

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
Facultad de ingeniería
Departamento de Ingeniería Metalúrgica

Profesor Patrocinante
Leopoldo Gutiérrez Briones.

Ingeniero Supervisor
Santiago Honores Meza

**ESTUDIO DE MEJORA DEL POTENCIAL DE RECUPERACIÓN DE COBRE Y
MOLIBDENO A ESCALA DE LABORATORIO EN LA FLOTACIÓN
COLECTIVA DE LA PLANTA CONCENTRADORA DE CHUQUICAMATA,
CODELCO.**

JEAN PIERRE VARELA VALENZUELA

Informe de Memoria de Título
Para optar al título de

Ingeniero Civil Metalúrgico

Enero 2024

Para mis papás, quienes siempre me han inculcado el valor de la verdad, la perseverancia, el esfuerzo, la dedicación, el honor y la honradez.

A mis abuelos, por su fe y su amor incondicional.

A todos los que me apoyaron en mis años de carrera y en el desarrollo de la memoria de título.

Jean Pierre Varela.

“Por el poder de la verdad, yo estando vivo, he conquistado el universo”.

Agradecimientos.

Con este informe culmina una etapa y con este “cierre de telón” quiero agradecer en primer lugar a Dios, por no dejarme decaer nunca.

Agradezco a mis padres por todo su apoyo y por todo lo que han dado por mí en el transcurso de todos estos años, sin lugar a dudas este logro y todo lo que soy, es en gran parte por y para ustedes.

A todos mis amigos de universidad, por las tardes entrañables que pasamos juntos y por la buena onda que me brindaron todos estos años. Víctor Pavez, Fernando Ortiz, Nicole Jara, Miguel Tapia, Rocío Flores, Julito Plaza, Martín Mardones, José Grandi, y mis bff Mayra Vergara y María Fernanda Valdés.

A mi gran compañera de carrera y bff, Javiera Arriagada por su apoyo incondicional y su amistad a través de estos años.

A mi Team Moly y amigos de CODELCO por hacer de mi estadía en el norte mucho más llevadera. Sin ustedes la estancia en Calama no hubiera sido lo mismo. Melanie Jara, José Valdivia, Felipe Muñoz, Camila Bastías, Dani Jiménez, Mati Acuña, Cata Santibáñez y Víctor Echeverría.

A CODELCO por permitirme el desarrollo de la memoria de título y a Don Santiago Honores por toda la paciencia, dedicación y todo lo que me enseñó en el desarrollo de la memoria.

A toda la gente de CODELCO que siempre me esperaba con buena onda, una buena charla y un buen consejo. Hicieron de mis días de trabajo en el laboratorio jornadas super amenas.

Por último, pero no menos importante. Agradezco a mi profesor Leopoldo Gutiérrez Briones por toda su entrega como académico, por todas las palabras de aliento, por toda su sabiduría como metalúrgico y por considerarme siempre como un buen estudiante. Desde el corazón espero que siga siendo siempre un gran maestro.

Resumen.

Desde el año 2020 a la fecha, la planta concentradora de CODELCO, División Chuquicamata ha presentado tendencias negativas en lo que respecta a la recuperación de cobre y molibdeno a medida que se sigue aumentando la proporción de ingreso de mineral de RT. Esta situación ha impactado negativamente en el negocio y acrecentando los costos de producción.

Ante ello, se decide trabajar en esta memoria de título, fijándonos como objetivo, el aumento del potencial de recuperación de cobre y molibdeno en laboratorio por medio de reactivos químicos dispersantes enfocados principalmente en el mineral de mina Radomiro Tomic, principal foco negativo debido a su alta presencia de arcillas.

Si bien es cierto que en una primera instancia el reactivo Flotisor PD-702 logra dar un buen resultado, este no perdura al momento de llegar a las pruebas finales de estadística, donde el reactivo de una manera más que evidente no logra dar con el objetivo impuesto.

Al momento de encontrar la dosis correcta; con dosis significativamente bajas (de 7 g/t) en el mejor de los casos, la recuperación de cobre se mantuvo en un 85,8% junto con la prueba estándar y el molibdeno logró aumentar 10 puntos porcentuales en relación con la prueba estándar donde se pasa de un 53,2% a un 61,6% de recuperación de molibdeno.

Finalmente, en el estudio estadístico con una dosis definida, el uso del Flotisor PD-702 resultó contraproducente por una parte en la mayoría de las pruebas. Baja la recuperación en el mejor de los casos desde un 94,3% a un 93,4%. Por otro lado, se presentan aumentos en la recuperación de molibdeno para el mejor de los casos, donde de la prueba estándar con una recuperación de 55,3% pasamos a un 58,4% por medio del Flotisor PD-702. Sin embargo, esta leve mejora, se ve opacada por un desmedido aumento de R_p .

Abstract.

From 2020 to date, the CODELCO concentration plant Chuquicamata Division has presented negative trends regarding the recovery of copper and molybdenum as the proportion of RT mineral input continues to increase. This situation has negatively impacted the business and somewhat increased production costs.

Given this, it was decided to work on this title report, setting as our objective the increase in the recovery potential of copper and molybdenum in the laboratory using dispersing chemical reagents focused mainly on the mineral from the Radomiro Tomic mine, the main negative focus due to its high presence of clays.

Although it is true that in the first instance, the Flotacor PD-702 reagent gives a good result, this does not persist when reaching the final statistical tests, where the reagent fails to achieve the intended objective.

When finding the correct dosage, at significantly low doses (7 g/t) in the best case, copper recovery remained at 85.8% along with the standard test, and molybdenum managed to increase ten percentage points relative to the standard test where molybdenum recovery goes from 53.2% to 61.6%.

Finally, in the statistical study with a defined dose, using Flotacor PD-702 was counterproductive to some extent in most of the tests. Recovery drops in the best case from 94.3% to 93.4%. On the other hand, there are increases in molybdenum recovery for the best case, where the standard test with a recovery of 55.3% goes to 58.4% using Flotacor PD-702. However, this slight improvement is overshadowed by an excessive increase in R_p .

Nomenclatura.

-CaO: cal.

-CaSO₄: Sulfato de calcio.

-cm³: centímetros cúbicos.

-Cu: cobre.

-DCh: División Chuquicamata.

-g: gramos.

-g/t: gramos por tonelada.

-GRMD: Gerencia de recursos mineros y desarrollo.

-H₂SO₄: ácido sulfúrico.

-kg: kilogramos.

-KCl: Cloruro de potasio.

-L: litros.

-Mo: molibdeno.

-Na₂CO₃: carbonato de sodio.

-NaOH: hidróxido de sodio.

-R_p: recuperación en peso, %.

-RT: para referirse usualmente a Mina Radomiro Tomic.

-%S: porcentaje en sólidos.

-SHMP: hexametafosfato de sodio.

-Std: prueba con condiciones estándar

Índice

1.	Introducción.....	1
1.1.	Objetivo general.....	2
1.2.	Objetivos específicos.....	2
2.	Antecedentes de flotación.....	3
2.1.	Principios de flotación.....	3
2.2.	Reactivos de flotación.....	4
2.2.1.	Colectores.....	4
2.2.2.	Espumantes.....	5
2.2.3.	Modificadores.....	5
2.2.4.	Flotacor PD-702.....	6
2.3.	Otros factores que influyen en el proceso de flotación.....	7
2.3.1.	Porcentaje de sólidos.....	7
2.3.2.	Granulometría.....	7
2.3.3.	Liberación.....	7
3.	Análisis de la operación actual de la planta concentradora.....	8
3.1.	Planta Concentradora A0.....	12
3.2.	Planta Concentradora A1.....	13
3.3.	Planta Concentradora A2.....	13
3.4.	Molienda de pebbles.....	15
3.5.	Limpieza y re limpieza.....	15
3.6.	Recuperación de agua.....	16
3.7.	Baja recuperación de cobre y molibdeno en planta Chuquicamata. 17	
4.	Desarrollo experimental.....	23
4.1.	Caracterización del mineral.....	23
4.2.	Instrumentos utilizados y procedimientos.....	23
4.3.	Metodología de trabajo.....	25
4.3.1.	Investigación 1.....	26
4.3.2.	Investigación 2.....	27
4.3.3.	Investigación 3.....	28
4.3.4.	Investigación 4.....	29

5.	Resultados.....	30
5.1.	Investigación 1.	30
5.1.1.	Etapa 1.	30
5.1.2.	Etapa 2.	34
5.1.3.	Etapa 3	38
5.2.	Investigación 2.	42
5.2.1.	Altas dosis.....	42
5.2.2.	Bajas dosis.....	43
5.3.	Investigación 3.	45
5.3.1.	Día 3 de julio 2023.	45
5.3.2.	Día 4 de julio 2023.	46
5.3.3.	Día 5 de julio 2023.	48
5.4.	Investigación 4.	50
6.	Discusiones.	52
7.	Conclusiones	54
8.	Recomendaciones.	55
	Referencias	56
	Anexos de información complementaria.	57
	Hoja Resumen Memoria de Título.....	62

Índice de figuras

Figura 1: Representación esquemática de una celda de flotación. (Gutiérrez Briones, 2018).	3
Figura 2: Adhesión del colector sobre la partícula mineral (Gutiérrez Briones, 2018).	4
Figura 3: Esquema de adsorción de espumante (Gutiérrez Briones, 2018).	5
Figura 4: Síntesis de Trietanolamina (Wiessermel, Arpe, Charlet R., & Hawkins, 2023).	6
Figura 5: Planta Concentradora Chuquicamata, planta colectiva y tratamiento de escorias (CODELCO, 2023).	10
Figura 6: Planta Concentradora Chuquicamata, planta selectiva y filtros	11
Figura 7: Diagrama de flujo Concentradoras A0, A1 y A2 (CODELCO, 2023).	14
Figura 8: Diagrama etapa cleaner y scavenger (Elaboración propia).	16
Figura 9: Ingresos de mineral a planta concentradora (CODELCO, 2023).	17
Figura 10: Variación de proporción de tipo de mineral en periodo 2022-2023 (CODELCO, 2023). ..	18
Figura 11: Disminución de recuperación de cobre al aumentar % de mineral de RT (CODELCO, 2023).	19
Figura 12: Comparación de recuperación de cobre en Laboratorio y planta vs tiempo de la planta A0 (CODELCO 2023).	20
Figura 13: Aumento de la diferencia de recuperación de cobre Laboratorio - planta de la planta A0 (CODELCO, 2023).	20
Figura 14: Comparación de recuperación de cobre en Laboratorio y planta vs tiempo de la planta A1 (CODELCO 2023).	21
Figura 15: Aumento de la diferencia de recuperación de cobre Laboratorio - planta de la planta A1 (CODELCO, 2023).	21
Figura 16: Comparación de recuperación de cobre en Laboratorio y planta vs tiempo de la planta A2 (CODELCO 2023).	22
Figura 17: Aumento de la diferencia de recuperación de cobre Laboratorio - planta de la planta A2 (CODELCO, 2023).	22
Figura 18: Fotografía de celda de flotación utilizada en laboratorio de planta concentradora.	24
Figura 19: Diferentes fases de investigación.	26
Figura 20: Recuperación de Cu vs Recuperación en peso de la etapa 1.	30
Figura 21: Ley de Cu en el concentrado vs Recuperación de Cu de la etapa 1.	31
Figura 22: Recuperación de Cu vs Tiempo de la etapa 1.	31
Figura 23: Recuperación de Mo vs Recuperación en peso de la etapa 1.	32
Figura 24: Recuperación de Mo vs Recuperación en peso de la etapa 1.	33
Figura 25: Recuperación de Mo vs Tiempo de la etapa 1.	33
Figura 26: Recuperación de Cu vs Recuperación en peso de la etapa 2.	34
Figura 27: Ley de Cu en el concentrado vs Recuperación de Cu de la etapa 2.	35
Figura 28: Recuperación de Cu vs Tiempo de la etapa 2.	35
Figura 29: Recuperación de Mo vs Recuperación en peso de la etapa 2.	36
Figura 30: Ley de Mo en el concentrado vs Recuperación de Mo de la etapa 2.	37
Figura 31: Recuperación de Mo vs Tiempo de la etapa 2.	38
Figura 32: Recuperación de cobre vs Recuperación en peso de la etapa 3.	38
Figura 33: Ley de Cu en el concentrado vs Recuperación de Cu de la etapa 3.	39
Figura 34: Recuperación de Cu vs Tiempo en la etapa 3.	40
Figura 35: Recuperación de molibdeno vs Recuperación en peso en la etapa 3.	40
Figura 36: Ley de Mo en el concentrado vs Recuperación de Mo de la etapa 3.	41
Figura 37: Recuperación de Mo vs Tiempo.	41
Figura 38: Recuperación de cobre vs Recuperación en peso.	42
Figura 39: Recuperación de Molibdeno vs Recuperación en peso.	43

<i>Figura 40: Recuperación de cobre vs Recuperación en peso.</i>	<i>44</i>
<i>Figura 41: Recuperación de Molibdeno vs Recuperación en peso.</i>	<i>44</i>
<i>Figura 42: Recuperación de cobre vs Recuperación en peso agregando Flotisor PD-702.</i>	<i>46</i>
<i>Figura 43: Recuperación de Molibdeno vs Recuperación en peso agregando Flotisor PD-702.</i>	<i>46</i>
<i>Figura 44: Recuperación de cobre vs Recuperación en peso agregando Flotisor PD-702.</i>	<i>47</i>
<i>Figura 45: Recuperación de Molibdeno vs Recuperación en peso agregando Flotisor PD-702.</i>	<i>48</i>
<i>Figura 46: Recuperación de cobre vs Recuperación en peso agregando Flotisor PD-702.</i>	<i>49</i>
<i>Figura 47: Recuperación de Mo vs Recuperación en peso agregando Flotisor PD-702.</i>	<i>49</i>
<i>Figura 48: Recuperación de cobre vs Recuperación en peso.</i>	<i>50</i>
<i>Figura 49: Recuperación de molibdeno vs Recuperación en peso.</i>	<i>51</i>
<i>Figura 50: Rotary laboratorio caracterización Codelco DCh.</i>	<i>57</i>
<i>Figura 51: Chancador de cono Laboratorio caracterización Codelco DCh.</i>	<i>57</i>
<i>Figura 52: Chancador de mandíbulas Laboratorio caracterización Codelco DCh.</i>	<i>58</i>
<i>Figura 53: Molino de Bolas Laboratorio caracterización Codelco DCh.</i>	<i>58</i>

Índice de tablas

<i>Tabla 1: Reactivos utilizados en planta Concentradora.</i>	<i>15</i>
<i>Tabla 2: Composición del mineral de RT utilizado en las pruebas de flotación.....</i>	<i>23</i>
<i>Tabla 3: Detalle de variables en pruebas de flotación de laboratorio.</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 4: Detalle de reactivos utilizados en las diferentes fases.</i>	<i>27</i>
<i>Tabla 5: Detalle de pruebas hechas en la investigación 2.</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 6: Detalles de las pruebas hechas en la investigación 3.</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 7: Reactivos empleados en la investigación 4 y sus detalles.</i>	<i>29</i>
<i>Tabla 8: Datos recopilados para elaboración de gráficos en Investigación 1, etapa 1.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 9: Datos recopilados para elaboración de gráficos en Investigación 1, etapa 2.</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 10: Datos recopilados para elaboración de gráficos en Investigación 1, etapa 3.</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 11: Datos recopilados para pruebas de Investigación 2 con altas dosis de Flotacor PD-702.</i>	<i>60</i>
<i>Tabla 12: Datos recopilados para pruebas de investigación 2 con bajas dosis de Flotacor PD-702.</i>	<i>60</i>
<i>Tabla 13: Datos recopilados en pruebas de la investigación 3 de estadística del día 3 de julio.</i>	<i>60</i>
<i>Tabla 14: Datos recopilados en pruebas de la investigación 3 de estadística del día 4 de julio.</i>	<i>60</i>
<i>Tabla 15: Datos recopilados en pruebas de la investigación 3 de estadística del día 5 de julio.</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 16: Datos recopilados en pruebas de la investigación 4.</i>	<i>61</i>

1. Introducción.

La Corporación Nacional de cobre (Codelco), es una empresa estatal destacada a nivel mundial por su calidad operacional y por los altos estándares de sus productos. Además, posee más de 100 años de experiencia en la explotación de minerales cupríferos.

Codelco cuenta con ocho divisiones operacionales: Chuquicamata, Radomiro Tomic, Ministro Hales, Gabriela Mistral, Salvador, Andina, Ventanas y El Teniente, además de poseer una participación en Minera El Abra (49% de propiedad) y en Anglo American Sur S.A. (20% de propiedad). Estas se encuentran ubicadas entre la región de Antofagasta y la región del Libertador Bernardo O'Higgins.

La división Chuquicamata, ubicada en la región de Antofagasta y puesta en marcha el año 1915, cuenta con procesos operacionales para tratar minerales oxidados y sulfurados, obteniendo cátodos de cobre con 99,99% de pureza como su principal producto comercial.

La concentradora de Chuquicamata para minerales sulfurados, opera con una alimentación de mineral aproximada a 8.000 toneladas por hora de mineral grueso, proveniente desde tres fuentes de alimentación: el rajo de Chuquicamata, Chuquicamata subterránea y Radomiro Tomic.

Estos tres tipos de ingresos diferentes de mineral a la planta, conllevan problemas asociados a su tratamiento puesto que, aunque todos son sulfuros, presentan propiedades mineralógicas distintas. Más aún, en los últimos años las proporciones que aporta cada fuente han ido variando, lo que ha significado un problema para la planta concentradora que ha bajado considerablemente sus recuperaciones metalúrgicas.

1.1. Objetivo general.

Estudiar el potencial de mejora de recuperación de cobre y molibdeno a través de pruebas de flotación a escala de laboratorio, con foco en la flotación colectiva de la planta concentradora de Chuquicamata, Codelco Chile.

1.2. Objetivos específicos.

- 1- Evaluar reactivos que puedan ser aplicados a la etapa rougher de la flotación colectiva de la planta concentradora de Chuquicamata, especialmente cuando existe alimentación de minerales arcillosos, utilizando mineral fresco.
- 2- Definir las mejores condiciones de dosificación de reactivos en términos de sus dosificaciones al proceso fresco.
- 3- Evaluar reactivos dispersantes y dosis definida con mineral fresco utilizando pulpa de planta.
- 4- Evaluar efecto de reactivos dispersantes en molienda junto con el comportamiento de algunas sales adicionadas al proceso de flotación.

2. Antecedentes de flotación.

2.1. Principios de flotación.

La flotación es un proceso fisicoquímico muy utilizado en la industria minero-metalúrgica, donde se logra separar el mineral de interés de todo aquello que no tiene un valor comercial, o más bien dicho, para un determinado negocio.

Apoyándose de la Figura 1 se puede ver que en este proceso existe una selectividad inducida por medio de la adición de reactivos químicos y se genera una adhesión partícula-burbuja que asciende a la superficie y es colectado en un concentrado rico en el mineral de interés. Las partículas no valiosas o “ganga”, es decir, todo aquello que no logra flotar, son eliminadas como rechazo o “cola” de flotación (Gutiérrez, 2018).

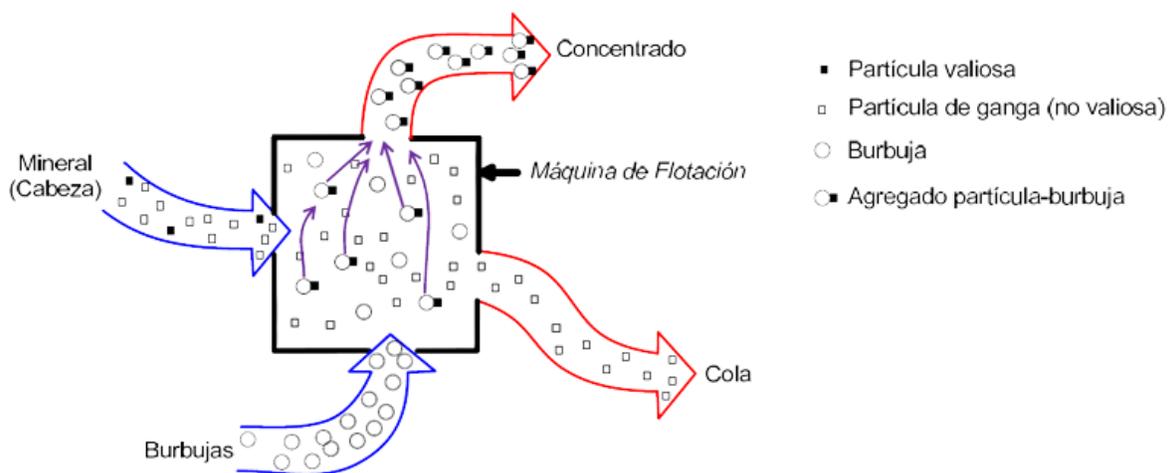


Figura 1: Representación esquemática de una celda de flotación. (Gutiérrez Briones, 2018).

El desarrollo de la tecnología de flotación ha permitido el crecimiento en escala de los equipos, acorde al tamaño de flujos de minerales en cada operación, pero, también ha impulsado el diseño de diferentes tipos de celdas que difieren esencialmente en la forma de contactar los sólidos con el gas y de retirar los productos obtenidos, concentrado y cola. Los principales tipos de celdas de flotación utilizadas en la industria son las celdas mecánicas, las columnas y las celdas neumáticas (Castro & García, 2003).

2.2. Reactivos de flotación.

Cada planta concentradora utiliza distintos tipos de reactivos que dependen de la mineralogía operacional de la planta y el tipo de celda de flotación que posean. Cada reactivo utilizado, se caracteriza por una función específica. Los diversos reactivos se clasifican en tres grupos, de acuerdo con su función dentro de la operación de la celda. Estos se describen a continuación:

2.2.1. Colectores.

Los colectores son reactivos orgánicos bastante diversos en composición y estructura cuya principal función es la hidrofobización selectiva de la superficie de las partículas de ciertos minerales, para crear condiciones favorables de adherencia mineral-burbuja. Los colectores disminuyen la mojabilidad de las partículas del mineral y aumentan su capacidad de adherencia a las burbujas (911Metallurgist, 2016).

