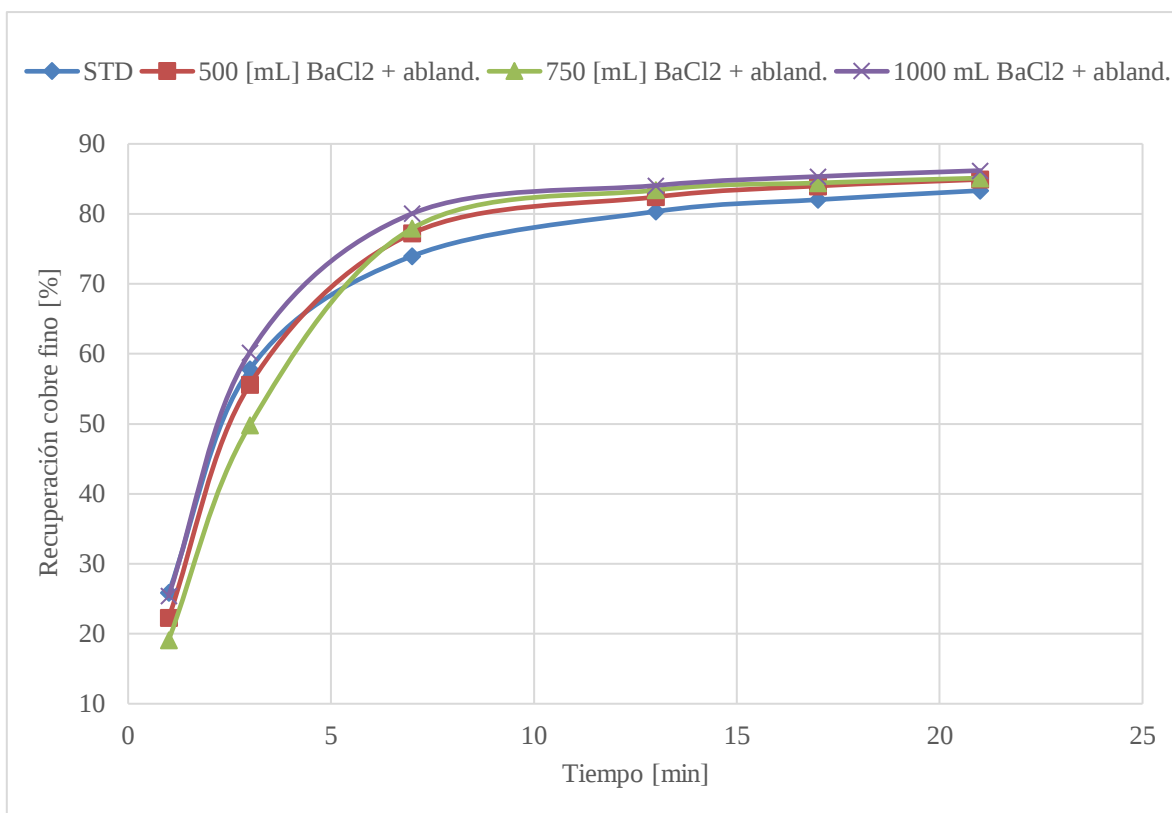


Figura 4.14. Cinética de recuperación de cobre fino en flotación batch, evaluando pretratamientos de remoción de sulfato y de ablandamiento en Agua de Procesos.

Aun cuando los resultados de este pretratamiento son beneficiosos, se propone continuar este estudio con la implementación de un tratamiento de remoción de sulfatos al Agua de Procesos más sustentable, puesto que el cloruro de bario es altamente dañino para el medioambiente dado que es un metal pesado y clasificado por el proveedor con grado de toxicidad n°3.

Capítulo 5: Conclusiones y Recomendaciones

5.1. Conclusiones

Considerando los resultados experimentales, el análisis y comparación entre ellos, según las metodologías implementadas, se determina que una potencial solución a la problemática (bajas recuperaciones asociadas al efecto de cubrimiento superficial de mineral), considerando el alcance de este estudio, es la implementación de un pretratamiento combinado de remoción de iones de dureza (calcio y magnesio) y de remoción de iones sulfatos, aplicados en el Agua de Procesos, es decir, el agua que ingresa directamente a la flotación en planta El Soldado. De esta manera, se logra aumentar hasta un 3% de recuperación mineral, en comparación a las condiciones actuales a las que trabaja la planta de flotación sulfuros de El Soldado (las cuales se representan por los resultados de las pruebas de flotación *batch* realizadas bajo el estándar de flotación del Laboratorio Metalúrgico, descrito en Anexo 4). Cabe destacar que, todos los resultados fueron obtenidos a escala de laboratorio (flotación *batch*), por lo que para determinar la factibilidad técnica de esta propuesta a nivel planta, se debería realizar un estudio de escalamiento de los pretratamientos y sus metodologías. Además, que se debería corroborar los resultados obtenidos en esta investigación con una mayor cantidad de pruebas de flotación *batch*, para un adecuado análisis y validación de datos.

A partir de los resultados, se relacionó con la base teórica de que la ganga silíceo ultra fina genera efectos negativos en la recuperación mineral, por el fenómeno de heterocoagulación entre la ganga arcillosa y los minerales de cobre, que converge en el efecto de cubrimiento superficial de mineral valioso. Además, flotar en un medio con iones divalentes que hidrolizan en diferentes especies cargadas eléctricamente (o que precipitan), se produce una activación de dicho efecto. Se concluyó que, dentro del alcance de este estudio, se corroboró la base teórica puesto que al eliminar iones que hidrolizan (calcio y magnesio) y/o precipitan (calcio, magnesio y sulfato) se mejora la recuperación de cobre fino en pruebas de flotación *batch*, dado que se eliminan los agentes activadores del efecto de recubrimiento mineral.

Los efectos de la base teórica fueron percibidos, por una parte, en la matriz de evaluación de pretratamiento de ablandamiento químico de aguas, con muestra mineral *MET-01021* dado que su mineralogía de ganga era mayor en términos de feldespatos potásicos, en comparación con la muestra *CP Matriz*, por lo que los beneficios percibidos de la remoción de iones de dureza (calcio y magnesio) activadores de cubrimiento superficial fueron mayores, reportando un aumento de 3,7% de recuperación de cobre fino en la flotación *batch* de *MET-01021* utilizando Agua Fresca Pretratada; para el mismo caso flotando *CP Matriz* se obtuvo un aumento de recuperación de 2,9%. A pesar de esto, otro factor que repercutió en una mayor recuperación de cobre en la muestra mineral *MET-01021* fue una mayor composición másica en cuanto a mineralogía de sulfuros de cobre.

Dado que la eficacia del pretratamiento de ablandamiento reflejado en flotación fue beneficioso solamente para Agua Fresca Pretratada, y siendo esta sólo un 20% de la composición del Agua de Procesos, se le adicionó un pretratamiento de remoción de sulfatos,

estudiado directamente en el Agua de Procesos, donde se percibieron resultados positivos en cuanto a recuperación de cobre fino al flotar con Agua de Procesos pretratada, alcanzando un beneficio máximo del 3,1% de aumento de recuperación. Por lo que se concluyó que la metodología de la combinación de ambos pretratamientos de agua estudiados para Agua de Procesos fue la alternativa que cumple el objetivo general de la presente investigación. No obstante, como propuesta de estudio futuro, los resultados de esta investigación se deberían robustecer al realizar más pruebas con un número mayor de repeticiones, de manera de validar los resultados obtenidos en este estudio, para posteriormente analizar su factibilidad técnica de escalamiento a planta piloto y planta industrial. Además, de considerar otras alternativas de tratamiento de remoción de sulfatos al agua utilizada en flotación, que sean más sustentables.

Respecto a las alternativas estudiadas de adición de reactivos dispersantes y aumento de conductividad del Agua de Procesos (Agua de Procesos Salobre), no se obtuvieron resultados favorables en términos de mejoras en la recuperación de cobre fino. Sin embargo, se propone como estudio futuro, volver a considerar dichas alternativas, pero con otros reactivos que se adecuen a la mineralogía de El Soldado, y considerando por otro lado, un rango menor de conductividad del agua para analizar su impacto en la flotabilidad del mineral.

5.2. Recomendaciones

- Repetir procedimiento y análisis experimental considerando las mismas variables a estudiar en ambos pretratamientos en duplicado (o triplicado, si es posible), con el objetivo de corroborar o refutar los resultados de esta investigación, mediante una adecuada validación de datos.
- Estudiar alternativas de tratamiento de remoción de sulfatos en el Agua de Procesos que no generen un impacto ambiental negativos ni riesgos al ecosistema, de tal manera que reemplacen la metodología de remoción por precipitación con sal de bario, dado el grado de toxicidad de este compuesto.
- Verificar la factibilidad técnica de implementar la combinación de ambos pretratamientos al Agua de Procesos a nivel industrial, según las condiciones de la planta de flotación sulfuros de El Soldado, mediante un estudio de escalamiento de los resultados obtenidos en la presente investigación. Esto, considerando la alternativa sustentable propuesta en el punto anterior.
- Evaluar la posibilidad de implementar únicamente el pretratamiento de remoción de sulfatos al Agua de Procesos de El Soldado, cuya visión es reducir costos de capital y de inversión futuros. Esto, considerando la alternativa sustentable de tratamiento de remoción de sulfato.
- Realizar una matriz experimental de pruebas de flotación, donde se estudien tipos de reactivos dispersantes, diferentes a los estudiados en esta investigación, para evaluar posibles beneficios en el rendimiento de la flotación, considerando la mineralogía y las condiciones de operación de El Soldado.

