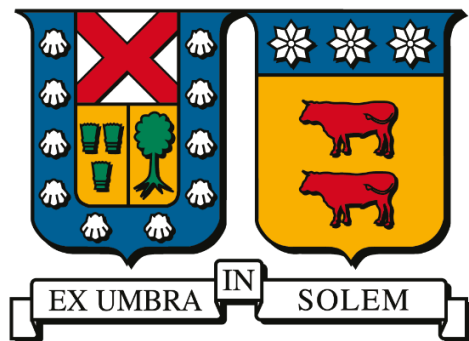


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y DE MATERIALES

SANTIAGO – CHILE



**“INFLUENCIA DE REACTIVOS QUÍMICOS DE  
SUPRESIÓN DE POLVO SOBRE LA EFICIENCIA DE  
LA ELECTROOBTENCIÓN: ESTUDIO A ESCALA  
DE LABORATORIO”**

**BALTAZAR ALEJANDRO GÁLVEZ HERRERA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE  
**INGENIERO CIVIL DE MINAS**

Profesora Patrocinante: Víctor Encina

Profesores Guía: Gonzalo Montes, Omar Gaete

Julio - 2025



## CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

### 1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

**Tipo de monografía (marcar una opción):**  Memoria o trabajo de título;  Tesis de Postgrado;

**Título del trabajo:** INFLUENCIA DE REACTIVOS QUÍMICOS DE SUPRESIÓN DE POLVO SOBRE LA EFICIENCIA DE LA ELECTROOBTENCIÓN: ESTUDIO A ESCALA DE LABORATORIO

**Nombre del candidato(a):** Baltazar Alejandro Gálvez Herrera

**Carrera / Grado:** Ingeniería civil de minas / pregrado

**Campus:** Santiago San Joaquín ; **Departamento:** INGENIERÍA METALÚRGICA Y DE MATERIALES

### 2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Víctor Encina Montenegro, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

### 3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

El trabajo **NO contiene información que amerite confidencialidad** y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

6 meses;  12 meses;  2 años;  3 años;  5 años;  10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

### 4.- FIRMAS

**Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:**

**Fecha:** 20-08-2025

**Firma:**

**Estudiante o Candidato(a):**

**Fecha:** 14-08-2025

**Firma:**

*Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.*

# AGRADECIMIENTOS

Expreso mi más sincero agradecimiento a todas las instituciones y personas que hicieron posible la realización de este trabajo de titulación.

En primer lugar, a la Universidad Técnica Federico Santa María, mi casa de estudios, por brindarme la formación académica de excelencia y las herramientas necesarias para enfrentar este desafío profesional, y por el ambiente propicio para el desarrollo de la investigación.

Mi gratitud se extiende a la Universidad de Chile, específicamente a la Facultad de minería, por su invaluable apoyo al facilitar el acceso a sus instalaciones y equipos de laboratorio, lo cual fue crucial para el desarrollo experimental y los análisis químicos de esta investigación.

Asimismo, agradezco al Departamento de Minas de la Universidad Católica por su colaboración y disposición para apoyarme durante mi desarrollo académico.

A la empresa Veolia, por su valiosa colaboración, el patrocinio de este estudio y por confiar en mi trabajo para la evaluación de sus reactivos, lo que permitió dar una aplicación práctica a esta investigación.

Al Profesor Gonzalo Montes, mi profesor guía por sus valiosos aportes y el tiempo dedicado a enriquecer este proyecto con su perspectiva y experiencia en el campo.

A Omar, representante de Veolia, por su excelente disposición y eficiencia en la coordinación, facilitando la comunicación y el suministro oportuno de los reactivos necesarios para el desarrollo de la investigación.

Al Profesor Víctor Encina, mi profesor patrocinante, por su constante guía, sus profundos conocimientos y su dedicación incansable, los cuales fueron esenciales para la dirección, el enfoque y el éxito de esta memoria.

Finalmente, agradezco a Gloria Crisostomo, la profesora a cargo del laboratorio de la Universidad De Chile, por su invaluable orientación, paciencia y apoyo constante durante la fase experimental, asegurando la correcta ejecución de cada prueba y la obtención de datos confiables.

# DEDICATORIA

A mis queridos hermanos, quienes, con su presencia, su aliento incondicional y su fe en mis capacidades, me han impulsado a superar cada obstáculo. Sus palabras de ánimo y su apoyo fueron un faro en los momentos de incertidumbre, recordándome la importancia de la perseverancia y el valor del esfuerzo compartido. Cada uno, a su manera, contribuyó a fortalecer mi espíritu y a mantenerme enfocado en esta meta.

Y de manera muy especial, a mis padres, cuyo amor, dedicación y sacrificio han sido la base de todo. Ellos me han enseñado el verdadero significado de la resiliencia y el compromiso. Cada esfuerzo, cada desvelo y cada enseñanza que me brindaron desde el primer día han florecido en este momento. Su confianza en mi potencial y su apoyo constante me han dado la fortaleza para perseguir mis sueños y convertirlos en realidad. Este logro es, en gran medida, el reflejo de todo lo que me han entregado.

# RESUMEN

En la industria minera, las operaciones iniciales como el chancado, la molienda y el transporte generan levantamiento de polvo. Veolia, una empresa especializada en soluciones químicas y ambientales, desarrolló 3 reactivos para el control de polvo, diseñados para reducir la volatilización de partículas sólidas finas mediante su aplicación diluida en agua sobre las pilas de acopio o los caminos. La influencia de su uso previo en los procesos hidrometalúrgicos posteriores, particularmente en la recuperación de cobre, no había sido estudiada empíricamente de manera exhaustiva. Los procedimientos hidrometalúrgicos como la lixiviación (LX), la extracción por solventes (SX) y la electroobtención (EW), así como la flotación (FL), son fases esenciales para la producción de cobre de alta pureza. La adición de sustancias químicas para el control de polvo en el material a tratar podría resultar perjudicial, por ello, se consideró fundamental analizar sistemáticamente el impacto de estos reactivos y sus concentraciones.

El objetivo principal de este trabajo fue cuantificar experimentalmente la influencia de los supresores de polvo en la recuperación cuprífera a través de pruebas de laboratorio enfocadas en la electroobtención (EW). De los 3 aditivos desarrollados por Veolia, se seleccionaron 2, Supresor de Polvo 1 (SP-1) y Supresor de Polvo 2 (SP-2), para la experimentación, ya que un tercer aditivo fue descartado por su inviabilidad de disolución en agua para su aplicación. Se realizaron ensayos con 3 concentraciones de cada uno de los dos aditivos, además de una prueba control sin aditivos externos, sumando un total de 7 experimentos en una etapa de control (grupo A) y en la etapa definitiva (grupo B). Los procesos de lixiviación en columnas (LX), extracción por solventes (SX) y flotación (FL) fueron objeto de revisión bibliográfica para entender sus posibles interacciones, pero no se incluyeron en el estudio experimental directo con los supresores de polvo. Las pruebas se llevaron a cabo replicando condiciones similares a las de una planta de tratamiento de gran minería.

