

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Metalúrgica

Profesor patrocinante
Dr. Leopoldo Gutiérrez

**USO DE DEPRESANTES ALTERNATIVOS PARA LA
FLOTACIÓN SELECTIVA DE MOLIBDENO
CODELCO DIVISIÓN ANDINA**

Guillermo Alfredo Manríquez Contreras

Informe de Memoria de Título
Para optar al Título de

Ingeniero Civil Metalúrgico

Abril 2019

AGRADECIMIENTOS

A mis Padres, Hermanos y especialmente a mi Esposa e Hijos, quienes fueron mi mayor motivación para retomar este importante desafío, que de alguna manera había postergado en las prioridades de mi vida.



RESUMEN

El siguiente trabajo de memoria fue realizado en la Planta de Molibdeno y Filtrado de Cobre de Codelco División Andina, el cual consistió, en la validación técnica y económica a escala industrial de los depresantes FLOMIN D633 y BK-511, que fueron utilizados durante el año 2015 y 2016 con el objetivo de hacer un remplazo parcial del sulfhidrato de sodio, como depresante de cobre en la flotación selectiva de molibdeno.

El reactivo NaHS (Sulfhidrato de Sodio) utilizado en División Andina, es un depresante por excelencia para sulfuros de cobre y hierro en el proceso de flotación selectiva de molibdeno. Sin embargo, los consumos elevados y alto riesgo para las personas, implican elevados costos de operación y altos estándares en materia de seguridad, para minimizar el riesgo en su almacenamiento y uso en la industria.

Las dosis de los depresantes alternativos, fueron determinadas por un set de pruebas de laboratorio definidas por la Superintendencia de Ingeniería de Procesos y operaciones SPMFC, donde se concluyó que el reactivo FLOMIN D633 logra reemplazar en un 30 % el NaHS, mientras que el depresante BK-511 disminuye el consumo de NaHS hasta un 50 %. Inicialmente se consideró para ambos reactivos una dosis de 250 [g/TMS].

La metodología consistió inicialmente en modificar la automatización de la preparación de reactivo para generar una mezcla de NaHS – Depresante Alternativo y ser adicionado en el proceso de flotación. Las pruebas industriales se realizaron en base a un modelo “on/off” donde se fue alternando los periodos con solo NaHS y los depresantes de prueba para ser comparados. Las variables de interés para el análisis fueron el consumo de reactivos, la recuperación metalúrgica de molibdeno, calidad del concentrado final y el potencial específico del circuito Rougher. Adicionalmente se midió la emisión de gases tipo sulfhídrico y además se realizó seguimiento a la concentración de sulfuros residuales en la Planta de Efluentes con el objetivo de determinar el impacto ambiental de estos reactivos.

Los resultados obtenidos durante la prueba con el depresante FLOMIN D633 demostraron que logra reemplazar hasta un máximo de un 23,9 % el consumo de NaHS. Sin embargo, este disminuye la recuperación de Mo en un promedio de 5,8 puntos, por lo cual, no se recomienda su uso. Con respecto al reactivo BK-511, el consumo alcanzó una máxima reducción del 41,5 % de NaHS, sin modificar significativamente la recuperación metalúrgica de Mo y la calidad del concentrado. Cabe destacar que la dosis de BK-511 se elevó a 390 [g/TMS] en base a especificaciones del proveedor. Respecto a las leyes, con el uso de FLOMIN D633 y BK511 no alteran la calidad de concentrado final, manteniéndose leyes en torno al 46% de Mo y 4,5% para el Cu.

Ambos reactivos producen un cambio en la sensibilidad del potencial en los circuitos Rougher, específicamente para el reactivo BK-511, el cual aumenta en aproximadamente 100 [mV] en comparación al potencial estándar de planta con solo NaHS correspondiente a -320 [mV]. Para el depresante FLOMIN D633, la disminución es menor en relación al reactivo BK-511, donde el intervalo de operación alcanzado está dentro de los -250 a los -290 [mV].

La emisión de gas sulfhídrico disminuyó en un promedio del 54,3 % con el depresante FLOMIN D633, mientras que durante el periodo de prueba con BK-511 no se registraron emisiones. Por otro lado, el contenido de sulfuros en los efluentes de la planta disminuye en un rango del 1 % al 6,5 % al utilizar el reactivo FLOMIN D633 y del 13,6 % al 54,4 % con BK-511 debido a que existe un menor consumo de NaHS en este último.

El costo de los reactivos disminuye en un margen de US\$ 448.000 anuales al utilizar el reactivo FLOMIN D633 con respecto al consumo planificado de NaHS correspondiente a 4,5 [kg/TMS]. Mientras tanto, el reactivo BK-511 aumenta este margen hasta US\$ 1.000.000 para el año 2016, por lo cual, se concluye que este último reactivo es el de mayor interés para ser incorporado como reactivo estándar en la Planta de Flotación Selectiva de División Andina. En relación a la clasificación de peligrosidad, se considera no peligroso, no es inflamable y no presenta un riesgo específico.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1: Introducción.....	1
1.1 Contexto.....	1
1.2 Objetivo general.....	2
1.2.1 Objetivos específicos.....	2
1.3 Hipótesis.....	3
CAPITULO 2: Antecedentes	4
2.1 Fundamentos del proceso de flotación	4
2.1.1 Flotabilidad de la molibdenita.....	5
2.2 Reactivos de flotación	8
2.2.1 Colectores.....	8
2.2.2 Espumantes.....	9
2.2.3 Modificadores.....	10
2.3 Mecanismo de depresión del sulfhidrato de sodio.....	10
2.4 Tioglicolato de sodio	13
2.4.1 Depresante FLOMIN D633.....	13
2.5 Depresante BK-511	14
2.6 Distribución t-student	15
2.7 Descripción del proceso de flotación selectiva Codelco División Andina.....	16
2.8 Reactivos de flotación Codelco División Andina.....	20
2.8.1 Flotación colectiva de Cu-Mo.....	20
2.8.2 Flotación selectiva de Mo	21
2.9 Mineralogía de concentrado Cu-Mo.....	21
CAPÍTULO 3: Desarrollo experimental	23
3.1 Preparación de NaHS.....	23

3.2	Preparación automática de mezclas depresantes	24
3.3	Pruebas industriales	26
3.3.1	Periodos de evaluación.....	26
3.3.2	Metodología de evaluación	27
3.3.3	Puntos de adición de reactivo.....	28
CAPÍTULO 4: Resultados y discusiones		30
4.1	Prueba industrial FLOMIN D633.....	30
4.1.1	Consumo de reactivos	30
4.1.2	Recuperación metalúrgica de molibdeno	31
4.1.3	Calidad del concentrado final.....	32
4.1.4	Potencial específico Rougher	34
4.1.5	Emisiones gas sulfhídrico.....	36
4.1.6	Sulfuros en efluentes	37
4.2	Prueba industrial BK-511	38
4.2.1	Consumo de reactivos	38
4.2.2	Recuperación metalúrgica de molibdeno	39
4.2.3	Calidad del concentrado final.....	39
4.2.4	Potencial específico Rougher	41
4.2.5	Emisiones gas sulfhídrico.....	43
4.2.6	Sulfuros en efluentes	43
4.3	Consideraciones económicas.....	44
CAPÍTULO 5: Conclusiones		47
CAPÍTULO 6: Recomendaciones		49
7.	Referencias	50
8.	Anexos.....	52

2.10	Anexo A: Hoja de seguridad FLOMIN D633.....	52
2.11	Anexo B: Hoja de seguridad BK-511	53
2.12	Anexo C: Preparación de mezclas depresantes.....	54
2.13	Anexo D: Medición de potencial específico Planta de Flotación Selectiva de Molibdeno Codelco División Andina.....	55

ÍNDICE DE FIGURAS

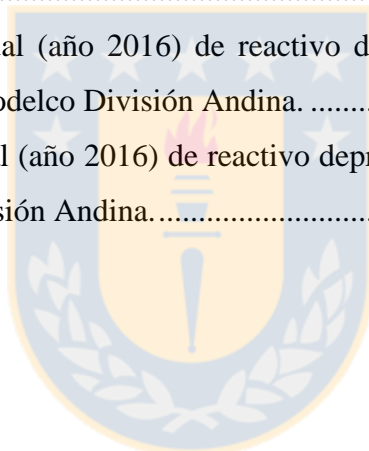
Figura 2-1. Esquema del proceso de flotación de minerales (Petrovskaya, 2009).....	4
Figura 2-2. Estructura cristalina de la molibdenita (López y Reyes, 2011).....	5
Figura 2-3. Diagrama de Pourbaix de Mo, Sistema Mo-O-S (M. Casas, 2007).	6
Figura 2-4. Cinética de recuperación de molibdenita con presencia de calcio y sílice (Raghavan y Hsu, 1984).....	7
Figura 2-5. Influencia del tamaño de partícula y pH en la recuperación de molibdeno (Ortega, 2005).	7
Figura 2-6. Adhesión del colector a la superficie del mineral (Yianatos, 2005).....	8
Figura 2-7. Zonas de trabajo de colectores (Yianatos, 2005).....	9
Figura 2-8. Adhesión del espumante a la superficie de la burbuja de aire.....	9
Figura 2-9. Gráfica de disociación de H ₂ S en función del pH (Applied Analytics, 2015).....	11
Figura 2-10. Diagrama de Pourbaix para un sistema con especies de azufre (Takeno, 2005).....	12
Figura 2-11. Mecanismo de desorción del colector xantato al utilizar NaHS como depresante (Castro, 2006).....	12
Figura 2-12. Reactivo FLOMIN D633.....	14
Figura 2-13. Reactivo BK-511.....	14
Figura 2-14. Diagrama de flujo del circuito Pre-Rougher Planta de Molibdeno y Filtrado de Cobre Codelco División Andina.....	17
Figura 2-15. Diagrama de Flujo Planta de Flotación Selectividad de Molibdeno Codelco División Andina.....	19
Figura 2-16. Diagrama de Flujo Planta de Flotación Selectividad de Molibdeno Codelco División Andina.....	19

Figura 3-1. Diagrama de flujo de la Planta de Reactivos Codelco División Andina (Planta de Molibdeno y Filtrado de Cobre).....	23
Figura 3-2. Flujómetro y válvula automática en manifold para adición de reactivo FLOMIN D633 a TK preparador.	25
Figura 3-3. Puntos de adición de reactivo depresante en Planta de Flotación Selectiva de Molibdeno Codelco División Andina.	29
Figura 3-4. Puntos de adición de reactivo depresante en Planta de Flotación Selectiva de Molibdeno Codelco División Andina.	29
Figura 4-1. Indicador de consumo (IP) de NaHS en periodo de evaluación FLOMIN D633.	31
Figura 4-2. Recuperación de molibdeno durante prueba industrial FLOMIN D633.	32
Figura 4-3. Ley de molibdeno en el concentrado final durante prueba industrial FLOMIN D633. ...	33
Figura 4-4. Ley de cobre en el concentrado final durante prueba industrial FLOMIN D633.	34
Figura 4-5. Potencial específico Rougher 500 durante prueba industrial FLOMIN D633.	35
Figura 4-6. Potencial específico Rougher 300 durante prueba industrial FLOMIN D633.	36
Figura 4-7. Mediciones de gas H ₂ S durante prueba industrial FLOMIN D633.....	37
Figura 4-8. Mediciones de sulfuros en efluentes durante prueba industrial FLOMIN D633.	37
Figura 4-9. Indicador de consumo (IP) de NaHS en periodo de evaluación BK-511.....	38
Figura 4-10. Recuperación de molibdeno durante prueba industrial BK-511.	39
Figura 4-11. Ley de molibdeno en el concentrado final durante prueba industrial BK-511.....	40
Figura 4-12. Ley de cobre en el concentrado final durante prueba industrial BK-511.....	41
Figura 4-13. Potencial específico Rougher 500 durante prueba industrial BK-511.	41
Figura 4-14. Potencial específico Rougher 300 durante prueba industrial BK-511.	42
Figura 4-15. Mediciones de sulfuros en efluentes durante prueba industrial BK-511.....	44
Figura 8-1. Hoja de seguridad de reactivo FLOMIN D633	52
Figura 8-2. Hoja de seguridad de reactivo BK-511.	53
Figura 8-3. Esquema de medición del potencial específico en la Planta de Flotación de Selectiva de Molibdeno Codelco División Andina.	56

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Energía de interacción de depresantes de calcopirita (Tobar, 2016).	15
---	----

Tabla 2-2. Reactivos de flotación colectiva Cu-Mo de la Planta Concentradora Codelco División Andina.	20
Tabla 2-3. Reactivos de flotación selectiva de Mo de la Planta de Molibdeno y Filtrado de Cobre Codelco División Andina.	21
Tabla 2-4. Composición másica de sulfuros en concentrado Cu-Mo Codelco División Andina.	22
Tabla 2-5. Composición másica de óxidos en concentrado Cu-Mo Codelco División Andina.	22
Tabla 2-6. Composición másica de ganga en concentrado Cu-Mo Codelco División Andina.	22
Tabla 3-1. Periodo de evaluación Reactivo FLOMIN D633.	26
Tabla 3-2. Periodo de evaluación reactivo BK-511.	26
Tabla 4-1. Mediciones de gas H ₂ S durante prueba industrial BK-511.	43
Tabla 4-2. Costos de reactivos depresantes en la Planta de Flotación Selectiva de Molibdeno Codelco División Andina.	44
Tabla 4-3. Costo proyectado anual (año 2016) de reactivo depresante FLOMIN D633, Planta de Molibdeno y Filtrado de Cobre Codelco División Andina.	45
Tabla 4-4. Costo proyectado anual (año 2016) de reactivo depresante BK-511, Planta de Molibdeno y Filtrado de Cobre Codelco División Andina.	46



NOMENCLATURA

AC : alto cobre

Cu : cobre

FeCl₂ : cloruro ferroso

CO₂ : dióxido de carbono

US\$: dólar estadounidense

TK : estanque de almacenamiento

g : gramos

HS⁻ : ion bisulfuro

MoO₄⁻²: ion molibdato

IP : Insumo-producto

kg : kilogramos

kJ : kilojoule

Ca(OH)₂: lechada de cal

l : litros

MIBC : metil isobutil carbinol

Mo : molibdeno

Mo₂S : molibdenita

min : minutos

α : nivel de significancia (t-student)

P0 : planificación anual

H⁺ : protones

ORP : oxido-reducción

ppm : partes por millón

p-valor: probabilidad bilateral

NaHS : sulfhidrato de sodio

Na₂S : sulfuro de sodio

TMS : toneladas métricas secas

t : valor estadístico t – student



CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 CONTEXTO

La Planta de Molibdeno y Filtrado de Cobre de Codelco División Andina tiene la función principal de producir concentrados de cobre y molibdeno a partir del concentrado mixto producido en la flotación colectiva de la Planta Concentradora. Estos metales son separados en la primera etapa correspondiente a la flotación selectiva de molibdenita en donde se utiliza el reactivo sulfhidrato de sodio (NaHS) como agente depresante para sulfuros de cobre.

El proceso de flotación selectiva de molibdeno de División Andina consume en promedio de 4 a 5 kilogramos de NaHS por tonelada métrica seca de concentrado mixto alcanzando una recuperación metalúrgica del 88,7 % de Mo y una ley en el concentrado final de alto cobre (AC) de 47 % de Mo y 4 % de Cu.

El sulfhidrato de sodio presenta ciertas dificultades en su uso en plantas de molibdeno. En primer lugar, un elevado consumo de NaHS restringe las condiciones óptimas de operación en lo que respecta al pH de la pulpa en las celdas de flotación, debido a alcalinidad que esta adquiere, lo que trae consigo una disminución en la cinética de recuperación de Mo. Desde el punto de vista económico, un alto consumo de este reactivo repercute en altos costos para la operación, considerando el transporte de mayores volúmenes de depresante. Sumado a lo anterior, el NaHS presenta riesgos para las personas encargadas de la operación en terreno, debido a la emisión de gases tipo sulfhídrico.

Con el propósito de disminuir el consumo de sulfhidrato de sodio en la Planta de Flotación Selectiva, se evaluaron durante el año 2015 y 2016 dos reactivos alternativos utilizados para la depresión de sulfuros de cobre y hierro: FLOMIN D633 (tioglicolato de sodio) de la empresa SNF FloMin y el reactivo BK-511 desarrollado y fabricado por el Departamento de Procesamiento de Minerales del instituto BGRIMM (Beijing General Research Institute of Mining & Metallurgy). Las características de estos depresantes, es que permiten el reemplazo parcial del NaHS con un bajo consumo de estos, y una menor toxicidad para las personas y el medio ambiente.

Las dosis de ambos reactivos fueron estudiadas por el laboratorio metalúrgico de la Planta de Molibdeno y Filtrado de Cobre (Ingeniería de Procesos) por medio de un set de pruebas de flotación batch. En base a los resultados presentados en laboratorio, se determinó que el depresante FLOMIN D633 logra reemplazar hasta un 30 % el NaHS, con una dosis de 250 [g/TMS], mientras que el BK-511 reduce hasta un 50 % el consumo de NaHS con la misma dosis del reactivo FLOMIN D633. Ambos depresantes demostraron en laboratorio no modificar los resultados metalúrgicos de forma significativa. Estos resultados definen las dosificaciones preliminares en las pruebas a escala industrial.

La evaluación técnico-económica de los depresantes alternativos se realizó mediante el análisis de los resultados metalúrgicos y parámetros de operación del circuito Rougher, de acuerdo a la cantidad consumida de reactivos durante los periodos de evaluación realizados durante el año 2015 (FLOMIN D633) y 2016 (BK-511). Además, se incluyó un análisis en la emisión de gas sulfhídrico junto a la concentración de sulfuros en la Planta de Efluentes.

1.2 OBJETIVO GENERAL

El objetivo general de este trabajo fue determinar la factibilidad técnica y económica de la utilización de los depresantes FLOMIN D633 y BK-511 en el reemplazo parcial del sulfhidrato de sodio en la Planta de Flotación Selectiva de Molibdeno de Codelco División Andina en base a las dosis recomendadas por el laboratorio metalúrgico de la planta.

1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar los resultados metalúrgicos de recuperación de molibdeno y calidad del concentrado, parámetros de operación del circuito Rougher y consumo de reactivos depresantes durante las pruebas industriales.
- Analizar las emisiones de gas sulfhídrico y la concentración de sulfuros en la Planta de Efluentes durante los periodos de prueba.
- Analizar la factibilidad económica de los depresantes alternativos FLOMIN D633 y BK-511 en base a los consumos obtenidos en las pruebas industriales.

1.3 HIPÓTESIS

La hipótesis de este proyecto de memoria plantea que los depresantes alternativos utilizados en la Planta de Flotación Selectiva de Molibdeno de Codelco División Andina disminuyen el consumo de sulfhidrato de Sodio, sin perjudicar la calidad del concentrado final y la recuperación metalúrgica del molibdeno. No se evalúa los efectos de concentración de otras especies, por encontrarse a nivel de trazas.



CAPITULO 2: ANTECEDENTES

2.1 FUNDAMENTOS DEL PROCESO DE FLOTACIÓN

La flotación corresponde a un proceso físico-químico en donde son separados los minerales a través del uso de la adhesión selectiva entre burbuja-partícula. Para realizar este proceso en forma efectiva es necesario antes reducir el tamaño de las partículas hasta alcanzar el nivel adecuado de liberación de las especies minerales, lo cual se logra en la etapa de chancado y molienda.