Como se observa en la Figura 2, los colectores se componen de un extremo polar y un extremo apolar. El extremo polar de las moléculas de colector se adsorbe sobre las superficies de las partículas hidrofílicas, eliminando los sitios iónicos que interactúan con el agua. De esta forma el extremo no polar o hidrofóbico queda expuesto hacia el agua generando un recubrimiento hidrofóbico (recubrimiento colector). Es así como la partícula pasa a comportarse como una partícula hidrofóbica (Gutiérrez, 2018).

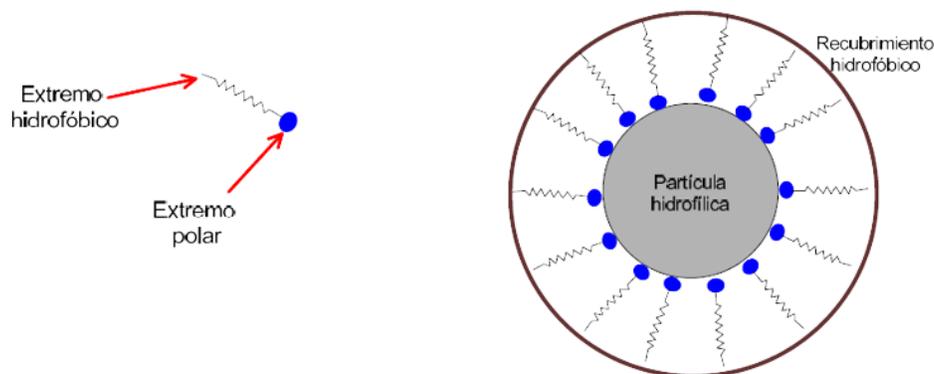


Figura 2: Adhesión del colector sobre la partícula mineral (Gutiérrez, 2018).

2.2.2. Espumantes.

Corresponden a agentes tensoactivos y tienen por objetivo la disminución del tamaño de burbuja y por lo tanto aumentar el área de contacto burbuja-partícula, estabilizando de esta manera la espuma, la estabilidad de la adherencia a la burbuja dependerá de la eficiencia del espumante. Además, dentro de los equipos se produce en forma espontánea coalescencia de las burbujas y estas crecen. El espumante modifica las propiedades superficiales de la burbuja para reducir la coalescencia (Yianatos, 2005).

En la Figura 3 se muestra como los espumantes tienen una distribución dispereja de grupos polares (interactúan con el agua) y grupos no polares que permiten la orientación preferencial en la interface agua/aire (Gutiérrez, 2018).

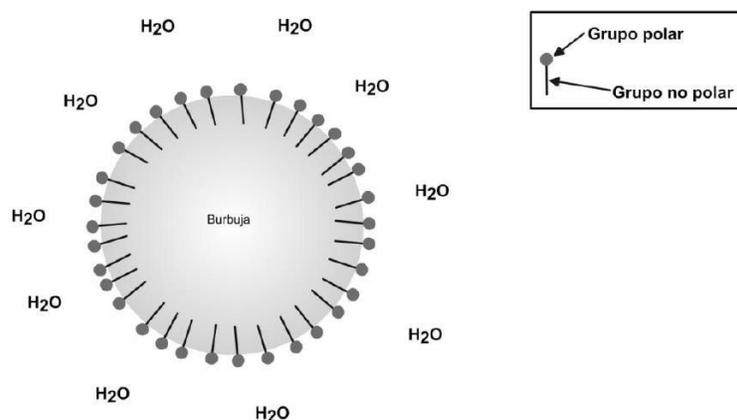


Figura 3: Esquema de adsorción de espumante (Gutiérrez, 2018).

2.2.3. Modificadores.

Román (2017) señala que los modificadores modulan el sistema de flotación regulando la química de la solución, o bien dispersando o aglomerando las partículas de la pulpa. Según su respectiva función pueden llegar a ser clasificados en los siguientes sub-grupos:

- a. **Activadores:** los cuales tienen por finalidad aumentar la flotabilidad de ciertos minerales, mejorando la adsorción de los colectores sobre las superficies de estos o para fortalecer el enlace entre la superficie de la burbuja y el colector (Román, 2017).

- b. **Depresantes:** tienen la función de inhibir el efecto de los colectores para aquellos minerales que no son valiosos para el proceso (Manríquez, 2019).
- c. **Reguladores de pH:** los reguladores de pH ajustan el pH de la pulpa para obtener un rendimiento óptimo para un reactivo y un mineral concreto. Los reguladores de pH más comunes son la CaO, NaOH, Na₂CO₃ y H₂SO₄ (Universidad Politécnica de Cartagena, s.f.).
- d. **Dispersantes:** facilita la dispersión de ciertas partículas que la pulpa contiene en suspensión, o está sobre la superficie de las partículas, también es utilizado para dispersar lamas (partículas ultra finas), que normalmente se aglomeran y cubren las superficies activas de las partículas valiosas evitando su recuperación (Román, 2017).

2.2.4. Flotisor PD-702.

Flotisor PD-702 corresponde a un reactivo modificador perteneciente al grupo de los dispersantes, más específicamente está definida en su HDS como una mezcla dispersora. Su denominación química es 2,2'2'' nitrilo-trietanol y cuya fórmula molecular es C₆H₁₅NO₃ se compone de una amina terciaria y tres grupos hidroxilos y como muestra la Figura 4 Se sintetiza a partir de la reacción de un óxido de etileno con amoníaco en solución acuosa. Presenta usos variados, que van desde los productos de higiene y cosmética hasta agricultura, construcción y minería.

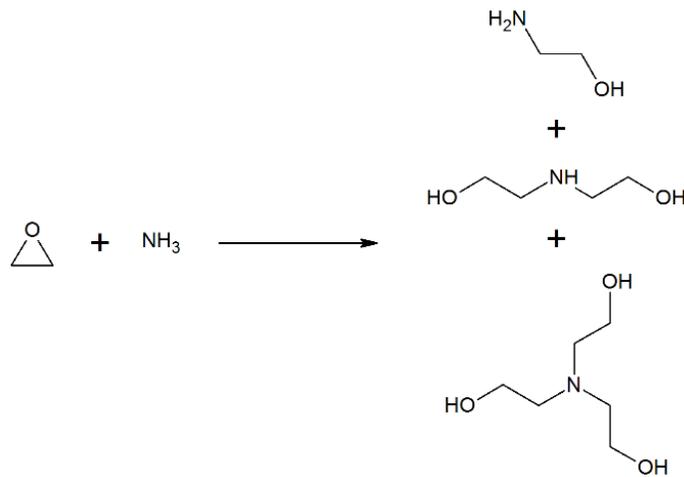


Figura 4: Síntesis de Trietanolamina (Wiessermel et al, 2023).

2.3. Otros factores que influyen en el proceso de flotación.

2.3.1. Porcentaje de sólidos.

Este parámetro viene determinado desde la etapa de molienda luego de pasar por una etapa de clasificación y es un factor que influye en los resultados de flotación cuando se llega a valores extremos. Una pulpa con un porcentaje en sólidos demasiado alta —por sobre 40% sólidos— reduce significativamente la velocidad de flotación y causa un efecto negativo en la recuperación del mineral valioso. En cambio, una pulpa con un porcentaje en sólidos bajo —menor a 10% sólidos— lleva a una excesiva dilución de los reactivos y presencias de especies indeseadas en el agua de flotación además de reducir el tiempo de residencia (Arias, 2019). Para el caso de las pruebas de laboratorio, se ajustó el % en sólidos a un 39%, oscilando en planta entre 35% a 42%.

2.3.2. Granulometría.

Es la graduación de la distribución de tamaño adquirida por el mineral luego de ser sometido a los procesos de conminución previos a la flotación. Considerando lo anterior, existirá una disminución de la recuperación en la flotación si la granulometría presente por el mineral es muy fina, pues las partículas no adquieren la energía cinética suficiente para formar un agregado partícula-burbuja estable. Para minerales laminares como la molibdenita se disminuye la relación cara/borde con la disminución del tamaño, formando partículas más hidrofílicas a causa de ello y menores recuperaciones. Por el contrario, partículas muy gruesas no dejan ser arrastradas por las burbujas y por lo tanto no son colectadas o concentradas (CODELCO, 2023).

2.3.3. Liberación.

Es un concepto clave que se expresa como la cantidad de mineral de interés que puede quedar libre de material estéril cuando se realiza una determinada reducción de tamaño, por lo que, con una reducción del tamaño óptima se logra una mayor liberación de mineral, de esta manera, la flotación será más selectiva y se obtendrá una mayor recuperación.

3. Análisis de la operación actual de la planta concentradora.

En este capítulo se presenta un análisis de los subsistemas operacionales que posee planta concentradora Chuquicamata, comenzando con la presentación del flowsheet de la planta concentradora global, seguido de la caracterización de cada una de las líneas operacionales de plantas A0, A1 y A2 y por último se explica el circuito de planta de limpieza y re limpieza, y la planta de espesamiento de relaves.

El proceso productivo de la planta concentradora Chuquicamata (ver Figura 5 y 6) comienza con la alimentación de minerales de las minas Chuquicamata rajo, Radomiro Tomic y mina Chuquicamata Subterránea. El mineral se transporta mediante correas transportadoras y camiones hacia los chancadores primarios. La descarga del chancador primario con un tamaño de 6 a 8 pulgadas, es enviada mediante correas transportadoras a la pila (stock piles), para almacenar el mineral que será utilizado en las siguientes etapas. El diseño de la planta concentradora de División Chuquicamata posee tres etapas de molienda, destinadas a procesar 180.000 toneladas de cobre al día y obtener un mineral 100% -65# (212 micrones), para la siguiente etapa productiva.

Existen dos moliendas convencionales y una molienda SAG, las que alimentan a tres etapas de flotación primaria, que tienen como objetivo obtener recuperaciones metalúrgicas de cobre en un rango entre 84% a 90%. La planta se divide en tres plantas concentradoras primarias nominadas con las siglas A0, A1 y A2, en las cuales los concentrados primarios que se obtienen buscan la máxima capacidad de recuperación de las especies de valor y, además, obtener una cola de relave con un máximo de 10% de cobre.

Los tres concentrados primarios, son enviados a dos etapas de re molienda, integradas por etapas de molienda de repaso (convencional) y molienda vertimill, las que operan por separado, y tienen como objetivo la disminución del tamaño de partícula, en búsqueda de un aumento de la liberación del mineral.

Luego, el concentrado se envía a la planta de limpieza y re limpieza, donde se busca el aumento de la concentración de los minerales de valor, y la disminución de las especies contaminantes del circuito (insolubles), luego el concentrado

colectivo final, es enviado a la planta selectiva y todas las colas, son enviadas hacia los espesadores de relave, para la recuperación de agua (CODELCO, 2023).

GERENCIA CONCENTRADORA
 DIAGRAMA PROCESO

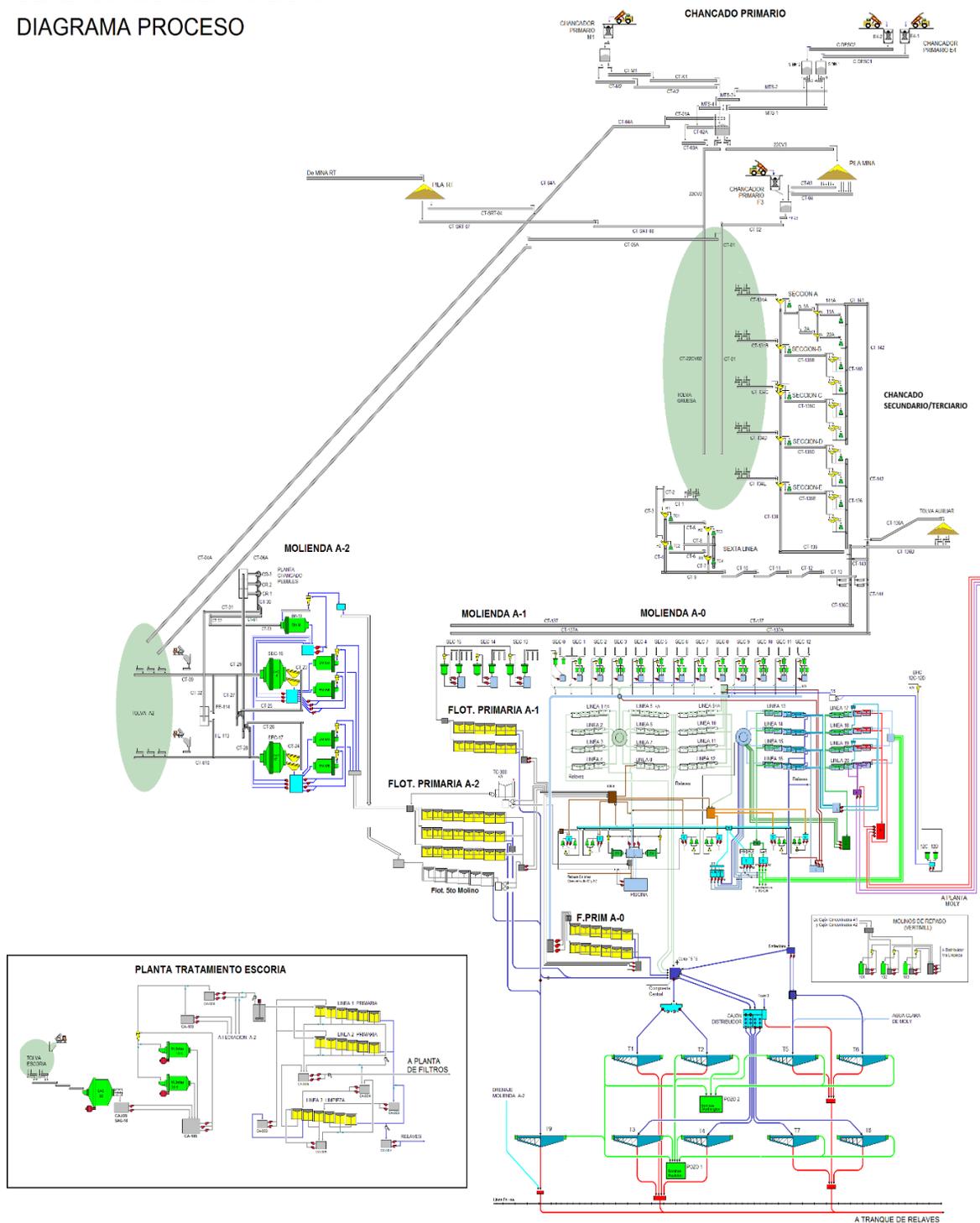


Figura 5: Planta Concentradora Chuquicamata, planta colectiva y tratamiento de escorias (CODELCO, 2023).

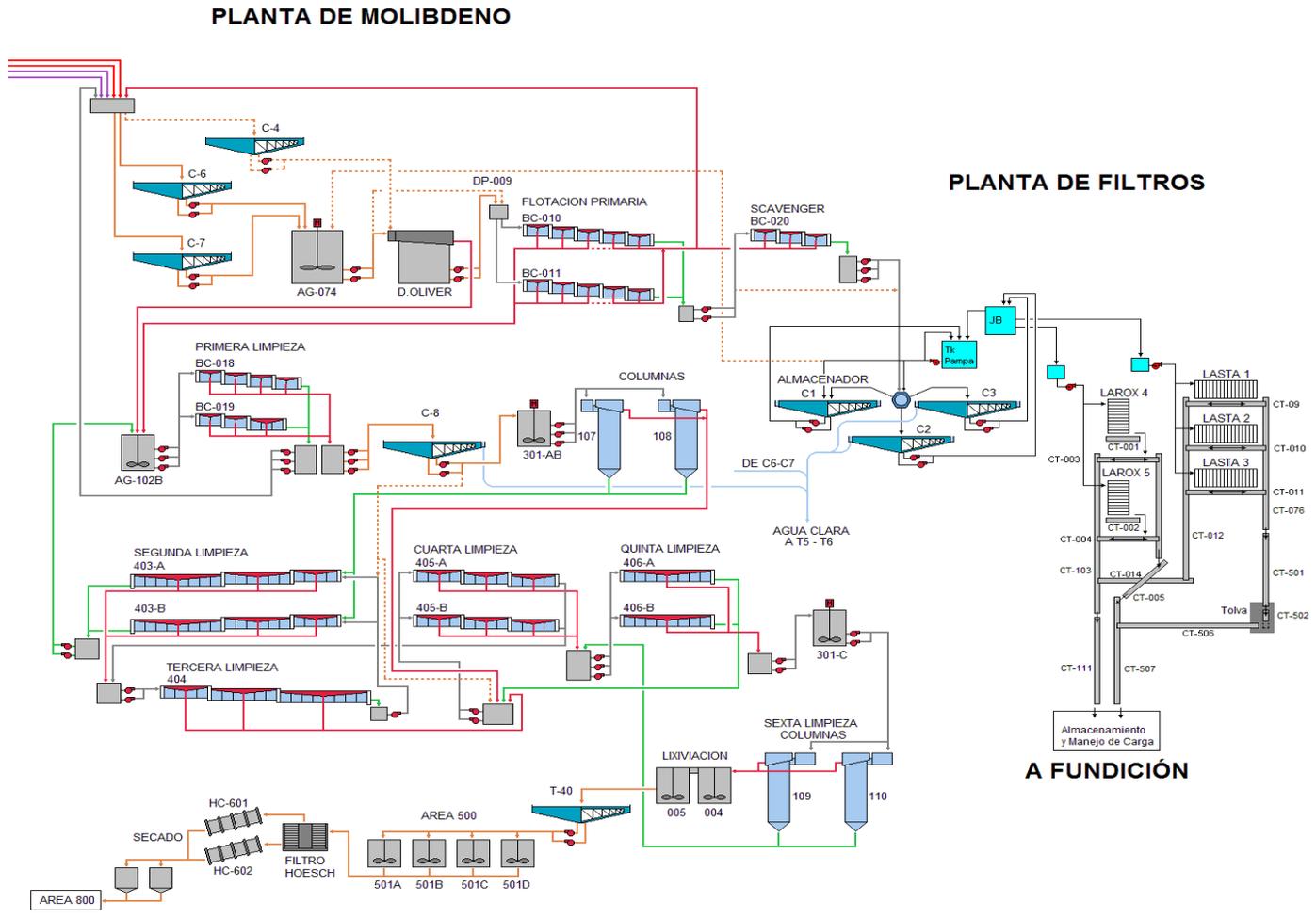


Figura 6: Planta Concentradora Chuquicamata, planta selectiva y filtros.

A continuación, se presenta una descripción de cada subsistema de la Planta Concentradora de División Chuquicamata (Figura 7), el diagrama de operación de cada subsistema, los equipos utilizados y el producto de cada uno de ellos. Los subsistemas presentados son:

- Planta Concentradora A0.
- Planta Concentradora A1.
- Planta Concentradora A2.
- Molienda de Pebbles.
- Planta de limpieza y re limpieza.
- Planta de espesamiento de relaves.

3.1. Planta Concentradora A0.

La Figura 7 muestra la planta concentradora A0 está constituida por una etapa de molienda y clasificación, seguida por la etapa de flotación. El diseño de la planta permite el procesamiento de 74.000 toneladas al día, provenientes desde los chancadores secundarios con potencia de 597 kW, un diámetro de 3,1m y 3,7m de largo y terciarios con potencia de 224 kW, diámetro de 1,8m y 3,7m de largo con un tamaño de 100% -1/2 pulgada (CODELCO, 2023).

Por diseño, la etapa de molienda opera con 13 secciones de molienda en circuito cerrado inverso, cada sección contempla un molino de barras con potencia de 597 kW, un diámetro de 3,1m y 4,3m de largo, una batería de hidrociclones y dos molinos de bolas. Los molinos de bolas y barras son de la marca Mercy, además, las baterías de 5 hidrociclones son de la marca Eral con diámetro 0,5 metros, el producto fino obtenido de la clasificación presenta un P80 de 100% -65# (212 micrones).

La pulpa clasificada es transportada hacia la Flotación Primaria A0, donde se distribuye en celdas de flotación tanto interiores como exteriores. Las celdas interiores son cuatro líneas de flotación (2, 4, 6 y 7), con 7 celdas de flotación Wemco cada una con una capacidad de 1500 pie³ y arreglo 1:1:1. La línea de flotación exterior se compone de 2 líneas de flotación (1 y 2), con 6 celdas de flotación Wemco de volumen 1500 pie³ y arreglo 3:2:2.

3.2. Planta Concentradora A1.

La Figura 7 muestra la planta concentradora A1 cuenta con una molienda convencional con 3 secciones, la cual procesa por diseño 36.000 toneladas al día, obteniendo material de granulometría de P80 212 micrones. Las tres secciones de molienda (13, 14 y 15), operan con molinos de barras de marca Mercy de potencia 1305 kW, un diámetro de 4,1m y 5,5m de largo, además de 3 molinos de bolas de la misma marca. La clasificación del mineral pasante se realiza en una batería de 5 hidrociclones Cavex de 0,65 m de diámetro (CODELCO, 2023).

El overflow de la batería de hidrociclones de P80 212 micrones es enviado hacia las celdas de flotación primaria A1, que están integradas por 2 líneas de flotación, las que poseen 6 celdas de flotación Wemco cada una de volumen de 5650 pie³ y arreglo 2:2:2. El concentrado es enviado al cajón 102, para alimentarlo a través de bombas hacia la siguiente etapa.