Los resultados finales de la electroobtención indicaron que no se hay una correlación directa entre la concentración de los tensoactivos (SP-1 y SP-2) y la recuperación de cobre en los cátodos, ya que la variación fue de tan solo 1.8%. Cualitativamente, se observó que el SP-2 mostró una disociación parcial e inestable en agua destilada a temperatura ambiente, requiriendo mayor agitación y temperatura (alrededor de 65 °C) para homogeneizarse. La generación de niebla ácida se produjo preferentemente sobre el ánodo, como era de esperarse debido a la reacción de oxidación del agua en dicho electrodo, mientras que la reacción en el cátodo no generó gases.

En conclusión, este estudio determinó que tanto el SP-1 como el SP-2 son, al menos, inertes en su aplicación directa al proceso de electroobtención, sin perjudicar la recuperación de cobre en los cátodos. Sin embargo, el SP-2 fue descartado como una alternativa viable para la industria minera debido a sus problemas de miscibilidad en agua en condiciones regulares. Aunque la evidencia no fue concluyente para asegurar la relación con la niebla ácida en este estudio, no se descarta que estos surfactantes puedan contribuir a su reducción por su composición.

# ABSTRACT

In the mining industry, initial operations such as crushing, grinding, and transport generate dust lift-off. Veolia, a company specializing in chemical and environmental solutions, developed three reagents for dust control, designed to reduce the volatilization of fine solid particles through their application diluted in water on stockpiles or roads. The influence of their prior use on subsequent hydrometallurgical processes, particularly on copper recovery, had not been exhaustively studied empirically. Hydrometallurgical procedures like leaching (LX), solvent extraction (SX), and electrowinning (EW), as well as flotation (FL), are essential phases for the production of high-purity copper. The addition of chemical substances for dust control to the material being treated could be detrimental; therefore, it was considered fundamental to systematically analyze the impact of these reagents and their concentrations.

The main objective of this work was to experimentally quantify the influence of dust suppressants on copper recovery through laboratory tests focused on electrowinning (EW). Of the 3 additives developed by Veolia, 2 were selected for experimentation, Dust Suppressant 1 (SP-1) and Dust Suppressant 2 (SP-2), as a third additive was discarded due to its non-viability for dissolution in water for its application. Tests were conducted with 3 concentrations of each of the two additives, in addition to a control test without external additives, for a total of 7 experiments in a control stage (group A) and in the definitive stage (group B). The processes of column leaching (LX), solvent extraction (SX), and flotation (FL) were the subject of a literature review to understand their possible interactions, but they were not included in the direct experimental study with the dust suppressants. The tests were carried out replicating conditions similar to those of a large-scale mining treatment plant.

The final electrowinning results indicated that there is no direct correlation between the concentration of the surfactants (SP-1 and SP-2) and copper recovery at the cathodes, as the variation was only 1.8%. Qualitatively, it was observed that SP-2 showed partial and unstable dissociation in distilled water at room temperature, requiring greater agitation and temperature (around 65°C) to become homogenized. The generation of acid mist occurred preferentially over the anode, as was expected due to the water oxidation reaction at said electrode, while the reaction at the cathode did not generate gases.

In conclusion, this study determined that both SP-1 and SP-2 are, at a minimum, inert in their direct application to the electrowinning process, without negatively affecting copper recovery at the cathodes. However, SP-2 was discarded as a viable alternative for the mining industry due to its miscibility problems in water under regular conditions. Although the evidence was not conclusive to ascertain the relationship with acid mist in this study, it is not ruled out that these surfactants may contribute to its reduction due to their composition.

# GLOSARIO

- 1) SP-1: Supresor de polvo 1
- 2) SP-2: Supresor de polvo 2
- 3) LX; Leaching; lixiviación
- 4) SX; *Solvent Extraction*; Extracción por solventes
- 5) EW; *Electrowinning*; Electroobtención
- 6) FL: Flotación
- 7) IL: Corriente límite
- 8) PLS: *Pregnant Leach Solution*; Solución rica de lixiviación
- 9) Crud: Emulsión estable de fase acuosa y orgánica que perjudica tremendamente el proceso de SX
- 10) ppm: Partes por millón
- 11) TK: Temperatura de Krafft
- 12) DSA: Ánodos Dimensionalmente Estables
- 13) MMO: Ánodos de Óxido Metálico Mixto
- 14) CMC: Concentración Micelar Crítica
- 15) CE: *Current Efficiency*; Eficiencia de corriente

# ÍNDICE DE GENERAL

AGRADECIMIENTOS .....	1
DEDICATORIA.....	2
RESUMEN.....	3
ABSTRACT .....	4
GLOSARIO.....	5
ÍNDICE DE GENERAL .....	5
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	6
ÍNDICE DE FIGURAS .....	8
ÍNDICE DE TABLAS.....	10
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	10
ÍNDICE DE FÓRMULAS.....	11

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

Capítulo 1: Introducción .....	12
1.1. Hipótesis de investigación .....	13
1.2. Objetivo general .....	14
1.3. Objetivos específicos .....	14
1.4. Alcances .....	14
1.4.1. Precisión y exactitud experimental.....	15
1.4.2. Alcance en la cadena productiva .....	15
Capítulo 2: Marco teórico.....	16
2.1. Proceso minero hidrometalúrgico .....	16
2.1.1 Procesos individuales y factores que los afectan.....	18
2.2. Electroobtención .....	19
2.2.1. Proceso de anodización .....	20
2.2.2. Densidad de corriente límite.....	20
2.2.3. Niebla ácida.....	21
2.2.4. Ley de Faraday .....	24
2.2.5. Depositación dendrítica de cobre .....	25
2.2.6. Propiedades del electrolito.....	26
2.3 Tensoactivos .....	27
2.3.1 Temperatura de Krafft.....	28
2.3.2. Funcionamiento y composición de los tenso activos .....	28
2.3.3. Propiedades clave en la electroobtención .....	30
2.3.4. Efectos teóricos de los tensoactivos en la cadena de procesamiento. ....	31
2.4. Estudios similares .....	35
Capítulo 3: Metodología y desarrollo experimental.....	37
3.1. Antecedentes del proyecto .....	37
3.2. Metodología .....	37
3.3. Experimentos preliminares .....	38
3.3.1. Elaboración de fórmula para el electrolito.....	39
3.3.2. Experimentación primaria.....	46