Referencias

- Al-Saleh, M., & Sundararaj, U. (2009). A review of vapor grown carbon nanofiber/polymer conductive composites. *Carbon*, 2-22.
- Anglo American. (2022). *El Soldado*. Obtenido de <https://chile.angloamerican.com/operaciones/el-soldado.aspx>
- Anglo American. (2022). *Medio Ambiente*. Obtenido de Agua: <https://chile.angloamerican.com/sustentabilidad/medio-ambiente.aspx#agua>
- Anglo American División El Soldado. (2021). *Preparación de Cargas de Molienda*. Nogales: Anglo American Chile.
- Anglo American División El Soldado. (2021). *Pruebas de Flotación*. Nogales: Anglo American Chile.
- Anglo American División El Soldado. (2021). *Pruebas de Molienda*. Nogales: Anglo American Chile.
- Arnold, B., & Aplan, F. (1986). The effect of clay slimes on coal flotation, part II: The role of water quality. *International Journal of Mineral Processing*, 243-260.
- BHP. (2019). *Copper: Properties, facts, uses and production*. Obtenido de https://www.bhp.com/es/-/media/documents/business/2019/191119_whatiscopper.pdf
- Biswas, A., & Davenport, W. (1993). *El Cobre: Metalurgia Extractiva*. Mexico D.F.: Limusa S.A.
- Bowell, R. (2004). A review of sulfate removal options for mine waters. *Proceedings of Mine Water*, 1-24.
- Bulatovic, S. (2007). *Handbook of Flotation Reagents: Chemistry, Theory and Practice*. Ontario: Elsevier.
- Can, I. B., Bicak, Ö., Özcelik, S., Can, M., & Ekmekci, Z. (2020). Sulphate Removal from Flotation Process Water Using Ion-Exchange Resin Column System. *Minerals*, 655-671.
- COCHILCO. (Abril de 2015). *Caracterización de los costos de la gran minería del Cobre*. Obtenido de https://www.cochilco.cl/Listado%20Tematico/Informe_caracterizacion_de_los_costos.pdf
- COCHILCO. (Marzo de 2022). *Informe de tendencias del mercado del Cobre: Proyecciones para los años 2022 y 2023*. Obtenido de [https://www.cochilco.cl/Mercado%20de%20Metales/Informe%20de%20Tendencias%20Mercado%20del%20Cobre%20Q1%202022%20\(VF\).pdf](https://www.cochilco.cl/Mercado%20de%20Metales/Informe%20de%20Tendencias%20Mercado%20del%20Cobre%20Q1%202022%20(VF).pdf)
- COCHILCO. (2022). *Informe semanal del mercado internacional del Cobre*. Obtenido de <https://www.cochilco.cl/Mercado%20de%20Metales/MERC%202022%2005%2013.pdf>
- CODELCO Educa. (2018). *Propiedades del Cobre*. Obtenido de <https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/edic/base/port/propiedades.html>
- Copper Development Association. (2022). Obtenido de https://www.copper.org/resources/properties/atomic_properties.html

- Corin, K., Reddy, A., Miyen, L., Wiese, J., & Harris, P. (2011). The effect of ionic strength of plant water on valuable mineral and gangue recovery in a platinum bearing ore from Merensky reef. *Minerals Engeneering*, 131-137.
- Cruz, C., Ramos, J., Robles, P., Leiva, W., Jeldres, R., & Cisternas, L. (2020). Partial seawater desalination treatment for improving chalcopryrite floatability and tailing flocculation with clay content. *Minerals Engeneering*, 151-157.
- Davenport, W., King, M., Schlesinger, M., & Biswas, A. (2002). *Extractive Metallurgy of Copper*. Oxford: Elsevier Science.
- Farrokhpay, S. (2012). The importance of rheology in mineral flotation: A review. *Minerals Engeneering*, 272-278.
- Farrokhpay, S., Morris, G., Fornasiero, D., & Self, P. (2005). Influence of polymer functional group architecture on titania pigment dispersion. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engeneering Aspects*, 183-191.
- Forbes, E., Davey, K., & Smith, L. (2014). Decoupling rheology and slime coatings effect on the natural flotability of chalcopryrite in a clay-rich flotation pulp. *Minerals Engeneering*, 136-144.
- Fuerstenau, M., & Han, K. (2003). *Principles of Mineral Processing*. Colorado: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. (SME).
- Gao, Z.-y., Jiang, Z.-y., Sun, W., & Gao, Y.-s. (2021). Typical roles of metal ions in mineral flotation: a review. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2081-2101.
- Grano, S., Wong, P., Skinner, W., & Johnson, N. (1995). Detection and Control of Calcium Sulfate Precipitation in the Lead Circuit of the Hilton Concentrator of Mount Isa Mines Limited, Australia. *Flotation operating practices and fundamentals* (págs. 171-180). San Francisco: SME.
- Gupta, A., & Yan, D. (2016). *Mineral Processing Design and Operations*. Amsterdam: Elsevier.
- Hirajima, T., Suyantara, G., Ichikawa, O., Elmahdy, A., Miki, H., & Sasaki, K. (2016). Effect of Mg^{+2} y Ca^{+2} as divalent seawater cations on the floatability of molybdenite and chalcopryrite. *Minerals Engeneering*, 83-93.
- Holmgren, C. (1987). Antecedentes para un modelo genético del yacimiento El Soldado, V Región Valparaíso, Chile. *Andean Geology*, 3-18.
- Hunter, R. (1988). *Zeta Potential in Colloid Science: Principles and Applications*. Sydney: Academic Press.
- Ineich, T., Degreve, C., Karamoutsos, S., & Du Plessis, C. (2017). Utilization efficiency of lime consumption during magnesium sulfate precipitation. *Hydrometallurgy*, 241-249.
- Jeldres, R., Arancibia-Bravo, M., Reyes, A., Aguirre, C., Cortes, L., & Cisternas, L. (2017). The impact of seawater with calcium and magnesium removal for the flotation of copper-molybdenum sulphide ores. *Minerals Engeneering*, 10-13.

- Jeldres, R., Uribe, L., Cisternas, L., Gutiérrez, L., Leiva, W., & Valenzuela, J. (s.f.). The effect of clay minerals on the process of flotation of copper ores. a.
- Laskowski, J., & Castro, S. (27-30 de Agosto de 2017). Hydrolysis of metallic ions in mineral processing circuits and its effect on flotation. *COM 2017 Conference of Metallurgists*. Vancouver: University of British Columbia Library. Obtenido de [doi:http://dx.doi.org/10.14288/1.0347200](http://dx.doi.org/10.14288/1.0347200)
- Lessard, R., & Zieminski, S. (1971). Bubble Coalescence and Gas Transfer in Aqueous Electrolytic Solutions. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 260-269.
- Liu, W., Moran, C. J., & Vink, S. (2013). A review of the effect of water quality on flotation. *Minerals Engineering*, 91-100.
- London Metal Exchange. (2022). *LME Copper Price Graphs*. Obtenido de <https://www.lme.com/en/Metals/Non-ferrous/LME-Copper#Price+graphs>
- Lopez, I. (2022). *Caracterización de las variables mineralógicas del yacimiento El Soldado para identificar parámetros geometalúrgicos que afectan la recuperación de cobre*. Obtenido de <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/184853>
- McFadzean, B., Moller, K., & O'Connor, C. (2015). A thermochemical study of thiol collector surface reactions on galena and chalcopyrite. *Minerals Engineering*, 83-88.
- MERCK Millipore. (2022). *Bario Cloruro Dihidrato*. Obtenido de https://www.merckmillipore.com/CL/es/product/Barium-chloride-dihydrate,MDA_CHEM-101719#anchor_orderingcomp
- Mpofu, P., Addai-Mensah, J., & Ralston, J. (2003). Influence of hydrolyzable metal ions on the interfacial chemistry, particle interactions, and dewatering behavior of kaolinite dispersions. *Journal of Colloid and Interface Science*, 349-359.
- Muzenda, E. (2010). An Investigation into the Effect of Water Quality on Flotation Performance. *World Academy of Science*, 237-241.
- Ni, C., Xie, G., Jin, M., Peng, Y., & Xia, W. (2016). The difference in flotation kinetics of various size fractions of bituminous coal between rougher and cleaner flotation processes. *Powder Technology*, 210-216.
- October, L., Corin, K., Manono, M., Schreithofer, N., & Wiese, J. (2020). A fundamental study considering specific ion effects on the attachment of sulfide minerals to air bubbles. *Minerals Engineering*, 151-156.
- Okrusch, M., & Frimmel, H. (2020). *Mineralogy*. Würzburg: Springer.
- Prestidge, C. (1997). Rheological investigations of ultrafine galena particle slurries under flotation-related conditions. *International Journal of Mineral Processing*, 241-254.
- SERNAGEOMIN. (2021). *Anuario de la Minería de Chile*. Obtenido de https://www.sernageomin.cl/pdf/anuario_de_%20la%20Mineria_de_Chile_2020_290621.pdf
- SGS. (2022). *Informe de análisis*. Santiago: SGS.