La concentración de minerales en el proceso de flotación, depende de la diferencia en la hidrofobicidad de las especies mineralógicas donde las partículas hidrofóbicas presentan una mayor afinidad por las burbujas de aire, concentrando de esta forma, los minerales valiosos mientras que las partículas hidrofílicas son descartadas del proceso como se muestra en la Figura 2-1.

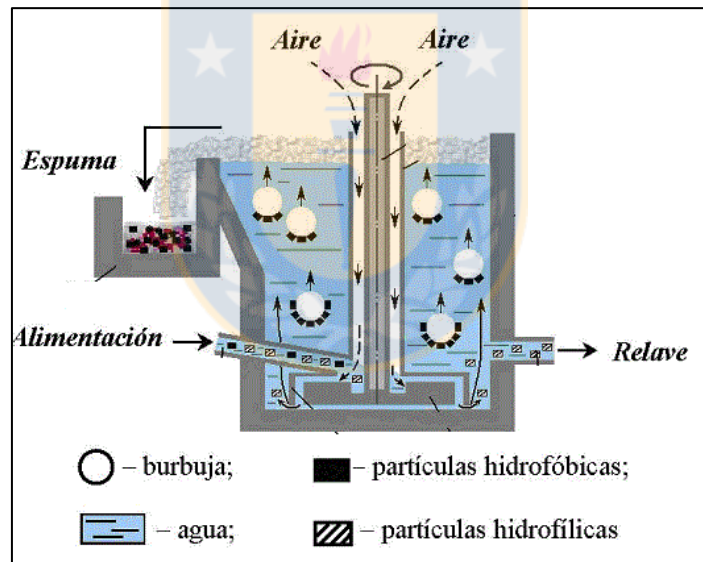


Figura 2-1. Esquema del proceso de flotación de minerales (Petrovskaya, 2009).

2.1.1 FLOTABILIDAD DE LA MOLIBDENITA

La molibdenita (MoS_2) presenta una flotabilidad natural debido a su naturaleza química. Su estructura es una formación hexagonal donde cada átomo de molibdeno se encuentra rodeado por un prisma trigonal de azufre donde se presenta dos tipos de enlaces: covalente entre átomos de Mo-S y enlaces de Van Der Waals entre capas de S-Mo-S (Figura 2-2). Debido a la ruptura de estos enlaces, se generan dos tipos de superficies llamado caras (ruptura de enlaces Van Der Waals) y bordes (ruptura de enlaces covalentes) (López & Reyes, 2005).

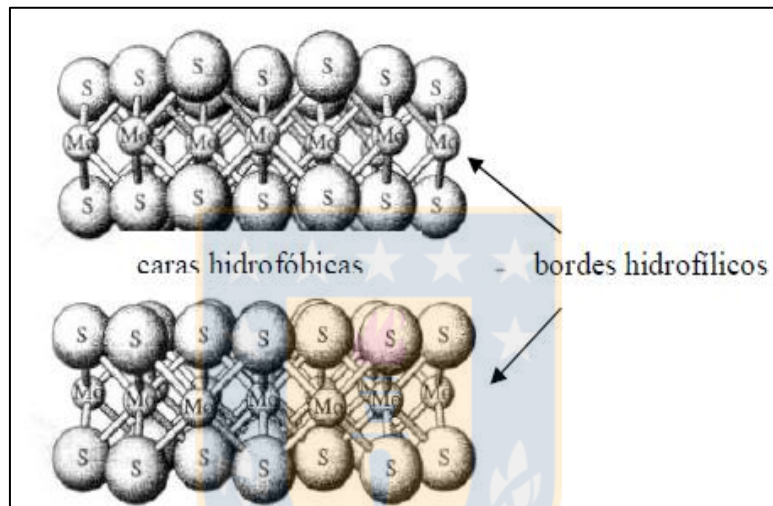


Figura 2-2. Estructura cristalina de la molibdenita (López y Reyes, 2011).

Al producirse la ruptura de los cristales de la molibdenita, a lo largo de las caras se crean superficies no polares de baja energía superficial (Sutulov, 1979), lo que produce una mayor afinidad con líquidos de baja energía superficial como los hidrocarburos saturados, que con líquidos de mayor energía de superficie como es el agua.

Las rupturas de los bordes de la MoS_2 generan superficies polares que son químicamente activas con el agua formando tiomolibdanatos (Fuerstenau & Chander, 1972). Éstas especies, principalmente MoO_4^{2-} en medios alcalinos (Figura 2-3), son formadas por la oxidación parcial del molibdeno por efecto del aire o el agua que dificultan la flotabilidad natural de la molibdenita debido a que determinan la carga eléctrica en los bordes, los cuales tienen una mayor afinidad con el agua.

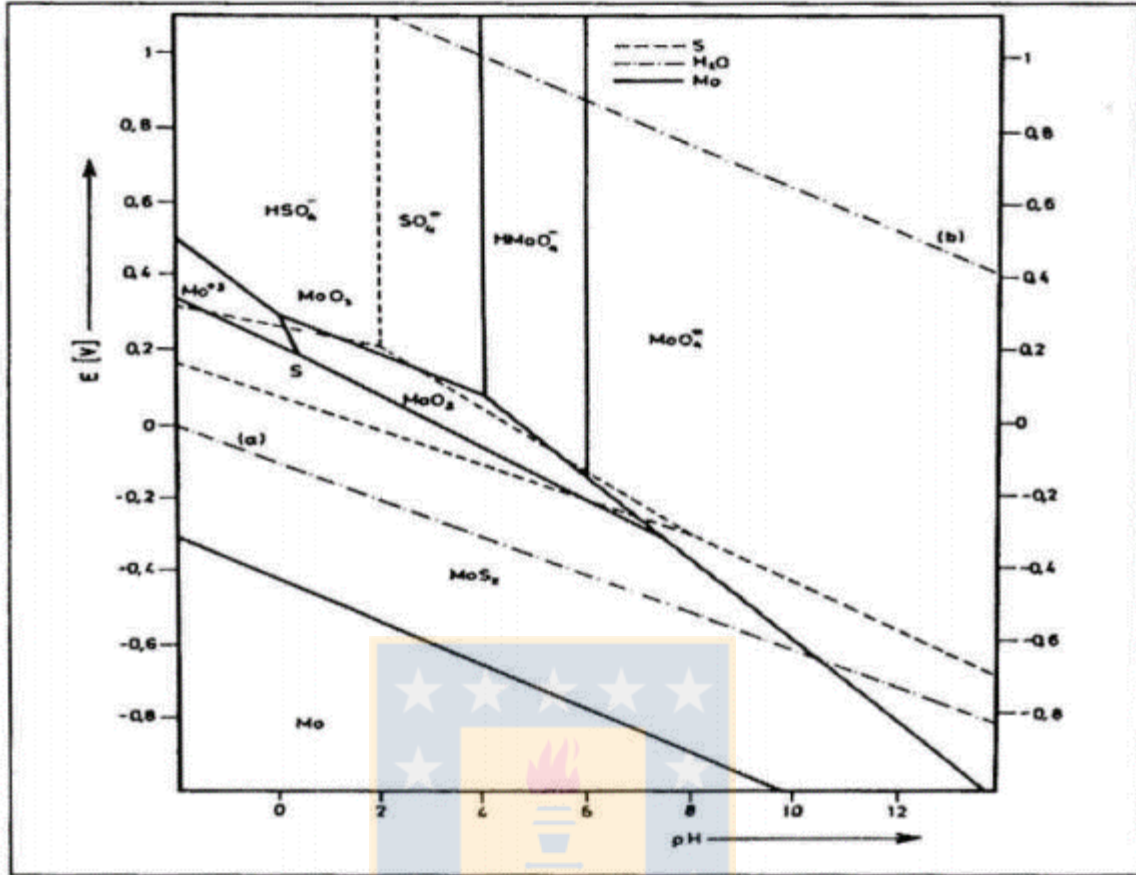


Figura 2-3. Diagrama de Pourbaix de Mo, Sistema Mo-O-S (M. Casas, 2007).

Existen otros aspectos que perjudican la flotabilidad de la molibdenita como es el caso de ion calcio y la sílice. Se ha demostrado (Raghavan & Hsu, 1984) que la presencia de calcio es beneficioso para la recuperación de molibdeno debido a que existe una disminución de la repulsión de la doble capa eléctrica entre la burbuja y las partículas de molibdenita. Para el caso en donde existe tanto la presencia de sílice y calcio, los potenciales zeta de las sílices y la molibdenita se vuelven menos negativos, incluso de signo contrario. Bajo estas condiciones, es posible que se produzca heterocoagulación entre ambos, afectando la recuperación de Mo. En ausencia del ion calcio, dicha repulsión eléctrica entre la molibdenita y la sílice se hace más fuerte como para evitar la coagulación, disminuyendo así la cinética de recuperación de Mo (Figura 2-4).

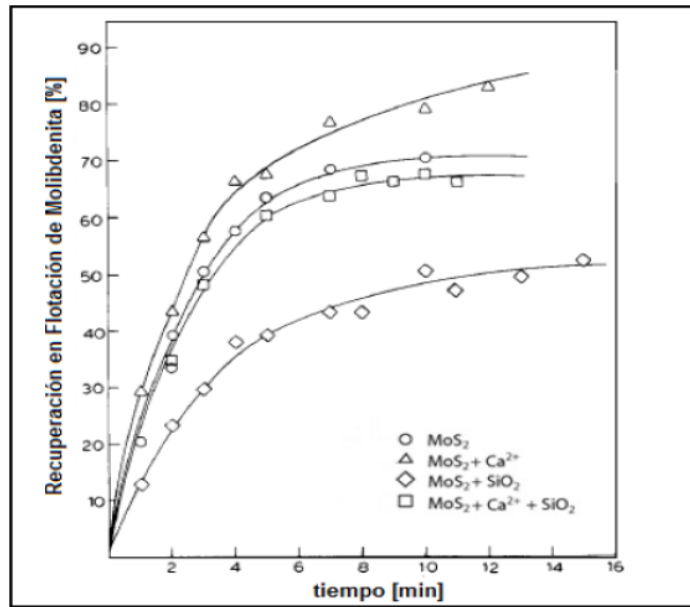


Figura 2-4. Cinética de recuperación de molibdenita con presencia de calcio y sílice (Raghavan y Hsu, 1984).

El tamaño de partícula de la molibdenita es una variable fundamental para la flotabilidad de esta. En termino simples, se afirma que a mayor tamaño del mineral, mayor es la relación cara/borde y por lo tanto, mayor será su hidrofobicidad (Ortega, 2005). La Figura 2-5 muestra la recuperación de MoS₂ a diferentes tamaños de partícula donde se observa que a medida que aumenta la granulometría, mayor es la flotabilidad de ésta. A lo anterior se suma la importancia del pH, donde al hacerse más alcalino, menor es la recuperación.

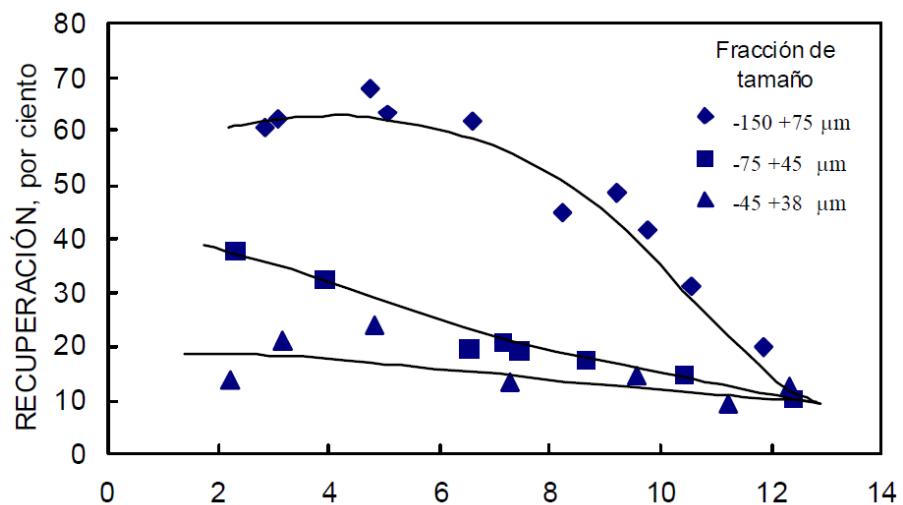


Figura 2-5. Influencia del tamaño de partícula y pH en la recuperación de molibdeno (Ortega, 2005).

2.2 REACTIVOS DE FLOTACIÓN

Otros reactivos de flotación son utilizados para mejorar la eficiencia del proceso, donde se encuentra principalmente los colectores, espumantes y modificadores (Yianatos, 2005). Estos intensifican y modifican las condiciones óptimas del mecanismo físico químico del proceso. La adsorción de los reactivos se basa en el equilibrio del potencial cinético, electroquímico y la hidratación de las partículas minerales.

2.2.1 COLECTORES

Los colectores se adsorben de forma selectiva en la superficie de los minerales con el fin de producir hidrofobicidad en las partículas de interés para flotar. La estructura del colector se divide tanto en un grupo apolar (hidrocarburo) que se orienta a la fase líquida y un grupo polar (iónica) que se adhiera a la superficie del mineral hidrofílico (Figura 2-6).

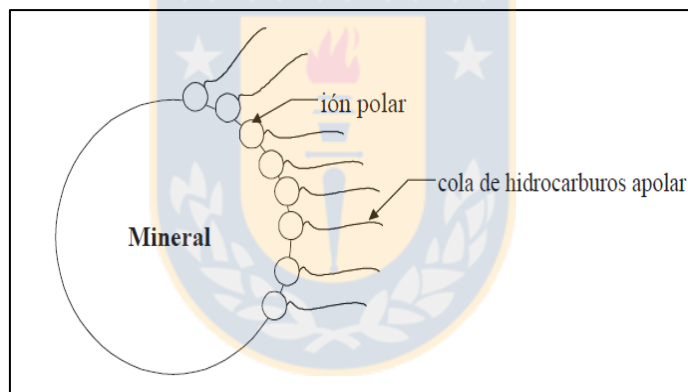


Figura 2-6. Adhesión del colector a la superficie del mineral (Yianatos, 2005).

La unión química entre el colector y el mineral deberá ser más fuerte que la que pueda existir entre el mineral y el agua.

Un factor importante al elegir un colector para un proceso de flotación es el pH en el cual se opere (Figura 2-7). Los colectores aniónicos (xantatos principalmente) son utilizados para pH ácidos mientras que los del tipo aniónico se aplican para pulpas con pH alcalino donde los más conocidos son las aminas y las sales cuaternarias de amonio.

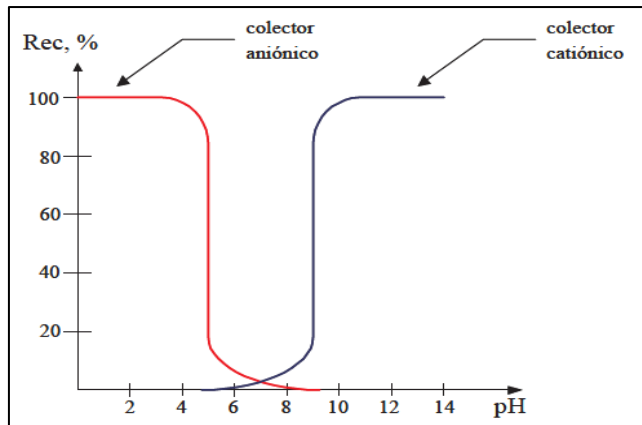


Figura 2-7. Zonas de trabajo de colectores (Yianatos, 2005).

2.2.2 ESPUMANTES

Los líquidos puros como el agua no logran mantener una espuma estable al ser agitadas con aire y las burbujas que se generan colapsan de forma instantánea. Es por este motivo que se utilizan compuestos con superficie heteropolar que se adsorben en la interfase líquido-gas llamados espumantes, los cuales modifican las propiedades superficiales de la burbuja para reducir su coalescencia (disminuir la tensión superficial). La parte polar del espumante se orienta hacia la fase líquida, mientras que la cola (hidrocarburo) se orienta hacia la fase gas (Figura 2-8).

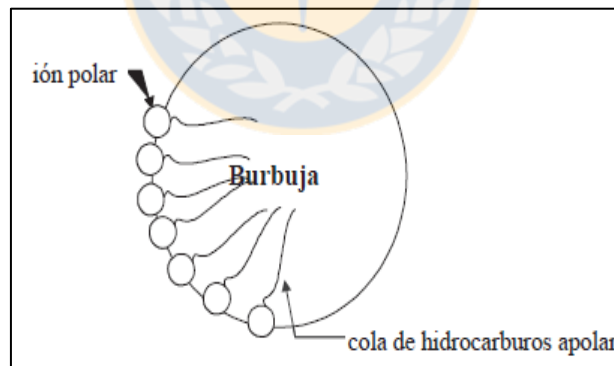


Figura 2-8. Adhesión del espumante a la superficie de la burbuja de aire.

La estabilidad de este reactivo dependerá de la interacción con el agua en la interfase de líquido-gas. Los espumantes más comunes son los que tienen un grupo hidroxílicos (OH^-) como por ejemplo el aceite de pino, cresoles y el MIBC.

2.2.3 MODIFICADORES

En el grupo de los reactivos denominados modificadores se encuentran principalmente los depresantes, dispersantes, activadores y reguladores de pH. Los depresantes tienen la función de inhibir el efecto de los colectores para aquellos minerales que no son valiosos para el proceso. Los dispersantes ayudan a remover partículas finas de ganga de la superficie de las partículas de mena (arcillas) que reducen la flotabilidad de ésta, así como también a generar cambios en el comportamiento reológico de la pulpa mineral. Por otro lado, los activadores permiten aumentar el grado de adsorción de un colector en la superficie o fortalecer la unión entre estos. Los reguladores de pH modifican la composición iónica de la pulpa mediante el cambio en la concentración de H^+ , el cual influye en el potencial electrocinético. Sumado a esto, también pueden considerarse como depresores al mismo tiempo como es el caso de la cal para deprimir la pirita.

2.3 MECANISMO DE DEPRESIÓN DEL SULFHIDRATO DE SODIO

El contenido de este tópico es solo referencial con respecto a la acción del sulfhidrato de sodio en la desorción de colectores del tipo xantato y no al que se utiliza actualmente en División Andina que corresponde al grupo tianocarbamato.

Al adicionar NaHS a una pulpa de flotación alcalina se produce la disociación de éste (J. Dávila, R. Llerena, N. Benavides, C. Curo, 2011) en diferentes iones como se indican en las siguientes reacciones químicas (ecuación 2-1, 2-2 y 2-3):



Pese que a disminuir el pH en la flotación selectiva de molibdeno mejora la recuperación de molibdenita, esto trae consigo un aumento en la concentración del gas sulfhídrico al utilizar depresantes como el NaHS o Na_2S desde un pH menor a 7 (Figura 2-9). Por otra parte, entre un rango de pH de 7 a 13 se observa una predominancia para iones HS^- .