3.3.3. Conclusiones primarias.....	47
3.3.4. Diseño de plan experimental definitivo.....	49
3.4. Experimentos definitivos.....	51
3.5. Errores asociados.....	54
3.5.1. Ruido en las mediciones.....	54
Capítulo 4: Resultados.....	55
4.1. Resultados cuantitativos .....	55
4.2. Resultados cualitativos.....	58
4.3 Comparativa con la escala industrial.....	65
4.3.1. Semejanzas con el proceso industrial .....	67
4.3.2. Diferencias con el proceso industrial .....	68
4.4. Discusión .....	69
4.4.1. Inferencias basadas en la evidencia.....	69
Capítulo 5: Conclusiones.....	73
5.1. Efectos de los reactivos en la depositación de cobre .....	73
5.2. Efectos de los reactivos en la supresión de niebla ácida .....	73
Capítulo 6: Recomendaciones .....	74
Capítulo 7: Referencias.....	76
Capítulo 8: Anexos.....	78

# ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Proceso hidrometalúrgico y pirometalúrgico de Codelco parte 1 .....	16
<b>Figura 2:</b> Proceso hidrometalúrgico y pirometalúrgico de Codelco parte 2.....	17
<b>Figura 3:</b> Esferas plásticas para el intercepto de gotas electrolíticas. ....	22
<b>Figura 4:</b> Advertencias de Huawei sobre las soluciones no soportadas por la protección IP68 .....	27
<b>Figura 5:</b> Camión de riego minero.....	28
<b>Figura 6:</b> Sulfato de cobre pentahidratado para uso de laboratorio.....	38
<b>Figura 7:</b> Cristalización en solución de sulfato de cobre pentahidratado (primer intento) ....	40
<b>Figura 8:</b> Cristalización menor en solución de sulfato de cobre pentahidratado (segundo intento). ....	41
<b>Figura 9:</b> Solución exitosa de sulfato de cobre pentahidratado (tercer intento). ....	42
<b>Figura 10:</b> Plano de los electrodos a utilizar.....	42
<b>Figura 11:</b> Reactivo SP-2 con disociado del agua destilada en condiciones regulares. ....	43
<b>Figura 12:</b> Reactivo SP-2 homogeneizado y disuelto con temperatura inducida externamente. ....	44
<b>Figura 13:</b> Comparativa entre ánodo virgen y ánodo pasivado. ....	46
<b>Figura 14:</b> Celda de electro obtención.....	46
<b>Figura 15:</b> Plano de papel filtro con ranuras para electrodos y portaobjetos. ....	51
<b>Figura 16:</b> Montaje de experimento de electro obtención a escala.....	52
<b>Figura 17:</b> Comparativa entre los cátodos obtenidos experimentalmente y uno de la industria.....	58
<b>Figura 18:</b> Prueba rápida de pH a electrolito de experimento 2B. ....	58
<b>Figura 19:</b> Portaobjetos de experimento 1B. ....	59
<b>Figura 20:</b> Portaobjetos de experimento 2B. ....	59
<b>Figura 21:</b> Portaobjetos de experimento 3B. ....	59
<b>Figura 22:</b> Portaobjetos de experimento 4B. ....	60
<b>Figura 23:</b> Portaobjetos de experimento 5B. ....	60
<b>Figura 24:</b> Portaobjetos de experimento 6B. ....	60
<b>Figura 25:</b> Portaobjetos de experimento 7B. ....	60
<b>Figura 26:</b> Niebla ácida focalizada en el sector del ánodo en experimento 3B. ....	61
<b>Figura 27:</b> Representación de celda de electro obtención utilizada. ....	62
<b>Figura 28:</b> Volumen teórico de niebla producida por cada experimento. ....	63

<b>Figura 29:</b> Formación de espuma por la incorporación de tensoactivos a la solución de experimento 3 (grupo B). .....	63
<b>Figura 30:</b> Formación de espuma por la incorporación de tensoactivos a la solución de experimento 4 (grupo B). .....	64
<b>Figura 31:</b> Ambas caras de cátodo de experimento 6B. ....	64
<b>Figura 32:</b> Formación costra en cátodo de experimento 1 del grupo B. ....	64
<b>Figura 33:</b> Proceso de Extracción por solventes (SX) previo a la electroobtención (EW). .....	65
<b>Figura 34:</b> Nave de electro obtención industrial. ....	66
<b>Figura 35:</b> Cátodos de cobre listos para comercializar. ....	66
<b>Figura 36:</b> Vapor depositado en portaobjetos proveniente de electrolito de experimento 7 del grupo B. ....	70
<b>Figura 37:</b> Naturaleza de campo magnético generado entre ambos electrodos. ....	71
<b>Figura 38:</b> Experimento de lixiviación en columnas a escala de laboratorio. ....	74
<b>Figura 39:</b> Separación de fase orgánica y acuosa en experimento de extracción por solventes a escala de laboratorio. ....	75
<b>Figura 40:</b> Ambas caras de cátodo de experimento 1B. ....	82
<b>Figura 41:</b> Ambas caras de cátodo de experimento 2B. ....	82
<b>Figura 42:</b> Ambas caras de cátodo de experimento 3B. ....	83
<b>Figura 43:</b> Ambas caras de cátodo de experimento 4B. ....	83
<b>Figura 44:</b> Ambas caras de cátodo de experimento 5B. ....	83
<b>Figura 45:</b> Ambas caras de cátodo de experimento 7B. ....	84

# ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Resolución y error de los instrumentos utilizados. ....	15
<b>Tabla 2:</b> Cobre depositado en cátodos para concentraciones de 3, 10 y 30 g/t (Grupo A).....	47
<b>Tabla 3:</b> Masa de cátodos vírgenes en exposición a la humedad.....	49
<b>Tabla 4:</b> Masa de cátodos vírgenes en exposición a la humedad.....	53
<b>Tabla 5:</b> Información recopilada en cada experimento del grupo B. ....	55
<b>Tabla 6:</b> Puntuación de <i>film drops</i> percibidas por el ojo humano. ....	61

# ÍNDICE DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1:</b> Solubilidad del sulfato de cobre pentahidratado en función de la temperatura. Fuente: Adaptado de Nolasco León y Rojas Baltazar (2013).....	38
<b>Gráfico 2:</b> Recuperación de cobre en función de la concentración de reactivo SP-1 (Grupo A). .....	47
<b>Gráfico 3:</b> Recuperación de cobre en función de la concentración de reactivo SP-2 (Grupo A). .....	48
<b>Gráfico 4:</b> Masa de cátodo 8 virgen en función de la exposición a la humedad. ....	50
<b>Gráfico 5:</b> Recuperación de Cu en cátodo 8 en función de la exposición a la humedad. ....	53
<b>Gráfico 6:</b> Recuperación de cobre en función de la concentración de reactivo SP-1 (Grupo B). .....	55
<b>Gráfico 7:</b> Recuperación de cobre en función de la concentración de reactivo SP-2 (Grupo B). .....	56
<b>Gráfico 8:</b> Generación de niebla ácida en función de la concentración del reactivo ..... SP-1 (Grupo B).....	56
<b>Gráfico 9:</b> Generación de niebla ácida en función de la concentración del reactivo ..... SP-2 (Grupo B).....	56
<b>Gráfico 10:</b> Generación de niebla ácida en función de la temperatura en las EW con SP-1 (Grupo B).....	57
<b>Gráfico 11:</b> Generación de niebla ácida en función de la temperatura en las EW con SP-2 (Grupo B).....	57
<b>Gráfico 12:</b> Comparativa entre la medición de <i>film drops</i> y <i>jet drops</i> . ....	62
<b>Gráfico 13:</b> Masa de cátodo 9 en función de la exposición a la humedad.....	78