- Sinche-Gonzalez, M., & Fornasiero, D. (2021). Understanding the effect of sulphate in mining-process water on sulphide flotation. *Minerals Engeneering*, 165-173.
- SONAMI. (2021). *Información de la Minería*. Obtenido de <https://www.sonami.cl/v2/informacion-de-la-mineria/#caracterizacion-de-la-mineria>
- Supelco. (2022). *Bario Cloruro Dihidrato SDS*. Obtenido de https://www.merckmillipore.com/CL/es/product/msds/MDA_CHEM-101719?Origin=PDP
- Trade Map. (2022). *List of importers of Copper ores and concentrates*. Obtenido de https://www.trademap.org/Country_SelProduct_TS.aspx?nvpm=1%7c%7c%7c%7c%7c2603%7c%7c%7c4%7c1%7c1%7c1%7c2%7c1%7c2%7c2%7c1%7c1
- Türk, T., Göcer, S., Güner, K., Ersoy, B., Kalyoncu, E., & Bulut, G. (2019). Developments in Flotation Technology. *IMPC Eurasia Conference* (págs. 310-321). Antalya: Research Gate.
- Uribe, L., Gutierrez, L., Laskowski, J., & Castro, S. (2017). Role of calcium and magnesium cations in the interactions between kaolinite and chalcopyrite in seawater. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 737-749.
- Wang, B., & Peng, Y. (2014). The effect of saline water on mineral flotation - A critical review. *Minerals Engeneering*, 13-24.
- Wang, D. (2016). *Flotation Reagents: Applied Surface Chemistry on Minerals Flotation and Energy Resources Beneficiation*. Beijing: Springer.
- Weber, C., & Peuker, U. (2020). On the Role of Hydrolyzable Metal Cations in the Adsorption of Anionic Surfactants on Negatively Charged Surfaces. *Frontiers in Materials*, 7:40.
- Wills, B., & Finch, J. (2016). *Mineral Processing Technology: An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery*. Oxford: Elsevier.
- Yang, X., Bu, X., Xie, G., & Chelgani, C. (2021). A comparative study on the influence of mono, di, and trivalent cations on the chalcopyrite and pyrite flotation. *Journal of Materials Research and Technology*, 1112-1122.
- Yianatos, J., & Vinnett, L. (2015). *Flotación de Minerales*. Valparaíso: USM.
- Yianatos, J., Bergh, L., Vinnett, L., Contreras, F., & Díaz, F. (2010). Flotation rate distribution in the collection zone of industrial cells. *Minerals Engeneering*, 1030-1035.
- Yu, Y., Ma, L., Cao, M., & Liu, Q. (2017). Slime coatings in froth flotation: A review. *Minerals Engeneering*, 26-36.
- Zanin, M., Lambert, H., & Du Plessis, C. (2019). Lime use and functionality in sulphide mineral flotation: A review. *Minerals Engeneering*, 143-156.
- Zhu, H., Li, Y., Lartey, C., Li, W., & Qian, G. (2020). Flotation kinetics of molybdenite in common sulfate salt solutions. *Minerals Engeneering*, 148-152.

Anexos

Anexo 1: Diagrama de flujo de procesos de flotaciones CPF y arenas-lamas de El Soldado.

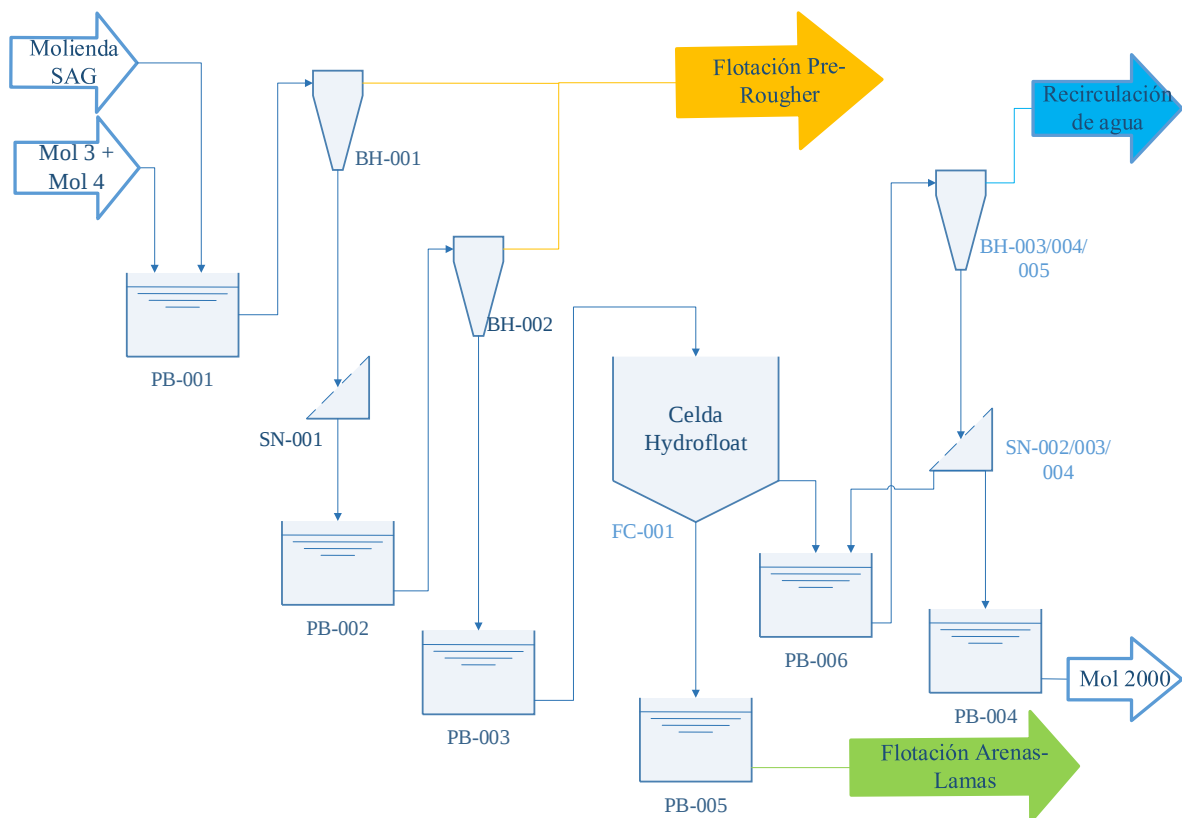


Figura 6.1. Diagrama de flujo de procesos de flotación CPF.

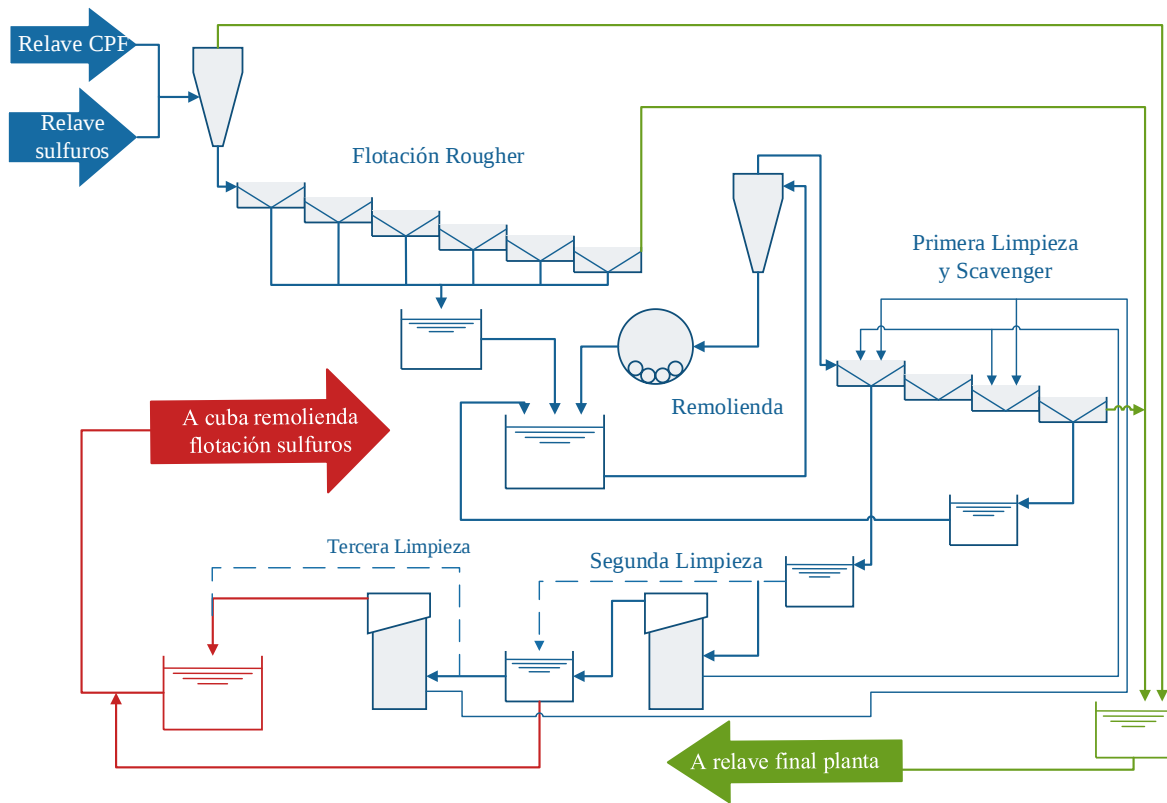


Figura 6.2. Diagrama de flujo de procesos de flotación arenas-lamas.

Anexo 2: Diagrama de especiación de iones calcio y magnesio.

Los diagramas de especiación por hidrólisis iónica mostrados a continuación se muestran en función de la máxima concentración, tanto de calcio como magnesio, reportada en el análisis de calidad de agua realizado para las fuentes de agua de El Soldado. Tal como se muestra más adelante en Anexo 8, corresponden a aproximadamente 0,01 [M] de concentración de calcio, y 1 [mM] de magnesio.