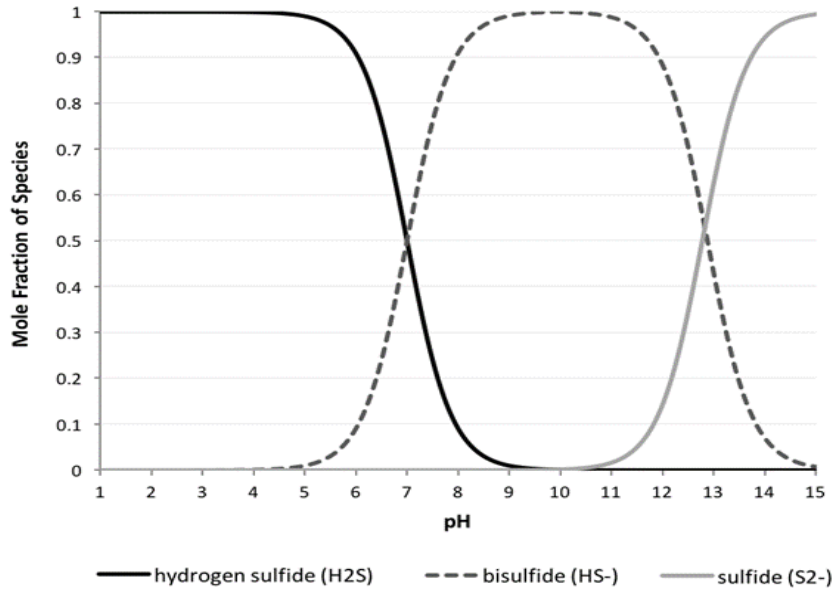


Figura 2-9. Gráfica de disociación de H₂S en función del pH (Applied Analytics, 2015)

De la literatura (Wark & Cox, 1934) se menciona que la depresión de sulfuros de cobre depende de la concentración de ion HS⁻, ya que es el responsable de la desorción del xantato. Sin embargo, el ion bisulfuro es inestable y se descompone rápidamente en presencia de oxígeno disuelto en la pulpa (además de una disminución en el potencial electroquímico). Esto implica un mayor consumo de NaHS en las plantas de flotación de molibdeno donde el gas utilizado es el aire. Es por esto que se recomienda utilizar nitrógeno como gas de flotación debido a que este es inerte en la oxidación del bisulfuro (Arenas, 2007).

Desde el punto de vista operacional, es importante un control adecuado en el pH y potencial óxido-reducción de la pulpa para evitar un sobreconsumo de sulfhidrato de sodio y tener una predominancia de iones HS⁻ como lo indica la Figura 2-10 (Takeno, 2005). De esta forma, no afectar la cinética de flotación y obtener la mayor eficiencia en la desorción del colector.

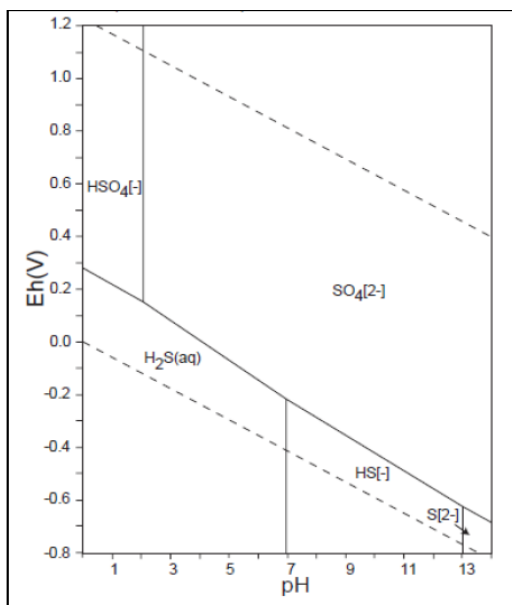


Figura 2-10. Diagrama de Pourbaix para un sistema con especies de azufre (Takeno, 2005).

Las reacciones producidas en la desorción del colector son la quimisorción del xantato (MX_2) y la adsorción física del dixantógeno (X_2) (Figura 2-11).

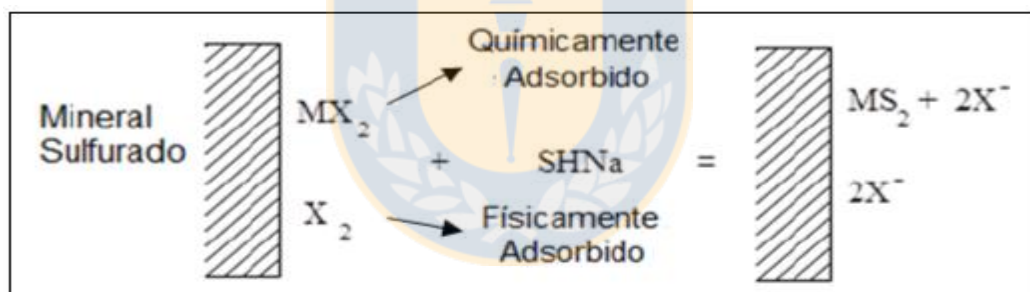
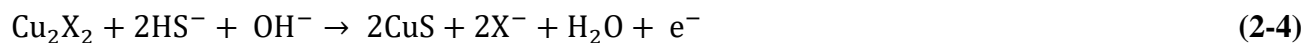


Figura 2-11. Mecanismo de desorción del colector xantato al utilizar NaHS como depresante (Castro, 2006).

La desorción del xantato desde la superficie del mineral hacia el seno de la solución se produciría principalmente desde la sal cuprosa Cu_2X_2 por desplazamiento químico para formar un sulfuro de cobre que es más estable (CuS), y en menor grado por la reducción del dixantógeno X_2 , como se muestra en las ecuaciones 2-4, 2-5 y 2-6 (Castro, 2006).



2.4 TIOLGLICOLATO DE SODIO

En términos de depresantes para sulfuros de cobre, el tioglicolato de sodio es considerado un depresor efectivo y no tóxico en comparación con compuestos como el NaHS o Na₂S. Este reactivo fue probado en una planta de molibdeno en Qingyang como depresor de calcopirita y pirita (Shuhua & Zhenfu, 2013). Los resultados demostraron el efectivo uso depresor del tioglicolato de sodio, con un bajo impacto en la flotabilidad de la molibdenita.

La ventaja del tioglicolato de sodio en comparación a los tradicionales depresores inorgánicos es que se requiere una menor dosis para producir la acción depresora en los sulfuros de cobre (Raghavan, 1983), esencialmente en pH alcalinos donde se prefiere un valor cercano a pH 8,5. Otro punto importante es el potencial ORP que es considerablemente más negativo en comparación a utilizar NaHS como depresor.

El tioglicolato de sodio se compone de un grupo carboxílico y otro mercapto (tiol) donde este último es considerado como el encargado en la depresión de sulfuros de cobre, esencialmente de la calcopirita (Qi, 1985). Esto es debido a la acción depresora del ácido tioglicólico y sus sales, que se asemeja a la acción del ion bisulfuro (HS⁻), en el cual el mecanismo de adsorción de tioglicolato por la superficie del mineral sulfurado es un proceso de quimisorción. Qi (1985) además señaló en su investigación que la acción depresora del tioglicolato no se ve perjudicada por la presencia de oxígeno como es el caso del NaHS, sino por el contrario, esta mejora la precipitación del tioglicolato sobre la superficie del sulfuro de cobre.

2.4.1 DEPRESANTE FLOMIN D633

El reactivo FLOMIN D633 corresponde a un tioglicolato de sodio utilizado para la depresión de sulfuros de cobre y hierro que permite reducir en menor dosis (parcial o totalmente) reactivos depresores de mayor consumo como es el sulfuro de sodio, sulfhidrato de sodio, ferrocianuro y cianuro de sodio.

De acuerdo a la información entregada por el proveedor, el reactivo se caracteriza por ser una formulación de compuestos tiomodificados, entre los que se encuentran los siguientes componentes: tioglicolato de sodio (NaSCH₂COONa), tritocarbonato de sodio (Na₂CS₃) e hidróxido de sodio NaOH, obteniendo una concentración total de ingredientes activos de un 35%.

El tioglicolato de sodio de FLOMIN D633 (Figura 2-12) se encuentra en la forma $\text{Na}_2\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_2\text{S}$, el cual se obtiene de la reacción entre el ácido tioglicólico ($\text{H}_2\text{C}_2\text{H}_2\text{OS}$) e hidróxido de sodio (NaOH). De esta forma, el reactivo adquiere un carácter alcalino con un valor de pH de 12,5. En el Anexo A se detalla la ficha seguridad del reactivo.



Figura 2-12. Reactivo FLOMIN D633.

2.5 DEPRESANTE BK-511

El reactivo BK-511 (Figura 2-13) es un reactivo fabricado por el departamento de procesamiento de minerales BGRIMM utilizado para la depresión de sulfuros de cobre y hierro en circuitos de flotación de molibdeno. Este reactivo puede ser utilizado para reemplazar tanto de forma parcial o totalmente al reactivo sulfhidrato de sodio.



Figura 2-13. Reactivo BK-511.

La composición principal dada por el proveedor corresponde a 2-sulfidoacetato sodio de amonio (15 – 25 %) y 2,2-dimercaptoacetato de potasio (15 – 25 %). La hoja de seguridad se encuentra en el Anexo B.

La energía de interacción es un parámetro para medir la intensidad de reacción entre el mineral y el reactivo. Cuando el valor de este se hace más negativo, indica una mayor adsorción en la superficie de este. El Personal técnico BGRIMM (Tobar, 2016) entrega la siguiente información de distintos depresantes en donde el depresante BK-511 es 4 veces más negativo sobre el NaHS y dos veces sobre el tioglicolato de sodio (Tabla 2-1).

Tabla 2-1. Energía de interacción de depresantes de calcopirita (Tobar, 2016).

La interacción entre calcopirita y diferentes reactivos		
	Reactivo	La energía de interacción entre calcopirita y reactivo, kJ/mol
1	BK 511	-704,04
2	Tioglicolato de Sodio	-382,97
3	NaHS	-167,5
4	Na ₂ S	-150,4
5	Tionocarbamato	-92,21

2.6 DISTRIBUCIÓN T-STUDENT

La distribución de probabilidad t fue publicada por William S. Gosset en 1908. Esta se fundamenta en dos premisas; la primera es la distribución de normalidad, y la segunda es en que las muestras sean independientes. Este modelo sustituye el valor de la varianza poblacional por su estimación lograda en base a la muestra (Turcios, 2015). Sus funciones se basan en establecer un intervalo de confianza, en base un nivel de confianza y los grados de libertad. Las curvas de densidad son simétricas y con forma de campana como la distribución normal estándar.

El valor t se calcula a partir de la ecuación 2-7:

$$t = \frac{x - \mu}{\frac{s}{\sqrt{n}}} \quad (2-7)$$

Donde “x” corresponde a la media, “μ” al valor analizado, “s” a la desviación estándar y “n” el tamaño de la muestra.

El procedimiento de prueba t para dos muestras debe utilizarse para comparar las medias de dos poblaciones independientes, pero relacionadas entre sí (Montgomery, 2004). El cálculo para encontrar el valor t se realiza en base a la diferencia de las medias de cada grupo dividido y la desviación típica de dichas diferencias. El rango de aceptación del valor estadístico t para un contraste bilateral se encuentra en función del nivel de error y de los grados de libertad.

La formulación de hipótesis es una afirmación estadística, ya sea acerca de los parámetros de una distribución de probabilidad o de los parámetros de los modelos. Esta refleja alguna conjetura acerca de la situación del problema.

Una hipótesis es planteada de la siguiente forma (ecuación 2-8 y 2-9):

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 \quad (2-8)$$

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2 \quad (2-9)$$

Donde H_0 es la hipótesis de nula diferencia entre las medias y H_1 es la hipótesis de diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las muestras analizadas.

Una manera de validar una prueba de hipótesis es estableciendo que la hipótesis nula fue rechazada para un valor estadístico t. Sin embargo, este método es inadecuado porque no ofrece al responsable de la toma de decisión, idea alguna de que si el valor estadístico se encuentra dentro de la región de rechazo o aceptación. Para evitar esto, se utiliza el p-valor, que es una medida de significación estadística y corresponde al grado de credibilidad de la hipótesis nula, se relaciona con el grado de confianza que se le atribuye al espacio de muestras. Si el p-valor fuese menor al nivel de confianza (α), significaría que la hipótesis nula debe ser rechazada; de caso contrario, si p-valor fuese mayor al nivel de confianza, la hipótesis nula es aceptada.

2.7 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FLOTACIÓN SELECTIVA CODELCO DIVISIÓN ANDINA

La Planta de Molibdeno y Filtrado de Cobre de Codelco División Andina recibe un concentrado mixto de Cu-Mo que es producido por el proceso de flotación colectiva en la Planta Concentradora con una ley de cobre del 28,5 % y de 0,7 % de molibdeno.

La pulpa es transportada a través de un concentraducto hasta llegar a la estación disipadora N°2, la cual se encuentra ubicada a la entrada de la planta, y que tiene la finalidad de disminuir la presión con la que llega el concentrado por medio de la acción de una serie de anillos cerámicos instalados dentro de la cañería. El flujo de concentrado a la planta es de 2 [m³/min] con un porcentaje de sólido que está dentro de un rango del 40 % al 57 %.

El concentrado que tiene un pH estándar de 10,5 a 11,5, es acondicionado con ácido sulfúrico para eliminar los restos de Ca(OH)₂ que es adicionado en la flotación colectiva como regulador de pH y depresor de pirita. La dosificación de ácido es controlada por medio de un lazo de control de pH, donde el set point es de un valor de 8.

Posteriormente el concentrado ingresa a un cajón sellado donde se adiciona la primera dosis de depresante para ingresar al circuito de flotación.

En ciertos casos, cuando la ley de entrada de molibdeno es superior al 1 %, se utiliza el circuito de flotación Pre-Rougher (Figura 2-14). Este circuito está compuesto por una celda Siemens que actúa como Rougher y una celda G-Cell como limpieza. El objetivo de este proceso es que la ley de cola de la celda Siemens que ingresa a la planta de flotación selectiva no sea mayor al 0,6 % de Mo y que el concentrado de la celda G-Cell alcance la calidad necesaria para ser enviada como producto final de flotación.

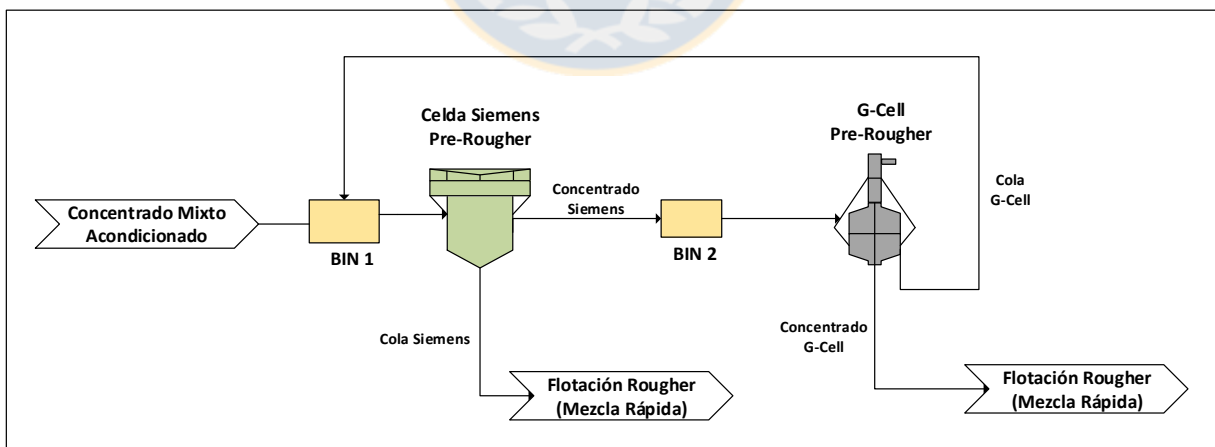


Figura 2-14. Diagrama de flujo del circuito Pre-Rougher Planta de Molibdeno y Filtrado de Cobre Codelco División Andina.

La Figura 2-16 explica la distribución de la Planta de Flotación Selectiva de Molibdenita de División Andina.

El concentrado acondicionado con NaHS pasa al cajón de mezcla rápida donde se junta con la cola de la etapa de primera limpieza y la cola Siemens (éste último en el caso de estar operando el Pre-Rougher). En este punto es adicionado el petróleo diesel como colector de molibdeno y dióxido de carbono como regulador de pH. En caso de mantención del cajón de mezcla rápida se opera con el cajón N°19.

La flotación Rougher tiene la función de obtener la mayor recuperación de molibdeno del concentrado mixto. Esta etapa se encuentra compuesta por dos bancos de celdas auto-aspirantes selladas en paralelo: Rougher 300 de 10 celdas de 300 [pie³] y el Rougher 500 de 6 celdas de 500 [pie³]. Los concentrados de ambos Rougher son enviados a la etapa de primera limpieza, mientras que las colas que tienen una ley promedio del 0,08 % de Mo son enviadas al proceso de desulfhidratación donde se neutralizan los restos de NaHS utilizando FeCl₂ de baja concentración.

El circuito cleaner tiene la función de aumentar la calidad del concentrado final proveniente del circuito primario. Para esto se tienen 3 etapas de limpieza donde la primera, al igual que la flotación Rougher, operan 5 celdas mecánicas selladas de 500 [pie³]. Cabe mencionar que el gas de flotación utilizado en las celdas mecánicas de la Planta de Molibdeno de División Andina es recirculado para obtener un gas enrarecido en oxígeno con un valor promedio del 3 % (97 % de nitrógeno). De esta forma se logra disminuir el consumo de NaHS producto de la oxidación de éste.

La segunda limpieza está compuesta por dos columnas que operan en paralelo. Éstas reciben el concentrado de la primera limpieza, la cola de tercera limpieza y la cola de la columna corta antigua. Los relaves de estas columnas son enviadas a un banco de repaso que consta de 3 celdas selladas de 500 [pie³]. El concentrado de estas últimas celdas alimenta a la columna corta antigua mientras que la cola es de vuelta a la primera limpieza.

Finalmente, la tercera limpieza compuesta por una celda G-Cell de menores dimensiones que la del circuito Pre-Rougher, tiene la función de generar el concentrado final con una ley promedio de 47 % de Mo y 4 % de Cu.