3.3. Planta Concentradora A2.

La planta concentradora A2 que se muestra en la Figura 7 comienza con dos secciones de molienda SAG con potencia de 8203 kW, 9,8m de diámetro y 5,2m de largo, un harnero de clasificación y dos molinos de bolas. Esta planta está diseñada para procesar 95.000 toneladas por día provenientes del chancador primario, y entrega una pulpa con 30% +65" (P80 212 micrones).

Las secciones de los molinos SAG (16 y 17), están integradas por molinos semiautógenos de la marca Cavex, además de poseer dos harneros vibratorios Tyler para la clasificación de cada sección. Cuentan con dos correas transportadoras, para poder llevar el mineral retenido por la malla de los harneros hacia los chancadores de pebbles tipo cono cabeza corta, modelo Nordberg, con potencia de 800 HP y un tamaño de MP800 pie. El efluente es clasificado y recirculado al quinto molino. El pasante de los harneros es enviado a un cajón de alimentación, luego mediante bombas es enviado a una batería de 7 hidrociclones Krebs, donde por el overflow se obtiene un producto de 100% +65# (P80 208 micrones) y el underflow es reenviado hacia los molinos de bolas (CODELCO, 2023).

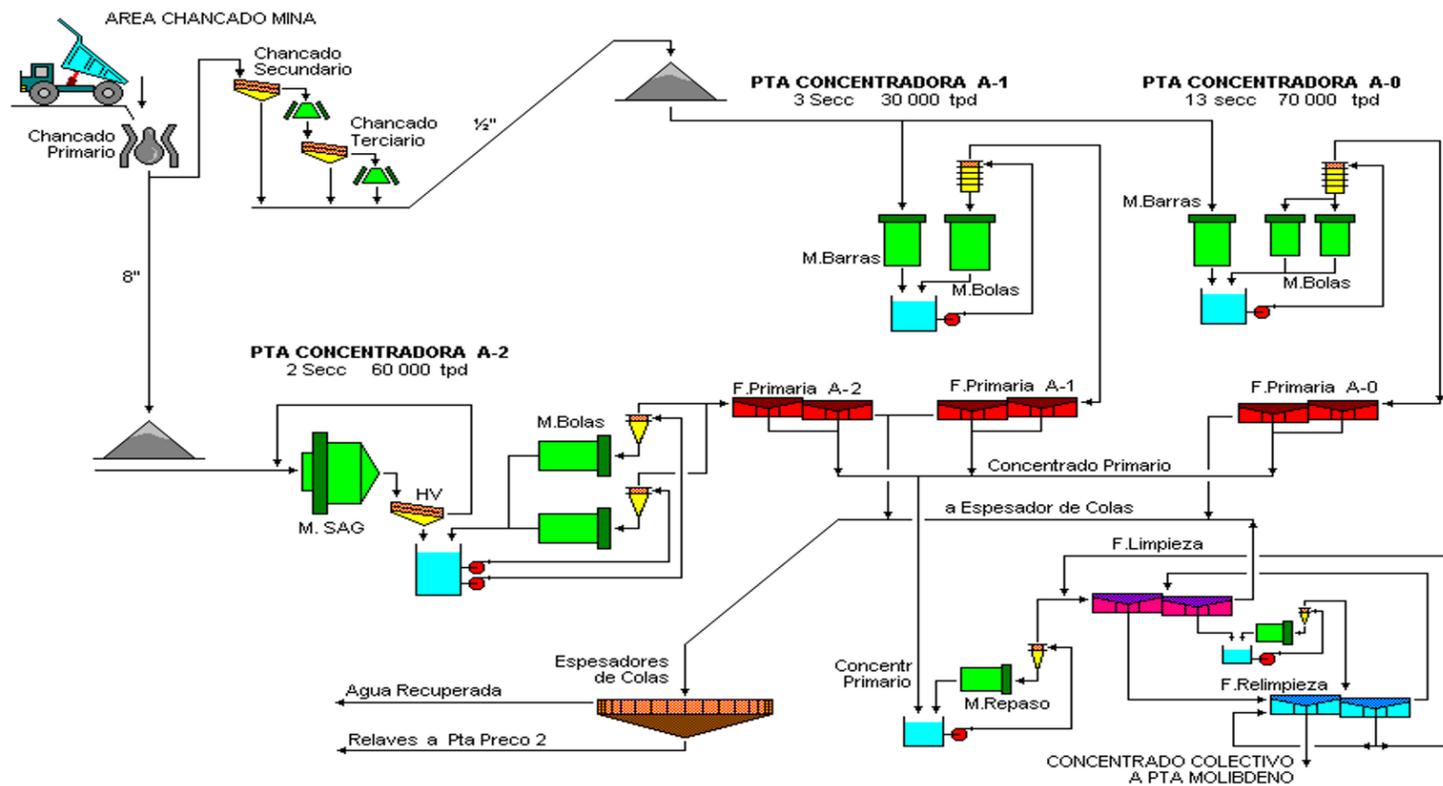


Figura 7: Diagrama de flujo Concentradoras A0, A1 y A2 (CODELCO, 2023).

El producto de esta etapa se distribuye hacia la etapa de flotación primaria A2, la que cuenta con 3 secciones de flotación Rougher, donde cada línea de operación cuenta con 8 celdas de flotación Outokumpo AK-100 de capacidad de 5650 pie³ y arreglo 2:2:2:2, para obtener la mayor recuperación de concentrado, que luego es enviado a la etapa de remolienda.

Para la obtención de los concentrados primarios, se emplean diversos reactivos químicos, que tienen por objetivo homogenizar la pulpa y aumentar la recuperación de cobre. Los reactivos químicos empleados en la planta se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1: Reactivos utilizados en planta Concentradora.

Reactivo	Nombre
Colector	<ul style="list-style-type: none"> • Isopropil Xantato de Sodio • Diésel
Espumante	<ul style="list-style-type: none"> • Matfroth 202
Modificador de pH	<ul style="list-style-type: none"> • Cal
Floculante	<ul style="list-style-type: none"> • Rheomax DR 1050

3.4. Molienda de pebbles.

La etapa de molienda de pebbles está compuesta por tres chancadores de pebbles, los cuales reciben el sobre tamaño de los harneros de la planta concentradora A2. Los productos son clasificados con una batería de hidrociclones, donde por el overflow se obtiene un producto de 100% +65# (P80 208 micrones) y es enviado a la flotación primaria A2. El underflow, es enviado al quinto molino.

3.5. Limpieza y re limpieza.

Las etapas de limpieza y re limpieza son comunes para los concentrados generados por las tres plantas concentradoras, estos pasan por una etapa de remolienda (Vertimill y Repaso), con el fin de que la pulpa posea una granulometría de 80% -325# (P80 43 micrones).

Los concentrados son almacenados en un cajón distribuidor, desde donde se distribuyen hacia la primera etapa de limpieza, la que está compuesta por cuatro líneas de celdas de flotación mecánicas (líneas 10, 14, 15, 16) de volumen de 85 m³ y arreglo 2:2:2:3, integradas por 4 bancos, con 2 celdas de flotación en los primeros dos bancos, en este caso se busca obtener un flujo con alto contenido de cobre (25%), el que es almacenado en el cajón B (ver Figura 8), para luego ser enviado al cajón distribuidor de la etapa de re limpieza.

Para la etapa de re limpieza, la alimentación que se almacena en el cajón distribuidor es distribuida en 3 líneas de flotación (18, 19, 20), donde para las líneas 18 y 19 en los primeros 2 bancos de dos celdas, se obtiene el concentrado colectivo, con una alta concentración de cobre (30%), el que es enviado hacia la planta selectiva, por otra parte, de los bancos 3 y 4, se obtiene el concentrado de re barrido que se vuelve a alimentar al cajón distribuidor de la etapa de limpieza. Para la línea 20 es algo diferente, ya que los concentrados de los bancos 1, 2 y 3 pasan a la etapa selectiva.

La cola de las 3 líneas de re limpieza, se almacenan en el cajón J (ver Figura 8), donde mediante bombas, se recircula hacia la planta primaria A0 (CODELCO, 2023).

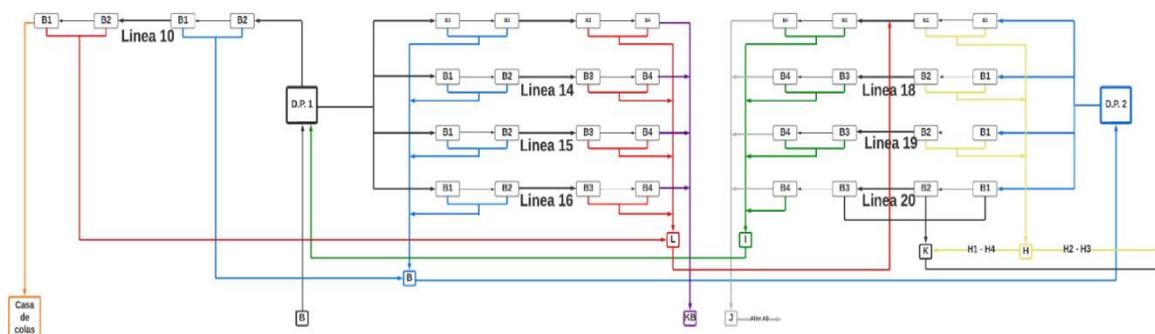


Figura 8: Diagrama etapa cleaner y scavenger (Elaboración propia).

3.6. Recuperación de agua.

El principal objetivo de la planta de recuperación de aguas es el procesamiento de los relaves de las plantas concentradoras colectiva y selectiva, a través de 9 espesadores, por cada espesador se recupera alrededor de 0,9 m³, es decir, 900

litros por cada tonelada seca de mineral. Los flujos de alimentación y descarga de los espesadores, poseen un porcentaje de sólidos entre 40% y 58%, respectivamente.

La sedimentación de las partículas sólidas se genera a través de la gravedad. Se emplea floculante, el cual por sus características químicas aglomera las partículas sólidas de la pulpa, aumentando su tamaño y, en consecuencia, generando una mayor velocidad de sedimentación. El floculante empleado en la compañía es Rheomax DR 1050 (CODELCO, 2023).

3.7. Baja recuperación de cobre y molibdeno en planta Chuquicamata.

Como se mencionó anteriormente, la planta concentradora de Chuquicamata presenta tres diferentes ingresos de mineral: como se ve en el esquema representado en la Figura 9. Se tienen, minerales sulfurados de mina Chuquicamata Rajo, mineral sulfurado de mina Chuquicamata subterránea y mineral proveniente de la mina RT. Estos tres ingresos configuran la operación de la planta de la división.

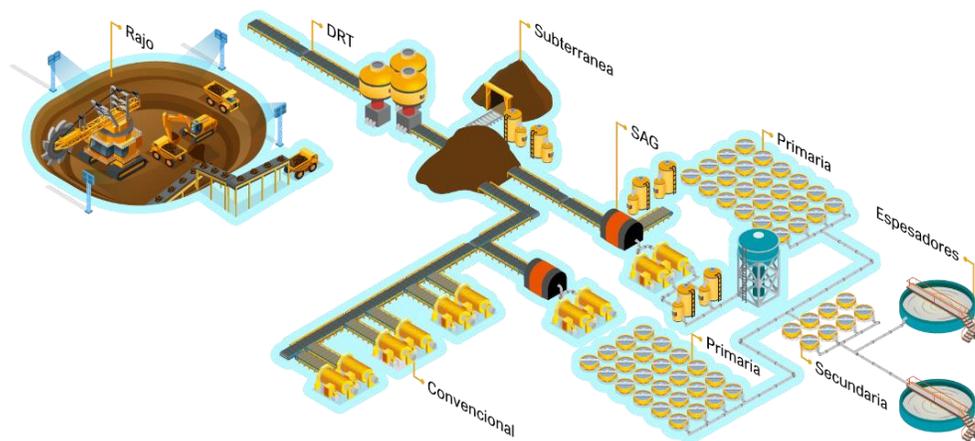


Figura 9: Ingresos de mineral a planta concentradora (CODELCO, 2023).

Sin embargo, desde un tiempo a la fecha, la proporción de alimentación de mineral de RT ha ido creciendo en desmedro de la cantidad de mineral alimentada desde el Rajo y de la Mina subterránea. Debido a la falta de mineral del rajo Chuquicamata y al atraso de los planes de producción de Chuquicamata subterránea, se está alimentando en mayor proporción mineral de RT.

En la Figura 10 presenta la tendencia mencionada, donde aproximadamente desde mitad del año 2022 la proporción de ingreso a RT, representado por la zona de color naranja, ha tendido a una fuerte alza, pasando de esta manera de un aporte aproximado de 25% en enero de 2022 a un 50% a la fecha de abril del 2023.

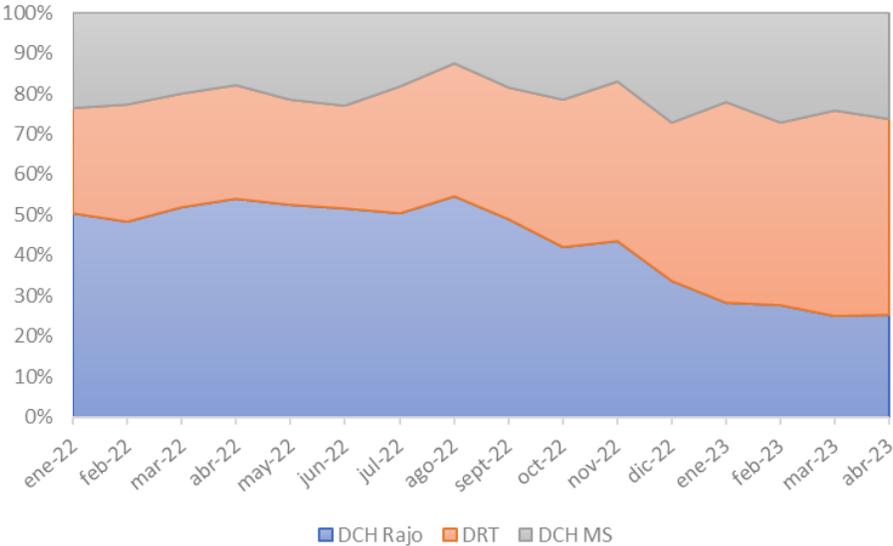


Figura 10: Variación de proporción de tipo de mineral en periodo 2022-2023 (CODELCO, 2023).

Por otra parte, según la base de datos aportada por la misma estatal Codelco, este aumento desmedido del mineral aportado por mina Radomiro Tomic, ha derivado en resultados sumamente negativos para la planta, llegando a bajar considerablemente las recuperaciones de cobre y molibdeno en la etapa colectiva.

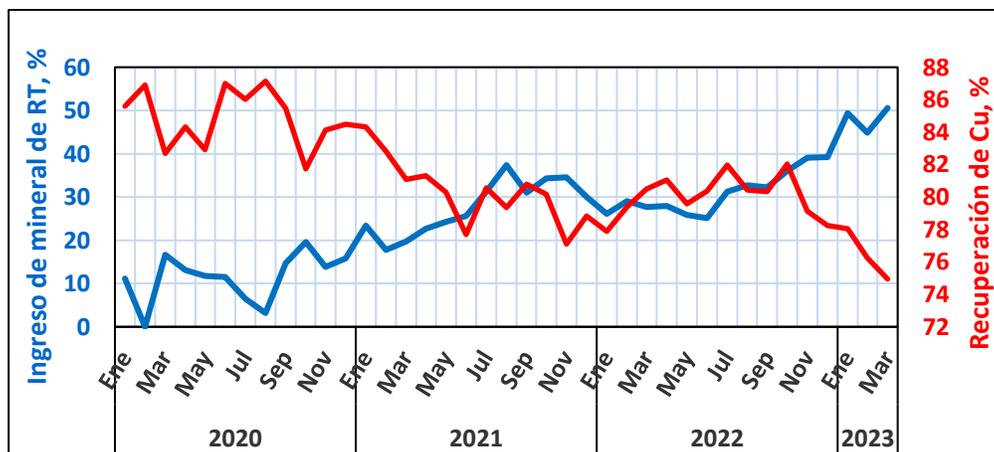


Figura 11: Disminución de recuperación de cobre al aumentar % de mineral de RT (CODELCO, 2023).

Como se aprecia en la gráfica Figura 11, los peaks de ingreso de mineral de RT a la planta, denotado por el eje azul, coinciden con la tendencia a la baja de recuperación de cobre denotado por el eje rojo.

Ahora, se debe considerar que esta baja de recuperación en planta, también se presentó en los datos de laboratorio asociados a las tres plantas concentradoras. Sin embargo, hay que distinguir que a pesar de que coinciden en su tendencia a la baja, se presentó una diferencia entre lo que se recuperó en laboratorio y lo que se logró recuperar en planta, donde en mayor medida las recuperaciones en un ambiente controlado como lo es el laboratorio fueron levemente mayores.

A continuación, en las **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** a la 17 se observa, la disminución de la recuperación de cada planta y la disminución de recuperación en laboratorio correspondiente.

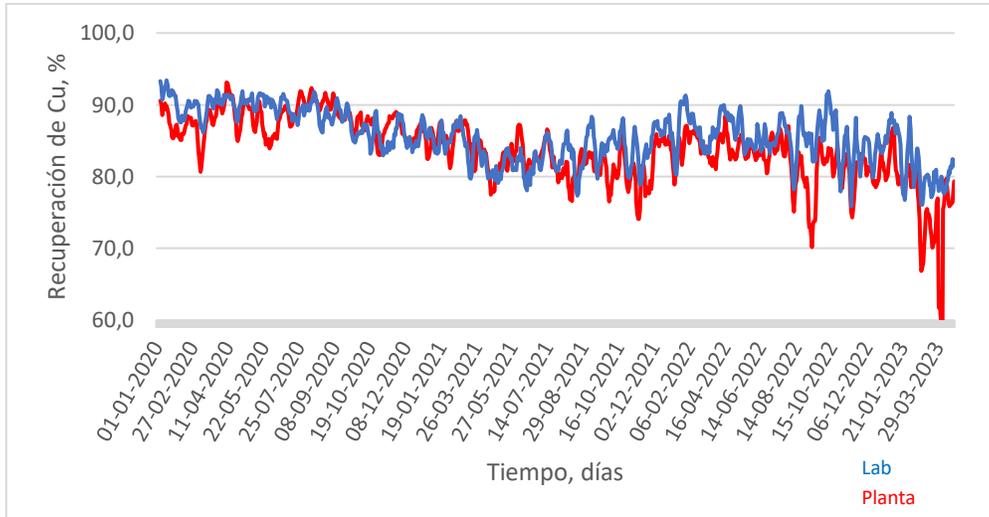


Figura 12: Comparación de recuperación de cobre en Laboratorio y planta vs tiempo de la planta A0 (CODELCO 2023).

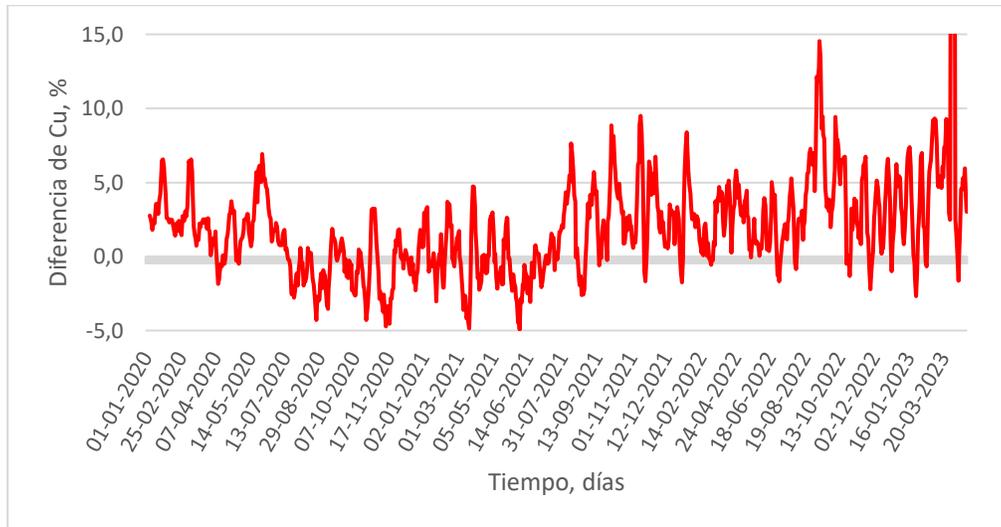


Figura 13: Aumento de la diferencia de recuperación de cobre Laboratorio - planta de la planta A0 (CODELCO, 2023).

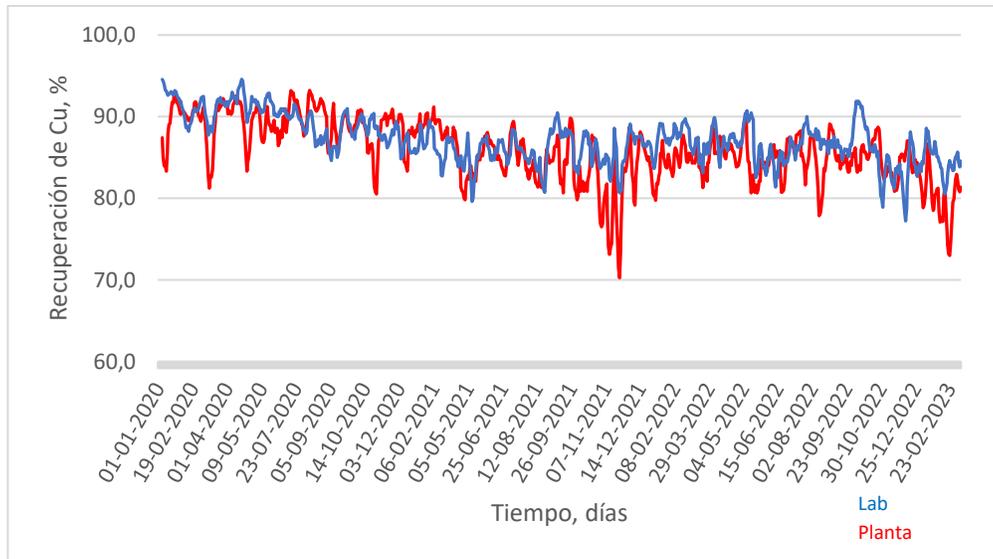


Figura 14: Comparación de recuperación de cobre en Laboratorio y planta vs tiempo de la planta A1 (CODELCO 2023).