<b>Gráfico 14:</b> Masa de cátodo 10 en función de la exposición a la humedad. ....	78
<b>Gráfico 15:</b> Masa de cátodo 11 en función de la exposición a la humedad. ....	79
<b>Gráfico 16:</b> Masa de cátodo 12 en función de la exposición a la humedad. ....	79
<b>Gráfico 17:</b> Masa de cátodo 13 en función de la exposición a la humedad. ....	79
<b>Gráfico 18:</b> Masa de cátodo 14 en función de la exposición a la humedad. ....	80
<b>Gráfico 19:</b> Masa de cátodo 9 con recuperación de Cu en función de la exposición a la humedad.....	80
<b>Gráfico 20:</b> Masa de cátodo 10 con recuperación de Cu en función de la exposición a la humedad.....	80
<b>Gráfico 21:</b> Masa de cátodo 11 con recuperación de Cu en función de la exposición a la humedad.....	81
<b>Gráfico 22:</b> Masa de cátodo 12 con recuperación de Cu en función de la exposición a la humedad.....	81
<b>Gráfico 23:</b> Masa de cátodo 13 con recuperación de Cu en función de la exposición a la humedad.....	81
<b>Gráfico 24:</b> Masa de cátodo 14 con recuperación de Cu en función de la exposición a la humedad.....	82

## ÍNDICE DE FÓRMULAS

1) .....	23
2) .....	24
3) .....	24
4) .....	24
5) .....	25
6) .....	25
7) .....	70
8) .....	70

# Capítulo 1: Introducción

La minería es una de las industrias más viejas, comienza desde la edad de los metales en el año 3000 A.C. Desde entonces está en constante innovación, teniendo sus mejoras más destacables durante la revolución industrial, en el año 1800, luego en la implementación de la electricidad a finales del 1900, después con la implementación de métodos hidrometalúrgicos alrededor de 1930, seguido de la implementación de maquinaria pesada desde el año 1960 y por último la incorporación de los sistemas automatizados desde el año 2000 hasta la fecha.

En la actualidad la cadena productiva del proceso minero está más que definida, desde que se hace el estudio geoestadístico de la zona de interés ya se puede proceder con la planificación minera, en la cual se decide tanto el método de explotación como el método de procesamiento. Estos dependiendo de parámetros principalmente geotécnicos para la determinación del método extractivo y de geológicos o mineralógicos para la elección del método de procesado.

Dentro de la planificación, puede variar un poco la cantidad y orden de las operaciones, pero en mediana y gran minería el proceso siempre tiene la misma estructura, en la cual no pueden faltar las etapas de perforación, tronadura, carguío, transporte y toda la cadena de chancado y conminución. Es en estas etapas en particular, en las cuales existe un levantamiento del material fino (inferior a la malla 400), es decir, las partículas que poseen un diámetro equivalente igual o inferior a 0,037 milímetros.

La volatilización de las pequeñas partículas causa un sinnúmero de problemas, algunos que representan solo una molestia, como la obstrucción acelerada de los filtros de aire de la maquinaria y otros bastante más graves, como la obstrucción de la visibilidad en los caminos y un riesgo de enfermedades respiratorias a largo plazo para los operadores expuestos.

Veolia es una compañía con años de experiencia en el área química, con una de sus ramas enfocada en el sector minero. Esta es contactada por personal de la mina Chuquicamata para desarrollar aditivos supresores de polvo que pudieran evitar los problemas que afronta la industria minera en el área extractiva y reductiva de tamaño.

Los 3 reactivos que fabricó Veolia deben estar acompañados de una ficha técnica para su comercialización, en especial si se trata de ventas masivas, siendo las grandes mineras las principales consumidoras. La principal preocupación de esta empresa es que estos productos puedan llegar a afectar negativamente la recuperación de cobre en los procesos posteriores a la reducción de tamaño, los cuales serían todos los relacionados a la hidrometalurgia, ya que en estas etapas se utilizan otros aditivos y/o compuestos químicos que podrían tener una reacción secundaria en paralelo con estos productos.

Para poder cuantificar la neutralidad o perjuicio que causan los supresores de polvo, la empresa Veolia solicitó la realización de un proyecto que entregue resultados empíricos representativos sobre la relación de cantidad y tipo de aditivos y la recuperación de cobre en cada etapa hidrometalúrgica. Los procesos hidrometalúrgicos más relevantes en la industria para el tratamiento de óxidos de cobre incluyen la Lixiviación en columnas (LX), la Extracción por Solventes (SX) y la Electroobtención (EW).

En el presente trabajo de título, los esfuerzos experimentales se concentran en la etapa de electroobtención (EW), considerada una fase crucial para la obtención de cobre de alta pureza. Se replican experimentos de EW a escala de laboratorio, aplicando los 2 reactivos supresores de polvo seleccionados en 3 concentraciones distintas, además de una prueba control sin aditivos. El tercer reactivo inicialmente previsto fue descartado para la experimentación debido a su inviabilidad de disolución en agua, lo que compromete su aplicación práctica en campo. Respecto a la lixiviación en columnas (LX), la extracción por solventes (SX) y la flotación (FL), estos procesos son abordados en esta memoria desde una perspectiva teórica y bibliográfica, buscando comprender sus posibles interacciones con los tensoactivos sin realizar pruebas de laboratorio directas. Este enfoque permite profundizar en el impacto real de los reactivos de interés en la etapa de mayor valor añadido de la hidrometalurgia del cobre, brindando a Veolia información valiosa sobre una parte fundamental de la cadena productiva.

Esta etapa se replica con las condiciones más semejantes posibles a las de una planta procesadora de gran escala.

Para la obtención de las conclusiones se comparan los resultados de las pruebas realizadas sin variar otros parámetros más que la añadidura de reactivos al electrolito utilizado para cada experimento, de esta manera, cualquier diferencia en la recuperación, se asume como consecuencia de la añadidura del aditivo supresor de levantamiento de polvo, ya que es el único parámetro que varía dentro de las combinaciones de cada proceso a replicar.

Con la información recopilada en base a las pruebas, se entrega a Veolia un informe detallado sobre cada característica de los reactivos testeados. De una manera escrita y gráfica que evidencia tanto la correlación que existe entre el aumento de estos compuestos y la depositación de cobre en los cátodos como la dependencia de la generación de niebla ácida.