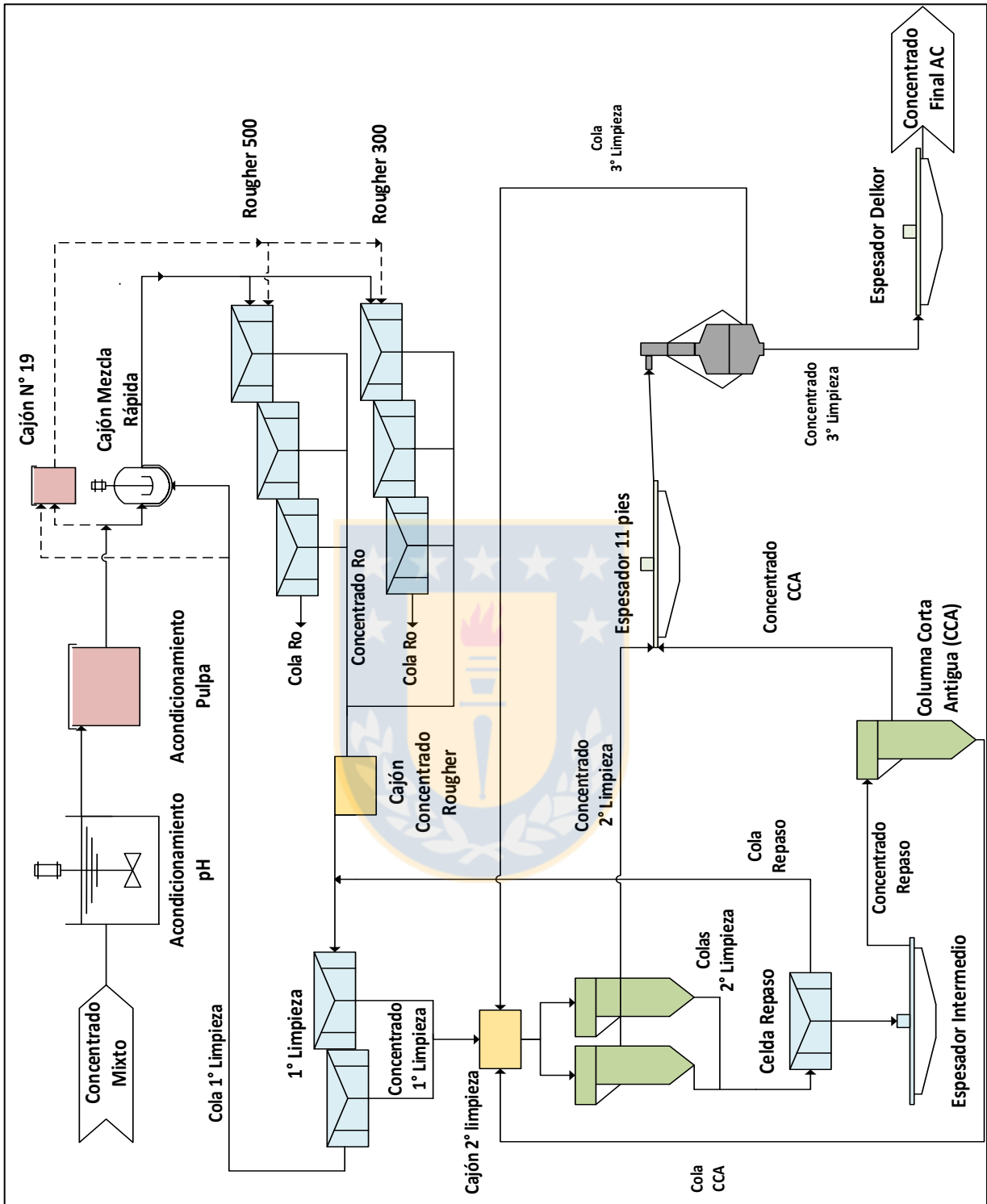


Figura 2-16. Diagrama de Flujo Planta de Flotación Selectividad de Molibdeno Codelco División Andina.

2.8 REACTIVOS DE FLOTACIÓN CODELCO DIVISIÓN ANDINA

A continuación, se detallan los reactivos utilizados tanto para el proceso de flotación colectiva de Cu-Mo y flotación selectiva de Mo en Codelco División Andina.

2.8.1 FLOTACIÓN COLECTIVA DE CU-MO

La Tabla 2-2 muestra en detalle los reactivos para el proceso de flotación colectiva de Cu-Mo de la Planta Concentradora de Codelco División Andina.

Tabla 2-2. Reactivos de flotación colectiva Cu-Mo de la Planta Concentradora Codelco División Andina.

Nombre Reactivo	Tipo	Dosis [g/TMS]	Descripción
Hostafлот X-23	Colector de cobre (tianocarbamato)	23	Dosificado en la etapa de molienda. Aumenta la flotabilidad de los sulfuros de cobre.
Petróleo Diesel	Colector de molibdeno	10	Dosificado en la etapa de molienda. Aumenta la flotabilidad de la molibdenita.
MIBC	Espumante	13	Dosificado en la etapa Rougher debido a su rápida acción, permitiendo estabilización en la espuma.
Lechada de Cal	Regulador de pH	940	Permite regular el pH de flotación a un valor de 12 para así depresar la pirita.

2.8.2 FLOTACIÓN SELECTIVA DE MO

Para lograr una eficiente separación entre los sulfuros de cobre y fierro de la molibdenita se utilizan los siguientes reactivos (Tabla 2-3).

Tabla 2-3. Reactivos de flotación selectiva de Mo de la Planta de Molibdeno y Filtrado de Cobre Codelco División Andina.

Nombre Reactivo	Tipo	Dosis [Kg/TMS]	Descripción
Ácido Sulfúrico	Regulador de pH	1.2	Dosificado en la etapa de acondicionamiento de pulpa controlando a un pH igual a 8. Además, permite consumir restos de lechada de cal.
Petróleo Diesel	Colector de molibdeno	0.080	Dosificado en la etapa Rougher. Mejora la flotabilidad de la molibdenita.
Dióxido de Carbono	Regulador de pH	0.300	Dosificado en la etapa Rougher y columnas de segunda limpieza para disminuir el pH de la flotación a un valor de 10 con el objetivo de mejorar la cinética de recuperación de la molibdenita.
Sulfhidrato de Sodio	Depresante	4.5	Permite depresar los sulfuros de cobre para separar diferencialmente la molibdenita.

2.9 MINERALOGÍA DE CONCENTRADO CU-MO

El concentrado mixto obtenido del proceso de flotación colectiva de División Andina posee diferentes especies minerales de cobre: calcopirita (CuFeS_2), bornita (Cu_5FeS_4), covelina (CuS), calcosina (Cu_2S), tenantita ($\text{Cu}_{14}\text{AsS}_{13}$), enargita (Cu_3AsS_4) y tetrahedrita ($\text{Cu}_3\text{SbS}_{3,25}$), siendo la calcopirita el mineral de cobre predominante, mientras que para el molibdeno es la molibdenita (MoS_2). Otras especies contenidas son la piritita (FeS_2), esfalerita (ZnS) y galena (PbS). Para las especies oxidadas se encuentran magnetita, hematita, goethita, harrisonita, rutilo e ilmenita.

En relación al material insoluble conocido como ganga, está compuesta por silicatos, tales como cuarzo, feldespato potásico y sericita-moscovita principalmente.

La Tabla 2-4, Tabla 2-5 y Tabla 2-6 (SGS, 2015 - 2016) detallan la composición mineralógica en base al balance de mineral del concentrado mixto de División Andina.

Tabla 2-4. Composición másica de sulfuros en concentrado Cu-Mo Codelco División Andina.

Sulfuros (BM %)	2015	2016
Calcopirita	76,54	72,92
Bornita	1,00	2,04
Covelina	0,05	0,03
Calcosina	0,01	0,03
Tenantita	0,28	0,30
Enargita	0,11	0,83
Tetrahedrita	0,03	0,12
Pirita	9,03	15,45
Esfalerita	0,72	0,82
Molibdenita	2,60	0,10
Galena	0,14	0,09
Otros Sulfuros	0,00	0,03

Tabla 2-5. Composición másica de óxidos en concentrado Cu-Mo Codelco División Andina.

Óxidos (BM %)	2015	2016
Magnetita-Hematita-Goethita	0,19	0,26
Goethita(Al)-Harrisonita	0,01	0,01
Rutilo	0,47	0,35
Ilmenita	0,03	0,02

Tabla 2-6. Composición másica de ganga en concentrado Cu-Mo Codelco División Andina.

Ganga (BM %)	2015	2016	Ganga (BM %)	2015	2016
Cuarzo	2,47	1,86	Circón	0,09	0,08
Feldespato Potásico	1,07	0,59	Titanita/Esfeno	0,00	0,00
Plagioclasa-Albita	0,48	0,44	Calcita	0,05	0,06
Epidota-Zoisita	0,00	0,00	Dolomita	0,07	0,07
Turmalina	0,12	0,08	Siderita (Mn)	0,41	0,25
Anfíbola	0,03	0,02	Yeso-Anhidrita	0,00	0,01
Sericita-Moscovita	3,23	2,57	Jarosita	0,00	0,00
Biotita	0,47	0,24	Otros Sulfatos	0,00	0,01
Kaolinita	0,04	0,03	Apatita	0,09	0,09
Montmorillonita	0,01	0,02	Otros Fosfatos	0,01	0,00
Otras Arcillas	0,00	0,01	Otros	0,00	0,04
Cloritas	0,15	0,13			

CAPÍTULO 3: DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1 PREPARACIÓN DE NAHS

El NaHS es recibido por la Planta de Reactivos (Tabla 3-1) en forma líquida al 42 % p/p con una concentración que va desde los 510 a los 540 [g/l]. Éste es almacenado en dos estanques (TK NaHS puro antiguo y TK NaHS puro nuevo) para posteriormente ser diluido con agua fresca antes de ser dosificado en el proceso de flotación con el objetivo de prevenir la formación de cristales en las cañerías producto de las bajas temperatura. Normalmente se utiliza el estanque con mayor volumen de NaHS puro para la dilución dejando en servicio el otro estanque para la recepción de sulfhidrato de sodio cargado en camiones.

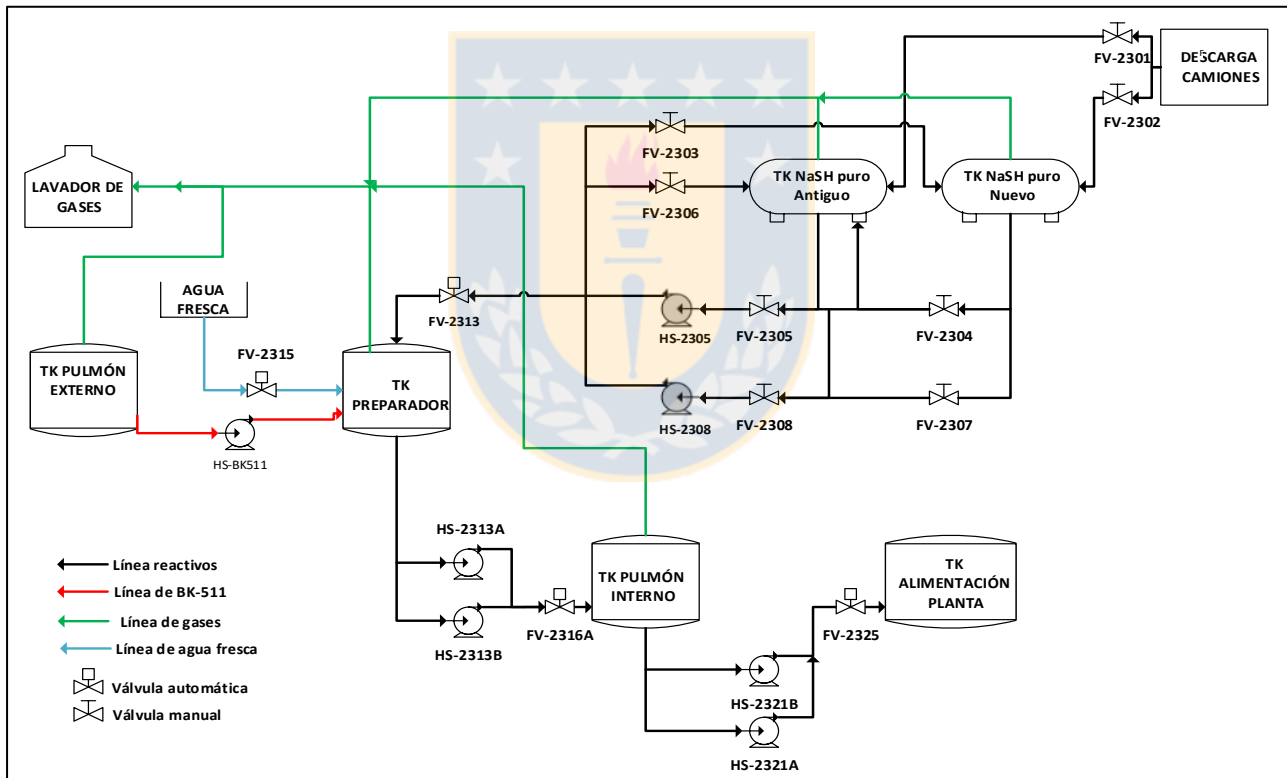


Figura 3-1. Diagrama de flujo de la Planta de Reactivos Codelco División Andina (Planta de Molibdeno y Filtrado de Cobre).

La dilución del NaHS es realizado en el TK preparador a una concentración de 280 [g/l] por medio de un control automático en función del nivel del estanque. Para que el sistema realice de forma eficiente el balance de masa, es necesario que el operador tome muestras de NaHS del TK puro Antiguo y TK puro Nuevo para ser enviadas al personal de terceros para análisis químico de concentración de NaHS. Una vez que el operador de la Planta Moly ha recibido la información correspondiente, confirma el TK de almacenamiento de NaHS puro y su concentración para ser utilizado para la dilución. Para comprobar la correcta preparación del reactivo también se toman muestras del TK preparador y el TK alimentación planta.

El cálculo que realiza el control de nivel es descrito en la ecuación 3-1:

$$[H \text{ NaHS }](\text{cm}) = \frac{[\text{altura Efectiva}](\text{cm}) * [\text{NaSH Preparado}] \left(\frac{\text{g}}{\text{L}}\right)}{[\text{NaSH puro}] \left(\frac{\text{g}}{\text{L}}\right)} \quad (3-1)$$

Donde la altura efectiva del estanque es de 204 [cm] y la concentración de NaHS preparado de 280 [g/l]. De esta forma se logra calcular la cantidad en centímetros de depresante (H NaHS) a dosificar para diluir con agua fresca hasta completar la capacidad del TK de 8000 litros y así obtener la concentración requerida a partir del análisis del NaHS puro.

3.2 PREPARACIÓN AUTOMÁTICA DE MEZCLAS DEPRESANTES

En base a la propuesta del reemplazo parcial del 30 % de NaHS por el reactivo FLOMIN D633, la prueba industrial consideró dosificar el 70 % de NaHS puro en comparación a la dilución normal. De esta forma el cálculo en la adición de NaHS al TK preparador queda de la siguiente forma (ecuación 3-2):

$$[H \text{ NaSH TIOGLICOLATO }](\text{cm}) = \frac{0,7 * [\text{altura Efectiva}](\text{cm}) * [\text{NaSH Preparado}] \left(\frac{\text{g}}{\text{L}}\right)}{[\text{NaSH puro}] \left(\frac{\text{g}}{\text{L}}\right)} \quad (3-2)$$

Para la preparación de la mezcla NaHS - BK-511 se aplicó un factor de 0,5 para disminuir en un 50 % el consumo de NaHS en el TK preparador (ecuación 3-3).

$$[H \text{ NaHS BK } - 511](\text{cm}) = \frac{0,5 * [\text{altura Efectiva}](\text{cm}) * [\text{NaSH Preparado}] \left(\frac{\text{g}}{\text{L}}\right)}{[\text{NaSH puro}] \left(\frac{\text{g}}{\text{L}}\right)} \quad (3-2)$$

El siguiente paso en la preparación de la mezcla es agregar el depresante alternativo al TK preparador. Para el caso del reactivo FLOMIN D633, se instaló un estanque IBC que conecta al estanque de preparación por medio de un manifold. Los instrumentos incluidos en dicho manifold fueron un flujómetro y una válvula automática (Figura 3-2) para controlar la dosis de depresante alternativo. Los contenedores restantes de FLOMIN D633 se ubicaron al exterior de la Planta de Reactivos con sus respectivos recipientes anti derrame.



Figura 3-2. Flujómetro y válvula automática en manifold para adición de reactivo FLOMIN D633 a TK preparador.

A finales del año 2015 se habilitó el TK pulmón exterior para poder almacenar el reactivo BK-511 con el objetivo de facilitar la manipulación y dosificación de éste. La adición de reactivo desde el TK pulmón externo al TK preparador es realizado mediante una bomba peristáltica con control de tiempo de operación.

La cantidad de depresante alternativo a agregar al TK preparador se calculó en base al número de preparaciones diarias, la dosis de depresante alternativo y la masa promedio de concentrado mixto que recibe la planta (Anexo C).

Finalmente se agrega agua fresca hasta completar el volumen del TK preparador para completar la preparación de las mezclas depresantes y ser utilizada en el proceso de flotación selectiva de molibdeno.

3.3 PRUEBAS INDUSTRIALES

3.3.1 PERIODOS DE EVALUACIÓN

Para evaluar las pruebas industriales se utilizaron pruebas “on/off” en donde se fue alternando el uso de los depresantes alternativos en comparación a operar la flotación selectiva de molibdeno con solo NaHS.

Ambos reactivos se estudiaron en cinco periodos donde tres de estos fueron con depresante alternativo. La Tabla 3-1 y Tabla 3-2 muestran los periodos analizados.

Tabla 3-1. Periodo de evaluación Reactivo FLOMIN D633.

Periodo	Mezcla de reactivo	Reemplazo de NaHS (%)
17 - 23 de febrero de 2016	NaHS – FLOMIN D633	30 %
24 de febrero – 2 de marzo de 2016	NaHS	
3 – 7 de marzo de 2016	NaHS – FLOMIN D633	30 %
8 – 11 de marzo de 2016	NaHS	
12 - 16 de marzo de 2016	NaHS – FLOMIN D633	30 %

Tabla 3-2. Periodo de evaluación reactivo BK-511.

Periodo	Mezcla de reactivo	Reemplazo de NaHS (%)
9 - 16 de diciembre de 2015	NaHS - BK-511	50 %
16 - 21 de diciembre de 2015	NaHS	
21 - 28 de diciembre de 2015	NaHS - BK-511	50 %
28 de diciembre de 2015 – 4 de enero de 2016	NaHS	
4 – 13 de enero de 2016	NaHS - BK-511	50 %

3.3.2 METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN

La evaluación técnica consistió en un análisis metalúrgico de los resultados obtenidos dentro de los periodos establecidos. Para chequear los datos de las variables de estudio, se llevó a cabo un análisis estadístico t-student (pruebas t de dos muestras) con un nivel de significancia de 0,05 (α) basado en la hipótesis de nula diferencia estadística entre las medias estudiadas.

Los datos analizados por turnos para los periodos evaluados son los siguientes:

- a. Consumo de depresantes.
- b. Recuperación de molibdeno.
- c. Calidad de concentrado final (ley cobre y molibdeno).
- d. Potencial de celdas Rougher 500 y 300.

Cabe destacar que el potencial medido en planta no corresponde al potencial óxido-reducción, sino al potencial específico, el cual es explicado en el Anexo D. El electrodo que se usa es de oro y la referencia de Ag,Ag/Cl

La evaluación económica se realizó en base los consumos de reactivos de las pruebas con respecto a la producción anual para el año 2016.

Por otro lado, se analizó la emisión de gas sulfhídrico medido por personal de Higiene Industrial de Codelco y el contenido de sulfuros en Espesador 1, Espesador 2, Filtros y Decantador N° 3 (Planta de Filtrado de Cobre y Planta de Efluentes) que es medido por personal de terceros.