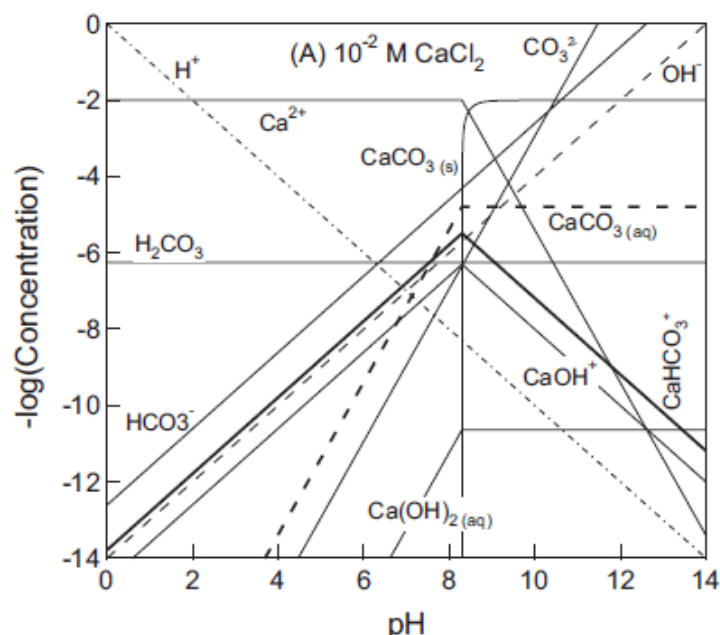


Figura 6.3. Diagrama de especiación de ion calcio en presencia de ion carbonato en función del pH (Hirajima, et. al, 2016).

$$Mg^{2+} I_{TOT} = 1.00 mM$$

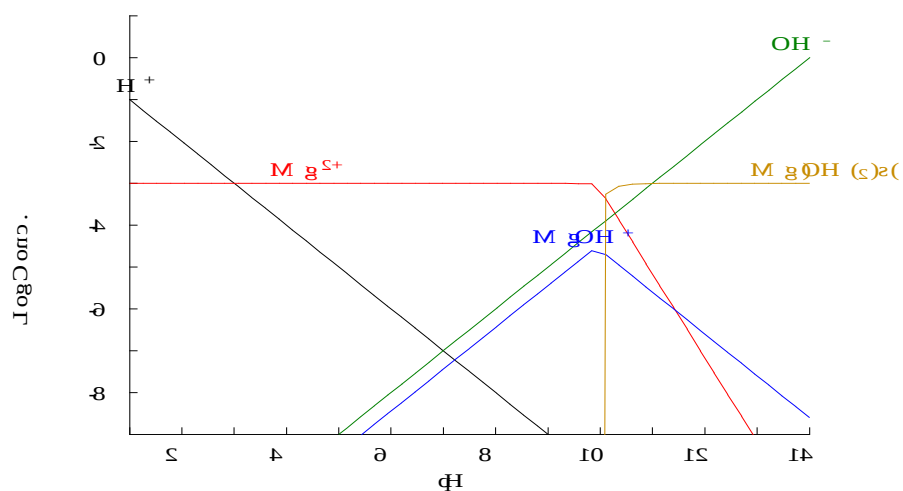


Figura 6.4. Diagrama de especiación de ion magnesio en función del pH (Fuente: Simulador de diagramas de equilibrio químico Hydra-Medusa).

Anexo 3: Comportamiento experimental de Cal en Agua de Procesos.

Considerando 1 [L] de Agua de Procesos en un vaso precipitado, se comienza a añadir cal viva sólida para registrar cada valor de pH adquirido. Esta variable es medida con un pH-metro de laboratorio *Hannah Instruments*.

En la Figura 6.5. se demuestra la tendencia de los puntos medidos experimentalmente de un pH en función de la dosis de cal agregada. Bajo este registro, se obtiene que la dosis requerida para alcanzar un pH de 11,5 en el Agua de Procesos es de 800 [mg/L] de cal viva.

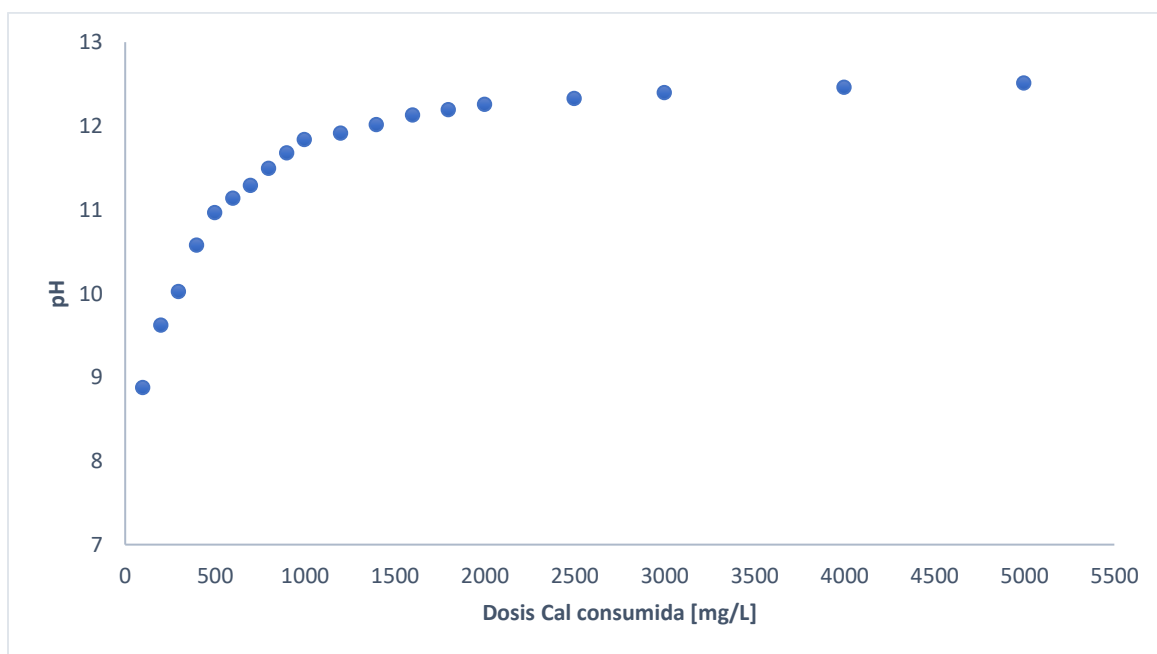


Figura 6.5. Datos experimentales pH alcanzado según dosis de cal viva para Agua de Procesos.

Anexo 4: Procedimiento estándar prueba de cinética de flotación batch de tipo rougher en Laboratorio Metalúrgico.

Como primera etapa, se debe preparar la pulpa mineral, según el procedimiento explicado en Anexo 5. Luego, con esta pulpa, se inicia la prueba de flotación *batch*, considerando los parámetros estándar representados en la Tabla 6.1 y la adición de los reactivos de flotación en tiempos determinados de la prueba, informados en la Tabla 6.2.

Tabla 6.1. Estándar prueba cinética flotación batch tipo rougher de Laboratorio Metalúrgico (Anglo American División El Soldado, 2021).

Porcentaje de sólido [%]	38
pH	10
Volumen de Celda [cc]	4.500
Peso seco de mineral [g]	2.250
Velocidad de agitación [RPM]	1.500
Tiempo duración prueba [min]	25
Tiempo de acondicionamiento [min]	1
Frecuencia de extracción de espuma [s]	15
Reactivo Matcol-500 [g/ton]	20
Reactivo PAX [g/ton]	20
Mezcla espumante ¹ [g/ton]	32
Tipo de agua	Procesos

Tabla 6.2. Dosificación de reactivos en el tiempo de flotación batch para prueba cinética en Laboratorio Metalúrgico (Anglo American División El Soldado, 2021).

	Matcol	PAX	Mezcla espumante²
Minuto 0	-	27 [cc]	57 [μL]
Minuto 7	16 [μL]	18 [cc]	39 [μL]

Para determinar las curvas cinéticas y los valores de recuperación de finos, másica y ley de concentrado de la prueba de flotación, se deben extraer seis concentrados en tiempos definidos, según la Tabla 6.3., mientras que el material residual al finalizar el tiempo de prueba corresponde al relave.

² Mezcla espumante se compone en una proporción de 6:1 de MIBC y Downfroth-350, respectivamente.

Tabla 6.3. Tiempos de extracción de concentrados en estándar de flotación batch de Laboratorio Metalúrgico.

Concentrado	Tiempo de Flotación [min]
Nº1	1
Nº2	3
Nº3	7
Nº4	13
Nº5	17
Nº6	21

Todos los concentrados extraídos y el relave son masados en una balanza de precisión, registrando su masa respectiva; luego son preparados para ser enviados a análisis químico con destino el laboratorio externo SGS, cuya información entregada corresponde a la ley asociada a cada concentrado o relave. Con estos datos, se grafica la curva de la cinética de flotación asociada a la prueba realizada, en función de la recuperación de cobre fino, la ley de concentrado y, la recuperación másica.

Cabe destacar, que los resultados obtenidos en el minuto 17 de este procedimiento representan el comportamiento de flotación *rougher* de planta El Soldado, dado que en este tiempo de la cinética se considera que representa el tiempo de residencia de la flotación *rougher*. Por ello, para considerar la operación realizada por la flotación limpieza, se aplica un factor a la recuperación de cobre fino representado por la ecuación X, siendo 0,96 el factor que representa la recuperación de cobre fino obtenida en la limpieza.

$$R_{Global} = 0,96 \cdot R_{Rougher}$$

Por lo tanto, los resultados finales entregados de recuperación de cobre fino en la cinética de flotación *batch* consideran este factor. Para el caso de la ley de concentrado, no se considera un factor, solamente se define la ley reportada en el minuto 17 como la representativa.