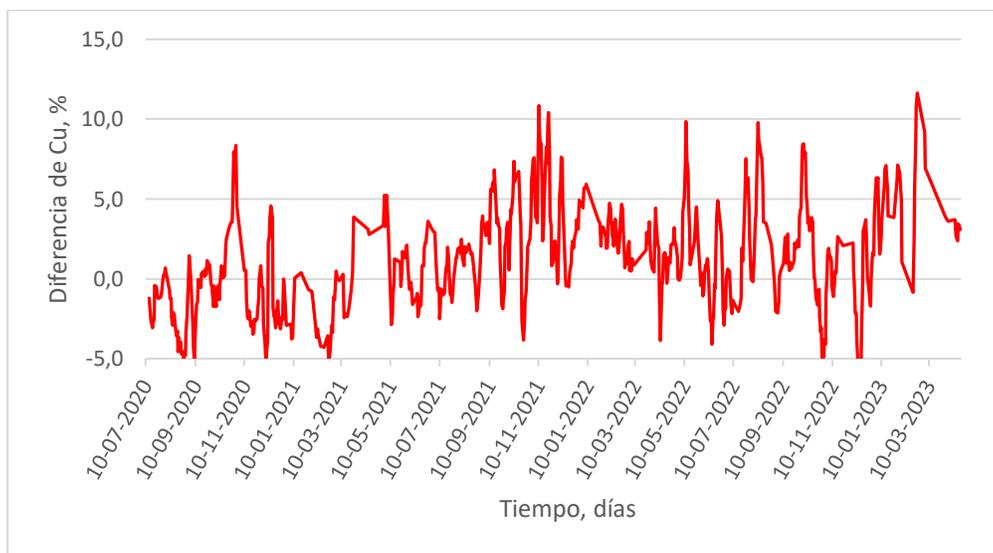


Figura 15: Aumento de la diferencia de recuperación de cobre Laboratorio - planta de la planta A1 (CODELCO, 2023).

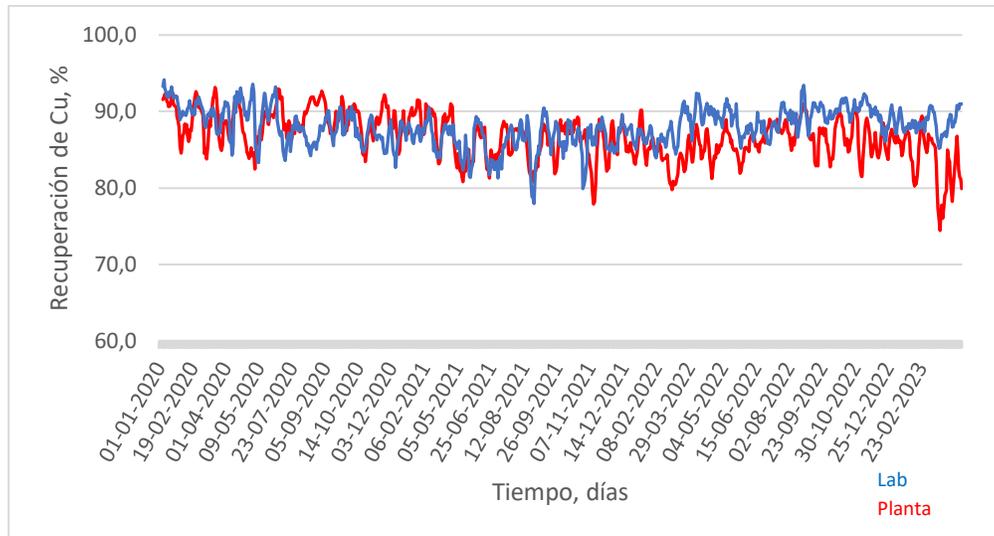


Figura 16: Comparación de recuperación de cobre en Laboratorio y planta vs tiempo de la planta A2 (CODELCO 2023).

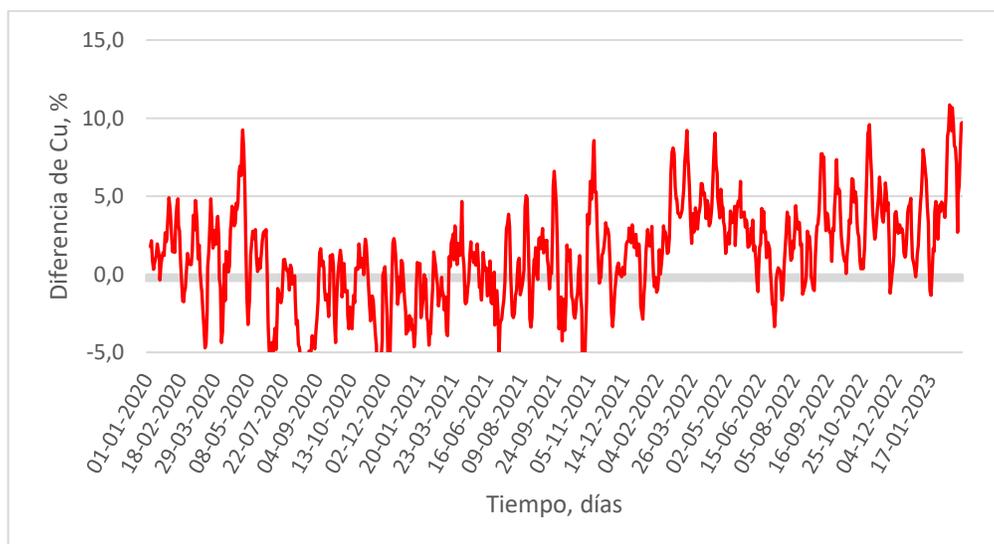


Figura 17: Aumento de la diferencia de recuperación de cobre Laboratorio - planta de la planta A2 (CODELCO, 2023).

En vista de lo presentado en las figuras anteriores, se puede destacar que, en algunos tramos del periodo, la recuperación promedio que se obtenía en planta llegaba a ser incluso mayor al promedio de recuperación que logró obtener en el laboratorio, sin embargo, este caso aislado no siguió presentándose, y más aún, esta diferencia de recuperaciones en el laboratorio y la planta ha ido acrecentándose cada vez más.

Teniendo esto como base, se ha propuesto lograr aumentar el potencial de recuperación de laboratorio para las recuperaciones de las plantas, por medio de un reactivo dispersante que logre disminuir los efectos perjudiciales que presentan las arcillas.

4. Desarrollo experimental.

4.1. Caracterización del mineral.

Considerando que en el año 2024 aumentará aún más el ingreso de mineral de RT a la planta concentradora, se decide realizar pruebas de flotación exclusivamente con mineral de mina Radomiro Tomic.

Se proporcionó por parte de la GRMD 150 kg de mineral, el cual fue sometido a un proceso de conminución y reducción de tamaño en chancador de conos y mandíbulas (Figura 51 y Figura 52) hasta lograr un tamaño de 1.6 mm, es decir, 100% -12#. Posteriormente el mineral se homogenizó en un cortador de rifle y de esta manera obtener muestras representativas de 1350g por medio del Rotary (Figura 50)Figura 50: Rotary laboratorio caracterización Codelco DCh..

Las muestras del mineral que se obtuvieron tenían la composición que se detalla en la Tabla 2.

Tabla 2: Composición del mineral de RT utilizado en las pruebas de flotación.

Cu %	Fe %	Mo %	As %	Zn %
0.59	1.00	0.022	0.017	0.044

4.2. Instrumentos utilizados y procedimientos.

Al momento de realizar las pruebas de laboratorio, se utilizaron diferentes equipos e instrumentos que se detallan a continuación.

Pruebas de Flotación.

Para las pruebas de flotación fueron utilizadas muestras de mineral que previamente habían sido homogenizadas y pasadas por rotary para lograr obtener muestras iguales y poder calcular el tiempo de molienda óptimo. Cada muestra

que contenía un aproximado de 1350 g se sometió al proceso de molienda en el molino de bolas previo a cada una de las pruebas de flotación.

Todas las pruebas de flotación fueron realizadas en una celda de la marca Essa, de un volumen de 2700 cm³ tal y como se puede apreciar en la Figura 18. El procedimiento para las pruebas comenzaba adicionando la pulpa que se obtenía del molino de bolas, luego enrasar la celda con agua de planta hasta los 2700 cm³ para posteriormente ajustar el pH con cal, agregar reactivos e iniciar el proceso de flotación.



Figura 18: Fotografía de celda de flotación utilizada en laboratorio de planta concentradora.

En la Tabla 3, se agregan algunos detalles de las sobre las pruebas de flotación:

Tabla 3: Detalle de variables en pruebas de flotación de laboratorio.

Condición de flotación	Detalle
%S	39%
pH	10,4
Flujo de aire	5 L/min
Velocidad de agitación	1200 RPM

Tiempo de acondicionamiento	2 minutos
Tiempo de flotación	8 minutos
Tiempos de colección	2 y 8 minutos
Frecuencia de paleteo	Paleteo cada 5 segundos
Adición de agua	A criterio del experimentador
Dosis de Xantato	25 g/t
Dosis de Espumante	10 g/t
Dosis Diesel	10 g/t
Dosis Reactivo a utilizar	20 g/t
Cal	0.3 g en molienda
Tipo de agua utilizada	Agua de planta

De los parámetros detallados en la Tabla 3 se desprenden las condiciones estándar de las pruebas de flotación, las cuales son: xantato 25 g/t, espumante 10 g/t, diesel 10 g/t, cal en molienda 0,3 g terminando de ajustar el pH adicionando cal en el acondicionamiento de las pruebas de flotación.

4.3. Metodología de trabajo.

Para llevar a cabo todo el proceso de experimentación, se definieron pruebas en un total de cuatro investigaciones. Cada investigación fue hecha en triplicado para lograr obtener resultados representativos.

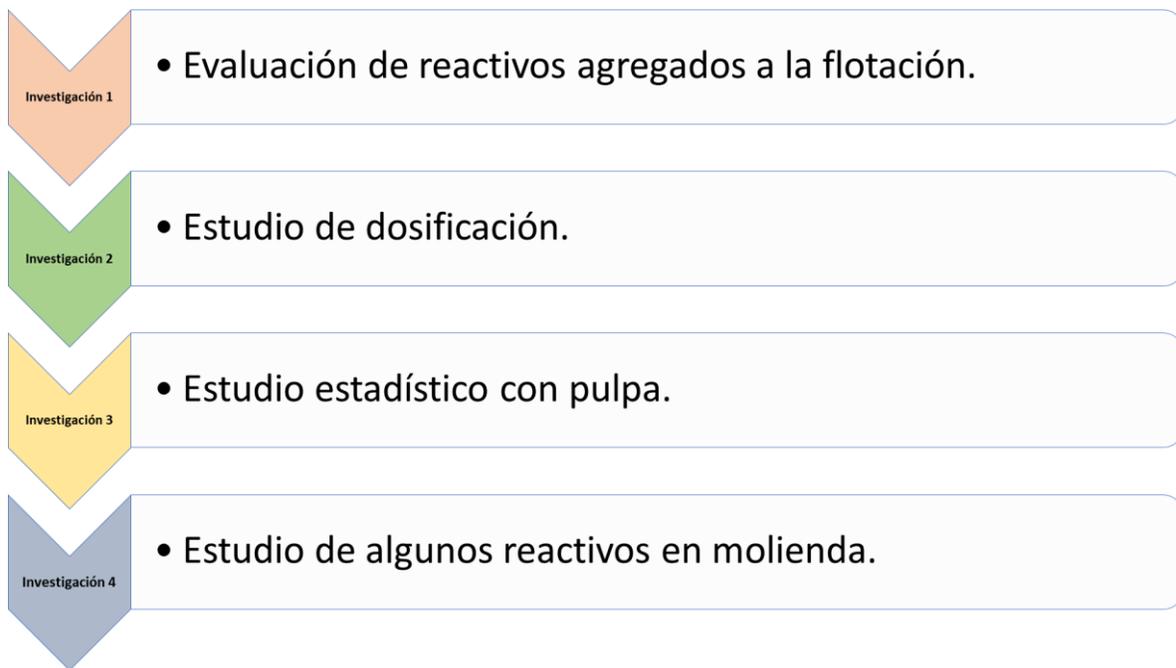


Figura 19: Diferentes fases de investigación.

4.3.1. Investigación 1.

La Investigación 1 consistió en evaluar el efecto de un set de 9 reactivos de flotación a una dosis constante de 20 g/t sobre la recuperación metalúrgica de cobre y molibdeno. La Investigación 1 se dividió en tres etapas tal como se especifica en la Tabla 4: etapa 1 donde se probaron 9 reactivos más el estándar; etapa 2 5 reactivos más estándar; y la etapa 3 donde se evaluaron 2 reactivos más prueba estándar. Se hace notar que la pulpa utilizada para el estudio de flotación corresponde a pulpa generada desde mineral fresco en el laboratorio.

El detalle de los reactivos probados en cada fase se detalla en la Tabla 4.

Tabla 4: Detalle de reactivos utilizados en las diferentes fases.

Fase	Reactivo	Tipo de Adición	Dosis	pH
Etapa 1	Std	-	-	10,4
	Aero MX-2415	Flotación	20 g/t	10,4
	Aero MX-7021	Flotación	20 g/t	10,4
	Aero MX-2418	Flotación	20 g/t	10,4
	A-2427	Flotación	20 g/t	10,4
	Cyquest-3223	Flotación	20 g/t	10,4
	Hostaflot PD-1005	Flotación	20 g/t	10,4
	Hostaflot PD-1006	Flotación	20 g/t	10,4
	Molitec-100	Flotación	20 g/t	10,4
	Flotisor PD-702	Flotación	20 g/t	10,4
Etapa 2	Std	-	-	10,4
	SHMP	Flotación	20 g/t	10,4
	Coatex-3736	Flotación	20 g/t	10,4
	Aero MX-2427	Flotación	20 g/t	10,4
	Aero MX-2418	Flotación	20 g/t	10,4
	Flotisor PD-702	Flotación	20 g/t	10,4
Etapa 3	Std	-	-	10,4
	SHMP	Flotación	20 g/t	10,4
	Flotisor PD-702	Flotación	20 g/t	10,4

4.3.2. Investigación 2.

El reactivo de flotación que mostró los mejores resultados en la Investigación 1 fue evaluado en la Investigación 2 a diferentes dosis, tal como se detalla en la Tabla 5. Al igual que como en el caso de la Investigación 1, la pulpa utilizada para el estudio de flotación correspondía a pulpa generada desde mineral fresco en el laboratorio.

El detalle de las pruebas de la investigación 2, se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5: Detalle de pruebas hechas en la investigación 2.

	Dosis de Flotacor PD-702	Tipo de adición	pH
Altas dosis	-	Flotación	10,4
	7 g/t	Flotación	10,4
	20 g/t	Flotación	10,4
	40 g/t	Flotación	10,4
Bajas dosis	-	Flotación	10,4
	5 g/t	Flotación	10,4
	12 g/t	Flotación	10,4
	20 g/t	Flotación	10,4

4.3.3. Investigación 3.

La Investigación 3 consistió en probar la dosis de reactivo que presentó mejores resultados en la Investigación 2 a través de los días. A diferencia de la investigación 1 y 2, esta se realizó con pulpa fresca generada en las plantas concentradoras A0 y A2. Se menciona que en el primer día la pulpa de RT entraba por la planta A0, sin embargo, el segundo y tercer día la pulpa de RT ingresaba a la planta concentradora por a través de la A2.

Los detalles de las pruebas realizadas en la investigación se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6: Detalles de las pruebas hechas en la investigación 3.

Día	Dosis de Flotacor PD-702	Tipo de adición	Pulpa	pH
3 de julio (día 1)	-	Flotación	A0	10,4
	5 g/t	Flotación	A0	10,4
4 de julio (día 2)	-	Flotación	A2	10,4
	5 g/t	Flotación	A2	10,4
5 de julio (día 3)	-	Flotación	A2	10,4
	5 g/t	Flotación	A2	10,4

4.3.4. Investigación 4.

Ante la posibilidad de mejoras en las recuperaciones metalúrgicas al adicionar algunos reactivos desde la molienda, la Investigación 4, la cual fue carácter exploratorio, estableció una breve base de datos que permita comparar la recuperación metalúrgica al adicionar diferentes reactivos (tales como dispersantes y sales) desde diferentes etapas del procesamiento mineral.

El detalle de las pruebas realizadas en la investigación 4, se presenta en la Tabla 7.

Tabla 7: Reactivos empleados en la investigación 4 y sus detalles.

Reactivo	Tipo de Adición	Dosis
Flotacor PD-702	Molienda	20 g/t
Flotacor PD-702	Flotación	20 g/t
SHMP	Molienda	20 g/t
Coatex	Flotación	20 g/t
Flotacor PD-702 / SHMP	Molienda	10 g/t - 10 g/t
Metasilicato de sodio	Flotación	20 g/t
KCl	Flotación	20 g/t

5. Resultados.

5.1. Investigación 1.

5.1.1. Etapa 1.

Los gráficos de esta etapa fueron elaborados a partir de los datos de la Tabla 8.

Resultados obtenidos para el cobre.

La Figura 20 muestra los resultados obtenidos de recuperación de cobre vs recuperación en peso utilizando los 9 reactivos de flotación evaluados en esta etapa. Se observa que, para recuperaciones en peso comparables, los mejores resultados de recuperación de cobre se obtienen con el reactivo Flotacor PD-702. Adicionalmente la data indica que los reactivos Hostafлот PD 1006 y Aero MX-7021 son los que generan mayores recuperaciones en peso, muy por sobre los valores obtenidos con los otros reactivos evaluados.

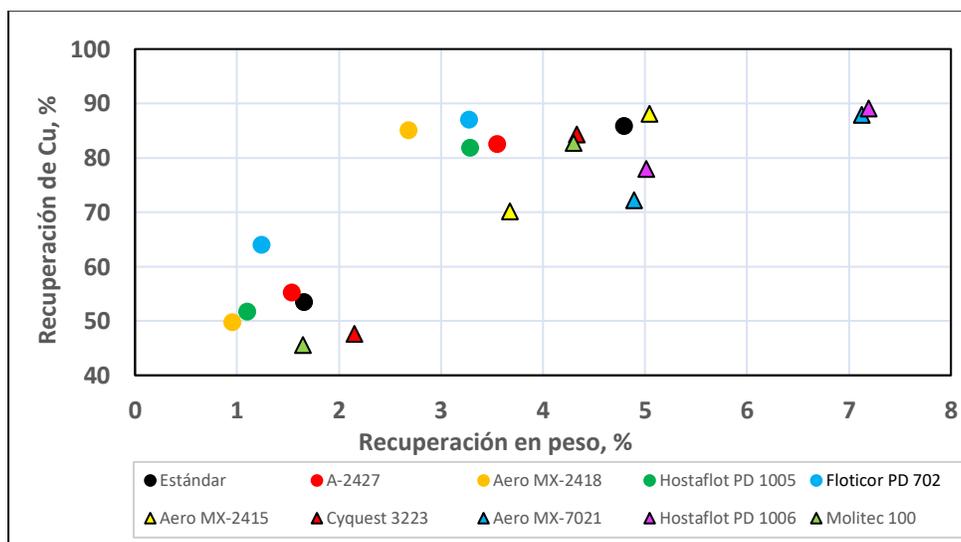


Figura 20: Recuperación de Cu vs Recuperación en peso de la etapa 1.

La Figura 21 muestra cómo disminuye la ley de cobre en el concentrado a medida que aumenta la recuperación de Cu de los 4 reactivos que presentan bajas recuperaciones en peso y alta recuperación metalúrgica. Se observa que para una recuperación de cobre de 90%, el reactivo Aero MX junto con el Flotacor PD-702 contienen una ley de cobre en el concentrado mayor con respecto a los demás reactivos.

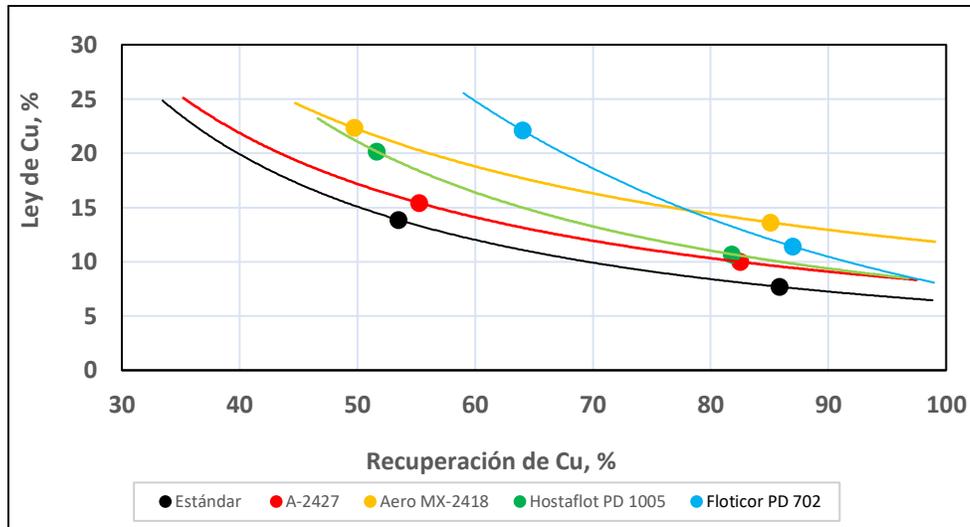


Figura 21: Ley de Cu en el concentrado vs Recuperación de Cu de la etapa 1.