## 1.1. Hipótesis de investigación

- La aplicación de los reactivos de control de polvo SP-1 y SP-2 en procesos previos a los hidrometalúrgicos puede llegar a causar una disminución de al menos un 5% en la recuperación de cobre en las etapas de LX, SX, EW y FL.
- Al menos uno de los reactivos en un rango de concentración puede causar un efecto despreciable (o incluso positivo) en la recuperación de cobre en procesos posteriores aun realizando con éxito su función principal de evitar el levantamiento de polvo en la faena minera.
- Los reactivos de control de polvo, al estar hechos a base de tensoactivos, pueden reducir de una manera apreciable la niebla ácida producida en el proceso de EW.

## 1.2. Objetivo general

- Identificar el posible perjuicio que causan los reactivos de control de polvo SP-1 y SP-2 en la recuperación de cobre en los procesos de LX, SX, EW y FL. Con profundización en el proceso de EW concluyendo en base a experimentos prácticos.

## 1.3. Objetivos específicos

- Replicar a escala de laboratorio de la manera más representativa posible el proceso de electroobtención
- Documentar cada uno de los parámetros de los experimentos para aislar por completo el efecto del reactivo.
- Visualizar el efecto que tienen los reactivos SP-1 y SP-2 en la niebla ácida producida durante el proceso de EW.
- Elaborar un informe técnico para la empresa Veolia en el cual se entregue una conclusión clara acerca de los efectos que tienen los supresores de polvo en el proceso de EW.

## 1.4. Alcances

- Los experimentos se replican de la manera más fiel a la industria el proceso de EW
- Con la posesión de los resultados referentes a la recuperación se confecciona un informe técnico para la empresa que financia este estudio. Gracias a ese informe la compañía tendrá conocimiento del efecto que pueden llegar a causar sus reactivos en el proceso de EW con certeza.
- Se extrapolan mediante un estudio bibliográfico los posibles efectos que podrían llegar a tener estos reactivos en procesos hidrometalúrgicos no probados empíricamente.

### 1.4.1. Precisión y exactitud experimental

Durante la fase experimental se tiene en todo momento el mayor cuidado posible con cada etapa del proceso, para reducir al mínimo el ruido de los errores, tanto instrumentales como humanos. A continuación, la resolución y el error de cada instrumento utilizado.

Instrumento	Resolución	Error	Unidad	Ruido asociado
Balanza micro analítica	0,00001	0,000005	g	vibraciones de la mesa
Fuente de poder	0,01	0,005	A	Variaciones por reacción
Multi voltímetro	0,0001	0,00005	A	Circuito cerrado
Papel tornasol (pH)	1	0,5	-	Efecto visual

**Tabla 1:** Resolución y error de los instrumentos utilizados.

Sumado a esto, hay que tener presente la posibilidad de un error de manipulación al momento de medir el volumen de algún líquido, pesar algún sólido o manipular algún tipo de temporizador.

En cuanto a los materiales de vidrio, todos los que se utilizan son tipo pyrex, el cual posee propiedades únicas y resulta sumamente resistente a la expansión química, la expansión térmica o los cambios abruptos de temperatura. Todos los implementos utilizados son “clase A”, los cuales siguen estándares internacionales definidos por organizaciones como ASTM (*American Society for Testing and Materials*) o ISO (*International Organization for Standardization*).

### 1.4.2. Alcance en la cadena productiva

Se tiene certeza desde antes de iniciar el proyecto de que los reactivos SP-1 y SP-2 no tienen ningún efecto en los procesos previos a la hidrometalurgia, es decir, los procesos de reducción del tamaño del mineral.

En cuanto a la cadena de hidrometalurgia, mediante la réplica a escala de los procesos industriales se puede determinar el impacto que estos reactivos causan en la etapa de EW. Si bien los procesos de LX y SX forman parte de la misma cadena productiva que la EW, las implicancias positivas o negativas que estos aditivos puedan tener en EW no entregan la información suficiente para extrapolar los resultados a procesos no experimentados. Cada etapa tiene una solución con un pH diferente que actúa en un proceso químico diferente. Una comparación con la FL sería menos representativa aún, ya que es un proceso incluso de otra cadena.

Lo que sí se puede inferir mediante un estudio como este, son los posibles efectos indirectos. Los reactivos para la supresión de polvo suelen ser una mezcla de 2 o más tenso activos, estos acostumbra tener una estructura similar. Hay otros estudios que muestran el efecto de sus reactivos supresores en las 3 etapas de la cadena de óxidos de cobre. Si los resultados obtenidos respecto a la influencia en la EW fuesen similares o iguales a los obtenidos en la sección de EW de este experimento, se podría inferir (con mediana certeza) que los reactivos de control de polvo de Veolia tienen efectos similares en LX y SX a esos estudios.

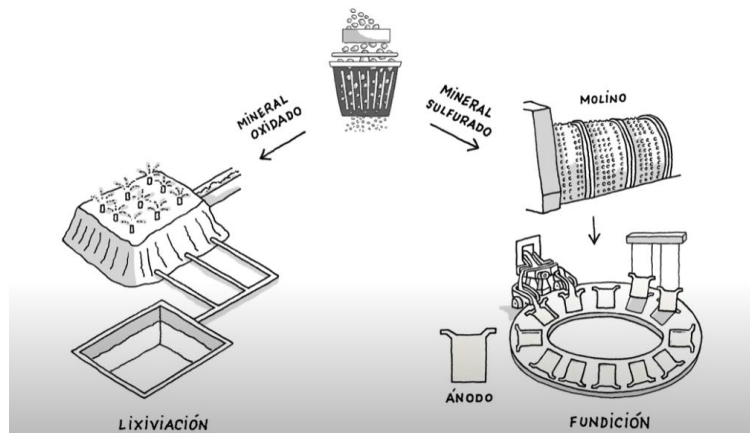
# Capítulo 2: Marco teórico

## 2.1. Proceso minero hidrometalúrgico

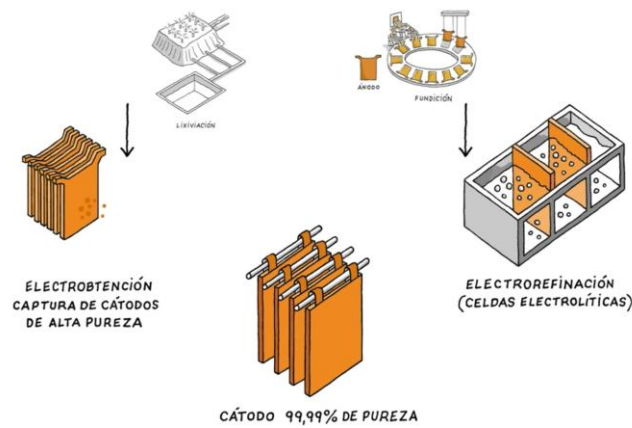
La hidrometalurgia y la pirometalurgia son las etapas más complejas de la cadena productiva de mineral, son las fases que requieren de un mayor estudio para ser desempeñadas correcta y eficientemente. Es durante estas etapas que se empieza a extraer el mineral de interés, en los procesos previos como chancado y conminución solo se logra disminuir el tamaño de las partículas a tratar. Desde la implementación de la hidrometalurgia en grandes mineras, alrededor del año 1930, el proceso está en una mejora constante, ejecutando de la mejor manera posible el proceso correspondiente para cada tipo de mineral.