Anexo 5: Procedimiento Laboratorio Metalúrgico El Soldado para preparación de cargas para molienda

- **Primera reducción de la muestra** (Anglo American División El Soldado, 2021)

Si la muestra a procesar proviene de sondajes obtenidos por aire reverso o muestras con material fino (bajo la malla Tyler #10), se debe pasar la muestra por harnero vibratorio, para retirar el material bajo la malla #10 antes de chancar (pre-clasificación).

1. Asegurar buen funcionamiento del extractor de polvo.
2. Verificar buen estado y limpieza del chancador (*Boyd*) y materiales para evitar la contaminación de la muestra. Verificar parada de emergencia.
3. Poner en marcha el chancador antes de introducir la muestra.
4. Alimentar lentamente la muestra al chancador, evitando pérdidas y rebalse del receptáculo del equipo. Esperar que pase toda la muestra, antes de volver a cargar.

- **Harneado de la muestra**

1. Se utiliza un harnero vibratorio con malla Tyler #10.
2. Revisar que el equipo esté en buen estado, bien armado y limpio.
3. Colocar los tarros o bolsas para la recepción de los productos -10 y +10 de la malla.
4. Alimentar el harnero evitando pérdidas y recargar el equipo.
5. Poner en marcha el harnero.
6. Ayudar en forma manual a la buena distribución y evacuación de la muestra sobre la malla (con brocha de pelo suave).
7. Continuar alimentando el equipo.
8. Recolectar los productos -10 y +10 de la malla.
9. Las etapas de reducción en chancador y clasificación en harnero vibratorio deben repetirse las veces que sea necesario con el material retenido en la malla #10, hasta que el total de la muestra quede bajo la malla #10 Tyler.

- **Homogenización y preparación de cargas**

1. Limpiar el área y equipo a usar.
2. Usar el distribuidor de carrusel para subdividir la muestra, (con un peso de 22.5 [kg] óptimos) y obtener partes iguales de 1.125 [g] (peso deseado). Alimentar muestra en forma lenta para evitar pérdidas de material fino por la campana de extracción.
3. Colectar la muestra de los 20 capachos y volver a distribuir en carrusel según el punto anterior una segunda vez, para asegurar una buena homogenización.
4. Verificar que la balanza esté bien tarada y calibrada. Pesar muestras que contengan 1.125 [g]. Use espátula para completar el pesaje requerido siempre y cuando la diferencia con el peso deseado no sea menor que 75 [g]. De no ser así, se procederá a sub-dividir una carga, hasta encontrar el peso adecuado.
5. Identificar con letra clara en cada muestra el tipo de muestra, peso y fecha de preparación.
6. Guardar las bolsas con muestra en bodega de testigos.

- **Verificación de la muestra.**

1. Una vez reducida la muestra a 100% -10 mallas y distribuidas en cargas, tomar 2 cargas opuestas del distribuidor de carrusel.
2. Realizar preparación para enviar a análisis químico como muestra 1 y muestra 2.
3. Determinar perfil granulométrico de ambas muestras usando las mallas 35 – 48 - 65 – 100 – 150 – 200. Registrar en libro “Metalúrgicas”.
4. Sólo una vez comprobada su semejanza (diferencia de ley menor a 5% para Cobre total y 5 micrones en D_{80}) serán oficializadas las cargas de 1.125 [g]. En caso de no cumplir con la exigencia de semejanza se procederá a repetir el proceso.

Una vez finalizado el procedimiento, se debe continuar con el procedimiento de molienda de cada muestra mineral, definido en Anexo 6.

Anexo 6: Procedimiento Laboratorio Metalúrgico de El Soldado para pruebas de molienda.

- **Prueba de molienda estándar** (Anglo American División El Soldado, 2021).

1. Verificar que la carga de bolas sea la estándar.

Tabla 6.4. Collar de bolas estándar según diámetro de bola seleccionado.

Diámetro	Nº bolas	Peso [g]
1 ½"	3	521
1 ¼"	10	1.304
1"	25	1.923,2
¾"	167	4.615,8
½"	401	3.356,2
Total		11.720,2

2. Cargar el molino con collar de bolas definido para la prueba, según Tabla 6.4.
3. Tomar una carga de 1.125 [g] de muestra previamente preparada según procedimiento de Preparación de Cargas de Molienda, y agregarla al molino. Verificar el peso de la carga.
4. Agregar 500 [cc] de agua.
5. Poner la tapa del molino con cuidado, asegurando que quede bien centrada y sin filtraciones.
6. Mover molino a mesa de polines utilizando monorriel.
7. Antes de bajar la tapa anti-ruídos asegúrese que el molino no quede patinando sobre los polines móviles.
8. Realizar molienda de 10 [min].
9. Abrir tapa y llevar cilindro de molienda a soporte utilizando monorriel.
10. Poner balde en descarga de bandeja receptora de pulpa.
11. Vaciar molino cuidadosamente, dejando caer pulpa sobre bandeja receptora de muestra evitando pérdidas.
12. Lavar bolas con agua de proceso para retirar pulpa adherida en bolas (usar agua de manera controlada, evitando excesos).
13. Incorporar nuevamente collar de bolas a molino.
14. La pulpa molida colectada en balde debe filtrarse y secarse para determinar perfil granulométrico utilizando el siguiente set de mallas para muestras de mineral 35 – 48 – 65 – 100 – 150 – 200 y para muestras de escoria 65 – 100 – 150 – 200 – 270 – 400.
15. Repetir el procedimiento descrito anteriormente para moliendas de 15 y 20 [min] (los tiempos de molienda pueden variar según la granulometría objetivo o tipo de material)
16. Con la cinética de molienda obtenida (curva D_{80} v/s tiempo de molienda), interpolar (o extrapolar) el tiempo requerido para obtener una granulometría con D_{80} de 195 [micrones].
17. Con una nueva carga de molienda realizar una molienda al tiempo determinado, bajo las mismas condiciones anteriores y verificar la granulometría resultante del producto.

18. La estimación de tiempo de molienda y verificación de la granulometría resultante debe realizarse hasta obtener un D_{80} entre 190 [micrones] y 200 [micrones].

- **Prueba de Molienda para prueba de Flotación**

1. Verificar que la carga de bolas sea la estándar.
2. Cargar el molino con la carga de bolas establecida.
3. Agregar muestra al molino y 500 [cc] de agua de proceso
4. Adicionar reactivos según tipo de prueba.
5. Poner la tapa del molino con cuidado, asegurando que quede bien centrada y sin filtraciones.
6. Mover molino a mesa de polines utilizando monorriel.
7. Antes de bajar la tapa anti-ruídos asegúrese que el molino no quede patinando sobre los polines móviles.
8. Realizar molienda a tiempo predeterminado.
9. Abrir tapa y llevar cilindro de molienda a soporte utilizando monorriel.
10. Poner celda de flotación en descarga de bandeja receptora de pulpa.
11. Vaciar molino cuidadosamente, dejando caer pulpa sobre bandeja receptora de muestra evitando pérdidas.
12. Lavar bolas con agua de proceso para retirar pulpa adherida en bolas (usar agua de manera controlada, evitando excesos).
13. Incorporar nuevamente collar de bolas a molino.

Anexo 7: Estequiometría de reacción de precipitación de sulfato de bario insoluble.

Se prepara la solución acuosa de Cloruro de Bario al 5% en peso, según recomendado por el proveedor (Supelco, 2022). Como aproximación para el cálculo se considera una densidad de agua de 1 [g/mL]. La preparación se realizará en un vaso precipitado de 1 [L], completándose dicho volumen con agua para posteriormente adicionar la sal. La cantidad de sal necesaria será determinada en base al volumen de agua y el porcentaje en peso recomendado, según la Ecuación 21.

$$\frac{\text{masa de soluto [g]}}{\text{masa de solución [g]}} \cdot 100 = \%p/p \quad [21]$$

$$\frac{X}{\left(1000 \text{ [mL]} \cdot \frac{1}{1 \left[\frac{\text{g}}{\text{mL}}\right]} + X\right)} \cdot 100 = 5\%$$

$$X = 52,6 \text{ [g]}$$

Siendo “X” la cantidad de cloruro de bario deshidratado necesaria para la solución acuosa, resultando en una masa de 52,6 [g].

Cabe destacar que el agua utilizada en este tratamiento será Agua de Procesos, por lo que, para determinar la cantidad de sales solubles de sulfato presentes en el agua, se van a considerar las concentraciones de sodio, calcio y potasio determinadas en el análisis químico de aguas; esto implica maximizar la reacción bajo la suposición de que todos los átomos metálicos van a formar una sal soluble con el sulfato, por ende, se está maximizando la cantidad de cloruro de bario necesaria estequiométricamente. Mediante las masas molares de cada metal y considerando un volumen de agua a tratar equivalente a 10 [L], se estiman los moles de cada uno presentes en dicha cantidad de agua.

$$\text{moles } Na^{+} = 200 \left[\frac{\text{mg}}{\text{L}}\right] \cdot \frac{1}{1000} \left[\frac{\text{g}}{\text{mg}}\right] \cdot \frac{1}{23 \left[\frac{\text{g}}{\text{mol}}\right]} \cdot 10[\text{L}] = 0,0870 \text{ [mol]}$$

$$\text{moles } K^{+} = 30 \left[\frac{\text{mg}}{\text{L}}\right] \cdot \frac{1}{1000} \left[\frac{\text{g}}{\text{mg}}\right] \cdot \frac{1}{39,1 \left[\frac{\text{g}}{\text{mol}}\right]} \cdot 10[\text{L}] = 0,00767 \text{ [mol]}$$

$$\text{moles } Ca^{+2} = 430 \left[\frac{\text{mg}}{\text{L}}\right] \cdot \frac{1}{1000} \left[\frac{\text{g}}{\text{mg}}\right] \cdot \frac{1}{40,1 \left[\frac{\text{g}}{\text{mol}}\right]} \cdot 10[\text{L}] = 0,107 \text{ [mol]}$$

A partir de los moles de los metales que conforman las sales solubles de sulfatos, se determinan los moles de estas sales, según la razón metal/compuesto de cada una.

$$\text{moles } Na_2SO_4 = \frac{0,0870 \text{ [mol]}}{2} = 0,0435 \text{ [mol]}$$

$$\text{moles } CaSO_4 = 0,107 \text{ [mol]}$$

$$\text{moles } K_2SO_4 = \frac{0,00767 \text{ [mol]}}{2} = 0,00384 \text{ [mol]}$$

A continuación, se procede a realizar la estequiometría de reacción, donde se considerará como aproximación para el cálculo un rendimiento de reacción de 80%, cloruro de bario en cantidad estequiométrica sin exceso, y se considera las tres reacciones simultáneas.