3.3.3 PUNTOS DE ADICIÓN DE REACTIVO

Los puntos de adición de depresante para el proceso de flotación selectiva de molibdeno fueron los siguientes (Figura 3-4):

- a. Alimentación Planta : Cajón de acondicionamiento de pulpa
- b. Circuito Pre-Rougher : BIN 2 (alimentación G-Cell)
- c. Circuito Rougher : Recepción 1° Banco 300
: Recepción 1° Banco 500
- d. Circuito de limpieza : Celdas Repaso
: Columna Corta Antigua
: Segunda limpieza
: Tercera Limpieza



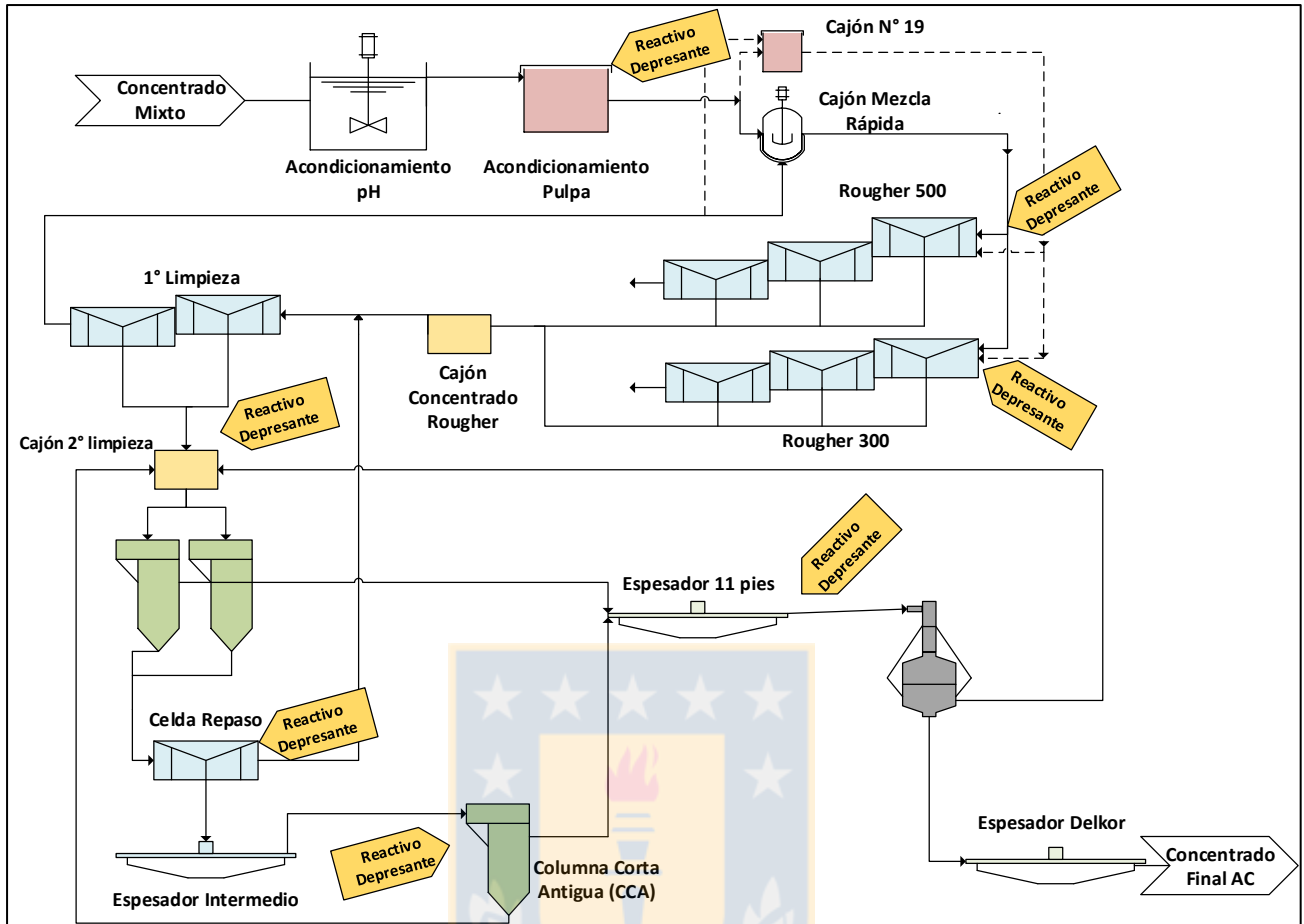


Figura 3-4. Puntos de adición de reactivo depresante en Planta de Flotación Selectiva de Molibdeno Codelco División Andina.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 PRUEBA INDUSTRIAL FLOMIN D633

4.1.1 CONSUMO DE REACTIVOS

Durante la primera semana de prueba, la automatización de la preparación consideró la adición de 200 litros por preparación de tioglicolato de sodio, lo que se tradujo en el uso de un IBC diario (4 preparaciones por día). A partir del segundo día, la preparación se modificó para adicionar 160 litros de reactivo considerando 5 preparaciones por día. En general, el consumo del primer periodo de prueba se vio afectado por una disminución en el pH de operación de la flotación colectiva, líneas de adición de reactivo obstruidas, recepción de concentrado mixto de mayor granulometría y un aumento de flujo de concentrado mixto (142 toneladas por hora), generando embanques en celdas de flotación Rougher.

Para el segundo periodo de prueba se utilizaron 160 litros de tioglicolato de sodio en cada preparación. Durante el segundo día, ésta se vio afectada por la recepción de una alta ley de alimentación de molibdeno en el concentrado mixto, con valores promedio de 2 %, por lo cual, se puso en funcionamiento el sistema Pre-Rougher, aumentando el flujo de depresante.

En base a los puntos descritos anteriormente, el consumo del depresante FLOMIN D633 fue de 420 [g/TMS], tanto para el primer y segundo periodo de prueba. Esto representa una dosis mayor en un 68 % con respecto al planificado (250 g/TMS), debido a la alta adición de depresante alternativo por preparación.

El consumo de NaHS durante la primera prueba del reactivo alternativo fue de 3,9 [kg/TMS]. Esto implica una disminución del 15,2 % respecto al valor máximo obtenido en el periodo de análisis (Figura 4-1) y un 13,3 % de ahorro con el IP de NaHS del año 2015 (4,5 kg/TMS). Para el segundo periodo con el reactivo FLOMIN D633, el consumo de NaHS alcanzó un promedio de 4,2 [kg/TMS], generando un sobreconsumo del 2,4 % en relación al periodo del 8 al 11 de marzo y una disminución del 6,7 % con respecto al IP planificado. Estas diferencias no generan ahorros en términos monetarios, al contrario, pueden elevar costos de operación en el global.

En la última prueba (12 al 16 de marzo) se disminuyó la adición a 100 litros de tioglicolato de sodio por preparación, para así alcanzar un consumo de 250 [g/TMS]. Durante este último periodo la planta se mantuvo dentro de márgenes de operación normales, disminuyendo el consumo de NaHS a 3,5 [kg/TMS]. Este valor equivale a un ahorro del 22,2 % de NaHS con respecto al planificado para el año 2015 y de un 23,9 % en relación al periodo con mayor consumo de NaHS (4,6 kg/TMS).

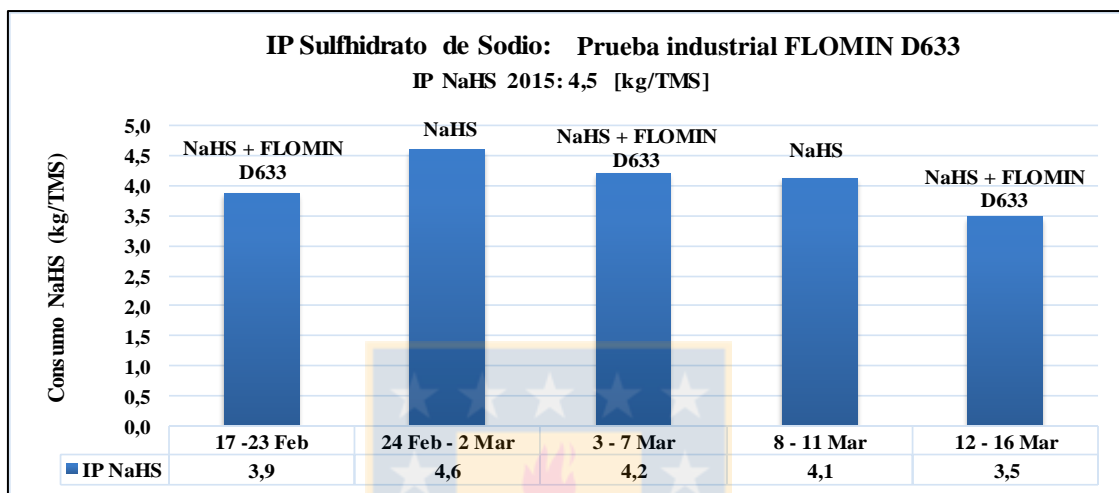


Figura 4-1. Indicador de consumo (IP) de NaHS en periodo de evaluación FLOMIN D633.

4.1.2 RECUPERACIÓN METALÚRGICA DE MOLIBDENO

Durante las dos primeras pruebas industriales con el reactivo FLOMIN D633 donde el consumo fue de 420 [g/TMS], se presentaron eventos donde el tonelaje del concentrado mixto disminuyó a causa de detenciones en el tratamiento de molienda. Producto de lo descrito anteriormente, la recuperación metalúrgica de Mo de la planta cae a valores puntuales bajo el 80% de recuperación, como lo indica la Figura 4-2.

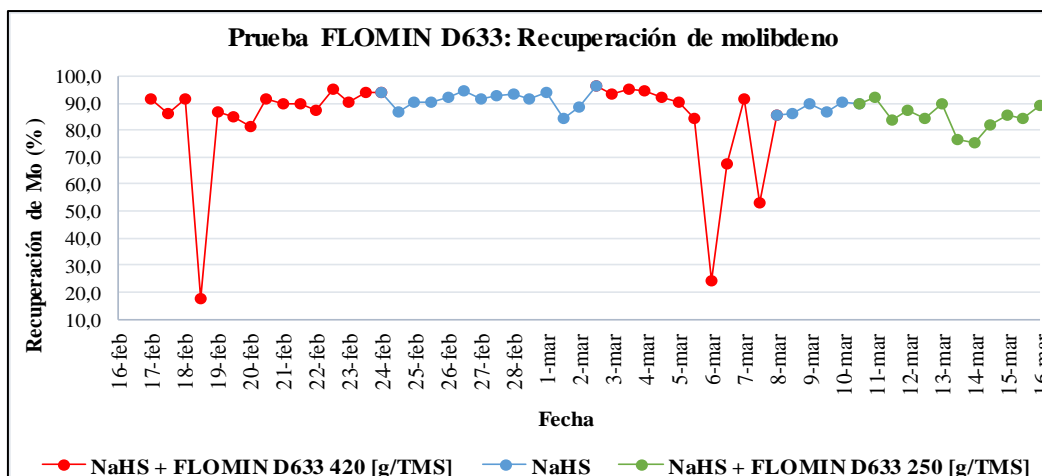


Figura 4-2. Recuperación de molibdeno durante prueba industrial FLOMIN D633.

La recuperación promedio durante las dos primeras pruebas con tioglicolato fue de 90,1 % (89,2 % la primera y 91,7 % la segunda) mientras que la media total con solo NaHS fue de un 90,4 %. Esta diferencia de 0,3 puntos entre ambas medias no representa una real significancia dado que la prueba *t* demuestra que el valor estadístico *t* se encuentra dentro de los límites de aceptación con un *p*-valor de 0,8 (mayor al valor de $\alpha = 0,05$).

Por otro lado, la recuperación promedio en el último periodo de prueba fue de 84,6 %. La diferencia es de 5,8 puntos en comparación a los periodos con solo NaHS, lo que representa una diferencia estadística relevante dado que dentro de un intervalo de confianza del 95 %, la probabilidad bilateral tiene un valor de 2×10^{-3} . Esto indica que el tioglicolato en dosis de 250 [g/TMS] disminuye la recuperación de Mo en comparación a una dosis de 420 [g/TMS].

4.1.3 CALIDAD DEL CONCENTRADO FINAL

a. Ley de molibdeno

La ley promedio de Mo en el concentrado final durante el primer periodo con FLOMIN D633 fue de un 45,3 % con una tendencia a alcanzar valores menores al 44 % (Figura 4-3), mientras que para la segunda prueba fue de un 48,4 %. Con respecto a la última prueba con tioglicolato de sodio la ley promedio fue de un 47,4 %. Para los días donde se utilizó solo NaHS como depresante, las medias para el primer y segundo periodo fueron de un 46,2 % y 48,7 % respectivamente.

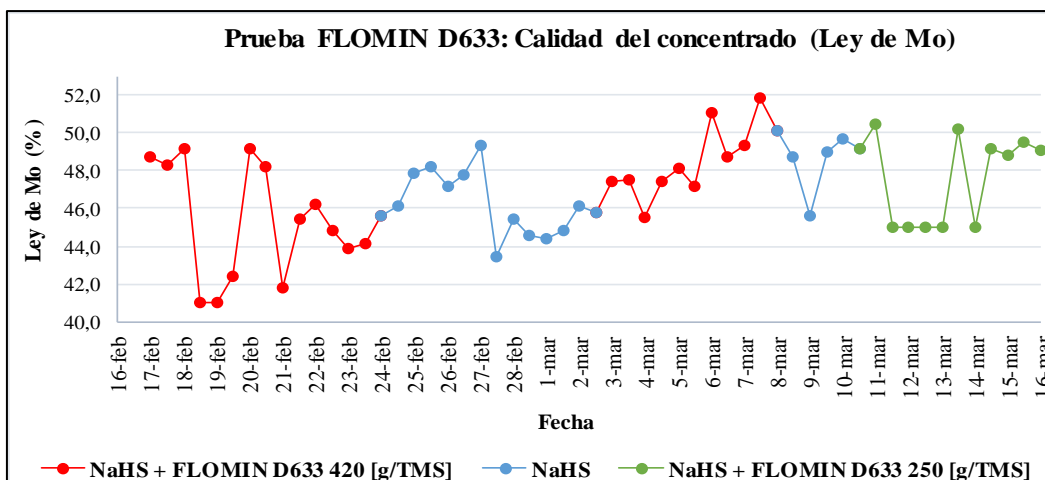


Figura 4-3. Ley de molibdeno en el concentrado final durante prueba industrial FLOMIN D633.

Comparando el primer periodo con NaHS y el segundo con tioglicolato de sodio (420 g/TMS), la diferencia es de 2,2 puntos porcentuales. Al aplicar la prueba t entre ambas muestras, se observó que la probabilidad bilateral es menor al intervalo de confianza con un valor de 9×10^{-3} , por lo tanto, esta diferencia entre las medias es significativa.

Sin embargo, al analizar la data total para la dosis de 420 [g/TMS] de FLOMIN D633, la media fue de un 46,6 %. Esto indica una diferencia de 0,3 puntos con respecto a la media de los dos periodos con solo NaHS (46,9 %), la cual no tiene una diferencia estadística, ya que el p-valor es de 0,7. De la misma forma ocurre con el promedio del último periodo con tioglicolato donde la diferencia con la media total de los días de operación con solo NaHS es insignificante (0,5 puntos). En base al análisis general realizado, el reactivo no modifica la ley de Mo en el concentrado final sin importar la dosis utilizada.

b. Ley de cobre

Analizando en general la información de la Figura 4-4, la media de los periodos con dosis de 420 [g/TMS] de tioglicolato fue de un 4 %, mientras que la última prueba fue de un 2,9 % (250 g/TMS). Con respecto a la media con solo NaHS, esta fue de un 4,1 % (4,7 % para el primero y 2,7 % para el segundo).

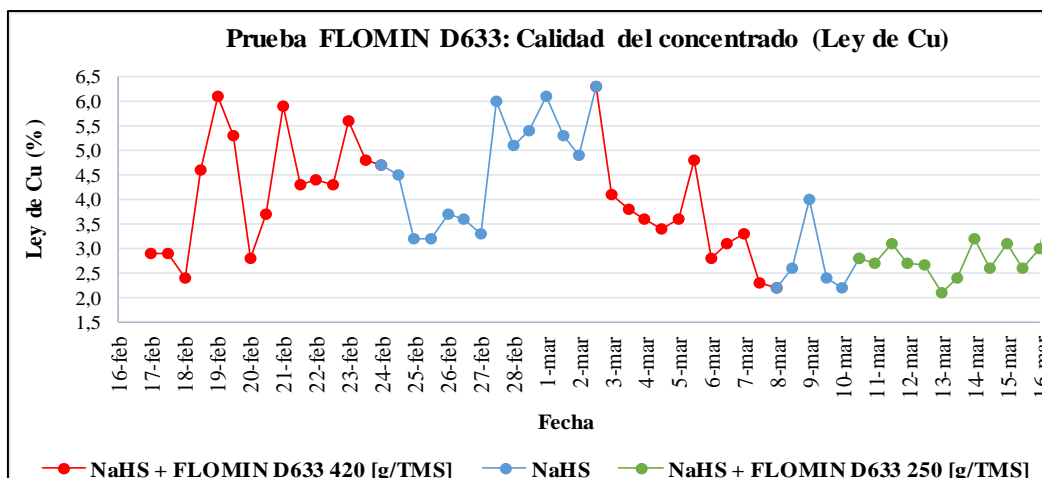


Figura 4-4. Ley de cobre en el concentrado final durante prueba industrial FLOMIN D633.

Pese a que los últimos periodos analizados (del 8 al 16 de marzo) se obtuvo una similitud entre las leyes de Cu de NaHS y tioglicolato, en general, existe una diferencia significativa de 1,4 puntos entre la media total de NaHS con la dosis de 250 [g/TMS] de depresante alternativo, donde el valor de la probabilidad bilateral de 2×10^{-3} , el cual es menor al intervalo de confianza utilizado. Por lo tanto, la menor dosis de tioglicolato disminuye la ley de cobre en el concentrado final en relación a utilizar una dosis de 420 [g/TMS].

4.1.4 POTENCIAL ESPECIFICO ROUGHER

a. Potencial Rougher 500

En general, el potencial específico del primer banco del Rougher 500 tiene una media de -263 [mV], el electrodo que se usa es de oro y la referencia de Ag,Ag/Cl, al utilizar una dosis de 420 [g/TMS] del reactivo FLOMIN D633 y una media de -270 [mV] con la dosis final correspondiente a 250 [g/TMS], donde el rango general va entre los -250 a los -280 [mV]. El potencial para los periodos con NaHS es más negativo como indica la Figura 4-5, con una media de -289 [mV].

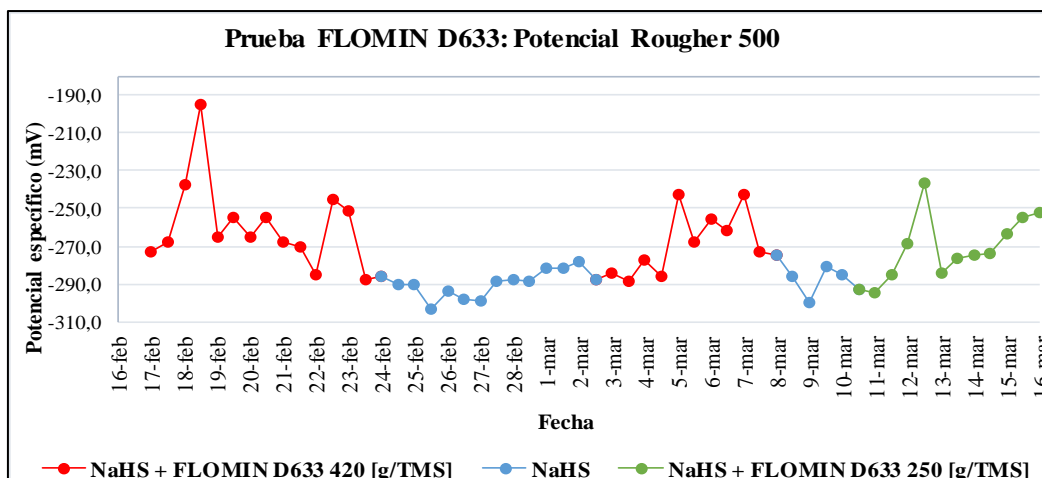


Figura 4-5. Potencial específico Rougher 500 durante prueba industrial FLOMIN D633.