La Figura 22 muestra como aumenta la recuperación de cobre en el tiempo de flotación. Se observa que desde el minuto 2 al 6 el Flotacor PD-702 presenta una recuperación de cobre mayor en comparación con los otros reactivos. Esta tendencia disminuye a partir del tiempo de colección del minuto 8 en adelante.

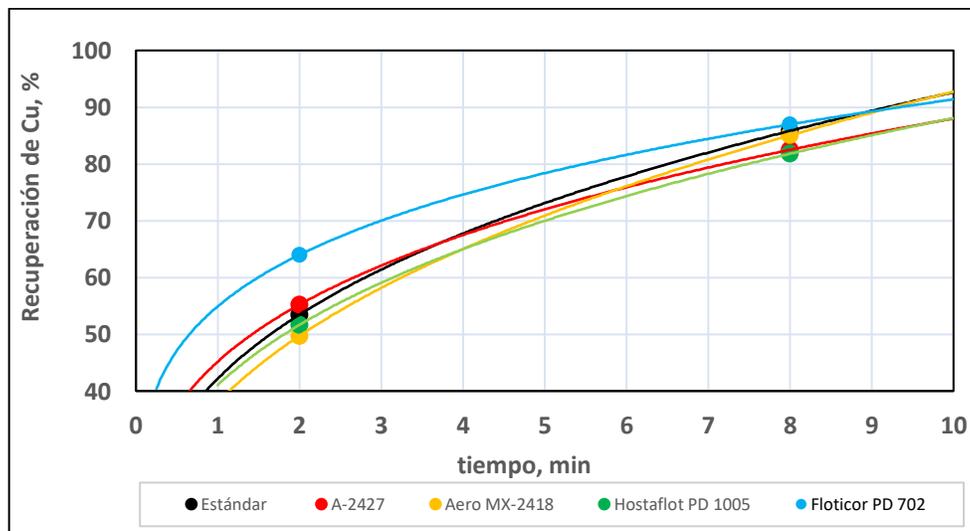


Figura 22: Recuperación de Cu vs Tiempo de la etapa 1.

Resultados obtenidos para el molibdeno.

La Figura 23 muestra los resultados obtenidos de recuperación de molibdeno vs recuperación en peso utilizando los 9 reactivos de flotación evaluados en etapa 1. Al igual que en los resultados del cobre, se observa que, para recuperaciones en

peso similares, los mejores resultados de recuperación de cobre se obtienen con el reactivo Flotacor PD-702. Además, de igual manera la data indica que los reactivos Hostafлот PD-1006 y Aero MX-7021 son los que generan mayores recuperaciones en peso, muy por sobre los valores obtenidos con los otros reactivos evaluados.

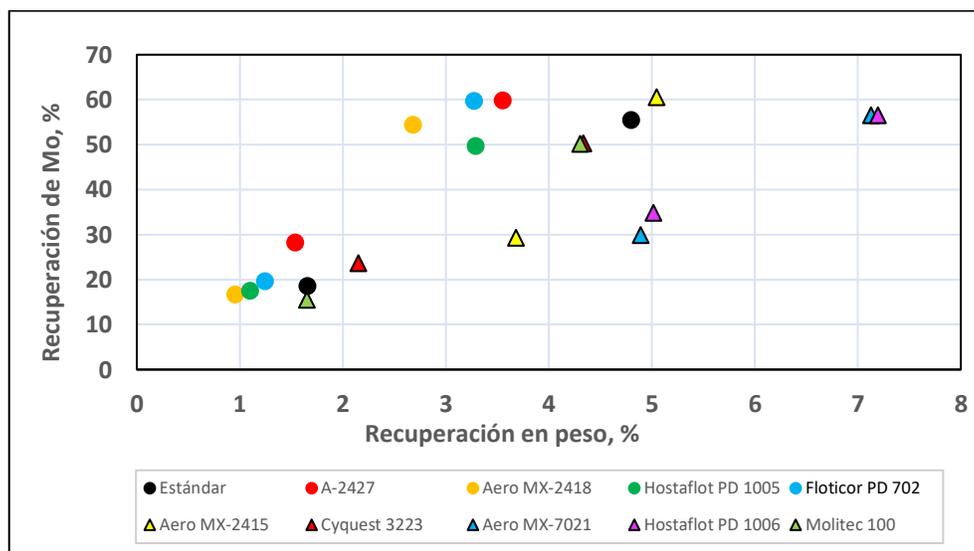


Figura 23: Recuperación de Mo vs Recuperación en peso de la etapa 1.

La Figura 24 muestra la disminución de la ley de molibdeno en el concentrado a medida que aumenta su recuperación metalúrgica. Se observa que, para recuperaciones metalúrgicas de molibdeno de 60%, el reactivo que presenta una mayor Ley de Mo en el concentrado corresponde a Aero MX-2418.

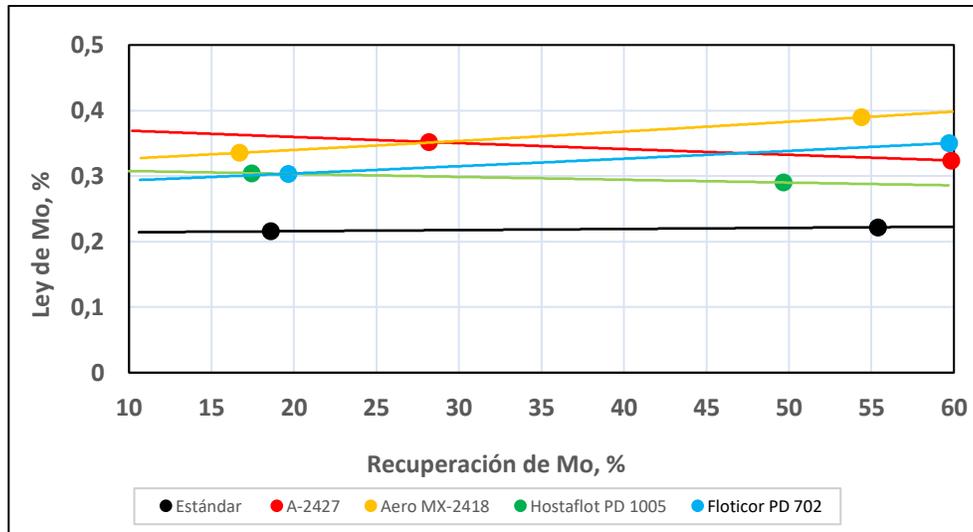


Figura 24: Recuperación de Mo vs Recuperación en peso de la etapa 1.

La Figura 25 muestra el aumento de recuperación de molibdeno en el tiempo. Se hace notar que al minuto 2 el reactivo que presenta un mejor desempeño es el A-2427 con respecto a los otros reactivos. Esta tendencia sigue hasta aproximadamente el minuto 7. En el minuto 8 el Flotacor PD-702 saca un resultado muy similar al reactivo A-2427.

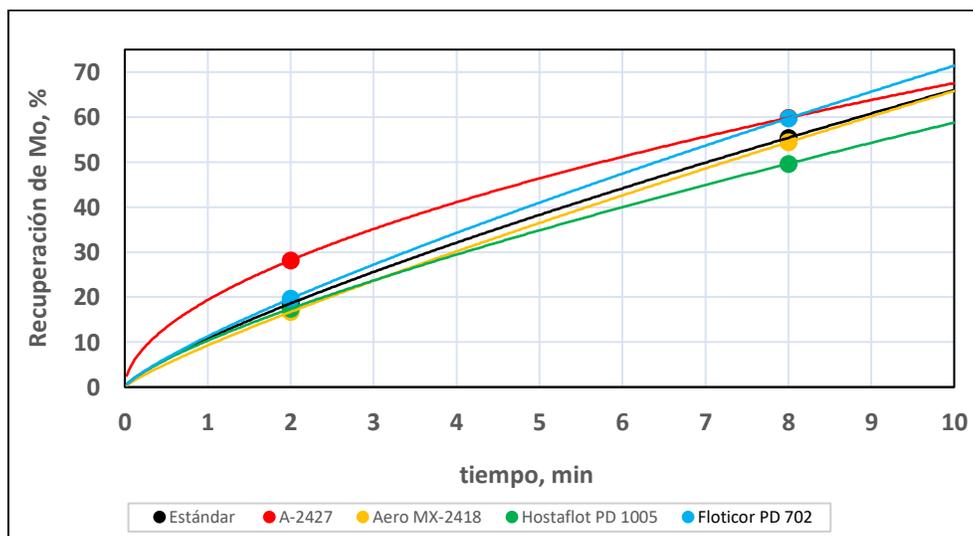


Figura 25: Recuperación de Mo vs Tiempo de la etapa 1.

5.1.2. Etapa 2.

Figuras de esta etapa elaboradas por medio de la Tabla 9 en los anexos.

Resultados obtenidos para el cobre.

La Figura 26 muestra los resultados de recuperación de cobre con respecto a la recuperación en peso R_p . Se observa que, aunque el Aero MX-2427 en las pruebas presenta buenas recuperaciones de cobre, también obtiene una recuperación en peso mucho mayor en desmedro de los demás, es decir, en el minuto 2, el Aero ya alcanza una R_p que bordea el 9% para alcanzar en el minuto 8 una R_p que llega hasta el 14%. Mientras que los demás reactivos en el minuto 2, oscilan entre unos valores de R_p de 4 y 6% para terminar en el minuto 8 con valores oscilantes entre un 9 y 12%.

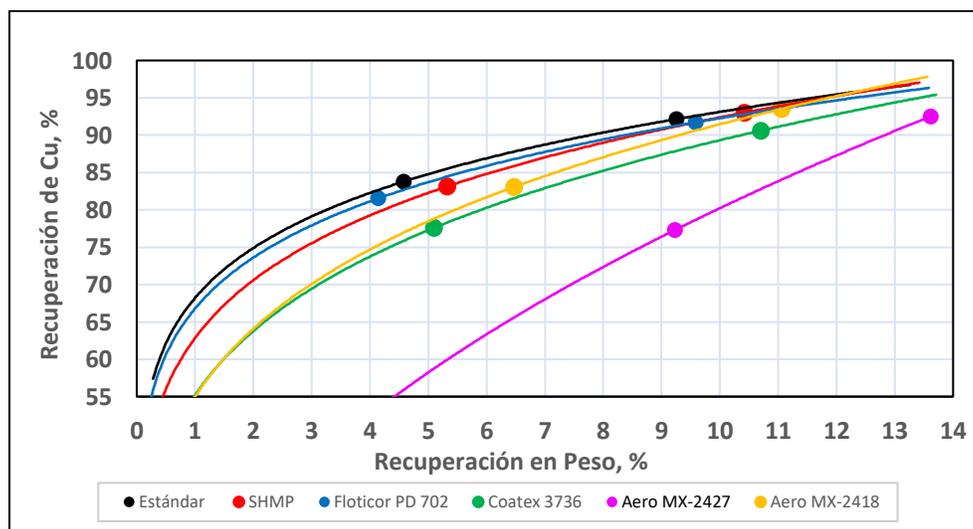


Figura 26: Recuperación de Cu vs Recuperación en peso de la etapa 2.

La Figura 28 muestra como disminuye la ley de cobre en el concentrado a medida que aumenta la recuperación. Se observa que, para valores de recuperación de cobre similares, la prueba estándar y el reactivo Flotisor PD-702 son los que presentan leyes de cobre en el concentrado más elevadas.

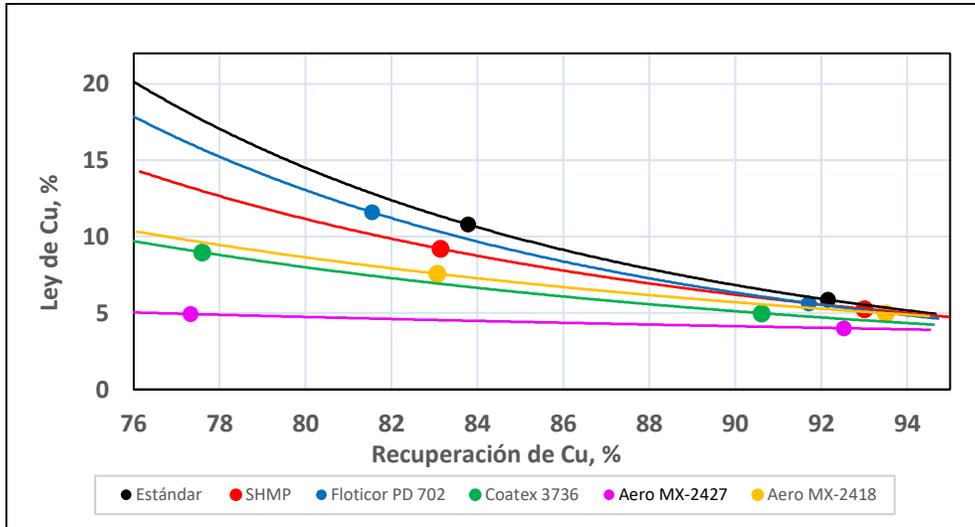


Figura 27: Ley de Cu en el concentrado vs Recuperación de Cu de la etapa 2

La Figura 28 muestra la recuperación de cobre a través del tiempo de flotación, donde se destaca que para el tiempo de colección del minuto 2, las recuperaciones de cobre para el Coatex-3736 y el Aero MX-2427 no alcanzan a llegar al 80%, a diferencia de los demás reactivos que alcanzan valores que oscilan entre 82 y 84%.

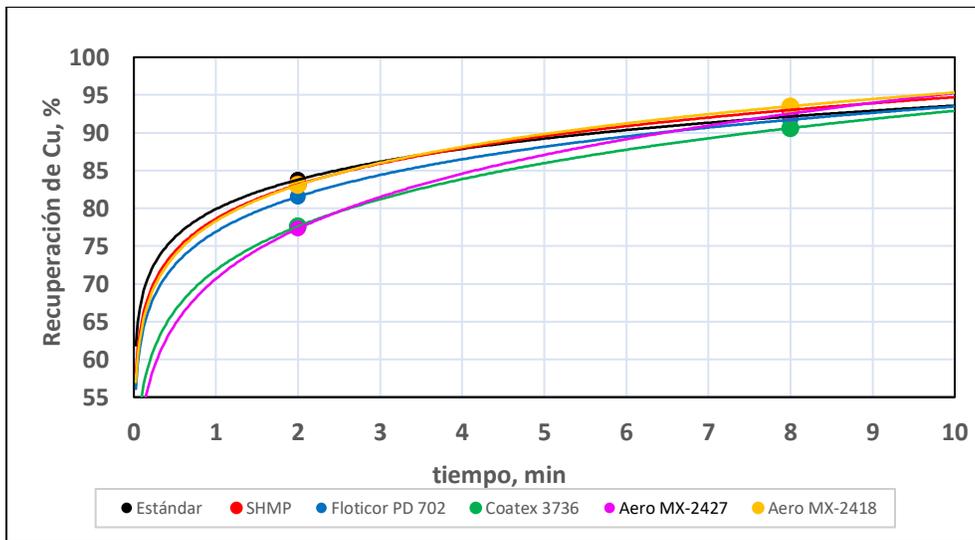


Figura 28: Recuperación de Cu vs Tiempo de la etapa 2.

Resultados obtenidos para el molibdeno.

La Figura 29 muestra la recuperación de molibdeno vs la recuperación en peso R_p . Se observa que, para una R_p igual, la prueba estándar obtiene mejores resultados que los reactivos. Por otra parte, el reactivo Aero MX-2427 es el que genera una mayor recuperación en peso, comparada con los demás.

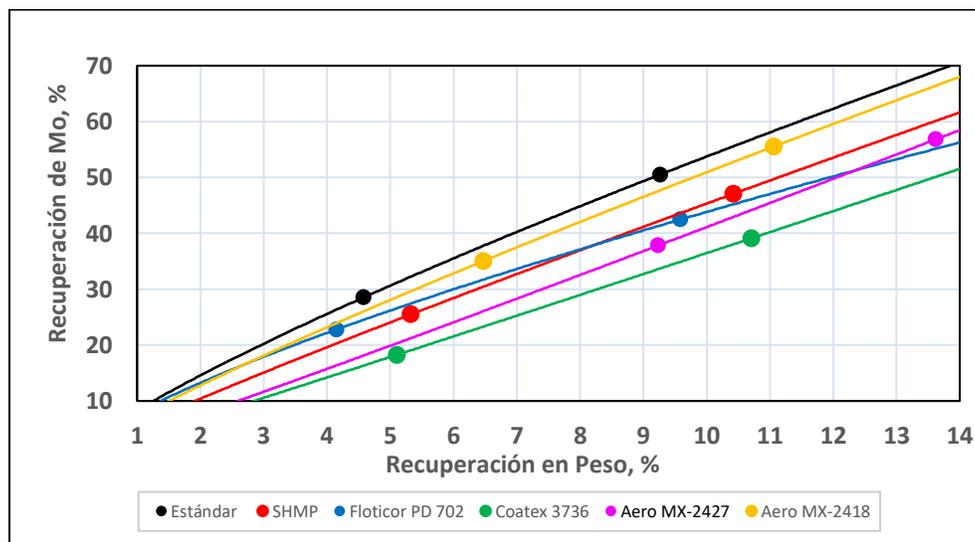


Figura 29: Recuperación de Mo vs Recuperación en peso de la etapa 2.

La Figura 31, muestra la Ley de Mo en el concentrado respecto de la recuperación de Mo. De acuerdo con la gráfica, para valores de recuperación de Mo similares, la prueba estándar y el reactivo Aero MX-2418 son los que presentan leyes de Mo en el concentrado más elevadas.

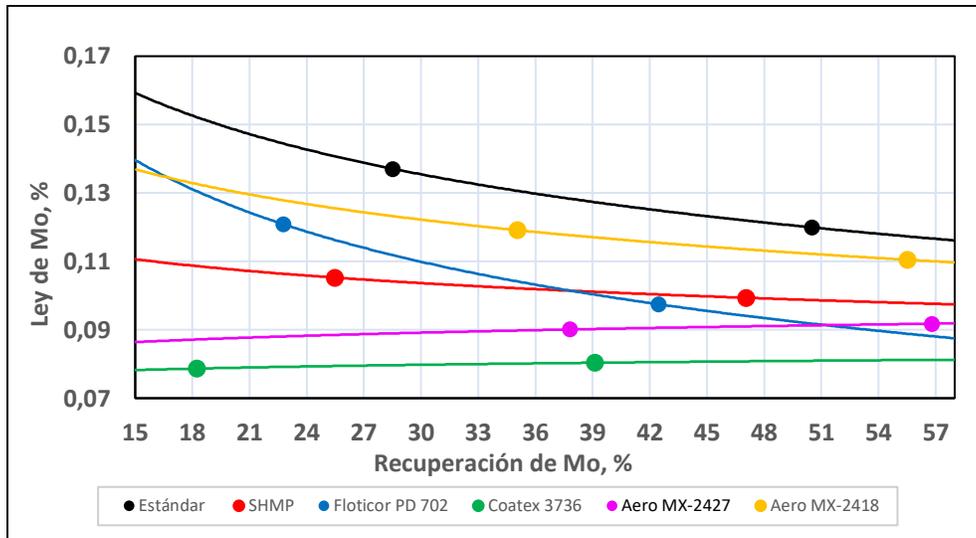


Figura 30: Ley de Mo en el concentrado vs Recuperación de Mo de la etapa 2

Por último, la Figura 31 muestra la variación de recuperación de molibdeno para ambos tiempos de colección. Se observa que, para un mismo tiempo de colección los reactivos que presentan mejores resultados son el Aero MX-2427 y el Aero MX-2418, esta tendencia se repite a lo largo de toda la prueba. Ahora, no se debe obviar el hecho de que este reactivo según las gráficas presentadas en la Figura 26 y 28 mostraban una recuperación en peso que se salía de la media en comparación con los demás. Por otra parte, el Aero MX 2418, aunque presenta una alta recuperación metalúrgica, también muestra una alta recuperación en peso. Finalmente, los que se ajustan mejor a las condiciones operaciones de la planta, es decir, con una R_p entre 9,5 y 10,5% son el Flotisor PD-702 y el SHMP.

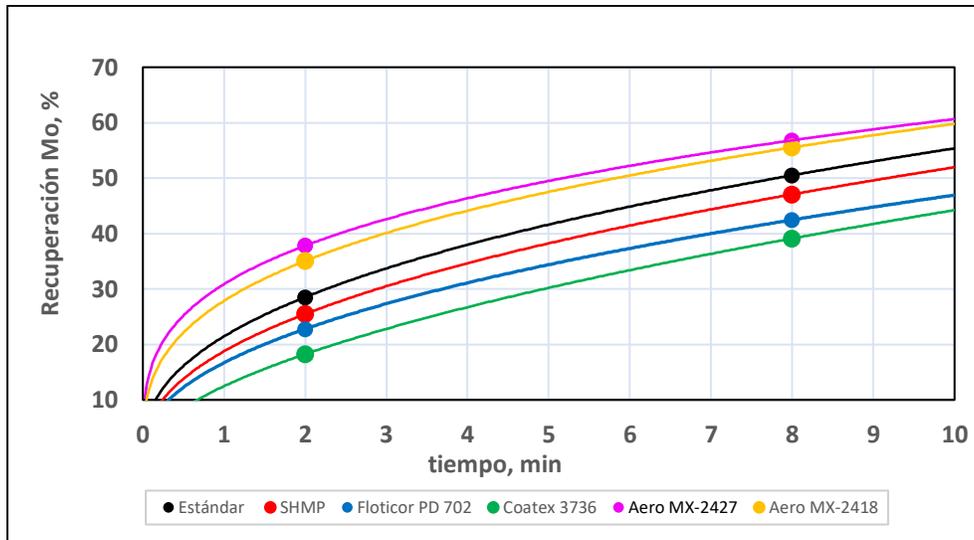


Figura 31: Recuperación de Mo vs Tiempo de la etapa 2

5.1.3. Etapa 3

Gráficas elaboradas a partir de los datos expuestos en la Tabla 10.