Por ejemplo, si se tratan óxidos de cobre, el proceso hidrometalúrgico comienza con una lixiviación, a través de la cual se obtiene una solución rica en sulfato de cobre. Posteriormente (la mayoría de las veces) se le realiza un proceso de extracción por solventes que toma como entrada el PLS (*Pregnant Leach Solution* o solución rica) y la separa en una fase orgánica (que contiene mineral de interés en mayor concentración) y una solución pobre. La fase orgánica debe ser devuelta a una forma acuosa para poder ser tratada en la siguiente etapa, esta conversión se realiza en el segundo proceso de la SX llamado reextracción o *stripping*. Finalmente se tiene la electro obtención (EW) en la que por la inducción de corriente eléctrica el cobre es adherido al cátodo, terminando así con un 99,99% de pureza y así pudiendo ser comercializado en el mercado internacional.

Por el contrario, si se tratan sulfuros de cobre, el mineral debe bajar mucho más su diámetro equivalente, llegando aproximadamente a los 0,15 milímetros de tamaño mediante un molino de bolas (proceso de conminución). Una vez con el tamaño requerido, se puede realizar un proceso de flotación para aumentar la concentración en la solución. Luego, el mineral pasa un horno de fundición, en el cual se obtiene un ánodo de cobre con una pureza cercana al 99%. Por último, se realiza un proceso de electro refinación. Induciendo una corriente eléctrica, teniendo el polo negativo en el cátodo y el positivo en el ánodo, las partículas de cobre migran a este último, dándonos finalmente un cátodo con un 99,99% de pureza, al igual que el proceso paralelo para los óxidos.



**Figura 1:** Proceso hidrometalúrgico y pirometalúrgico de Codelco parte 1



**Figura 2:** Proceso hidrometalúrgico y pirometalúrgico de Codelco parte 2

Para obtener los resultados deseados durante el proceso se requiere que no existan agentes que interfieran en las reacciones químicas principales. En la industria minera, al presentar una nueva alternativa que pueda alterar positiva o negativamente el proceso, esta se prueba a escala de laboratorio en una primera instancia. Esto con las condiciones más similares posibles a las que se tienen en la escala industrial, para poder representar correctamente un resultado realista, pero sin comprometer la producción de mineral que está en constante funcionamiento. Empíricamente se ha demostrado a lo largo del tiempo (en experimentos independientes) que hay muchos factores que pueden llegar a alterar el desarrollo esperado de cada proceso.

### 2.1.1 Procesos individuales y factores que los afectan

**Lixiviación en Columnas:** Consiste en la disolución del cobre presente en minerales oxidados o sulfuros secundarios. Este procedimiento es afectado por elementos como la clase y cantidad de reactivos utilizados. En investigaciones actuales, se ha determinado que algunos aditivos, como las poliacrilamidas, pueden influir en la eficacia de disolución al modificar la dinámica de transporte iónico en la matriz del mineral (Masoga, I. L, 2023), (Ehsani, A. et al., 2016).

Estudios recientes destacan que la adición de cloruro mejora la cinética de lixiviación en sulfuros secundarios, aumentando la recuperación de cobre en un 40% a concentraciones de 50 g/L de cloruro. Esta mejora se debe a la formación de especies cloro-complejas, que facilitan la disolución del cobre incluso a bajas temperaturas (Saldaña M. et al., 2019). Además, el uso de aditivos como nitrato de plata a concentraciones mínimas de 0,05 g/L actúa como catalizador en la lixiviación de calcopirita, promoviendo una extracción superior al 90% en condiciones experimentales controladas (Sheean J., 2017).

Por otra parte, se ha demostrado que un control riguroso del pH en rangos de 1,8 a 2,2 evita la formación de capas pasivadoras como el azufre elemental, que podría inhibir la lixiviación. Este manejo es crucial para mantener una recuperación constante y reducir los tiempos de operación (Saldaña M. et al., 2019).

**Extracción por Solventes (SX):** Inicialmente logra la separación selectiva de cobre en una fase orgánica (rica) y una fase acuosa (pobre), luego se somete la fase orgánica a una reextracción para obtener el electrolito rico en fase acuosa. Este procedimiento puede verse alterado por residuos de reactivos empleados en fases anteriores, que producen emulsiones estables y prolongan los periodos de separación de fases (Masoga, I. L, 2023). Específicamente, aditivos como los polioxometalatos han demostrado disminuir las impurezas orgánicas en el electrolito, mejorando la calidad de este, que se alimenta durante la fase de electroobtención (Ehsani, A. et al., 2016).

En cambio, el uso de emulsiones de control de polvo durante el traslado del mineral puede tener un impacto indirecto en la calidad de las soluciones lixiviadas y su tratamiento posterior en SX (Strokova, V. et al., 2024).

La calidad de la SX es altamente dependiente de los reactivos orgánicos utilizados. Los extractantes a base de aldoxima y cetoxima son los más comunes debido a su alta selectividad hacia el cobre. La combinación de aldoximas modificadas con alcoholes alifáticos mejora significativamente la separación de fases y la eficiencia del proceso, con tasas de extracción que superan el 98% bajo condiciones óptimas de pH y temperatura (Littlejohn. P., 2007).

**La electroobtención (EW):** Es la fase final del procedimiento hidrometalúrgico para óxidos, en la que se consigue cobre metálico de gran pureza a través de la electrólisis. En esta fase, la implementación de aditivos tiene como objetivo optimizar la forma del depósito catódico y disminuir el uso de energía (Zuowei, L. et al., 2024) (Masoga, I. L, 2023). Por ejemplo, se ha comprobado que las poliacrilamidas y polioxometalatos son eficaces para incrementar la

eficiencia de la corriente y disminuir los defectos estructurales en los cátodos (Moats, M. et al., 2014). Otro ejemplo es el metatungstato de amonio (un tipo de polioxometalato), el cual aumenta la eficiencia de corriente hasta en un 8% y mejoran la tasa de deposición al actuar como catalizadores de las reacciones de reducción en el cátodo

No obstante, su concentración requiere un control meticuloso para prevenir consecuencias negativas, como la aparición de texturas dendríticas en el depósito (Ehsani, A. et al., 2016).

Otro aditivo significativo es la tiourea, que a concentraciones de 3 mg/L mejora la calidad del depósito al reducir la formación de dendritas en el cobre. Esto se traduce en cátodos más uniformes y con mayor pureza, características esenciales para aplicaciones industriales (Freire et al., 2017).