$BaCl_{2(ac)} + Na_2SO_{4(ac)} \rightarrow BaSO_{4(s)} + 2NaCl_{(ac)}$				
Moles iniciales [mol]	0,0435	0,0435	-	-
Moles que reaccionan [mol]	$-0,8 \cdot 0,0435$	$-0,8 \cdot 0,0435$	$+0,8 \cdot 0,0435$	$+0,8 \cdot 0,0435$
Moles finales [mol]	0,0087	0,0087	0,0348	0,0348

$BaCl_{2(ac)} + CaSO_{4(ac)} \rightarrow BaSO_{4(s)} + CaCl_{2(ac)}$				
Moles iniciales [mol]	0,107	0,107	-	-
Moles que reaccionan [mol]	$-0,8 \cdot 0,107$	$-0,8 \cdot 0,107$	$+0,8 \cdot 0,107$	$+0,8 \cdot 0,107$
Moles finales [mol]	0,0214	0,0214	0,0856	0,0856

$BaCl_{2(ac)} + K_2SO_{4(ac)} \rightarrow BaSO_{4(s)} + 2KCl_{(ac)}$				
Moles iniciales [mol]	0,00384	0,00384	-	-
Moles que reaccionan [mol]	$-0,8 \cdot 0,00384$	$-0,8 \cdot 0,00384$	$+0,8 \cdot 0,00384$	$+0,8 \cdot 0,00384$
Moles finales [mol]	$7,7 \cdot 10^{-4}$	$7,7 \cdot 10^{-4}$	0,00307	0,00307

Considerando el cloruro de bario en cantidades estequiométricas, se obtiene la cantidad de moles necesarios la sal para llevar a cabo las reacciones de formación de sulfato de bario insoluble:

$$\text{Moles totales } BaCl_{2(ac)} = (0,0435 + 0,107 + 0,00384) \text{ [mol]}$$

$$\text{Moles totales de } BaCl_{2(ac)} = 0,154 \text{ [mol]}$$

Por reglas de dilución química, se determina el volumen de cloruro de bario acuoso requerido para las reacciones, recordando que esta solución está en una concentración de 0,205 [M].

$$\text{Dilución: Moles 1} = \text{Moles 2} \quad [22]$$

$$\text{Concentración 1} \cdot \text{Volumen 1} = \text{Concentración 2} \cdot \text{Volumen 2} \quad [23]$$

$$0,205[M] \cdot \text{Volumen requerido} = 0,154 \text{ [mol]}$$

$$\text{Volumen requerido} = 750 \text{ [mL]}$$

De la estequiometría se tiene que la cantidad de sulfato de bario producido, en términos de concentración, corresponde a:

$$[BaSO_4] = \frac{(0,0348 + 0,0856 + 0,00307) \text{ [mol]}}{10 \text{ [L]}}$$

$$[BaSO_4] = 0,0123 \text{ [M]}$$

Dado que el sulfato de bario es un precipitado sólido, se debe analizar su producto de solubilidad, de tal manera de verificar la cantidad de sulfato soluble que queda contenido en el agua y la cantidad de sulfato insoluble que se puede precipitar en forma de sulfato de bario. Cabe destacar que es un cálculo teórico considerando las aproximaciones previamente mencionadas, lo que significa que puede diferir de los resultados de análisis químico. La reacción de equilibrio de producto de solubilidad del sulfato de bario se representa como:

$BaSO_{4(s)} \rightleftharpoons Ba_{(ac)}^{+2} + SO_{4(ac)}^{-2}$			
Concentración inicial [M]	0,0123	-	-
Concentración que reacciona [M]	-X	+X	+X
Concentración en equilibrio [M]	0,0123 - X	X	X

La constante de producto de solubilidad del sulfato de bario corresponde a:

$$K_{ps}(BaSO_4) = 1,1 \cdot 10^{-10}$$

Por lo que por reglas de equilibrio químico se tiene, para una reacción química de tipo:



$$K_{eq} = \frac{[C]_{eq}^c \cdot [D]_{eq}^d}{[A]_{eq}^a \cdot [B]_{eq}^b} \quad [25]$$

Por lo que para el producto de solubilidad se tiene:

$$1,1 \cdot 10^{-10} = [Ba^{+2}]_{eq} \cdot [SO_4^{-2}]_{eq}$$

$$1,1 \cdot 10^{-10} = Y^2$$

$$X = 1,05 \cdot 10^{-5} [M]$$

Siendo “Y” la concentración de sulfato (y bario) soluble en equilibrio en el agua tratada, por lo que la cantidad de moles en equilibrio en 10 [L] de agua tratada corresponden a:

$$mol SO_4 \text{ en equilibrio} = 1,05 \cdot 10^{-5} [M] \cdot 10[L]$$

$$mol SO_4 \text{ en equilibrio} = 1,05 \cdot 10^{-4} [mol]$$

Por lo tanto, los moles de sulfato y de bario que quedaran contenidos en el agua después del tratamiento son $1,05 \cdot 10^{-4}$ [mol], siendo entonces la cantidad de sulfato de bario soluble en agua.

Anexo 8: Resultados de análisis químico de calidad de aguas y sus pretratamientos de ablandamiento.

Tabla 6.5. Análisis químico de aguas disponibles con y sin pretratamiento de ablandamiento, en [mg/L] (SGS, 2022).

Parámetro	Agua Fresca	Agua Fresca Tratada	Agua Balsa Tranque	Agua Balsa Tranque Tratada	Agua de Procesos	Agua de Procesos Tratada
Aluminio	0,05	< 0,05	0,18	0,05	0,32	0,08
Arsénico	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Bario	< 0,01	< 0,01	0,06	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Berilio	< 0,01	< 0,01	0,02	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Bismuto	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Boro	0,07	0,02	0,33	0,24	0,26	0,21
Cadmio	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Calcio	68,03	2,81	338,6	348,7	431,1	314,0
Carbono Orgánico Total	5,5	3,3	10,1	10,9	7,9	6,4
Cinc	0,04	0,02	0,39	0,09	0,15	0,08
Cloruro	19,14	22,05	165,2	133,6	112,8	114,0
Cobalto	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Cobre	< 0,01	< 0,01	0,02	< 0,01	0,05	0,02
Conductividad a 25 °C [µS/cm]	788	1.616	2.363	2.844	2.838	4.135
Cromo Total	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Estaño	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Estroncio	0,29	0,03	1,19	1,03	1,28	1,01
Fluoruro	0,08	0,62	1,09	2,52	0,26	3,65
Fósforo	0,07	0,07	0,11	0,09	0,09	< 0,02
Hierro	0,16	< 0,01	0,11	< 0,01	0,60	0,14
Litio	0,03	0,03	0,02	< 0,01	0,03	0,04
Magnesio	29,97	1,63	7,89	2,03	20,68	2,83
Manganeso	< 0,01	< 0,01	0,2	0,03	1,02	< 0,01
Mercurio	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005
Molibdeno	< 0,01	< 0,01	0,04	< 0,01	0,08	0,09
Níquel	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Nitrato	26,47	20,97	10,75	16,74	10,57	8,00
Nitrito	< 0,02	< 0,02	3,69	4	< 0,02	< 0,02

pH 25°C Laboratorio	7,9	11,6	6,6	11,6	7,3	11,9
Plata	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Plomo	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Potasio	1,08	1,22	36,87	36,68	28,92	27,90
Selenio	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Silicio	19,2	10,3	3,1	2,4	9,0	5,4
Sodio	20,71	241,8	172,9	230,4	198,4	412,8
Sólidos Suspendidos Totales	7	< 5	< 5	10	21	24
Sólidos Totales Disueltos	754	740	1.892	2.100	2.664	2.660
Sulfato	146,5	124,7	1.617,1	1.430	1.403,5	1257,5
Talio	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Titanio	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Vanadio	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01

Anexo 9: Resultados de análisis químico de calidad de Agua de Procesos y pretratamiento de remoción de sulfatos.

Tabla 6.6 Análisis químico de Agua de Procesos con y sin pretratamiento de remoción de sulfatos (SGS, 2022).