Resultados obtenidos para el cobre.

La Figura 32 muestra la recuperación de cobre vs recuperación en peso R_p . Se observa que, para una misma R_p el reactivo SHMP logra una recuperación de Cu mayor. Por otro lado, a una R_p de 9% el Flotisor PD-702 y el SHMP logran la misma recuperación de Cu.

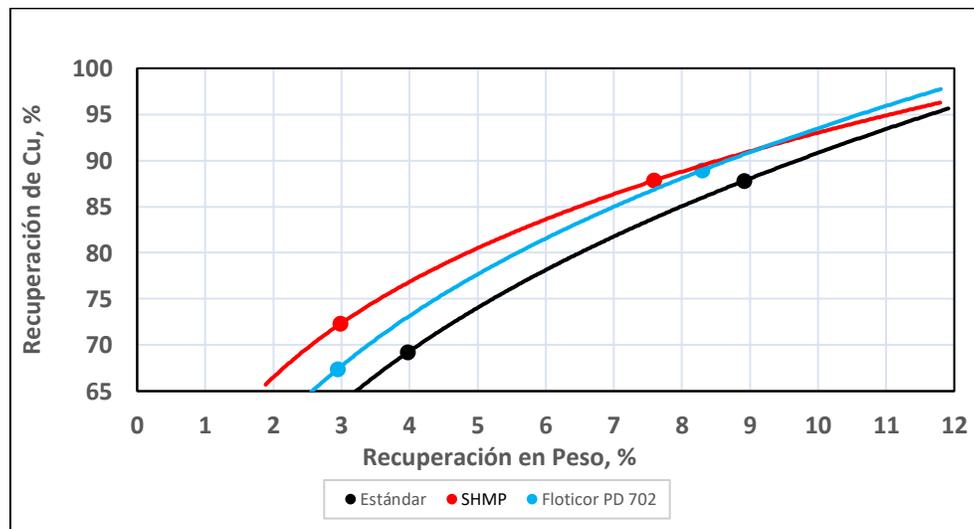


Figura 32: Recuperación de cobre vs Recuperación en peso de la etapa 3.

La Figura 34 muestra la ley de Cu en el concentrado respecto de la recuperación de Cu. Se puede observar que, para una misma recuperación de Cu el reactivo SHMP presenta una ley de concentrado mayor en lo que respecta al Flotisor y al estándar.

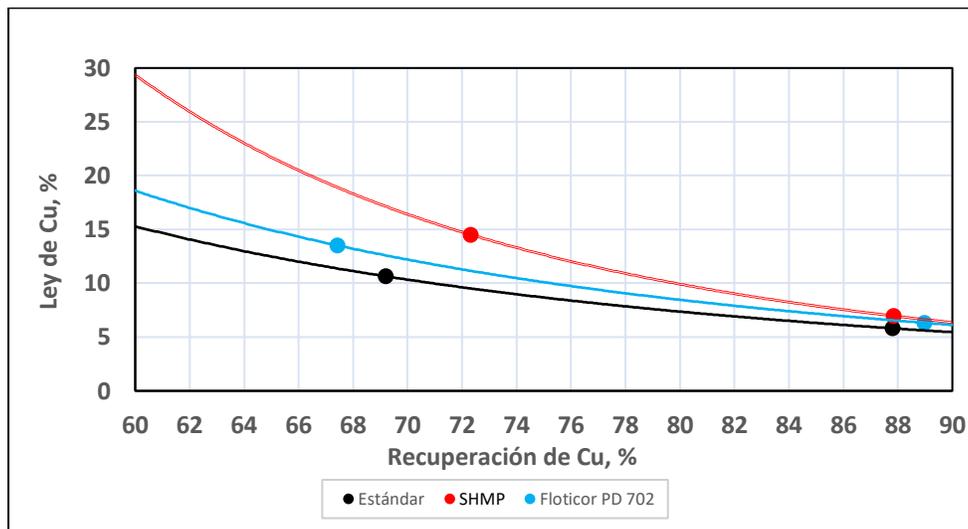


Figura 33: Ley de Cu en el concentrado vs Recuperación de Cu de la etapa 3.

La Figura 34 presenta las recuperaciones de cobre con respecto al tiempo. Se puede observar que al tiempo 2 el SHMP superará el 70% de recuperación de cobre por sobre el Flotisor PD-702, a su vez en el tiempo 8, el Flotisor PD-702 alcanza una recuperación de cobre mayor a la SHMP.

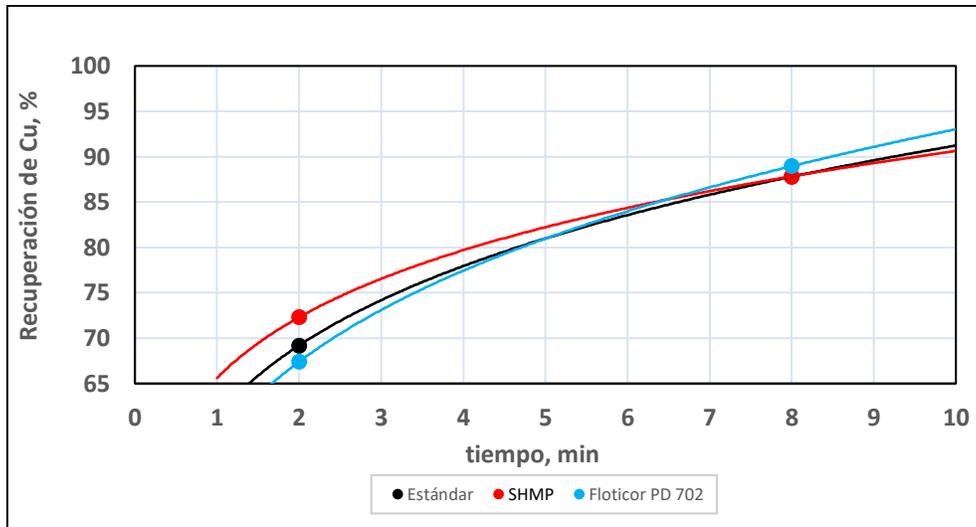


Figura 34: Recuperación de Cu vs Tiempo en la etapa 3.

Resultados obtenidos para el molibdeno.

La Figura 35, se muestra la recuperación de molibdeno vs la recuperación en peso R_p . Se nota que, para una misma recuperación en peso el SHMP logra una mayor recuperación de Cu. Por otra parte, las recuperaciones metalúrgicas para el estándar y el Flotisor son prácticamente iguales a R_p similares.

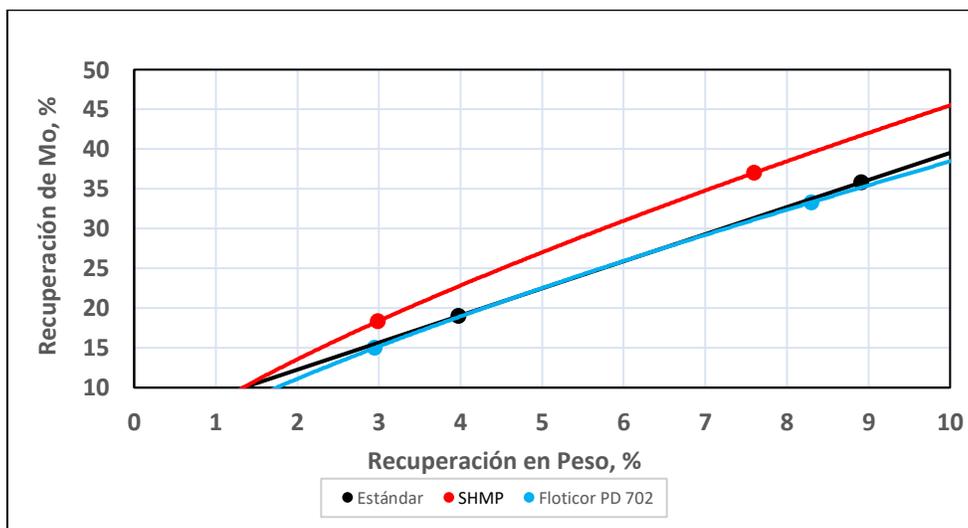


Figura 35: Recuperación de molibdeno vs Recuperación en peso en la etapa 3.

La Figura 37 la variación de Mo en el concentrado con respecto a la recuperación de Mo. Se puede observar que, para una misma recuperación de molibdeno le ley de Mo en el concentrado es mayor para el SHMP en comparación con el estándar y el reactivo Flotisor PD-702.

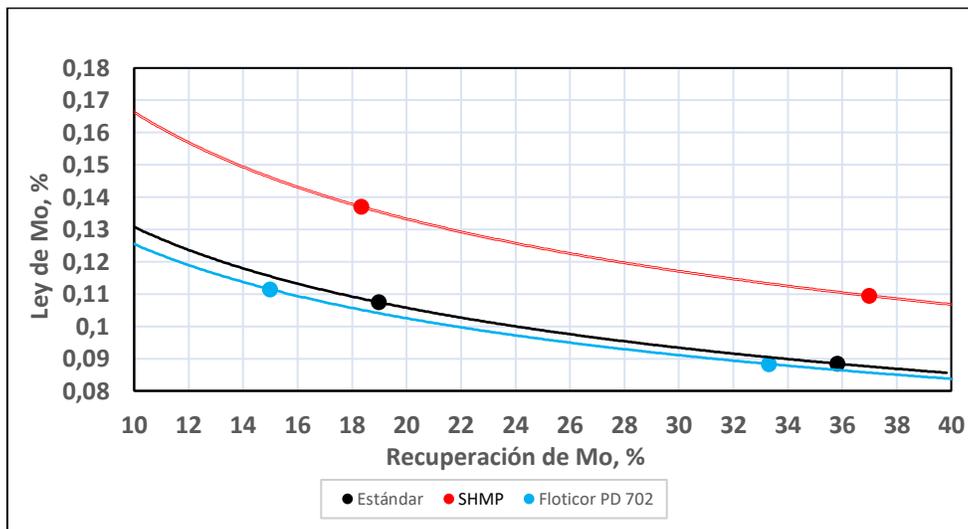


Figura 36: Ley de Mo en el concentrado vs Recuperación de Mo de la etapa 3.

La Figura 37 muestra la gráfica que corresponde a la Recuperación de Mo versus el tiempo. Se puede observar que recuperación de molibdeno en el minuto 2 es menor que la estándar para ambos reactivos, sobre todo para el Flotisor PD-702.

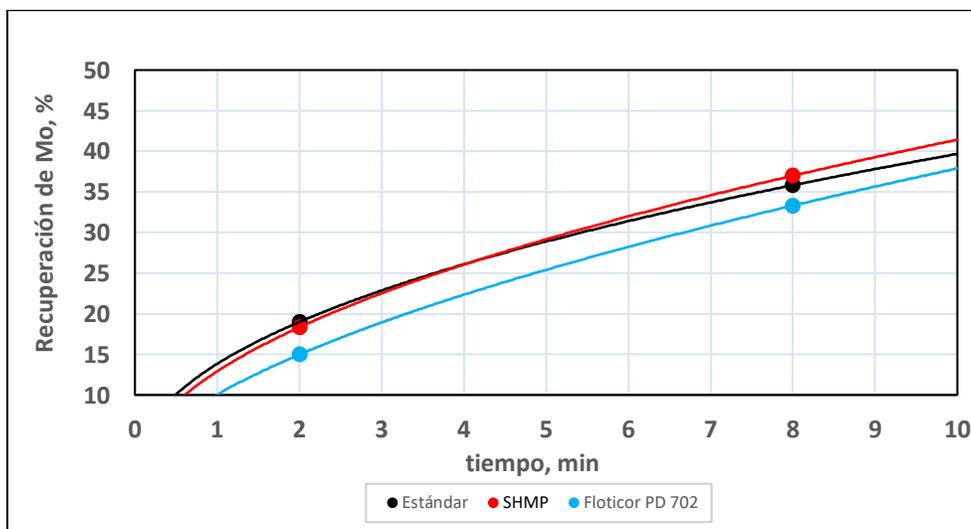


Figura 37: Recuperación de Mo vs Tiempo.

Estos análisis, presentan resultados variados, en asuntos del molibdeno, la adición del hexametáfosfato de sodio marca una evidente ventaja en comparación con la prueba estándar y más todavía con el Flotacor PD-702. Por otra parte, el Flotacor PD-702 logra una mayor Recuperación de Cu. Es por ello que se decide continuar los análisis de pruebas de la investigación 2 y 3 con este reactivo.

5.2. Investigación 2.

- **Determinación de la dosis óptima.**

5.2.1. Altas dosis.

Se muestran los resultados metalúrgicos obtenidos para altas dosis de Flotacor PD-702. Las figuras elaboradas por medio de la Tabla 11.

Resultados para el cobre.

La Figura 38, se muestra la gráfica de recuperación de cobre vs recuperación en peso. Se puede notar que, a una misma recuperación en peso, dosis más bajas logran una mayor recuperación metalúrgica de cobre.

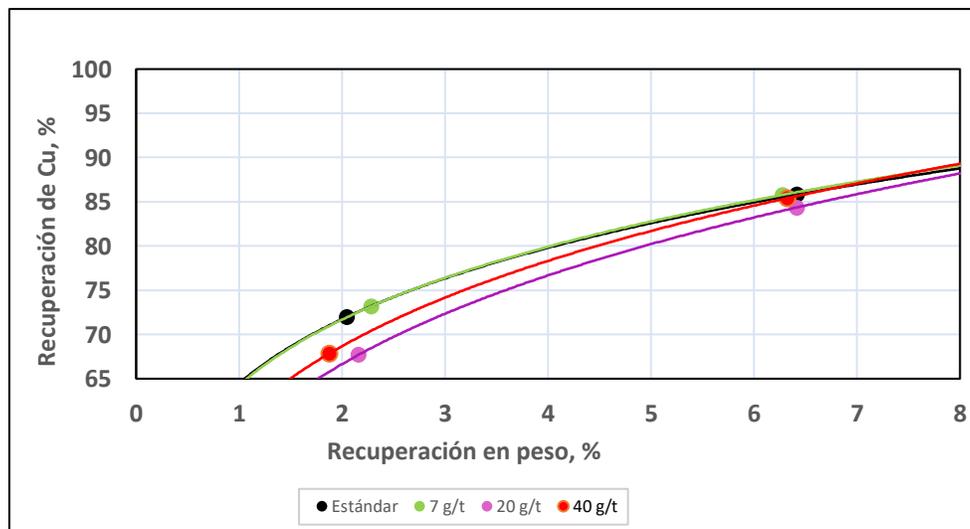


Figura 38: Recuperación de cobre vs Recuperación en peso.

Resultados para el molibdeno.

La Figura 39 muestra a continuación se compara la recuperación de molibdeno en comparación con la recuperación en peso R_p . Se observa que, a recuperaciones

en peso equiparables, la dosis más baja obtiene mejores resultados de recuperación de molibdeno.

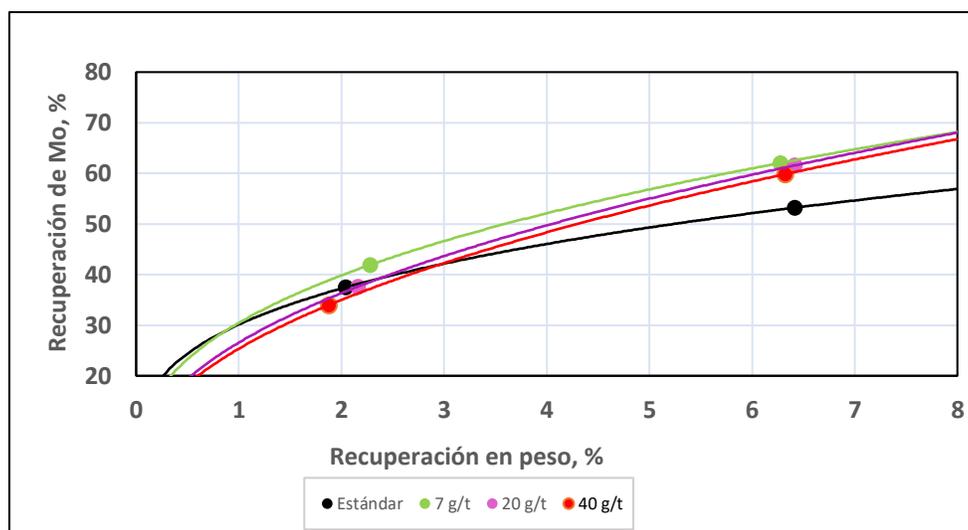


Figura 39: Recuperación de Molibdeno vs Recuperación en peso.

5.2.2. Bajas dosis.

Resultados para bajas dosis de Flotisor PD-702. Figuras elaboradas a partir de la Tabla 12.

Resultados para el cobre.

La Figura 40 presenta los resultados obtenidos para el cobre. Se observa que, a una recuperación en peso igual, dosis más bajas alcanzan mejores resultados de recuperación de cobre.

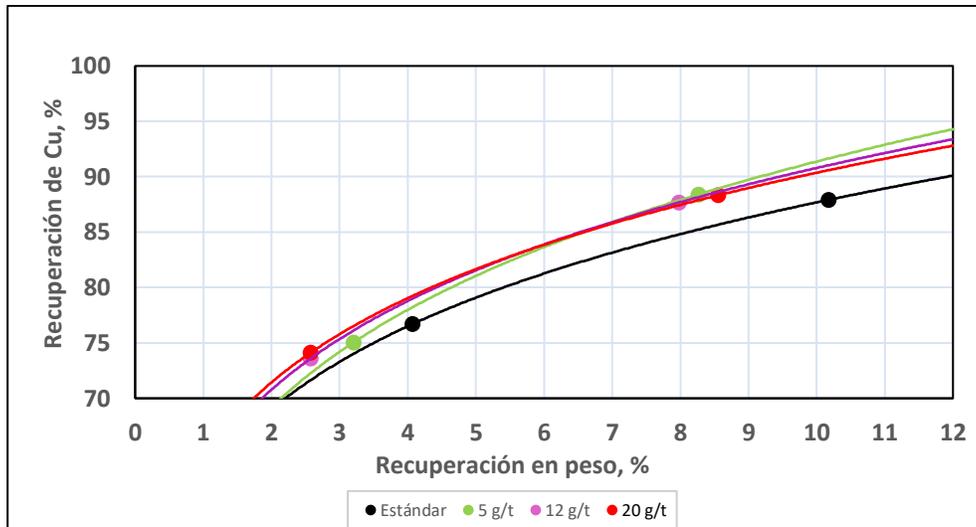


Figura 40: Recuperación de cobre vs Recuperación en peso.

Resultados para el molibdeno.

La Figura 41 muestra los resultados asociados a la recuperación de molibdeno respecto a la recuperación en peso. De acuerdo a la gráfica se puede notar que a una misma R_p la adición de reactivo resulta benéfica respecto de la estándar en cualquiera de sus dosis.

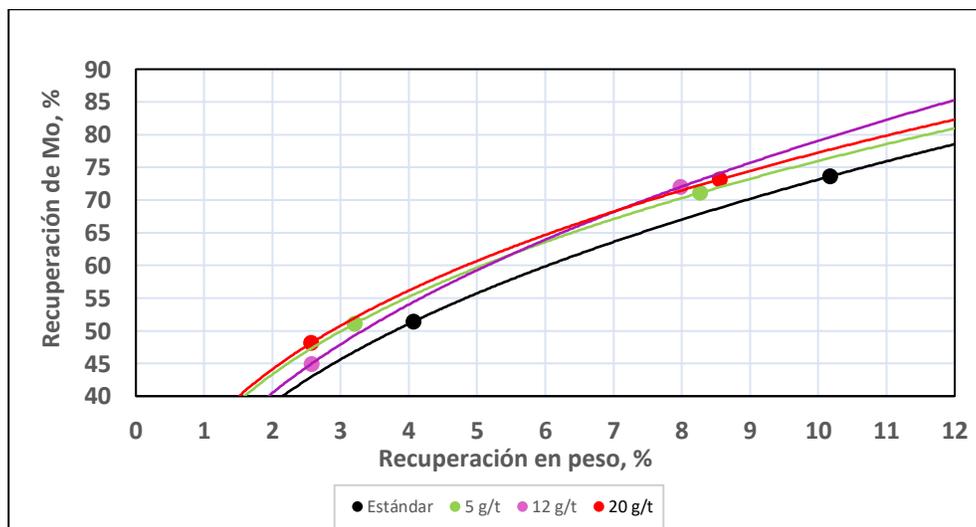


Figura 41: Recuperación de Molibdeno vs Recuperación en peso.

Se nota que con altas dosis de reactivos, los resultados no son los esperados; es más, la adición de dosis bajas resulta mucho más conveniente para el proceso de flotación, al menos para estos reactivos, este detalle no menor, no se debe obviar, puesto que supondría una disminución no menor en términos de costos operacionales.

Es por ello que, se sigue el análisis de la Investigación con la dosis mas baja que se ha probado, es decir, una dosificación de 5 g/t.

5.3. Investigación 3.

Como se menciona en las metodologías, la Investigación 3 se realiza utilizando pulpa de planta en vez de mineral. Al igual que para la Investigación 1 y 2, se mantuvieron los parámetros acordados, se ajusta el porcentaje en sólidos en 39% y en el acondicionamiento se ajusta el pH a un 10,4.

5.3.1. Día 3 de julio 2023.

Pruebas realizadas con pulpa fresca de la planta A0. Figuras elaboradas por medio de la Tabla 13.

Resultados para el cobre.

La Figura 42 muestra la recuperación de cobre comparada con la recuperación en peso R_p . Se puede notar que para valores de R_p menores al 3%, la adición del reactivo logra mejor recuperación de Cu que la prueba estándar, sin embargo, esta tendencia se invierte con R_p mayores a 3%, donde sin la adición Flotacor PD-702 se logran mejores resultados.