Desde el punto de vista estadístico, las medias se diferencian en aproximadamente 25 [mV] para ambas dosis de tioglicolato en relación a los periodos con solo NaHS como depresante, debido a que la probabilidad bilateral es menor al intervalo de confianza aplicado. Esto indica un cambio en la operación con respecto al potencial al reemplazar el 30 % del NaHS en la preparación de reactivo con ambas dosis de FLOMIN D633.

b. Potencial Rougher 300

El potencial para las celdas del Rougher 300 presenta un comportamiento diferente a lo que se observó en el Rougher 500 como lo muestra la Figura 4-6. El potencial tuvo una tendencia a ser más positivo durante la primera prueba industrial desde un valor cercano a los -300 [mV] hasta los -250 [mV] producto de una disminución en el flujo de depresante del primer banco del Rougher 300. Sin embargo, para el primer periodo con solo NaHS, el potencial alcanzó un promedio de -262 [mV], el cual se encuentra bajo en casi 40 [mV] con el potencial normal de operación (-300 mV). Esto se debe a un menor porcentaje de sólidos que tratan estas celdas comparación al Rougher 500, por lo tanto, menor es la recuperación de agua y el arrastre (en base a la medición de sólidos realizada en las colas de flotación).

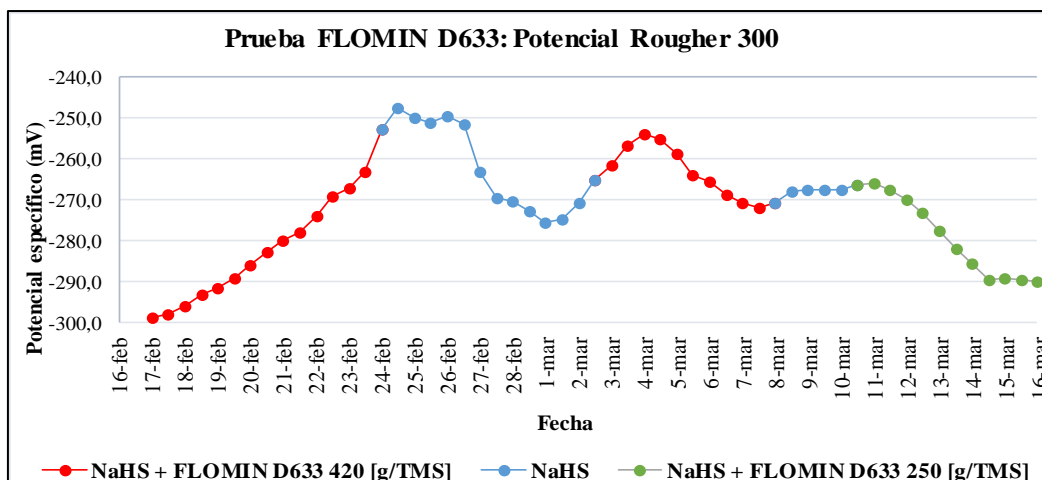


Figura 4-6. Potencial específico Rougher 300 durante prueba industrial FLOMIN D633.

Con respecto al último periodo con tioglicolato de sodio (250 g/TMS), la media del potencial fue de -281 [mV] con un rango de -270 a -290 [mV]. Estos valores se asemejan a las condiciones de operación normales al utilizar solo NaHS como depresante.

4.1.5 EMISIONES GAS SULFÚDRICO

El registro de emisiones fue realizado por el personal de Higiene Industrial mediante la instalación de sensores de gas sulfúdrico. Se presenta a continuación la gráfica de emisiones (Figura 4-7) durante los cinco periodos de análisis para el sector de lavador de gases ubicado al costado del TK preparador en la Planta de Reactivos, puesto que es el punto más representativo respecto a las mediciones detectadas.

La reducción de emisiones de gas sulfúdrico se encuentra un intervalo de un 20 % hasta un 60 % al utilizar el reactivo FLOMIN D633, donde el valor promedio de las emisiones es menor en un 54,3 % en comparación a los periodos donde solo se utilizó NaHS como depresante.

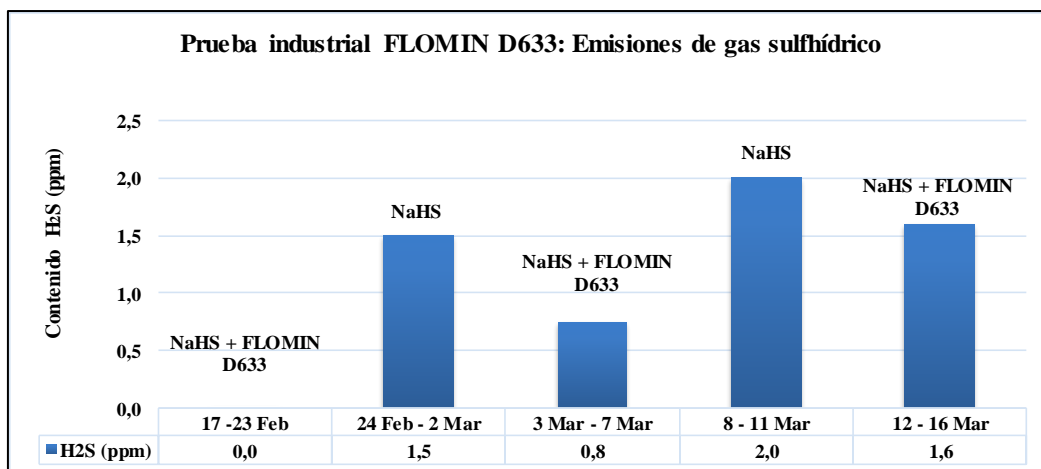


Figura 4-7. Mediciones de gas H₂S durante prueba industrial FLOMIN D633.

4.1.6 SULFUROS EN EFLUENTES

La Figura 4-8 muestra los datos entregados por la empresa NALCO (empresa encargada de la Planta de Efluentes durante el año 2015) correspondientes a las mediciones de sulfuros en ppm en Espesador 1 y 2 (Colas de flotación Rougher), Decantador 3 (entrada a Planta de Efluentes) y Filtros.

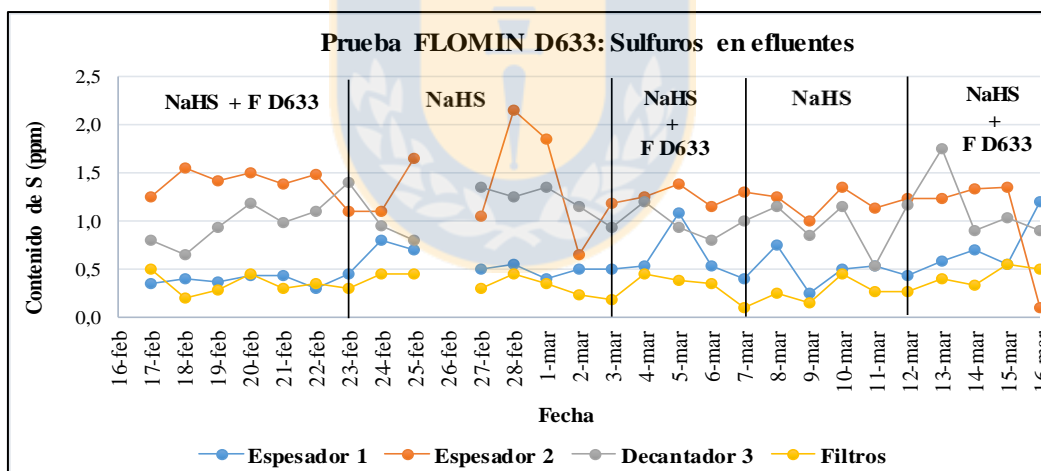


Figura 4-8. Mediciones de sulfuros en efluentes durante prueba industrial FLOMIN D633.

La cantidad de sulfuros disminuye al utilizar el reactivo FLOMIN D633 en los puntos: Espesador 1, Espesador 2 y Decantador 3 en un promedio de 1,9 %, 6,5 % y 1 % respectivamente en comparación a los periodos donde se utilizó solo NaHS. En tanto a los Filtros, el contenido aumento en un promedio de 5,7 % al utilizar el reactivo alternativo. Por lo tanto, se determinó que la mezcla FLOMIN D633 – NaHS logro disminuir las emisiones de Sulfuros en la Planta de Efluentes.

4.2 PRUEBA INDUSTRIAL BK-511

4.2.1 CONSUMO DE REACTIVOS

A solicitud del personal técnico de BGRIMM, se aumentó la dosis de BK-511 en relación al determinado por el laboratorio metalúrgico que correspondía a 250 [g/TMS]. Esto fue producto de una alta demanda de la mezcla depresante que era suministrada a la planta de flotación durante el inicio del primer periodo de prueba, para estabilizar el circuito. Por lo tanto, se aumentó el tiempo de operación de la bomba peristáltica que adiciona el depresante alternativo al TK preparador de 120 a 160 [l] por preparación, alcanzando una dosis promedio de 390 [g/TMS] de BK-511 y disminuyendo el flujo de depresante total.

En lo que respecta al NaHS, el consumo promedio fue de 2,6 [kg/TMS] al utilizar el depresante BK-511, lo que significa una disminución del 42,2 % con respecto al IP de NaHS estimado para el año 2016 (4,5 kg/TMS) y 35 % de ahorro en relación a los dos periodos sin depresante alternativo (4 kg/TMS).

Como se detalla en la Figura 4-9, el menor consumo de NaHS fue en el segundo periodo de prueba donde este fue de 2,4 [kg/TMS] de NaHS, lo que representa un ahorro máximo del 46,7 % en relación al IP para el año 2016 y un 41,5 % en comparación al periodo con mayor consumo de NaHS de la prueba industrial (4,1 kg/TMS).

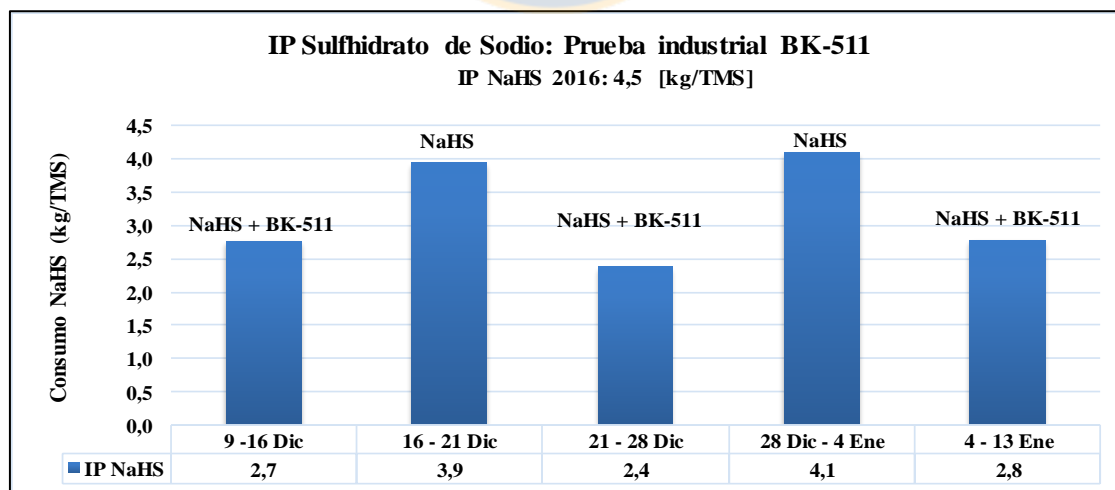


Figura 4-9. Indicador de consumo (IP) de NaHS en periodo de evaluación BK-511.

4.2.2 RECUPERACIÓN METALÚRGICA DE MOLIBDENO

La recuperación promedio de Mo durante el primer y segundo periodo con el reactivo BK-511 fue de un 90 % y 91,1 %. Sin embargo, el tercer periodo alcanzó un promedio del 83 % con un mínimo de recuperación de 35,8 % de Mo (figura 4-10) producto de una disminución en el flujo másico que recibe la planta (detención de molino SAG en Planta Concentradora), influyo también una disminución del perfil granulométrico. Para los periodos donde se utilizó solo NaHS como depresante, la recuperación promedio fue aproximadamente un 92 % para ambos.

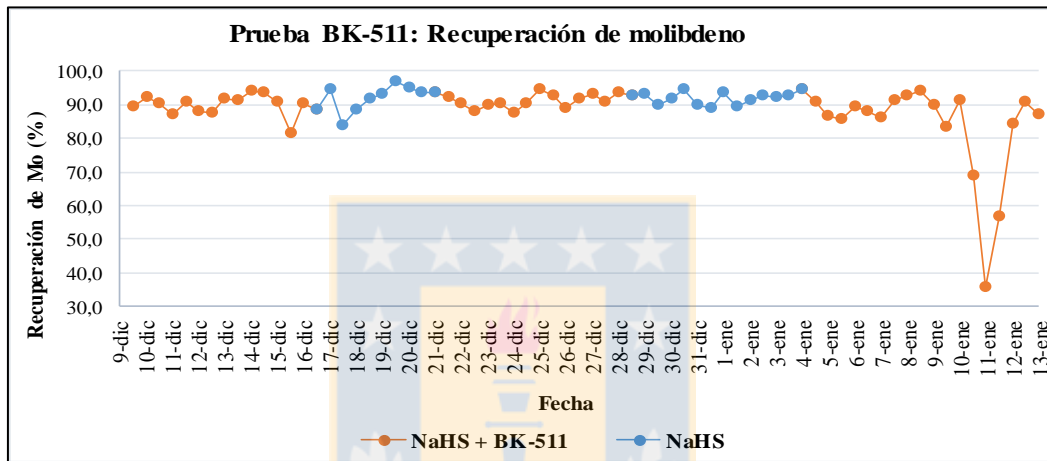


Figura 4-10. Recuperación de molibdeno durante prueba industrial BK-511.

Tomando en cuenta los dos primeros periodos de prueba con BK-511 (más estables), la recuperación de Mo fue de un 90,5 %. Esto representa una diferencia de 1,4 puntos con respecto a la recuperación al utilizar solo NaHS, lo que no presenta una significancia estadística (p -valor = 0,07).

En base a lo anterior, el reactivo BK-511 no modifica los resultados de recuperación metalúrgica significativamente.

4.2.3 CALIDAD DEL CONCENTRADO FINAL

a. Ley de molibdeno

La media en la ley de Mo para la primera, segunda y tercera prueba industrial con el reactivo BK-511 fue de un 45,2 %, 46,3 % y 47,7 % respectivamente. En relación a los periodos con solo NaHS, la media fue de un 48,3 % para el primer periodo y de un 45,6 % para el segundo.

Analizando en general la data de la Figura 4-11, la media del grupo que corresponde a las pruebas industriales fue de un 46,5 %. La diferencia con respecto a la media general con solo NaHS es de 0,2 puntos (46,7 %) sin representar una diferencia estadística dado que la probabilidad bilateral es de 0,7. Por lo tanto, no existe variabilidad en la ley de Mo en el concentrado final al utilizar el depresante alternativo BK-511.

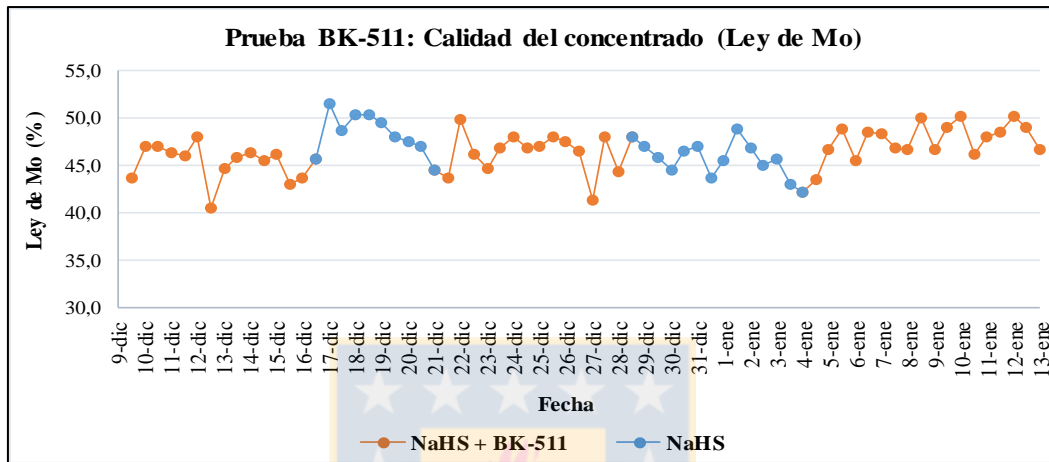


Figura 4-11. Ley de molibdeno en el concentrado final durante prueba industrial BK-511.

b. Ley de cobre

La media de la ley de Cu en la primera y segunda prueba con BK-511 fue de un 4,1 % para ambos, mientras que la tercera prueba disminuyó la media a un valor de 3,5 %. Con respecto a los dos periodos con solo NaHS, este alcanzó un valor de un 3,4 % para el primero y de un 4,1 % en el segundo.

Existe una diferencia estadística significativa de 0,7 puntos entre las dos primeras pruebas con el depresante BK-511 y el primer periodo con solo NaHS donde la probabilidad bilateral de las pruebas t obtuvo un valor menor al intervalo de confianza (obtenidas de la Figura 4-12). Pese a lo anterior, al analizar la data durante todas las pruebas, la media fue de un 3,9 % mientras que para las dos etapas con solo NaHS fue de un 3,8 %. Esta diferencia de 0,1 punto no tiene relevancia estadística debido a que la probabilidad bilateral de la prueba t tiene un valor de 0,6, por lo tanto, el depresante alternativo no modificó la calidad del concentrado.

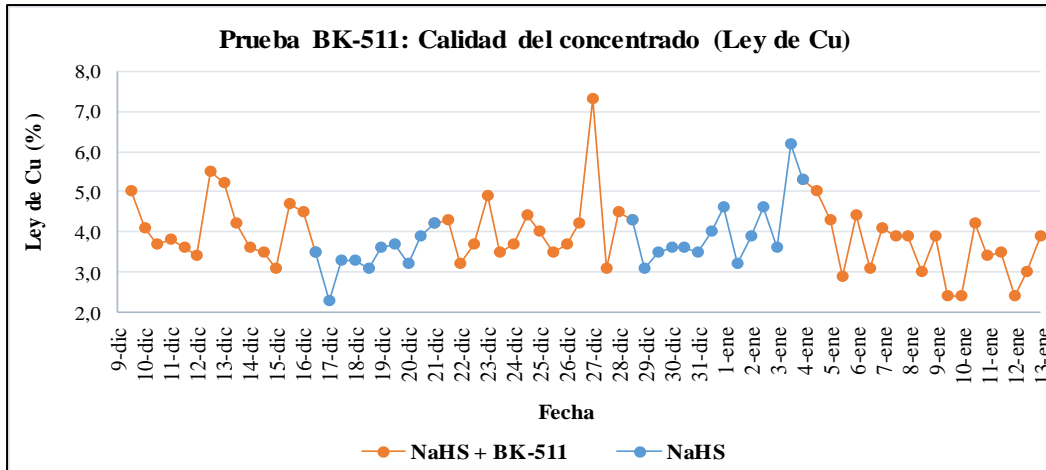


Figura 4-12. Ley de cobre en el concentrado final durante prueba industrial BK-511.