Respecto al efecto medioambiental y laboral, la utilización de reactivos químicos en los procedimientos de hidrometalurgia también presenta retos. Por ejemplo, los compuestos empleados en la regulación del polvo, a pesar de ser útiles para disminuir la producción de partículas en suspensión, pueden incorporar contaminantes orgánicos en los circuitos acuáticos, impactando la eficacia de los procesos subsiguientes (Stroková, V. et al., 2024) (Dong, H. et al., 2023). Por lo tanto, resulta vital analizar de forma holística el efecto de estos productos en cada fase del proceso de hidrometalurgia.

En vista de que existe una cadena productiva con varias etapas, de las cuales al menos 3 involucran procesos químicos, es imperativo realizarle pruebas a todas las fases posteriores del proceso para corroborar que no exista un efecto negativo posterior a la adición de un compuesto que se supone que altere una etapa puntual.

## 2.2. Electroobtención

La electroobtención es el proceso hidrometalúrgico en el cual se enfoca este informe, ya que es el proceso en el cual se concluye en base a resultados obtenidos empíricamente. Los principios son los mismos en cualquier escala, precisamente por eso es que se pueden estudiar los mismos fenómenos ocurridos en la escala industrial. Al inducir corriente al electrolito mediante los electrodos se debe tener en cuenta la densidad de corriente límite del sistema para favorecer la depositación del cobre, la cual se puede calcular teóricamente con la ley de Faraday. La niebla ácida producida a escala no representa un peligro como en las celdas utilizadas en la industria, pero de igual manera se puede estudiar su impacto y variación con la finalidad de reducirla en la gran escala si es que este reactivo lo permite.

### 2.2.1. Proceso de anodización

El proceso de pasivación o anodización se lleva a cabo sumergiendo los ánodos limpios en el electrolito de electroobtención (que contiene sulfato de cobre y ácido sulfúrico) y aplicando una corriente eléctrica cercana a la mitad de la que se usa en la operación normal de la celda, pero durante un tiempo mayor (aproximadamente el doble). Durante este proceso el plomo del cual está hecho el ánodo se oxida en la superficie, dejando una capa de óxido metálico. Esta capa es muy importante, ya que actúa como una barrera protectora que protege al ánodo de la corrosión a la cual estará posteriormente sometida. También evita la contaminación del electrolito con iones del mismo ánodo que podrían desprenderse. Esta capa de óxido también actúa como catalizador en el proceso de oxidación del agua y minimiza la ocurrencia de reacciones secundarias en el proceso de electroobtención.

### 2.2.2. Densidad de corriente límite

Para alcanzar un proceso óptimo y eficiente en cuanto a velocidad de depositación, se busca trabajar entre un 80 y un 85% de la densidad de corriente límite, ya que mientras más elevada es la corriente, más rápido ocurre el proceso de migración de cobre de la solución a los cátodos. Si bien es favorecedor para el proceso aumentar la densidad de corriente, esta no puede llegar a igualar la densidad de corriente límite (IL) del proceso, ya que al ocurrir eso la velocidad a la que los iones de cobre pueden ser transportados desde el seno de la solución hacia la superficie del cátodo no es lo suficientemente rápida para satisfacer la demanda de la reacción electroquímica. Al ocurrir esto, la concentración de iones de cobre en la capa límite adyacente a la superficie del cátodo se acerca a cero. En estas condiciones de agotamiento de iones  $\text{Cu}^{2+}$ , la reacción de reducción de los iones de cobre se ve severamente limitada por la disponibilidad de estos iones en la interfaz electrodo-solución.

En lugar de una deposición controlada y uniforme de cobre metálico, pueden ocurrir fenómenos como nucleación rápida, mayor influencia de impurezas, creación de depósitos porosos o depositación dendrítica. Este tipo de fenómenos conducen a la formación de polvo de cobre en lugar de una depositación sólida y de fácil cosecha posterior.

### 2.2.3. Niebla ácida

La niebla ácida es un subproducto inherente y problemático del proceso de electroobtención (EW) de cobre, cuya generación no se debe a un fallo operativo, sino a la electroquímica fundamental del proceso. Su origen reside en la reacción anódica, donde, para depositar un kilogramo de cobre en el cátodo, se produce la oxidación de moléculas de agua, liberando aproximadamente 0,17 metros cúbicos de oxígeno gaseoso ( $O_2$ ). Este gas se nuclea y crece en la superficie del ánodo inerte (generalmente una aleación de plomo o un ánodo dimensionalmente estable) hasta que la fuerza de flotación supera la tensión superficial, desprendiéndose en forma de burbujas. Al ascender a través del electrolito —una solución concentrada de sulfato de cobre y ácido sulfúrico (típicamente 50-180 g/L de  $H_2SO_4$ ) a temperaturas de 50-60°C— estas burbujas estallan violentamente en la interfaz líquido-aire, aerosolizando finas gotas del electrolito y formando la niebla.

El mecanismo físico de esta aerosolización es un proceso complejo. La ruptura de una burbuja produce dos tipos de gotas: las "gotas de película" (film drops), formadas por la desintegración de la cúpula líquida de la burbuja, y las "gotas de chorro" (jet drops), que se originan por el colapso de la cavidad de la burbuja, creando un chorro de líquido que se fragmenta en gotas más pequeñas y numerosas. Para el rango de tamaños de burbuja observado en la electroobtención (20  $\mu m$  a 400  $\mu m$ ), se ha demostrado que la niebla ácida se compone casi en su totalidad de estas gotas de chorro, que son más pequeñas y energéticas, lo que las hace más propensas a permanecer suspendidas en el aire. La cantidad de niebla generada está fuertemente influenciada por las condiciones operativas. Un aumento en la temperatura del electrolito es el factor más dominante, ya que reduce la viscosidad y la tensión superficial, facilitando la formación de gotas más finas, además de provocar una evaporación del agua presente que puede arrastrar consigo una pequeña parte del ácido sulfúrico y otros elementos presentes. Un incremento en la densidad de corriente también aumenta la generación de niebla al acelerar la producción de oxígeno, aunque de manera no lineal. Curiosamente, una mayor acidez tiende a disminuir la generación de niebla, ya que aumenta la viscosidad del electrolito, lo que dificulta la fragmentación de las burbujas y produce gotas más grandes y menos aerosolizables.

El impacto de la niebla ácida es multifacético y severo. Desde una perspectiva de salud ocupacional, es un potente irritante que causa efectos agudos como irritación de ojos, piel y tracto respiratorio, y efectos crónicos como la erosión del esmalte dental y bronquitis. El riesgo más grave, sin embargo, es su clasificación por la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) como un carcinógeno del Grupo 1, lo que significa que hay evidencia suficiente para afirmar que es cancerígeno para los humanos, específicamente asociado a un mayor riesgo de cáncer de laringe y pulmón. Esta clasificación se aplica exclusivamente al aerosol, no al ácido en estado líquido, subrayando el peligro inherente al proceso de EW. Además, la niebla transporta metales pesados del electrolito (plomo, arsénico), lo que agrava su toxicidad. A nivel operativo, la naturaleza corrosiva de la niebla causa daños significativos y costosos a la infraestructura de la planta, incluyendo estructuras de acero, grúas y barras colectoras.