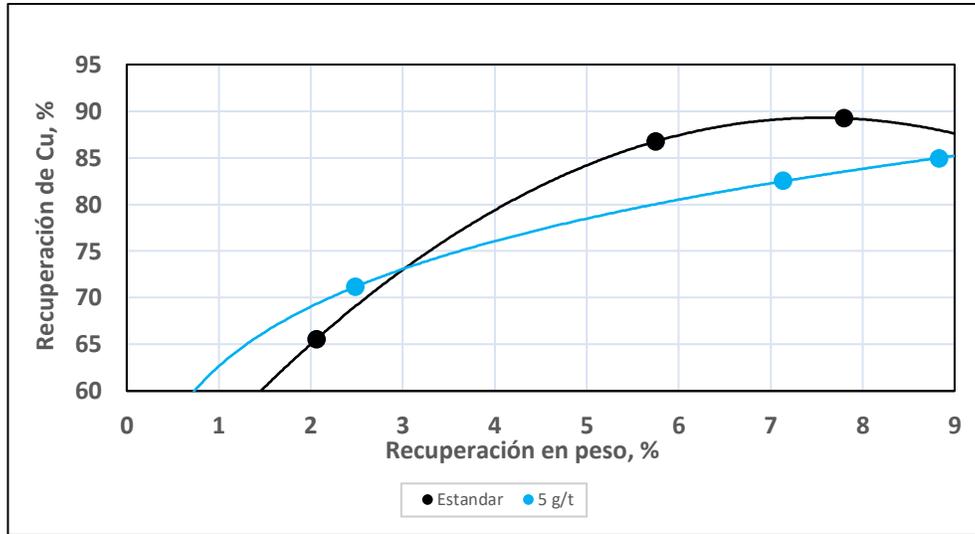


Figura 42: Recuperación de cobre vs Recuperación en peso agregando Flotitor PD-702.

Resultados para el molibdeno.

La Figura 43 muestra la recuperación de molibdeno comparada con la recuperación en peso. De acuerdo al gráfico se observa que, para una misma recuperación en peso, el reactivo Flotitor PD-702 obtiene mejores recuperaciones de Mo.

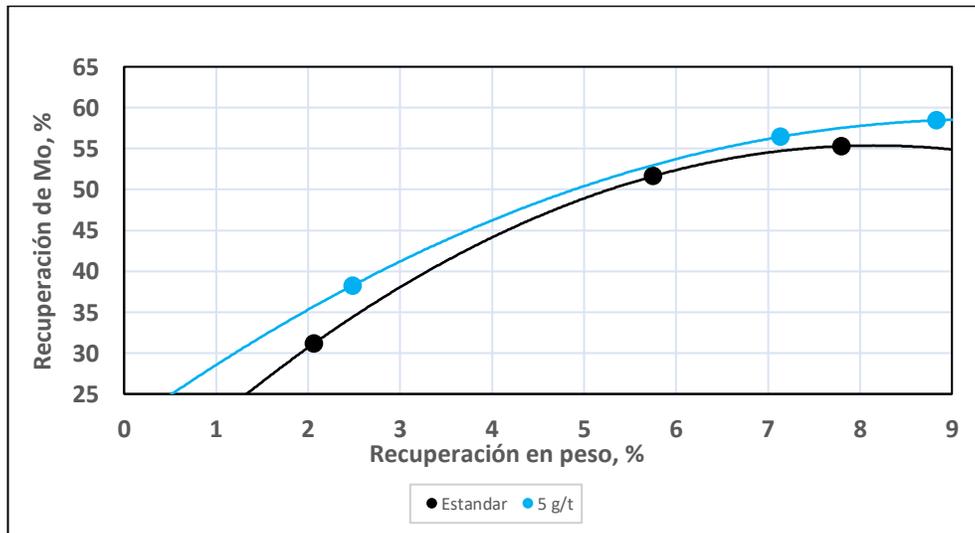


Figura 43: Recuperación de Molibdeno vs Recuperación en peso agregando Flotitor PD-702.

5.3.2. Día 4 de julio 2023.

Pruebas realizadas con pulpa de la A2. Figuras elaboradas a partir de la Tabla 14.

Resultados para el cobre.

Se muestra en la Figura 44 los resultados de recuperación de cobre en comparación con recuperación en peso. Se observa que, para una recuperación en peso similar, la adición del reactivo no significa una mejora en la recuperación de Cu. Por otra parte, la adición de Flotisor PD-702 implica un aumento sustancial de R_p .

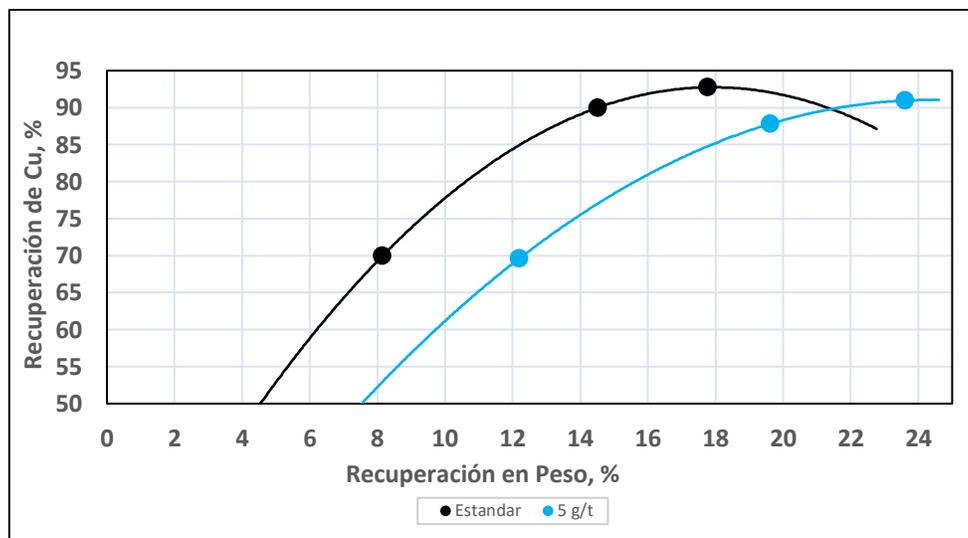


Figura 44: Recuperación de cobre vs Recuperación en peso agregando Flotisor PD-702.

Resultados para el molibdeno.

La Figura 45 corresponde a la recuperación de molibdeno en comparación con la recuperación en peso. Al igual que para el caso del Cu, con el Mo sucede algo similar, es decir, a una R_p similar, la adición del Flotisor PD-702 no conlleva una mejora en la recuperación de Mo. Por otra parte, la prueba estándar alcanza altas R_p , condición que se acentúa al agregar el reactivo.

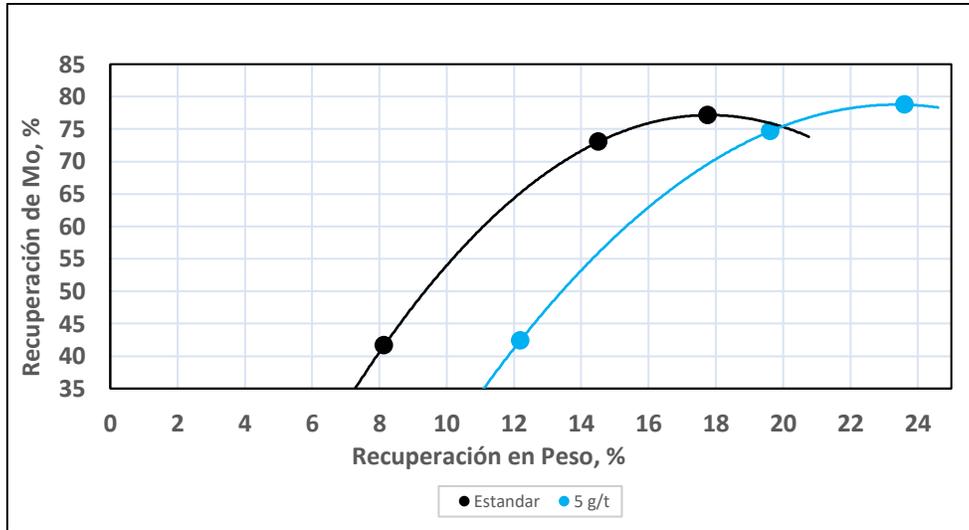


Figura 45: Recuperación de Molibdeno vs Recuperación en peso agregando Flotacor PD-702.

5.3.3. Día 5 de julio 2023.

Pruebas realizadas con pulpa de la A2. Figuras elaboradas a partir de la Tabla 15.

Resultados para el cobre.

La Figura 46 siguiente, muestra los resultados para el cobre a partir de los análisis estadísticos, y donde se compara la recuperación de cobre versus la recuperación en peso. Se observa que, para una recuperación en peso igual, la recuperación metalúrgica alcanzada sin el reactivo llega a ser mejor. Además, la gráfica muestra que la adición del Flotacor PD-702 aumenta la R_p con respecto a la estándar.

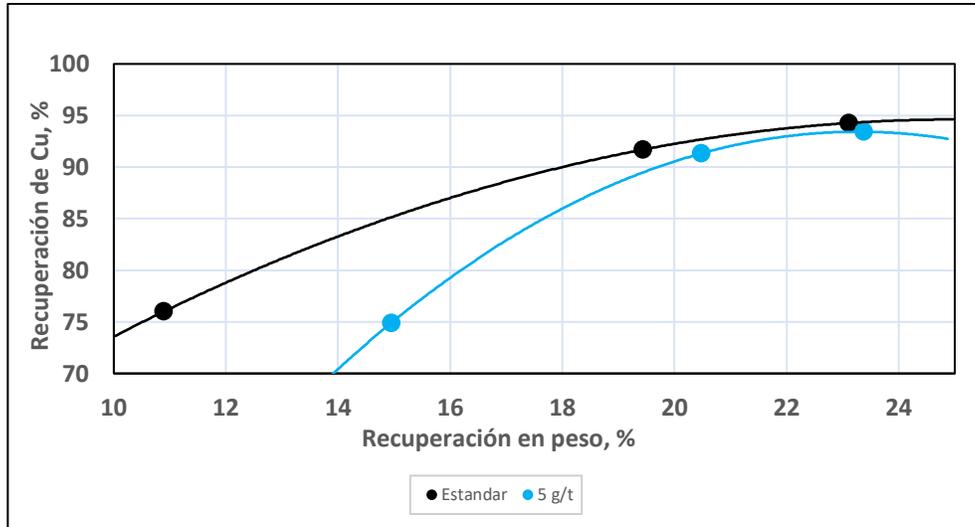


Figura 46: Recuperación de cobre vs Recuperación en peso agregando Flotisor PD-702.

Resultados para el molibdeno.

La Figura 47 muestra la recuperación de molibdeno respecto de la recuperación en peso. En primer lugar, se observa que, para recuperaciones en peso similares la adición del reactivo no mejora la recuperación de molibdeno. Por otro lado, el estándar y el reactivo presentan altas R_p .

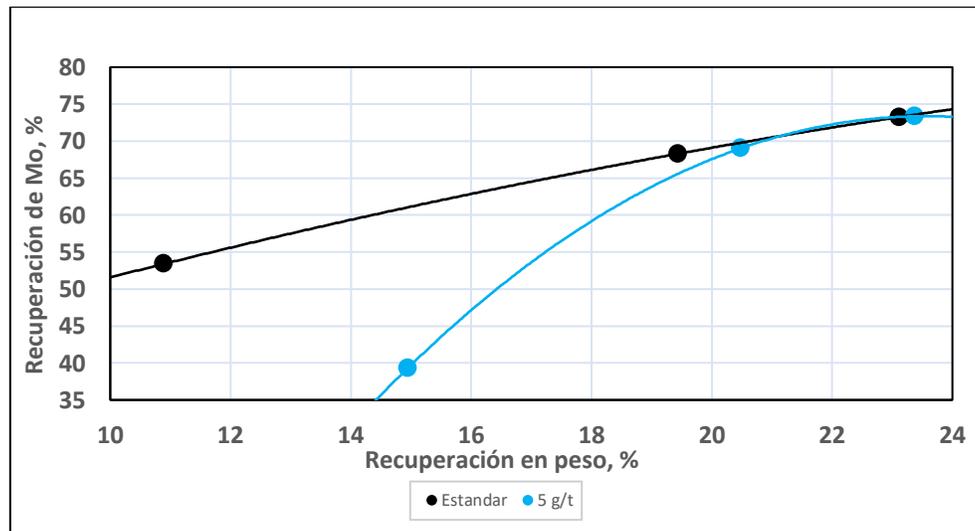


Figura 47: Recuperación de Mo vs Recuperación en peso agregando Flotisor PD-702.

Si bien el primer día de estudio diario, las R_p estaban dentro del rango con el que se trabajaba en la planta y laboratorio, el uso del reactivo no significó una mejora en términos de la recuperación metalúrgica. Por otra parte, debido a situaciones

propias de la planta, la pulpa de RT que ingresaba regularmente por la planta A0, comienza a hacer ingreso a la concentradora a través de la planta A2. Si bien en un principio ambas pulpas corresponden al mismo mineral, las R_p desde el día al 2 cambian drásticamente llegando hasta casi un 18% en el segundo día y a valores que bordean el 25% en el tercer día.

Sin ir más lejos, el uso del Flotisor PD-702 no mejora las recuperaciones metalúrgicas del cobre y para el molibdeno, la mejora en la recuperación que se logra obtener no resulta sustancial. Por lo que se decide detener el estudio diario.

5.4. Investigación 4.

Figuras elaboradas a partir de la Tabla 16.

Resultados para el cobre.

La Figura 48 muestra la recuperación de cobre vs la recuperación en peso. Se pudo observar que a una R_p de 3%, el reactivo que presenta mejores recuperaciones metalúrgicas corresponde al KCl, que supera el 80% de recuperación de cobre. Además, para el minuto 2, se observa que para una misma recuperación metalúrgica todos los reactivos bajan la R_p con relación a la prueba estándar. Por otra parte, se puede ver que para una misma R_p el reactivo Flotisor PD-702 logra mejores recuperaciones de Cu adicionándose desde la flotación.

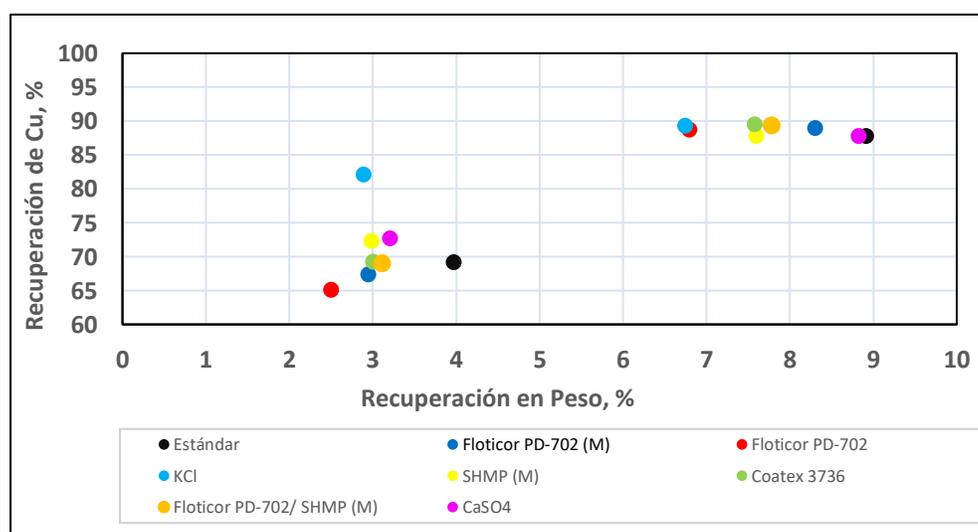


Figura 48: Recuperación de cobre vs Recuperación en peso.

Resultados para el molibdeno.

La Figura 49 muestra la recuperación de Mo respecto de la recuperación en peso. Se observa que, para una recuperación en peso cercana al 3% el la sal KCl no logra obtener buenas recuperaciones de molibdeno como en el caso anterior del cobre. Por otro lado, para una R_p cercana a 8%, el reactivo que logra una mayor recuperación metalúrgica es el coatex-3736. Sin ir más lejos, se observa que para una R_p cercana a 9%, el reactivo que presenta un desempeño más bajo corresponde al CaSO_4 .

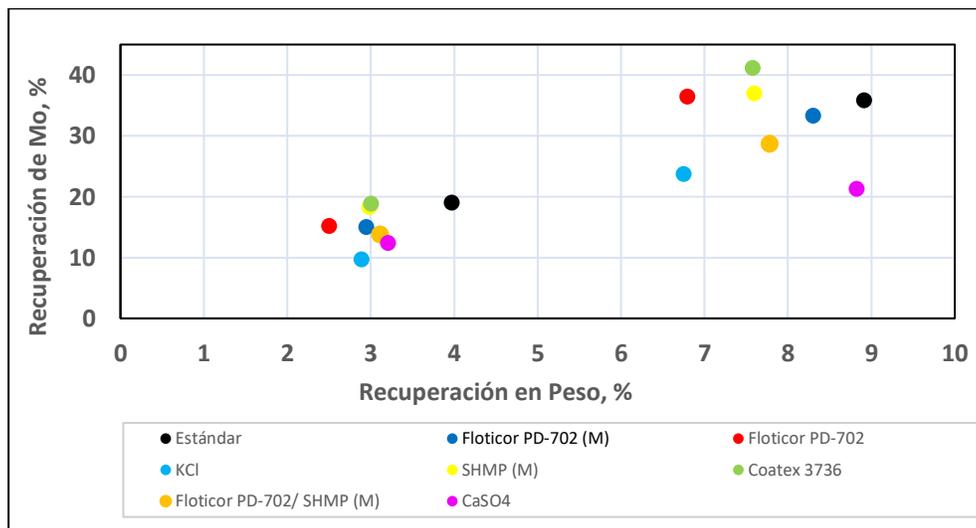


Figura 49: Recuperación de molibdeno vs Recuperación en peso.

6. Discusiones.

Como se pudo ver en detalle a lo largo de las diferentes investigaciones de pruebas de flotación, el reactivo que en términos generales obtuvo un mejor desempeño fue el Flotacor PD-702. Si bien es cierto que este dispersante logró mejorar la recuperación de cobre y molibdeno bajando la recuperación en peso durante las pruebas de laboratorio en las primeras investigaciones, este resultado no fue una constante en el tiempo, es más, ya seleccionado el reactivo y su dosis correcta, se dejan de obtener tan buenos resultados, bajando su buen rendimiento cada vez más cuando se usa pulpa de planta. Ante esta problemática, se decide detener las pruebas de análisis diario.

El problema de disminución del rendimiento del reactivo indudablemente está ligado al cambio de pulpa con el que se trabaja, donde para este caso debido a los requerimientos operacionales de la planta, el mineral de RT a mitad del estudio estadístico deja de ingresar por la planta A0 y pasa a entrar de lleno por la planta A2.

El principal problema que se presenta al seguir utilizando el Flotacor PD-702 con una pulpa diferente, radica en el aumento desmedido de la recuperación en peso que se presenta, pero entonces: ¿Cómo se puede aseverar que en realidad la pulpa que ingresa es el problema? Pues bien, se debe destacar que las pruebas se realizaron todas bajo los mismos parámetros que se fijaron desde un inicio del proceso investigativo. Y es por ello por lo que, para ese análisis diario de ir revisando el comportamiento del reactivo a lo largo de los días, también se consideró su respectiva prueba estándar —como se puede ver en las diferentes figuras presentadas en la sección 5.3—. Prueba (la estándar) que también presenta un aumento significativo en su recuperación en peso.

Ahora, si se ahonda un poco más, se aprecia que la recuperación metalúrgica de cobre y de molibdeno no se presentan mejoras sustanciales. Por una parte, entonces, para todas las pruebas de estadísticas, hay bajas recuperaciones de

cobre incluso llegando a una diferencia de cinco puntos porcentuales respecto de la prueba estándar en el peor de los casos.

Por otra parte, para el molibdeno durante los estudios de pruebas diarias presentó mejores resultados, pero no significativos. De todas maneras, esta leve mejora con respecto a la estándar se ve opacada por el aumento desproporcionado de la recuperación en peso.

Es importante mencionar que según la Figura 32 y Figura 35, donde se extrapolaron los puntos, a una misma recuperación en peso el SHMP presenta mejores resultados, por lo que sería acertado abrir una línea investigativa con respecto a ese dispersante, puesto que, si nos centramos en una R_p de 8% para ambas gráficas, el SHMP logra obtener mejores resultados para el cobre y más aún para el molibdeno.

También se puede destacar que, durante el desarrollo de las pruebas de flotación queda en evidencia que las bajas dosis en muchas ocasiones funcionan mucho mejor que dosis más elevadas. Considerando que una disminución de la cantidad del reactivo ocupada durante el proceso significa una baja en los costos operacionales.

Por último, durante la investigación exploratoria, como se menciona, para el caso del cobre, el KCl y el Flotacor PD-702 agregado desde la flotación son los que presentan mejores resultados. Según los resultados, al agregar el reactivo desde la molienda, se aumenta considerablemente la recuperación en peso. Estos resultados, pueden servir como base para partir con nuevos estudios.

7. Conclusiones

A través del estudio del desempeño de estos reactivos en el laboratorio de la planta concentradora de Chuquicamata, aunque efectivamente en primera instancia se logra aumentar algunos puntos porcentuales las recuperaciones de cobre y molibdeno, y que eventualmente se hubieran podido escalar a la planta, finalmente el estudio no logra lo esperado, ya que como se menciona anteriormente, en las últimas pruebas las recuperaciones bajan considerablemente llegando incluso a sacar resultados inferiores que la prueba estándar.