4.2.4 POTENCIAL ESPECIFICO ROUGHER

a. Potencial Rougher 500

Es evidente la tendencia a obtener potenciales más positivos al utilizar el reactivo BK-511 al reemplazar el 50 % del NaHS en la preparación de depresante como se muestra en la Figura 4-13, donde el rango se encuentra entre los -140 a los -270 [mV] con una media de -207 [mV] aproximadamente para los tres periodos. Esto representa alrededor de 100 [mV] de diferencia en relación al potencial de operación normal (-300 mV).

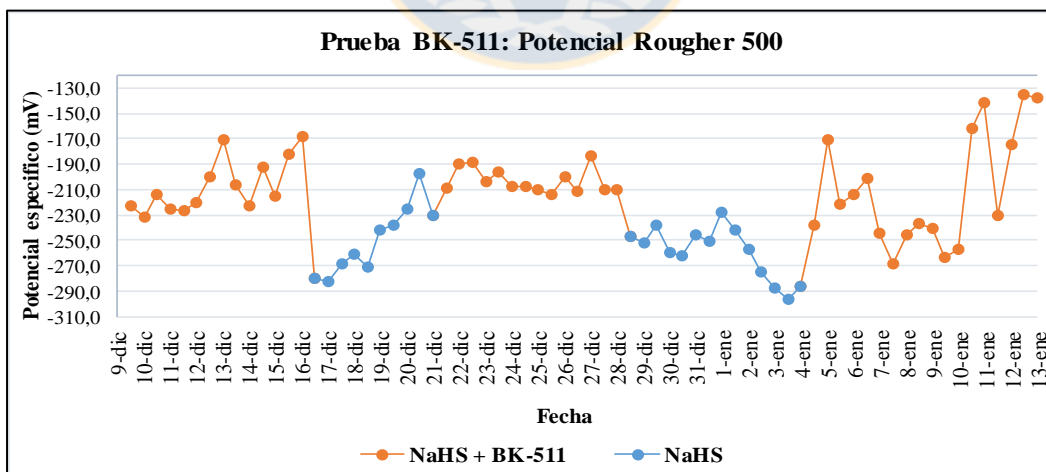


Figura 4-13. Potencial específico Rougher 500 durante prueba industrial BK-511.

Con respecto a los días de operación con solo NaHS, se tuvo una media total de -255 [mV] entre un rango de -200 hasta los -290 [mV]. El mínimo valor fue alcanzado durante la primera etapa (entre el 20 y 21 de diciembre) donde las condiciones del concentrado mixto y el porcentaje de sólido en las celdas del Rougher 500 fueron normales.

b. Potencial Rougher 300

El potencial del Rougher 300 alcanzó una media de -252 [mV] al utilizar el reactivo BK-511 con un intervalo desde los -220 hasta un máximo de -300 [mV]. Durante el último periodo se alcanzó un valor mínimo de -160 [mV] (figura 4-14), el cual no es tomado en cuenta debido a que durante el 10 y 11 de diciembre hubo una disminución en el tonelaje que alimenta a la planta.

La diferencia entre las medias del potencial Rougher 300 y 500 durante las pruebas industriales fue de 45 [mV], lo que indica una clara diferencia de operación entre ambas celdas. Esto es debido a problemas en el sellado de las celdas del Rougher 500 que provocan un aumento de oxígeno en el gas enrarecido aumentado la oxidación del NaHS. Lo descrito anteriormente fue respaldado en base a mediciones de oxígeno en el interior de las celdas Rougher, donde se detectó una oscilación en la concentración que va desde el 3 % hasta un 21 %, predominantemente en el Rougher 500.

Para los periodos con solo NaHS, se alcanzó una media de -300 [mV] para la primera etapa y de -254 [mV] para la segunda. Esto significa una diferencia aproximadamente entre 100 a 50 [mV] más negativo para el Rougher 300 que el 500, por lo tanto, la forma de operar entre ambas celdas es significativamente diferente pese a utilizar BK-511.

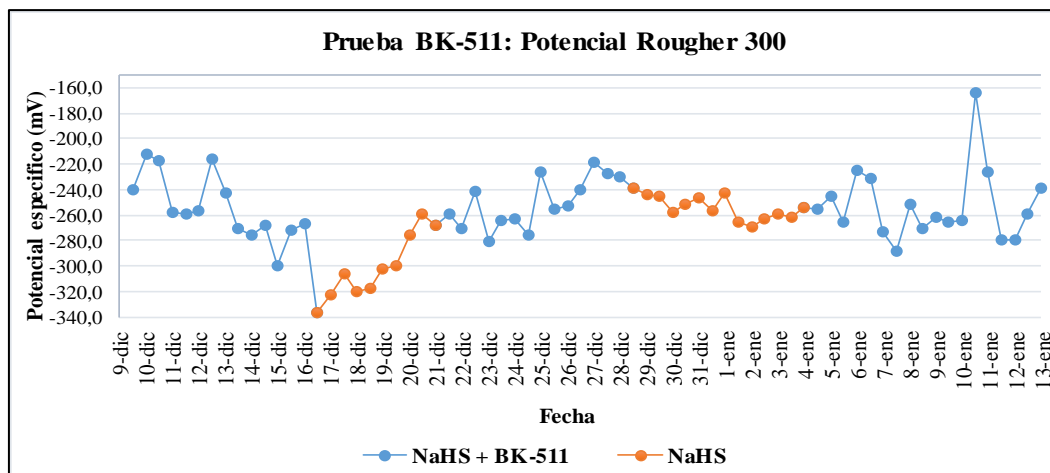


Figura 4-14. Potencial específico Rougher 300 durante prueba industrial BK-511.

4.2.5 EMISIONES GAS SULFÚDRICO

De la misma forma que en el periodo de prueba con el reactivo FLOMIN D633, el personal de Higiene Industrial estuvo encargada de la instalación de sensores de gas sulfhídrico para la prueba con el reactivo BK-511.

En base a los resultados (Tabla 4-1), se observó que durante los períodos de prueba industrial con el reactivo BK-511, no se detectaron emisiones gas sulfhídrico. Solo se registraron emisiones durante el cuarto periodo de análisis donde se utilizó solo NaHS en columnas de limpieza de la Planta de Flotación Selectiva de Molibdeno, el cual marco una concentración promedio de 0,3 [ppm] y un máximo de 9 [ppm] de gas sulfhídrico (exceso de NaHS).

Tabla 4-1. Mediciones de gas H₂S durante prueba industrial BK-511.

Fecha Medición	Equipo Serie	Punto de Medición	Hora de instalación	Hora de retiro	Promedio H ₂ S (PPM)	Medición Máxima (PPM y Hora)
Viernes 11 Dic.	4822	Cola Rougher	6:12	11:13	0 PPM	
	3932	Lavado de Gases	6:00	11:02	0 PPM	
	4397	Columna de Limpieza	6:10	11:11	0 PPM	
	3856	Pasillo Rougher 300 y 500	6:05	11:04	0 PPM	
	2879	Adicion Reactivo	6:18	11:17	0 PPM	
Jueves 17 Dic.	4822	Pasillo Rougher 300 y 500	9:05	15:06	0 PPM	
	4397	Adicion Reactivo	9:25	15:28	0 PPM	
	4683	Bodega de Concentrado	9:20	15:20	0 PPM	
	3856	Cola Rougher	9:13	15:18	0 PPM	
	2879	Columna de Limpieza	9:10	15:11	0 PPM	
Lunes 21 Dic.	3932	Lavado de Gases	9:01	15:01	0 PPM	
	4822	Lavado de Gases	9:00	15:40	0 PPM	
	2879	Pasillo Rougher 300 y 500	9:06	15:45	0 PPM	
	3932	Columna de Limpieza	9:08	15:48	0,3 PPM	9 PPM 11:29:30
	4683	Cola Rougher	9:10	15:50	0 PPM	
	3856	Bodega de Concentrado	9:18	15:58	0 PPM	
Lunes 28 Dic.	4397	Adicion Reactivo	9:20	16:02	0 PPM	
	4822	Lavado de Gases	9:06	15:40	0 PPM	
	2879	Pasillo Rougher 300 y 500	9:13	15:46	0 PPM	
	4683	Columna de Limpieza	9:16	15:48	0 PPM	
	4397	Cola Rougher	9:18	15:50	0 PPM	
	2879	Bodega de Concentrado	9:26	15:55	0 PPM	
	3932	Adicion Reactivo	9:30	15:59	0 PPM	

4.2.6 SULFUROS EN EFLUENTES

Las mediciones de sulfuros fueron realizadas por la empresa contratista Steel Ferroviario durante la prueba industrial del reactivo BK-511 (Figura 4-15). Nota: Existieron periodos donde no se registraron correctamente la emisión de sulfuros.

Los tres periodos de prueba industrial con el reactivo BK-511 demostraron disminuir la emisión de azufre en comparación a los periodos con solo NaHS, en un promedio de un 54,4 %, 13,6 %, 15,7 % y 16,7 % respectivamente a los puntos de medición: Espesador 1, Espesador 2, Decantador 3 y Filtros.

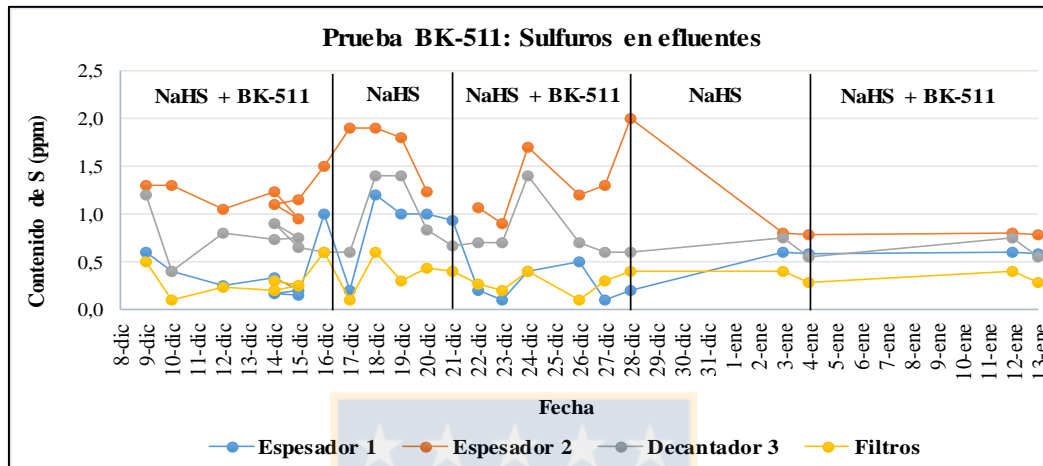


Figura 4-15. Mediciones de sulfuros en efluentes durante prueba industrial BK-511.

4.3 CONSIDERACIONES ECONÓMICAS

La evaluación económica se realizó en base a la comparación de los consumos de depresantes obtenidos en las pruebas industriales.

El costo proyectado fue estimado en base al tonelaje planificado para el año 2016 (P0), correspondiente a 810.870 toneladas métricas secas de concentrado mixto Cu – Mo.

Los costos de los reactivos en la evaluación son indicados en la Tabla 4-2 y fueron obtenidos del presupuesto de reactivos del año 2016 para la Superintendencia Planta de Molibdeno y Filtrado de Cobre.

Tabla 4-2. Costos de reactivos depresantes en la Planta de Flotación Selectiva de Molibdeno Codelco División Andina.

Reactivos depresantes	Costo (US\$/kg)
NaHS	1,05
FLOMIN D633	1,99
BK-511	2,49

Considerando únicamente el último periodo con el reactivo FLOMIN D633 (solo este genera beneficio económico), donde el consumo de NaHS fue de 3,5 [kg/TMS], el costo alcanzó un valor de KUS\$ 3.383 (Tabla 4-3). Esto significa un ahorro de US\$ 448.000 (11,7 % de ahorro en costo de depresante) en comparación al costo anual de NaHS para el año 2016: KUS\$ 3.831 (4,5 kg/TMS) y de US\$ 534.000 con respecto al mayor consumo de NaHS dentro del periodo de análisis.

Con respecto al costo promedio de NaHS sin utilizar el reactivo alternativo, este alcanzó un valor de KUS\$ 3.704, lo que significa una diferencia de US\$ 320.293 en relación al consumo obtenido en la última prueba con el depresante FLOMIN D633.

Tabla 4-3. Costo proyectado anual (año 2016) de reactivo depresante FLOMIN D633, Planta de Molibdeno y Filtrado de Cobre Codelco División Andina.

Periodo	IP [kg/TMS]		Costo anual - 2016 (KUS\$)
	NaHS	FLOMIN D633	
17 - 23 de febrero de 2016	3,9	0,42	3.998
24 de febrero – 2 de marzo de 2016	4,6	0	3.917
3 – 7 de marzo de 2016	4,2	0,42	4.254
8 – 11 de marzo de 2016	4,1	0	3.490
12 - 16 de marzo de 2016	3,5	0,25	3.383

En base a los consumos obtenidos durante la prueba industrial con el reactivo BK-511, se genera un mínimo gasto de KUS\$ 2.831 con una dosis de 2,4 [kg/TMS] de NaHS y 390 [g/TMS] de depresante alternativo (Tabla 4-4). Esta cifra equivale a un ahorro de MUS\$ 1 en relación al consumo de NaHS estimado para la planta para el año 2016 (26,1 % en disminución de los costos de depresante) y de US\$ 607.000 en relación al mayor consumo de NaHS dentro del periodo de estudio (4,1 kg/TMS).

Analizando el costo promedio, este alcanzó un valor de KUS\$ 3.029 entre los tres periodos con el reactivo BK-511 que considera un ahorro de US\$ 812.000 en comparación al costo de depresante anual y de US\$ 376.000 en base a los consumos de NaHS sin reactivo alternativo.

Sumado a lo anterior, el consumo de NaHS en los periodos sin BK-511, alcanzó un valor promedio de 4 [kg/TMS], lo que demuestra que la planta puede reducir el consumo a dicha cifra para así reducir los costos en US\$ 426.000 sin la necesidad de utilizar un depresante alternativo.

Tabla 4-4. Costo proyectado anual (año 2016) de reactivo depresante BK-511, Planta de Molibdeno y Filtrado de Cobre Codelco División Andina.

Periodo	IP [kg/TMS]		Costo anual - 2016 (KUS\$)
	NaHS	BK 511	
9 - 16 de diciembre de 2015	2,7	0,39	3.086
16 - 21 de diciembre de 2015	3,9	0	3.321
21 - 28 de diciembre de 2015	2,4	0,39	2.831
28 de diciembre de 2015 – 4 de enero de 2016	4,1	0	3.491
4 – 13 de enero de 2016	2,8	0,39	3.171



CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES

En base a los resultados más relevantes de la evaluación industrial realizado a los depresantes alternativos y objetivos planteados, se concluye lo siguiente:

El reactivo FLOMIN D633 al ser utilizado en una dosis de 420 [g/TMS] por el periodo establecido en el diseño experimental no modifica de forma significativa la recuperación metalúrgica de molibdeno y la calidad del concentrado final. Pese a lo anterior, en la dosis utilizada, no genera beneficio económico dado los altos consumos de NaHS, inclusive alcanzado costos mayores en un 2,4 % en relación a los periodos sin tioglicolato. Al reducir la dosis de tioglicolato a 250 [g/TMS] se disminuyó el consumo de NaHS a 3,5 [kg/TMS], lo que representa una disminución máxima del 23,9 % durante la etapa industrial y de un 22,2 % con respecto al IP de la planta (4,5 kg/TMS). Sin embargo, la recuperación de Mo disminuye en 5,8 puntos, por lo tanto, se concluye que no es factible utilizar el reactivo FLOMIN D633 a las dosis probadas en planta.

Para los periodos con BK-511 donde el consumo fue de 390 [g/TMS], el consumo de NaHS alcanzó un mínimo de 2,4 [kg/TMS], lo que significa una disminución del 46,7 % con respecto al IP planificado, mientras que la media durante los tres periodos de prueba fue de 2,6 [kg/TMS]. La recuperación metalúrgica no fue alterada en gran magnitud obtenido valores superiores al 90 % al igual que en los periodos con solo NaHS. La ley de molibdeno en el concentrado final alcanzó un promedio de un 46,7 % al utilizar BK-511, mientras que las etapas con NaHS fue de un 46,5 %. Esta diferencia de 0,2 puntos no representa una relevancia estadística dado que la prueba t entre ambas muestras indica una probabilidad bilateral mayor al intervalo de confianza escogido (95 %). Lo mismo ocurre con la ley de Cu donde la diferencia es de 0,1 puntos entre ambas medias (3,9 % para el reactivo BK-511 y 3,8 % con solo NaHS). Por lo tanto, este depresante alternativo cumple con la hipótesis planteada, ya que reduce el consumo de NaHS sin modificar los resultados metalúrgicos.

En relación al registro de emisiones de gases tipo sulfhídrico, se determinó que al utilizar el reactivo BK-511 se reducen totalmente las emisiones, mientras que el reactivo FLOMIN D633, las emisiones se reducen en un promedio del 54,3 % en el punto de medición escogido: Planta de Reactivos.

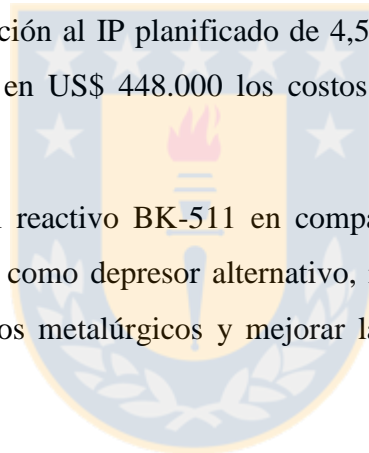
Para el contenido de sulfuros en los efluentes de la planta, hay una mayor efectividad con el reactivo BK-511, ya que reduce la concentración en un intervalo del 13,6 % al 54,4 %. En relación al depresante FLOMIN D633, la reducción es prácticamente mínima con un intervalo del 1 % al 6,5 %.

En base a lo anterior, se ven favorecidas las condiciones ambientales al utilizar el reactivo BK-511 que con tioglicolato de sodio, gracias a un mayor reemplazo de NaHS.

Con respecto a la operación, el potencial Rougher cambia considerablemente al utilizar el reactivo BK-511. Este se encuentra en un rango de -140 a -300 [mV] donde la media para el Rougher 500 es de -207 [mV] y de -252 [mV] para el Rougher 300. Esta diferencia es de 45 unidades y significa una variabilidad operacional relevante entre ambas celdas producto de un aumento en la concentración de oxígeno en el gas enrarecido del Rougher 500 (fisuras en celdas) que reduce la concentración de NaHS en la pulpa. En cambio, al usar el depresante FLOMIN D633, el potencial específico está en un rango de -250 a -300 [mV], el cual se asemeja al potencial de operación estándar de la planta con solo NaHS (-270 a -320 mV).