Parámetro	Agua Procesos	AP + 500 [mL]	AP + 750 [mL]	AP + 1000 [mL]
Aluminio	0,32	0,06	0,09	0,10
Arsénico	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Bario	< 0,01	< 0,01	337,0	899,6
Berilio	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Bismuto	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Boro	0,26	0,31	0,30	0,30
Cadmio	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Calcio	431,1	325,8	337,1	336,6
Carbono Orgánico Total	7,9	8,8	8,6	8,1
Cinc	0,15	0,26	0,22	0,24
Cloruro	112,8	1.009	1.292	1.794
Cobalto	< 0,01	< 0,01	0,11	0,24
Cobre	0,05	0,07	0,13	0,11
Conductividad a 25 °C [µS/cm]	2.838	3.009	3.749	4.728
Cromo Total	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Estaño	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Estroncio	1,28	0,28	1,06	1,06
Fluoruro	0,26	2,38	2,4	2,05
Fósforo	0,09	0,19	0,28	0,08
Hierro	0,60	0,14	0,07	0,18
Litio	0,03	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Magnesio	20,68	24,87	24,92	24,47
Manganeso	1,02	1,51	1,25	1,10
Mercurio	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005
Molibdeno	0,08	0,05	< 0,01	< 0,01
Níquel	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Nitrato	1057,0	0,05	5,55	0,19
Nitrito	< 0,02	< 0,02	2,17	1,07
pH 25°C Laboratorio	7,3	7,4	5,5	4,0
Plata	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Plomo	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01

Potasio	28,92	23,23	26,16	24,17
Selenio	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Silicio	9,0	7,5	7,6	7,5
Sodio	198,4	168,0	167,9	162,3
Sólidos Suspendidos Totales	21	< 5	< 5	< 5
Sólidos Totales Disueltos	2.664	2.048	2.424	3.390
Sulfato	1.404	172,3	8,4	9,4
Talio	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Titanio	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Vanadio	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01

Anexo 10: Cinéticas de flotación *batch* considerando pretratamiento de ablandamiento químico.

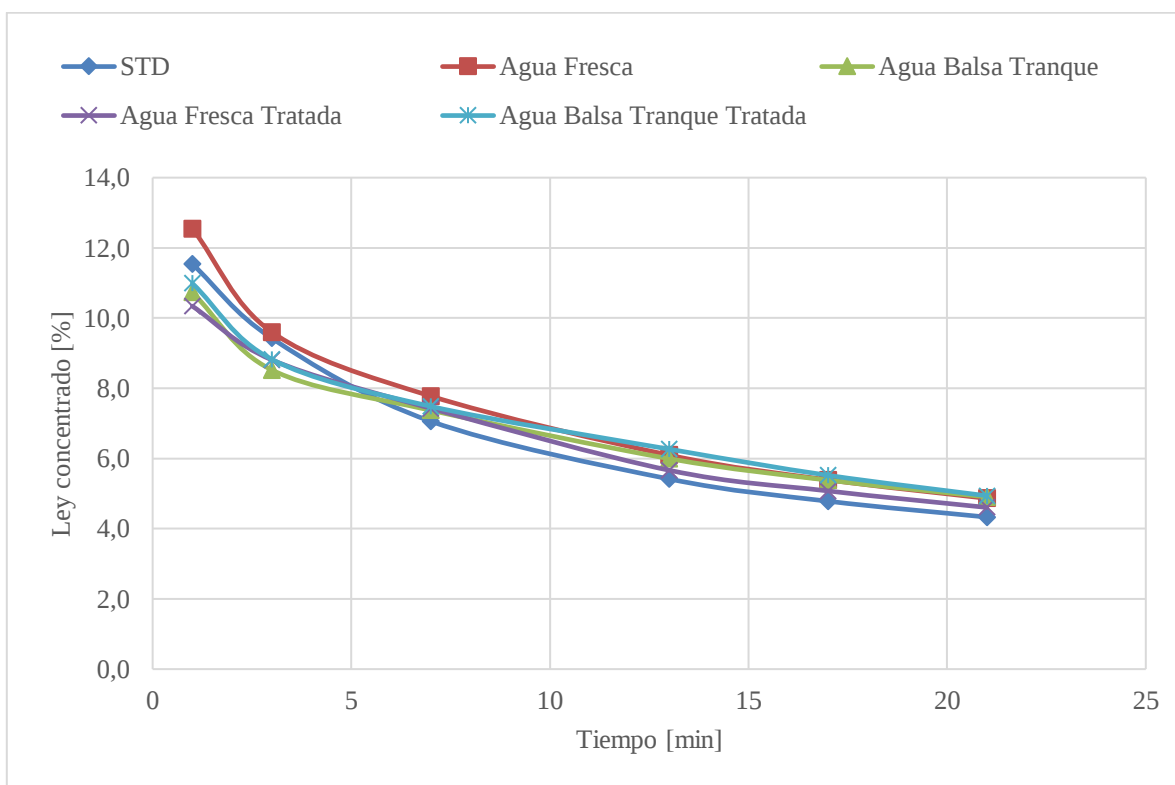


Figura 6.6. Cinética de ley de concentrado de cobre por flotación *batch* con mineral MET-01021.

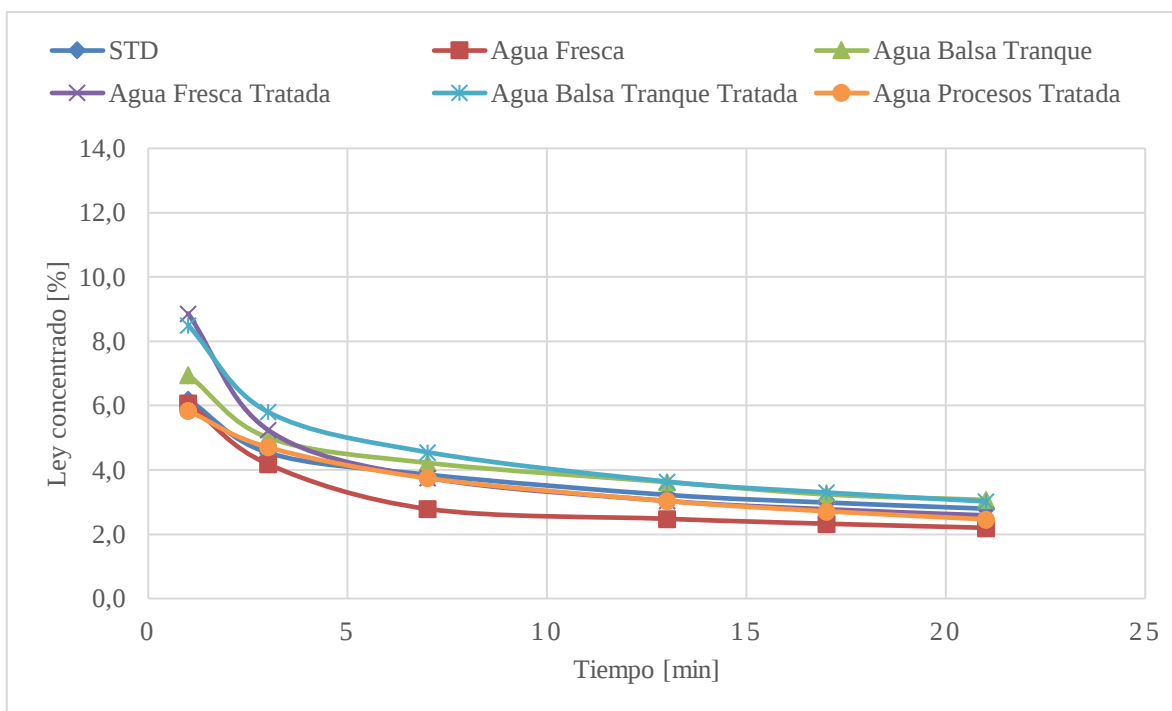


Figura 6.7. Cinética de ley de concentrado de cobre por flotación batch con mineral CP Matriz.

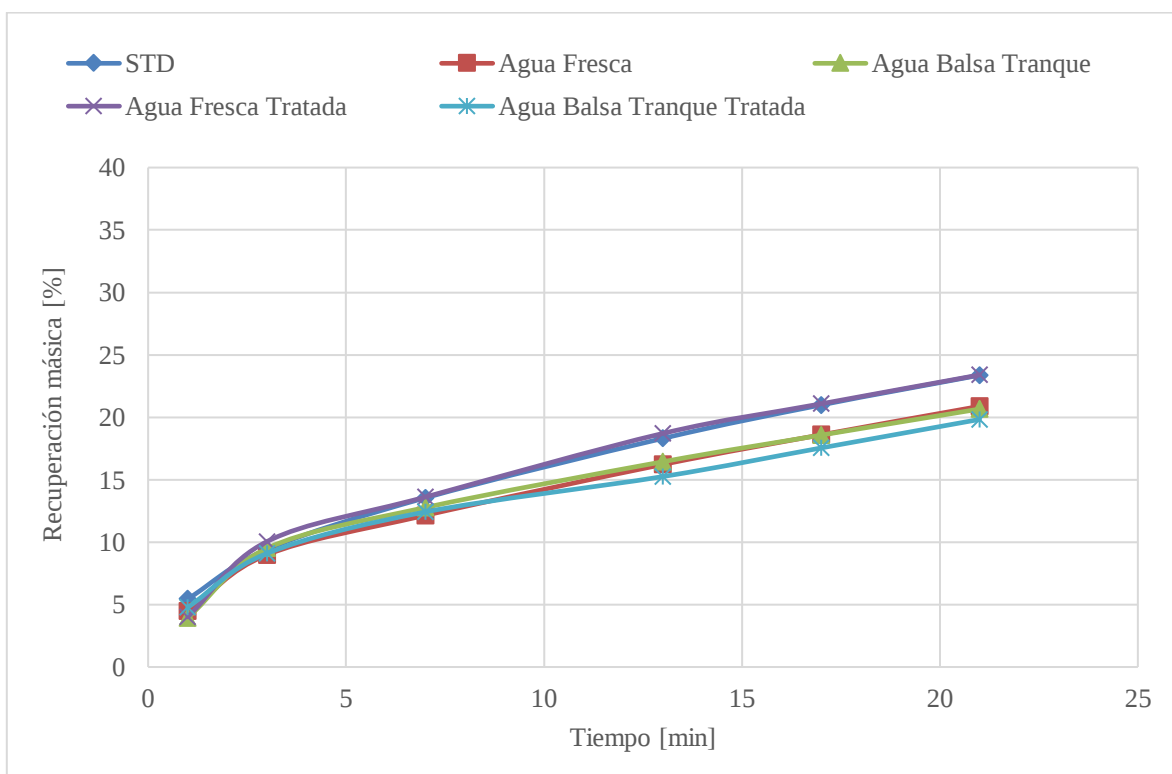


Figura 6.8. Cinética de recuperación másica por flotación batch con mineral MET-01021.