En cuanto al desempeño de los reactivos estudiados, se logra analizar y recopilar una amplia base de datos que no se descarta que puedan ser utilizadas eventualmente en nuevos estudios de laboratorio y planta por Codelco División Chuquicamata

Refiriéndonos a las dosis de los reactivos, posterior al estudio se logra concluir que, en muchas ocasiones las dosis más bajas resultan mucho más eficientes a la hora de obtener mejores recuperaciones metalúrgicas. Esto en cada caso, debe ser respaldado con estudios de laboratorio que lo avalen.

Por otra parte, en lo que respecta al Flotacor PD-702, se concluye que este reactivo puede llegar a funcionar para el laboratorio y planta, sin embargo, se necesita un estudio más exhaustivo sobre la pulpa que ingresa por las tres plantas (A0, A1 y A2) a la concentradora, es decir, un estudio mineralógico detallado donde se permita analizar todavía más los reactivos y algunas otras variables del proceso de flotación.

Finalmente, se logra recopilar una breve base de datos con los reactivos agregados en molienda. En el caso del Flotacor PD-702 presenta mejores resultados al adicionarlo desde el proceso de flotación. Por otra parte, la sal y el sulfato presentan buenos resultados para la recuperación de cobre, por lo que no se deben descartar para eventuales estudios.

8. Recomendaciones.

Para próximas investigaciones se recomienda:

- Realizar pruebas y analizar detalladamente en qué momento es conveniente utilizar el Flotacor PD-702.
- Abrir línea investigativa con pruebas de flotación con relación al SHMP, considerando que también se obtuvieron resultados favorables.
- Analizar con mayor detalle el comportamiento de la sal KCl en bajas dosis en el proceso de flotación.
- Realización de pruebas de flotación modificando otros parámetros de las pruebas, como tiempo de agitación, pH o porcentaje en sólidos.

Referencias

- 911Metallurgist. (2016). *Colectores y la química de la flotación*. Obtenido de <https://www.911metallurgist.com/metalurgia/colectores-y-quimica-de-la-flotacion/>
- Arias, D. (2019). *Optimización de la flotación de molibdenita fina utilizando óxido de polietileno*. Concepción.
- Castro, S., & García, J. (2003). *Flotación, fundamentos y aplicaciones*. Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Universidad de Concepción, Chile, 83-93. Concepción.
- CODELCO. (2023).
- Gutiérrez Briones, L. (2018). *Apuntes curso flotación, fundamentos físico-químicos*. Concepción, Chile: Departamento de Ingeniería Metalúrgica.
- Manríquez Contreras, G. A. (2019). *Uso de depresantes alternativos para la flotación selectiva de molibdeno CODELCO división Andina*. Concepción.
- Productos químicos Paraguay. (2020). *Trietanolamina*. Obtenido de <https://productosquimicosparaguay.com.py/trietanolamina/#:~:text=La%20trietanolamina%20se%20puede%20sintetizar,a%20alta%20temperatura%20y%20presi%C3%B3n.>
- Román Ruiz, F. I. (2017). *Uso de dispersantes en flotación de minerales con agua de mar*. Concepción.
- Universidad Politécnica de Cartagena. (s.f.). *Tema 10: Flotación*. Cartagena.
- Wiessermel, K., Arpe, H.-J., Charlet R., L., & Hawkins, S. (2023). *Oxidation products of Ethylene*.
- Yianatos B., J. (2005). *Flotación de minerales*. Universidad Técnica Federico Santa María.

Anexos de información complementaria.



Figura 50: Rotary laboratorio caracterización Codelco DCh.



Figura 51: Chancador de cono Laboratorio caracterización Codelco DCh.



Figura 52: Chancador de mandíbulas Laboratorio caracterización Codelco DCh.



Figura 53: Molino de Bolas Laboratorio caracterización Codelco DCh.

Tabla 8: Datos recopilados para elaboración de gráficos en Investigación 1, etapa 1.

	Reactivo 20 g/t	tiempo min	Aliment, %				Conc, %				Cola, %				Recuperaciones, %				
			Cu	Fe	Mo	Ins	Cu	Fe	Mo	Ins	Cu	Fe	Mo	Ins	Cu	Fe	Mo	Ins	Peso
P1	Estándar	2	0,43	0,80	0,019		13,9	3,9	0,22		0,203	0,7	0,016		53,5	8,1	18,6		1,7
		8	0,43	0,80	0,019		7,7	2,8	0,22		0,064	0,7	0,009		85,8	16,7	55,4		4,8
P2	Aero MX-2415	2	0,43	0,80	0,019		8,2	3,4	0,15		0,133	0,7	0,014		70,1	15,4	29,3		3,7
		8	0,43	0,80	0,019		7,5	3,8	0,23		0,054	0,6	0,008		88,1	24,0	60,5		5,0
P3	Cyquest 3223	2	0,43	0,80	0,019		9,5	1,4	0,21		0,230	0,8	0,015		47,6	3,7	23,6		2,2
		8	0,43	0,80	0,019		8,4	1,7	0,22		0,071	0,8	0,010		84,2	9,1	50,2		4,3
P4	Aero MX-7021	2	0,43	0,80	0,019		6,3	2,8	0,12		0,126	0,7	0,014		72,1	16,8	29,9		4,9
		8	0,43	0,80	0,019		5,3	3,1	0,15		0,056	0,6	0,009		87,9	28,0	56,5		7,1
P5	A-2427	2	0,43	0,80	0,019		15,4	2,8	0,35		0,196	0,8	0,014		55,2	5,3	28,2		1,5
		8	0,43	0,80	0,019		10,0	3,0	0,32		0,078	0,7	0,008		82,5	13,2	59,8		3,6
P6	Aero MX-2418	2	0,43	0,80	0,019		22,3	7,2	0,34		0,218	0,7	0,016		49,7	8,6	16,7		1,0
		8	0,43	0,80	0,019		13,6	5,2	0,39		0,066	0,7	0,009		85,1	17,3	54,4		2,7
P7	Hostafлот PD 1005	2	0,43	0,80	0,019		20,2	2,1	0,30		0,210	0,8	0,016		51,6	2,9	17,5		1,1
		8	0,43	0,80	0,019		10,7	1,7	0,29		0,081	0,8	0,010		81,8	6,9	49,7		3,3
P8	Hostafлот PD 1006	2	0,43	0,80	0,019		6,7	1,5	0,13		0,100	0,8	0,013		77,9	9,4	34,8		5,0
		8	0,43	0,80	0,019		5,3	2,1	0,15		0,051	0,7	0,009		89,0	18,8	56,5		7,2
P9	Molitec 100	2	0,43	0,80	0,019		11,9	3,2	0,18		0,238	0,8	0,017		45,6	6,7	15,4		1,6
		8	0,43	0,80	0,019		8,3	2,4	0,22		0,078	0,7	0,010		82,6	12,7	50,2		4,3
P10	Flotacor PD 702	2	0,43	0,80	0,019		22,1	5,1	0,30		0,157	0,7	0,016		64,0	8,0	19,7		1,2
		8	0,43	0,8	0,019		11,4	3,8	0,35		0,058	0,7	0,008		87,0	15,4	59,7		3,3

Tabla 9: Datos recopilados para elaboración de gráficos en Investigación 1, etapa 2.

	Reactivo 20 g/t	tiempo min	Aliment, %				Conc, %				Cola, %				Recuperaciones, %				
			Cu	Fe	Mo	Ins	Cu	Fe	Mo	Ins	Cu	Fe	Mo	Ins	Cu	Fe	Mo	Ins	Peso
P1	Estándar	2	0,59	1,00	0,022		10,8	2,7	0,14		0,100	0,9	0,016		83,8	12,2	28,5		4,6
		8	0,59	1,00	0,022		5,9	2,7	0,12		0,051	0,8	0,012		92,2	24,7	50,5		9,3
P2	SHMP	2	0,59	1,00	0,022		9,2	2,8	0,11		0,105	0,9	0,017		83,1	15,0	25,5		5,3
		8	0,59	1,00	0,022		5,3	2,7	0,10		0,046	0,8	0,013		93,0	28,3	47,1		10,4
P3	Flotacor PD 702	2	0,59	1,00	0,022		11,6	3,1	0,12		0,114	0,9	0,018		81,6	12,8	22,8		4,1
		8	0,59	1,00	0,022		5,6	2,6	0,10		0,054	0,8	0,014		91,7	25,0	42,5		9,6
P4	Coatex 3736	2	0,59	1,00	0,022		9,0	2,8	0,08		0,139	0,9	0,019		77,6	14,2	18,2		5,1
		8	0,59	1,00	0,022		5,0	2,6	0,08		0,062	0,8	0,015		90,6	27,7	39,1		10,7
P5	Aero MX-2427	2	0,59	1,00	0,022		4,9	2,0	0,09		0,147	0,9	0,015		77,3	18,8	37,8		9,2
		8	0,59	1,00	0,022		4,0	2,5	0,09		0,051	0,8	0,011		92,5	33,5	56,8		13,6
P6	Xantato	2	0,59	1,00	0,022		7,6	4,6	0,12		0,107	0,8	0,015		83,1	29,6	35,1		6,5
		8	0,59	1,00	0,022		5,0	3,9	0,11		0,043	0,6	0,011		93,5	43,1	55,5		11,1

Tabla 10: Datos recopilados para elaboración de gráficos en Investigación 1, etapa 3.

	Reactivo 20 g/t	tiempo min	Aliment, %				Conc, %				Cola, %				Recuperaciones, %				
			Cu	Fe	Mo	Ins	Cu	Fe	Mo	Ins	Cu	Fe	Mo	Ins	Cu	Fe	Mo	Ins	Peso
P1	Estándar	2	0,59	1,0	0,022		10,6	2,0	0,11		0,2	1,0	0,019		69,2	7,4	19,0		4,0
		8	0,59	1,0	0,022		5,8	1,9	0,09		0,1	0,9	0,016		87,8	16,7	35,8		8,9
P2	Flotacor PD 702	2	0,59	1,0	0,022		13,5	1,9	0,11		0,2	1,0	0,019		67,4	5,6	15,0		2,9
		8	0,59	1,0	0,022		6,3	1,4	0,09		0,1	1,0	0,016		89,0	12,0	33,3		8,3
P3	SHMP	2	0,59	1,0	0,022		14,5	1,1	0,14		0,2	1,0	0,019		72,3	4,0	18,3		3,0
		8	0,59	1,0	0,022		7,0	1,4	0,11		0,1	1,0	0,015		87,8	11,2	37,0		7,6

Tabla 11: Datos recopilados para pruebas de Investigación 2 con altas dosis de Flotacor PD-702.

	Flotacor	tiempo min	Aliment, %				Conc, %				Cola, %				Recuperaciones, %				
			Cu	Fe	Mo	Ins	Cu	Fe	Mo	Ins	Cu	Fe	Mo	Ins	Cu	Fe	Mo	Ins	Peso
P1	Estandar	2	0,64	1,19	0,028		22,5	1,3	0,51		0,183	1,2	0,018		72,0	2,3	37		2,0
		8	0,64	1,19	0,028		8,6	0,7	0,23		0,097	1,2	0,014		85,8	4,0	53		6,4
P2	7 g/t	2	0,64	1,19	0,028		21,2	1,4	0,53		0,175	1,2	0,017		73,2	2,3	42		2,3
		8	0,64	1,19	0,028		8,9	1,2	0,28		0,097	1,2	0,011		85,8	6,0	62		6,3
P3	20 g/t	2	0,64	1,19	0,028		20,2	3,5	0,49		0,211	1,1	0,018		67,7	6,6	38		2,2
		8	0,64	1,19	0,028		8,5	2,4	0,27		0,107	1,1	0,012		84,4	13,5	62		6,4
P4	40 g/t	2	0,64	1,19	0,028		23,6	1,0	0,51		0,21	1,2	0,019		67,8	1,7	34		1,9
		8	0,64	1,19	0,028		8,8	1,3	0,27		0,1	1,2	0,012		85,4	6,8	60		6,3

Tabla 12: Datos recopilados para pruebas de investigación 2 con bajas dosis de Flotacor PD-702.

	Flotacor	tiempo min	Aliment, %				Conc, %				Cola, %				Recuperaciones, %				
			Cu	Fe	Mo	Ins	Cu	Fe	Mo	Ins	Cu	Fe	Mo	Ins	Cu	Fe	Mo	Ins	Peso
P1	Estandar	2	0,65	1,33	0,046		12,8	7,3	0,6		0,158	1,1	0,023		76,7	21,7	51		4,1
		8					5,7	5,2	0,34		0,088	0,9	0,014		87,9	39,2	74		10,2
P2	5 g/t	2	0,65	1,33	0,046		15,3	7,3	0,74		0,167	1,1	0,023		75,1	17,8	51		3,2
		8					7,2	5,2	0,41		0,082	1,0	0,015		88,4	32,0	71		8,3
P3	12 g/t	2	0,65	1,33	0,046		19,0	8,3	0,82		0,176	1,1	0,026		73,6	16,2	45		2,6
		8					7,2	5,0	0,42		0,087	1,0	0,014		87,7	30,4	72		8,0
P4	20 g/t	2	0,65	1,33	0,046		19,0	9,8	0,87		0,173	1,1	0,024		74,1	18,8	48		2,6
		8					6,7	5,6	0,4		0,083	0,9	0,014		88,3	35,7	73		8,6

Tabla 13: Datos recopilados en pruebas de la investigación 3 de estadística del día 3 de julio.

	Flotacor	tiempo min	Aliment, %				Conc, %				Cola, %				Recuperaciones, %				
			Cu	Fe	Mo	Ins	Cu	Fe	Mo	Ins	Cu	Fe	Mo	Ins	Cu	Fe	Mo	Ins	Peso
P1	Estandar	2	0,69	1,16	0,034		21,9	15,7	0,54		0,242	0,9	0,024		65,6	28,1	31,2		2,1
		8					10,5	8,6	0,31		0,097	0,7	0,017		86,8	42,6	51,6		5,7
		12					8,0	7,0	0,25		0,081	0,7	0,017		89,2	47,1	55,3		7,8
P2	5 g/t	2	0,69	1,16	0,034		19,8	13,1	0,52		0,204	0,9	0,022		71,1	28,0	38,3		2,5
		8					8,1	7,1	0,27		0,130	0,7	0,016		82,5	43,7	56,4		7,1
		12					6,7	6,3	0,23		0,114	0,7	0,016		84,9	47,7	58,4		8,8

Tabla 14: Datos recopilados en pruebas de la investigación 3 de estadística del día 4 de julio.

	Flotacor	tiempo min	Aliment, %				Conc, %				Cola, %				Recuperaciones, %				
			Cu	Fe	Mo	Ins	Cu	Fe	Mo	Ins	Cu	Fe	Mo	Ins	Cu	Fe	Mo	Ins	Peso
P1	Estandar	2	0,72	1,10	0,045		6,4	4,1	0,24		0,235	0,8	0,029		70,0	29,6	41,7		8,1
		8					4,5	3,9	0,23		0,084	0,6	0,014		90,0	51,4	73,0		14,5
		12					3,8	3,5	0,20		0,064	0,6	0,013		92,7	56,3	77,1		17,8
P2	5 g/t	2	0,72	1,10	0,045		4,1	3,1	0,16		0,249	0,8	0,029		69,6	33,8	42,4		12,2
		8					3,2	3,2	0,17		0,109	0,6	0,014		87,8	56,8	74,7		19,6
		12					2,8	2,9	0,15		0,085	0,5	0,013		91,0	62,1	78,8		23,6

Tabla 15: Datos recopilados en pruebas de la investigación 3 de estadística del día 5 de julio.

	Flotacor	tiempo	Aliment, %				Conc, %				Cola, %				Recuperaciones, %				
			min	Cu	Fe	Mo	Ins	Cu	Fe	Mo	Ins	Cu	Fe	Mo	Ins	Cu	Fe	Mo	Ins
P1	Estandar	2	0,67	1,19	0,023		4,7	3,1	0,11		0,180	1,0	0,012		76,0	28,1	53,4		10,9
		8					3,2	3,0	0,08		0,069	0,8	0,009		91,7	49,1	68,3		19,4
		12					2,7	2,8	0,07		0,050	0,7	0,008		94,3	53,5	73,3		23,1
P2	5 g/t	2	0,67	1,19	0,023		3,4	2,5	0,06		0,198	1,0	0,016		74,9	31,7	39,3		14,9
		8					3,0	2,8	0,08		0,073	0,8	0,009		91,3	49,0	69,0		20,5
		12					2,7	2,7	0,07		0,058	0,7	0,008		93,4	52,7	73,4		23,4

Tabla 16: Datos recopilados en pruebas de la investigación 4.

	Reactivo	tiempo	Aliment, %				Conc, %				Cola, %				Recuperaciones, %				
			min	Cu	Fe	Mo	Ins	Cu	Fe	Mo	Ins	Cu	Fe	Mo	Ins	Cu	Fe	Mo	Ins
P1	20 g/t Estándar	2	0,59	1,00	0,022		10,6	2,0	0,11		0,189	1,0	0,019		69,2	7,4	19,0		4,0
		8					5,8	1,9	0,09		0,079	0,9	0,016		87,8	16,7	35,8		8,9
P2	Flotacor PD-702 (M)	2	0,59	1,00	0,022		13,5	1,9	0,11		0,198	1,0	0,019		67,4	5,6	15,0		2,9
		8					6,3	1,4	0,09		0,071	1,0	0,016		89,0	12,0	33,3		8,3
P3	Flotacor PD-702	2	0,59	1,00	0,022		15,4	1,8	0,13		0,211	1,0	0,019		65,2	4,4	15,2		2,5
		8					7,7	1,5	0,12		0,071	1,0	0,015		88,8	10,5	36,4		6,8
P4	SHMP (M)	2	0,59	1,00	0,022		14,5	1,1	0,14		0,168	1,0	0,019		72,3	4,0	18,3		3,0
		8					7,0	1,4	0,11		0,078	1,0	0,015		87,8	11,2	37,0		7,6
P5	Coatex 3736	2	0,59	1,00	0,022		13,6	2,8	0,14		0,187	0,9	0,018		69,3	8,4	18,9		3,0
		8					7,0	2,3	0,12		0,067	0,9	0,014		89,5	17,7	41,2		7,6
P6	Flotacor PD-702/ SHMP (M)	2	0,59	1,00	0,022		13,1	1,5	0,10		0,188	1,0	0,020		69,1	4,5	13,8		3,1
		8					6,8	1,9	0,08		0,068	0,9	0,017		89,4	15,2	28,7		7,8
P7	Metasilicato de sodio	2	0,59	1,00	0,022		13,4	1,6	0,07		0,220	1,0	0,021		63,7	4,5	9,0		2,8
		8					6,0	1,2	0,06		0,105	1,0	0,019		83,7	10,1	20,8		8,3
P8	CaSO4	2	0,59	1,00	0,022		13,4	2,5	0,08		0,166	0,9	0,020		72,8	8,1	12,4		3,2
		8					5,9	1,9	0,05		0,079	0,9	0,019		87,8	17,0	21,3		8,8
P9	KCl	2	0,59	1,00	0,022		16,8	3,1	0,07		0,109	0,9	0,020		82,1	8,9	9,7		2,9
		8					7,8	2,9	0,08		0,068	0,9	0,018		89,3	19,8	23,7		6,8

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – FACULTAD DE INGENIERÍA
Departamento de Ingeniería Metalúrgica

Hoja Resumen Memoria de Título

Título: Estudio de mejora del potencial de recuperación de cobre y molibdeno a escala de laboratorio en flotación colectiva de la planta concentradora de Chuquicamata, Codelco.

Nombre Memorista: Jean Pierre Antonio Varela Valenzuela.

Modalidad	Investigación	Profesor(es) Patrocinante(s)
Concepto		
Calificación		
Fecha	22-01-2024	
Prof. ^a Eugenia Araneda H.		Prof. Leopoldo Gutiérrez Briones.
		Ingeniero Supervisor: Santiago Honores Meza.
		Institución: Codelco DCh – UdeC.

Comisión (Nombre y Firma)	
Prof. Andrés Ramírez Madrid	Prof. Fernando Parada Luna

Resumen

Desde el año 2020 a la fecha, la planta concentradora de CODELCO, División Chuquicamata ha venido presentando tendencias negativas en lo que respecta a la recuperación de cobre y molibdeno a medida que se sigue aumentando la proporción de ingreso de mineral de RT. Esta situación ha impactado negativamente en el negocio y acrecentando de cierta manera los costos de producción.

Ante ello, se decide trabajar en esta memoria de título, fijándonos como objetivo, el aumento del potencial de recuperación de cobre y molibdeno en laboratorio por medio de reactivos químicos dispersantes enfocados principalmente en el mineral de mina Radomiro Tomic, principal foco negativo debido a su alta presencia de arcillas.

Si bien es cierto que en una primera instancia el reactivo Flotacor PD-702 logra dar un buen resultado, este no perdura al momento de llegar a las pruebas finales de estadística, donde el reactivo de una manera más que evidente no logra dar con el objetivo impuesto.

Al momento de encontrar la dosis correcta; con dosis significativamente bajas (de 7 g/t) en el mejor de los casos, la recuperación de cobre se mantuvo en un 85,8% junto con la prueba estándar y el molibdeno logró aumentar 10 puntos porcentuales en relación con la prueba estándar donde se pasa de un 53,2% a un 61,6% de recuperación de molibdeno.

Finalmente, en el estudio estadístico ya con una dosis definida, el uso del Flotacor PD-702 resultó contraproducente por una parte en la mayoría de las pruebas. Baja la recuperación en el mejor de los casos desde un 94,3% a un 93,4%. Por otro lado, se presentan aumentos en la recuperación de molibdeno para el mejor de los casos, donde de la prueba estándar con una recuperación de 55,3% pasamos a un 58,4% por medio del Flotacor PD-702. Sin embargo, esta leve mejora, se ve opacada por un desmedido aumento de R_p .