Por último, las consideraciones económicas para el año 2016 con el reactivo BK-511 entrega una disminución de MUS\$ 1 en relación al IP planificado de 4,5 [kg/TMS] de NaHS, mientras que el reactivo FLOMIN D633 reduce en US\$ 448.000 los costos de operación con una dosis de 250 [g/TMS].

Por lo tanto, se concluye que el reactivo BK-511 en comparación al FLOMIN D633, se puede incorporar al proceso productivo como depresor alternativo, reemplazando parcialmente al NaHS. Este logra mantener los resultados metalúrgicos y mejorar las condiciones medioambientales del medio en que se utiliza.



CAPÍTULO 6: RECOMENDACIONES

No se recomienda el uso del reactivo FLOMIN D633 en una dosis de 250 [g/TMS] debido a que disminuye la recuperación metalúrgica de Mo por debajo del estándar de planta (88,7 %) en un promedio de 4,1 puntos, pese a que genera un ahorro anual económico del 11,7 %. En esta condición se puede analizar el comportamiento en un circuito de mayor capacidad en las etapas de limpieza. Al aumentar la dosis, se mejoran los resultados metalúrgicos, pero se encarece la operación por sobre operar solo con NaHS.

Con respecto al depresante BK-511, se recomienda utilizarlo en una dosis de 390 [g/TMS] para reemplazar en un 50 % el NaHS en la preparación de depresante, dado que logra la calidad del concentrado final y la recuperación metalúrgica esperada.

Par lograr disminuir aún más el consumo de NaHS, mejorar los resultados metalúrgicos y reducir la variabilidad en relación al potencial específico de flotación Rougher, se aconseja mejorar el sellado de las celdas del circuito Rougher o utilizar nitrógeno como gas de flotación.

Finalmente, se recomienda la difusión del reactivo BK-511 para generar un desarrollo en las otras divisiones de Codelco, donde el uso de NaHS presenta altos consumos y poder así, contribuir en el plan de contingencia de costos de la empresa.

REFERENCIAS

- Arenas, J. G., 2007. *Aplicaciones de nitrógeno como gas de flotación*. Perú: Tecsup.
- Castro, S., 2006. *Flotación: Fundamentos y aplicaciones*.. Concepción: Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Metalurgia. .
- Fuerstenau, D. & Chander, S., 1972. *On the natural floatability of molybdenite*. s.l.:Transactions SME.
- J. Dávila, R. Llerena, N. Benavides, C. Curo, 2011. *NaHS en la optimización de la flotación de cobre, Concentradora Cuajone*. Perú: Congreso de Minas.
- López, A. & Reyes, J., 2005. *Flotación de calcopirita, pirita y molibdenita en minerales de cobre tipo pórfidos*.. Chillan: X Simposio sobre procesamiento de minerales.
- Montgomery, D. C., 2004. *Diseño y Análisis de experimentos*. Arizona: Limusa Wiley.
- Ortega, M., 2005. *Efectos de los iones calcio, pH, tamaño de partícula y colectores no polares en flotabilidad de la molibdenita*.. San Luis, Mexico. : Tesis de Maestría en Ingeniería de Minerales. Instituto de Metalurgia, Facultad de Ingeniería, UASLP..
- Qi, L., 1985. *Studies on the flotation depression of chalcopyrite, galena and sphalerite of thioglycolic acid*. s.l.:The University of British Columbia.
- Raghavan, S., 1983. *Interaction of thioglycolic acid with chalcocite*. Trans.: IMM.
- Raghavan, S. & Hsu, L. L., 1984. *Factors affecting the flotation recovery of molybdenite from porphyry copper ores*. Tucson (U.S.A.): International Journal of Mineral Processing.
- SGS, 2015 - 2016. *Estudio Mineralógica de Alta Definición*, Saladillo: Codelco División Andina.
- Shuhua, D. & Zhenfu, L., 2013. *Flotation technology of refractory low-grade molybdenum ore*. China: International Journal of Mining Science and Technology.
- Sutulov, A., 1979. *Flotation of Molibdenite. International Molybdenum Enciclopedia*. s.l.:Internet Publications: 164-179.

Takeo, N., 2005. *Atlas of Eh-pH diagrams: Intercomparison of thermodynamic databases*. Tokyo: National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Research Center for Deep Geological Environments.

Tobar, H., 2016. *Informe: Prueba industrial de reactivo depresor de cobre en flotación*. Saladillo : Codelco División Andina.

Turcios, R. A. S., 2015. t-student: Usos y abusos. 26(1).

Wark, I. & Cox, A., 1934. *Principles of flotation: I-an experimental study of the effect of xanthates on contact angles at mineral surfaces*. s.l.:Trans. AIME..

Yianatos, J., 2005. *Flotación de Minerales*. s.l.:Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento de Procesos Químicos, Biotecnológicos y Ambientales..



ANEXOS

2.10 ANEXO A: HOJA DE SEGURIDAD FLOMIN D633

FLOMIN D 633 REACTIVOS

Sector 2: Datos relativos al Riesgo "INFORMACION DE PROVEEDOR"

UN 1760

Sector 1: Encabezamiento		Teléfonos de emergencia	
Fabricante / proveedor : Flomin Inc.		Fabricante/proveedor : +1-703-527-3887 CHEMTREC (Todo el mundo)	
Sector 3: Nombre Químico		Sector 4: Descripción general	
Nombre comercial : Flomin D 633 Reactivos		Estado físico : Líquido	
Nombre Según NCh.382 : Líquido corrosivo, N.E.P.		Color : Naranja	
Fórmula química : Mezcla		Apariencia : Líquido transparente color naranja	
Número CAS : No disponible		Olor : Olor ligero	
		pH : >12.5	
		T° inflamación : >93°C (>200°F), TAG CC	
Sector 5: Naturaleza del riesgo			
Riesgos a la salud de las personas			
Absorción	Piel: Puede causar irritación. Puede causar dolor, comezón, descoloración, hinchazón, ampollas y quemaduras. Ojos: Puede causar irritación. Puede causar lagrimeo, enrojecimiento, hinchazón, visión borrosa y lesiones en la córnea.		
Inhalación	: La inhalación prolongada de los vapores y neblinas puede ser irritante al sistema respiratorio. Los efectos en el sistema nervioso central pueden incluir dolores de cabeza, debilidad, mareos, tos, náusea y vómito. El contacto con ácidos o el calentamiento excesivo puede liberar gas de sulfuro de hidrógeno venenoso y flamable. El sulfuro de hidrógeno tiene el olor característico del huevo podrido. El nivel de exposición (8 horas) TWA para el sulfuro de hidrógeno es 10 ppm. El nivel de exposición IDLH para el sulfuro de hidrógeno es 100 ppm.		
Ingestión	: La ingestión puede causar irritación o quemaduras en la boca, garganta, esófago y estómago. Los efectos en el sistema nervioso central pueden incluir dolores de cabeza, debilidad y náusea.		
Riesgos medio ambiente y otros riesgos			
Inestabilidad	: Desde el punto de vista químico: Estable bajo condiciones normales. No ocurrirá polimerización riesgosa. Evitar altas temperaturas y fuentes de ignición. Evitar los ácidos fuertes y agentes oxidantes. Almacenar en recipientes cerrados en un área fresca, lejos de fuentes de calor o de ignición. Se deben tomar precauciones para evitar descargas de electricidad estática. Almacene este producto en recipientes de acero inoxidable, polietileno o polipropileno. Desde el punto de vista ecológico: No disponible.		
Degradabilidad	: No disponible		Bioacumulación : No disponible
Sector 6: Elementos de protección personal			
Elementos de Protección personal básicos		Específico en condición normal	Específico en condición especial
ELEMENTOS DE PROTECCIÓN PERSONAL BÁSICOS		NEOPRENO (polivinilo, goma butílica o nitrilo)	CARETA FACIAL QUÍMICOS VAPORES (cuando exista la posibilidad de exposición considerable)
Equipamiento mínimo de control			
: En caso de derrame usar equipo completo de protección para ojos, cuerpo y sistema respiratorio. En caso de incendio usar respirador aprobado por NIOSH de presión positiva auto contenido. Utilizar equipo completo de protección para cuerpo y ojos.			
Sector 7: Medidas de primeros auxilios			
Absorción	Piel: Quite la ropa mojada de inmediato y lave la piel afectada con agua y jabón. Obtenga tratamiento médico para las quemaduras y la irritación persistente. Lave la ropa contaminada antes de volverla a usar. Solicite atención médica. Ojos: Enjuague con agua abundante al menos durante 15 minutos y consulte a un médico. Mantenga los ojos bien abiertos mientras enjuaga y levante los párpados superior e inferior para asegurar la remoción total de la sustancia química. Solicite atención médica.		
Inhalación	: Mueva al aire libre de inmediato. Si es necesario administre oxígeno. Si persisten los síntomas busque atención médica.		
Ingestión	: No induzca el vómito. Llame a un médico de inmediato.		
Sector 8: Medios y medidas para combatir el fuego			
Medios de extinción : Usar rocío de agua, dióxido de carbono o producto químico seco.			
Contraindicaciones : No disponible			
Sector 9: Medidas para el control de derrames o fugas			
Perímetros de seguridad : Ventile el área del derrame.			
Precauciones para el medio ambiente : Mantener material enjuagado lejos de las vías pluviales. Desechar el material de limpieza de forma aprobada.			
Métodos de limpieza : Hacer un dique alrededor del derrame y recoger para desechar o volver a utilizar. Usar materiales adsorbentes sobre el material residual. Enjuagar el área del derrame con agua.			

Figura 8-1. Hoja de seguridad de reactivo FLOMIN D633

2.11 ANEXO B: HOJA DE SEGURIDAD BK-511

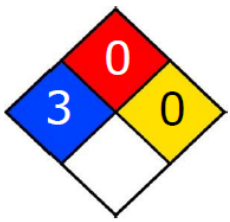








<h1>BK-511</h1>		Sector 2: Datos relativos al riesgo "INFORMACIÓN DE PROVEEDOR"	
			
Sector 1: Encabezamiento		Teléfonos de emergencia	
Fabricante /proveedor : Instituto de Investigación General de Minería y Metalurgia de Beijing		Fabricante/proveedor : (56)2-23353399	
Sector 3: Nombre Químico		Sector 4: Descripción general	
Nombre comercial : BK-511		Estado físico : Líquido	
Nombre Según Nch 382 : No aplicable		Color : Amarillo/Rojo	
Fórmula química : Mezcla		Apariencia : Líquido	
Número CAS : 7732-18-5		Olor : No disponible	
		pH : 8-9.	
		Tº inflamación : No disponible (No inflamable)	
Sector 5: Naturaleza del riesgo			
Riesgos a la salud de las personas			
Absorción	Piel: Según clasificación GHS, el mercaptoacetato de potasio es nocivo en contacto con la piel (Toxico agudo 4; H 312). Puede causar irritación a la piel y alergia. Ojos: Puede causar irritación a los ojos, enrojecimiento, lagrimeo y picazón, llegando a causar quemaduras a la córnea y causar ceguera permanente.		
Inhalación	: La exposición prolongada, puede causar mareos, dolor de cabeza y náuseas.		
Ingestión	: Según clasificación GHS, el mercaptoacetato de potasio es tóxico en caso de ingestión (Tóxico agudo 3; H 301). El producto puede ser nocivo en caso de ingestión. Puede causar irritación del tracto gastrointestinal con náuseas, vómitos, diarrea y/o coma.		
Riesgos medio ambiente y otros riesgos			
Inestabilidad	Desde el punto de vista químico: Estable en condiciones normales de almacenamiento, presión y temperatura. Según clasificación GHS, el mercaptoacetato de potasio, puede ser corrosivo para los metales (Corrosión de metales 1; H 290). Evitar calor, fuego, ácidos y agentes oxidantes. Incompatibilidad con oxígeno y agentes oxidantes fuertes tales como cloratos, nitratos, peróxidos, etc. Almacenar en un lugar seguro, fresco y seco, alejado del calor y que posea buena ventilación. No utilizar presión para vaciar el recipiente o forzar, se puede romper y generar explosión. Desde el punto de vista ecológico: No disponible. No es perjudicial para el medio ambiente. Este producto es de baja toxicidad. Mantener en lo posible lejos de pozos de agua y red de alcantarillado.		
Degradabilidad	: Se espera que sea biodegradable.		
		Bioacumulación : No se espera que sea bioacumulable	
Sector 6: Elementos de protección personal			
Específico en condición normal		Específico en condición especial	
 Respirador con filtro para orgánicos		 Antiparras	
 Nitrilo o vitón		 Ropa impermeable	
 Botas		 Usar equipo presión positiva, si existe el potencial de una liberación no controlada	
Equipamiento mínimo de control : En caso de derrame: Usar elementos de protección antes señalados. En caso de incendio: Usar equipo completo contra incendios (protección completa) y protección respiratoria (SCBA).			
Sector 7: Medidas de primeros auxilios			
Absorción	Piel: INMEDIATAMENTE: quitarse la ropa contaminada, lavar la zona afectada con agua durante 5 minutos. Si persisten los síntomas, solicitar atención médica. Ojos: INMEDIATAMENTE: mantener los párpados abiertos y lavar con agua por lo menos durante 15 minutos. Si persisten los síntomas, solicitar atención médica.		
Inhalación	: INMEDIATAMENTE: sacar al paciente al aire fresco, aflojar la ropa apretada y dejar reposar. Aplicar respiración artificial y masaje cardíaco externo si la respiración es difícil o el paciente está adquiriendo un color azul. Solicitar atención médica.		
Ingestión	: Solicite atención médica.		
Sector 8: Medios y medidas para combatir el fuego			
Medios de extinción : Elegir medios de extinción según incendio circundante.			
Contraindicaciones : No usar chorros de agua directamente.			
Sector 9: Medidas para el control de derrames o fugas			
Perímetros de seguridad : Aislar la zona; alejar del área de derrame a todas las personas desprotegidas. Ventilar el área.			
Precauciones para el medio ambiente : Evitar ingreso a cursos de agua natural, pozos de agua y red de alcantarillado. Si esto no fuera posible, entonces dar aviso inmediato a las autoridades competentes. Una pequeña fuga se puede eliminar con agua, para así diluir y eliminar por el sistema de aguas residuales. Derrame de pequeñas cantidades: cualquier material absorbente. Recoger en contenedores apropiados y debidamente etiquetados.			
Métodos de limpieza : Lavar el lugar del derrame con grandes cantidades de agua. Derrame de grandes cantidades: Área de dique para contener un derrame. Bombearlo a recipientes apropiados y debidamente etiquetados.			

Figura 8-2. Hoja de seguridad de reactivo BK-511.

2.12 ANEXO C: PREPARACIÓN DE MEZCLAS DEPRESANTES

El proceso de automatización de la preparación con el reactivo FLOMIN D633 inicio con la modificación de la lógica de control del TK preparador con el objetivo de realizar preparaciones de NaHS-FLOMIN en un volumen de 8.000 litros.

La primera dosis de FLOMIN D633 en la prueba industrial se realizó mediante la planificación de utilizar un IBC diario, el cual contiene 800 litros. Por lo tanto, para realizar 5 preparaciones diarias se utilizaron 160 litros por preparación. Sin embargo, esta dosis reflejo un consumo de 420 [g/TMS] de tioglicolato de sodio.

El recalcu (ecuación 8-1) de la adición de depresante alternativo se realizó en base al flujo másico promedio de concentrado mixto que recibe la planta correspondiente a 2.200 [TMS/día], la dosis de FLOMIN D633 planificado de 250 [g/TMS] y su densidad:

$$\text{FLOMIN D633} = 250 \left[\frac{\text{g}}{\text{TMS}} \right] * 2.200 \left[\frac{\text{TMS}}{\text{día}} \right] * \frac{1}{5} \left[\frac{\text{día}}{\text{preparaciones}} \right] * \frac{1}{1.250} \left[\frac{\text{l}}{\text{g}} \right] = 88 \left[\frac{\text{l}}{\text{preparacion}} \right] \quad (8-1)$$

Esta cantidad se aproximó en 100 litros y fue considerada como la dosificación final para el último periodo de prueba alcanzado un consumo de 250 [g/TMS] de tioglicolato de sodio.

En el caso con el reactivo BK-511, el consumo se mantuvo en 120 litros por preparación durante el primer día, el cual aumento en base a las recomendaciones del personal técnico de BGRIMM a 160 litros por preparación (390 g/TMS) con el objetivo de mejorar la estabilidad de la flotación.

2.13 ANEXO D: MEDICIÓN DE POTENCIAL ESPECIFICO PLANTA DE FLOTACIÓN SELECTIVA DE MOLIBDENO CODELCO DIVISIÓN ANDINA

La medición del potencial de la pulpa en el proceso de flotación selectiva de molibdeno de Codelco División Andina corresponde a la relación entre el potencial ORP y el pH de operación.

El cálculo se realiza mediante el cambio de pH a unidades de voltaje (milivots), donde la pendiente tiene un valor aproximado de 59 [mV/pH] (varía según la calibración). De esta forma se obtiene el valor de potencial de la concentración de H⁺ (ecuación 8-2):

$$(7 - \text{pH}) * 59 \left[\frac{\text{mV}}{\text{pH}} \right] = \text{Potencial H}^+ \quad (8-2)$$

Finalmente, el potencial específico es calculado mediante la resta eléctrica entre ambos potenciales (ecuación 8-3):

$$\text{Potencial Especifico} = \text{Potencial ORP} - \text{Potencial H}^+ \quad (8-3)$$

Como se mencionó en los antecedentes del proceso de flotación de División Andina, el pH de la operación Rougher de la Planta de Molibdeno va de un rango de 11,5 a 10,5, dependiendo si se esté utilizando el control de pH con CO₂.

Con estos parámetros de operación más el potencial ORP de la pulpa, el potencial específico medido en la planta mantiene un rango entre los -270 a -320 [mV] al utilizar NaHS como depresante, eliminando la variable de la concentración de H⁺.

A continuación, se describen los equipos instalados en la Planta de Flotación Selectiva de Molibdeno de Codelco Andina.

- a. **Medidor de ORP:** El sensor de potencial ORP es una unidad de medición del estado de equilibrio entre especies oxidantes y reductoras en un medio. De manera análoga se incluye una referencia de Ag/AgCl. Posee un electrodo de oro.

b. Medidor de pH: El valor de pH es utilizado como una medida de la acidez o alcalinidad de una solución. La membrana de vidrio del electrodo proporciona un potencial que es dependiente del valor de pH del medio. Este potencial es generado por la penetración selectiva de H^+ a través de la membrana exterior. El electrodo de referencia es una solución integrada de Ag/AgCl. El transmisor convierte el voltaje medido en un valor de pH utilizando la ecuación de Nernst.

La medición de voltaje de ambos electrodos es recibida por un transmisor que realiza la resta eléctrica como lo muestra la figura 8-3, para obtener el potencial específico de operación.

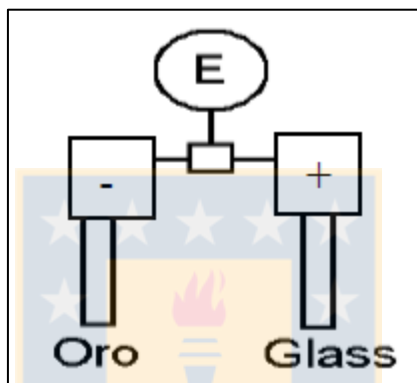


Figura 8-3. Esquema de medición del potencial específico en la Planta de Flotación de Selectiva de Molibdeno Codelco División Andina.