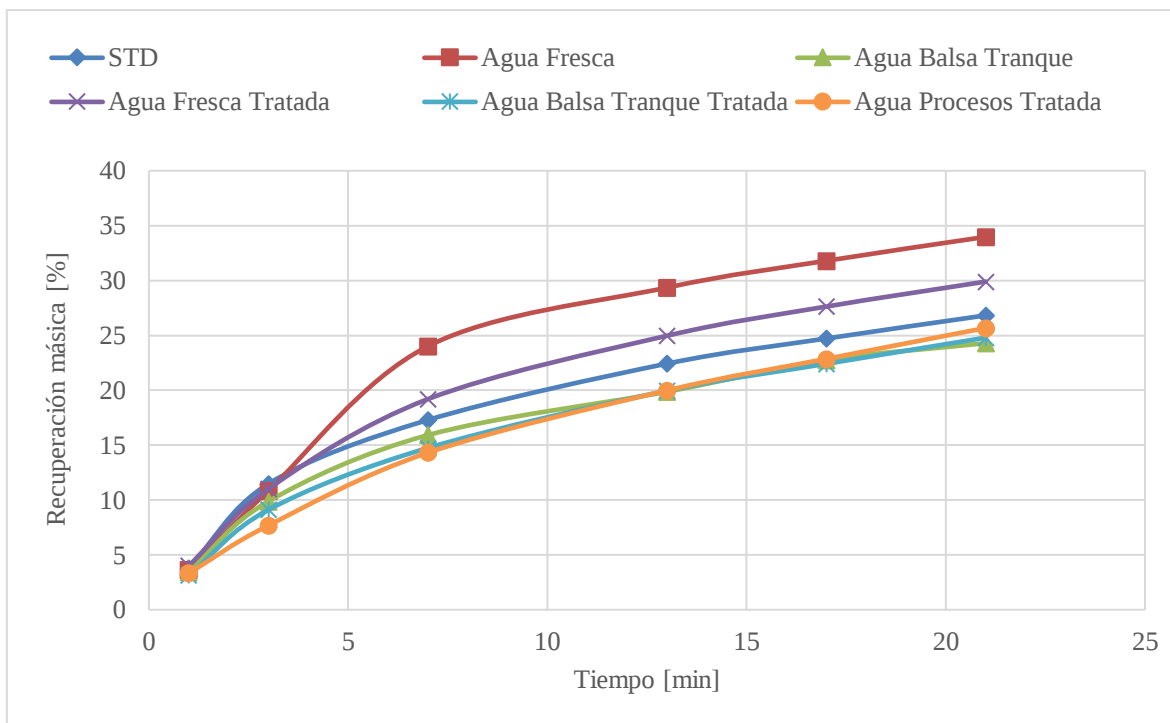


Figura 6.9. Cinética de recuperación másica por flotación batch con mineral CP Matriz.

Anexo 11: Cinéticas de flotación batch considerando pretratamiento de remoción de sulfatos.

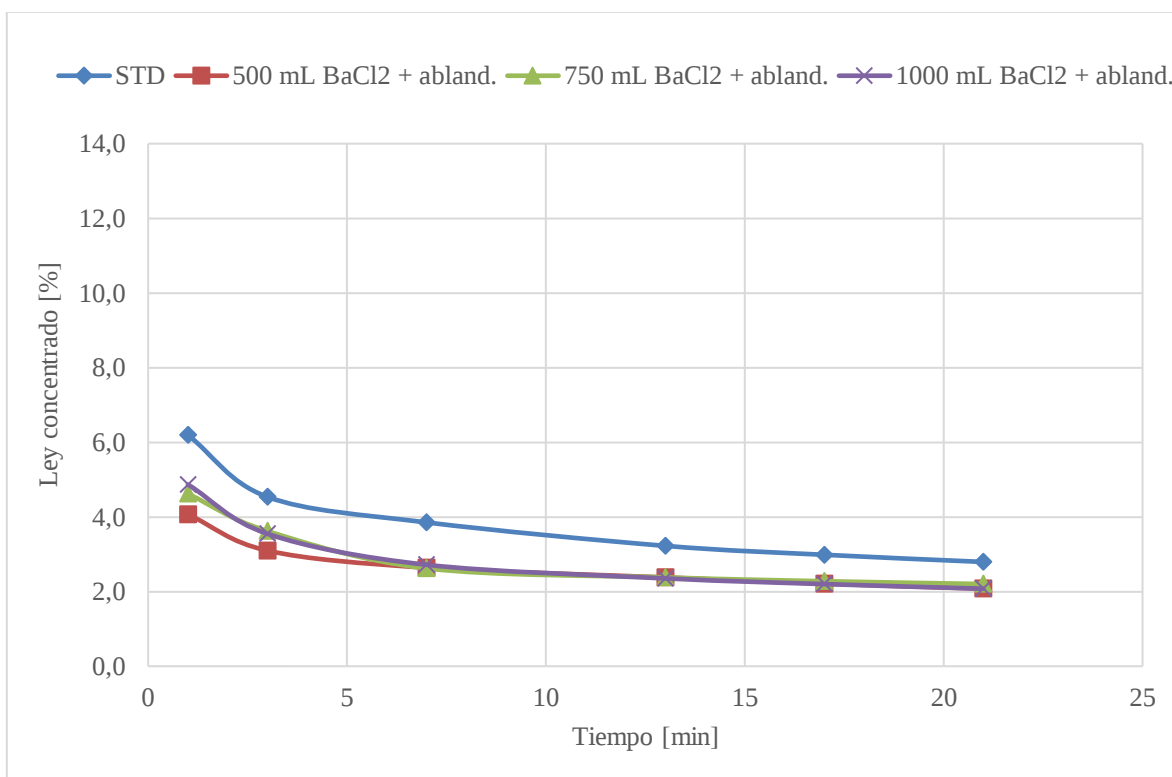


Figura 6.10. Cinética de ley de concentrado de cobre por flotación batch evaluando pretratamientos en Agua de Procesos de remoción de sulfato y de ablandamiento.

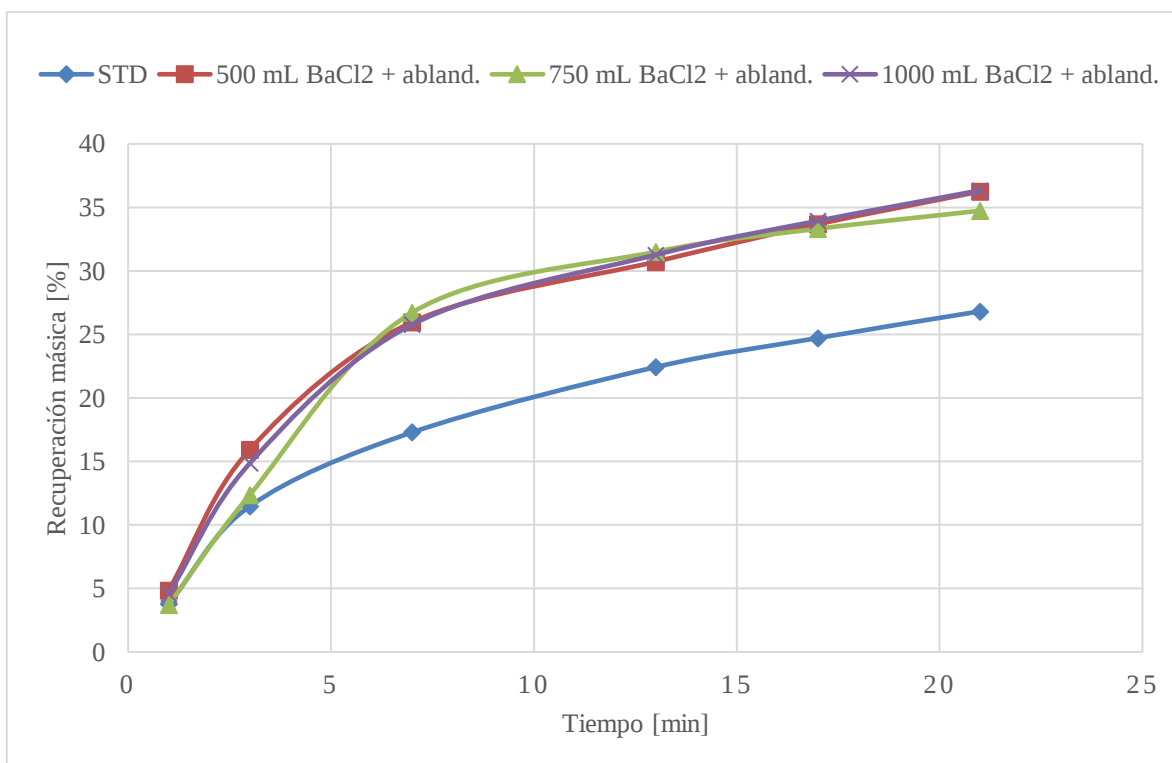


Figura 6.11. Cinética de recuperación másica por flotación batch evaluando pretratamientos en Agua de Procesos de remoción de sulfato y de ablandamiento.