El marco regulatorio para la exposición a la niebla ácida varía considerablemente a nivel mundial. Mientras que la ACGIH en EE. UU. recomienda un límite de exposición (TLV-TWA) de  $0,2 \text{ mg/m}^3$  y el SCOEL en la Unión Europea sugiere un límite aún más estricto de  $0,05 \text{ mg/m}^3$ , la normativa chilena (Decreto Supremo N° 594) establece un Límite Permissible Ponderado (LPP) de  $0,8 \text{ mg/m}^3$  y un Límite Permissible Temporal (LPT) de  $3 \text{ mg/m}^3$ . Esta disparidad regulatoria presenta un desafío para las operaciones mineras, que deben cumplir con la legislación local mientras consideran las mejores prácticas internacionales para la protección de la salud de los trabajadores.

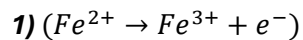
Para mitigar estos riesgos, se han desarrollado diversas tecnologías de control. Los métodos físicos incluyen el uso de barreras flotantes, como esferas de plástico (siendo el HDPE más efectivo que el PP), que cubren la superficie del electrolito para interceptar las gotas.



**Figura 3:** Esferas plásticas para el intercepto de gotas electrolíticas.

Aunque son comunes, su eficacia depende de la cobertura superficial y pueden interferir con las operaciones de cosecha de cátodos. Una solución más robusta, aunque costosa y a menudo impráctica, es el uso de cubiertas o campanas que aíslan completamente las celdas. El control químico se basa en el uso de aditivos surfactantes que modifican las propiedades de la interfaz electrolito-aire. Históricamente, el estándar fue el surfactante fluoroquímico FC-1100, que reduce la tensión superficial y aumenta la elasticidad de la película de la burbuja, resultando en una ruptura menos violenta. Sin embargo, debido a preocupaciones ambientales sobre los compuestos perfluorados (PFAS), la industria está migrando hacia alternativas más ecológicas. Entre estas, los biosurfactantes, como los extractos de raíz de regaliz, han demostrado una eficacia sorprendente, a veces superior a la del FC-1100, especialmente cuando se usan en sinergia con otros aditivos para crear una capa de espuma estable que atrapa los aerosoles.

Cuando los controles en la fuente no son suficientes, los controles de ingeniería como la ventilación son la siguiente línea de defensa. La ventilación por extracción localizada (LEV) es preferible a la ventilación general por dilución, ya que captura el contaminante cerca de su origen de manera más eficiente y con menor consumo energético. Un sistema LEV bien diseñado consta de campanas de captura, conductos, unidades de filtración (lavadores de gases) y ventiladores, y su diseño debe optimizarse para evitar problemas como el reentrenamiento del aire de escape. Finalmente, la solución más fundamental y preventiva es la innovación del proceso para eliminar la causa raíz de la niebla. Esto se puede lograr reemplazando la reacción anódica de oxidación del agua por una alternativa que no genere gas, como la oxidación de iones ferrosos a férricos.



Este enfoque no solo elimina por completo la generación de niebla ácida, sino que también ofrece una drástica reducción en el consumo de energía del proceso, transformando un pasivo de seguridad en una ventaja económica. La gestión eficaz de la niebla ácida, por lo tanto, requiere un enfoque integrado que priorice la eliminación y sustitución, complementado con robustos controles de ingeniería y prácticas de trabajo seguras.

Para implementar esta alternativa en la EW se deben tomar medidas desde 2 etapas antes en la cadena. En el proceso de lixiviación en pilas o columnas se utilizan iones férricos como oxidante, esto permite la presencia de iones  $Fe^{2+}$  en el electrolito. La presencia de este ion deber ser cuidadosamente controlada. En condiciones normales, el hierro férrico es extremadamente dañino para el proceso de EW, es por eso que el proceso también tiene que cambiar un poco. Los ánodos utilizados en esta técnica son de titanio con un recubrimiento de óxidos de metales preciosos o semipreciosos (como  $I_rO_2$  o  $R_uO_2$ ). Estos se conocen como Ánodos Dimensionalmente Estables (DSA) o Ánodos de Óxido Metálico Mixto (MMO).

En este estilo de EW, el sistema está diseñado para que la oxidación del  $Fe^{2+}$  sea la reacción anódica principal, eliminando la producción de oxígeno y aprovechando el hierro en un ciclo beneficioso para el proceso global. Se pasa de una impureza que compite y consume energía a un transportador de electrones que permite un proceso más eficiente y limpio.

## 2.2.4. Ley de Faraday

Michael Faraday, alrededor de 1833, estableció las bases cuantitativas de la electrólisis mediante dos leyes que relacionan la cantidad de electricidad utilizada con la masa de sustancia transformada en los electrodos, siendo esenciales para predecir y controlar estos procesos.

La primera ley de Faraday indica que la masa  $m$  de sustancia transformada en un electrodo es directamente proporcional a la cantidad total de carga eléctrica  $Q$  que pasa por el electrolito  $m \propto Q$ . Esto se expresa como:

$$2) m = ZQ$$

donde  $Z$  es el equivalente electroquímico, específico para cada sustancia, que representa la masa transformada por unidad de carga (ej. gr/C). La segunda ley establece que, si la misma carga  $Q$  atraviesa diferentes electrolitos, las masas transformadas son proporcionales a los pesos equivalentes  $E$  de las sustancias. El peso equivalente se define como la masa molar  $M$  dividida por el número de moles de electrones  $n$  transferidos en la semirreacción. De estas leyes se deduce que  $Z$  es proporcional a  $E$

$$3) (Z = E/F)$$

Donde  $F$  es la constante de Faraday.

Combinando ambas leyes y considerando que la carga  $Q$  es el producto de una corriente constante y el tiempo, se obtiene la ecuación unificada fundamental para los cálculos en electrólisis:

$$4) m = (I * t * M) / (n * F)$$

Donde:

$m$  es la masa depositada en g.

$I$  es la corriente en amperes.

$t$  es el tiempo en s.

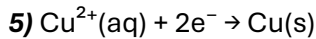
$M$  es la masa molar en g/mol.

$n$  es el número de moles de electrones transferidos por mol de sustancia (adimensional).

$F$  es la constante de Faraday.

La constante de Faraday ( $F = N_A * e$ ) representa la carga de un mol de electrones y su valor aceptado es aproximadamente  $F \approx 96485 \text{ C/mol}$ . Esta ecuación combina factores universales ( $F$ ), parámetros operativos controlables ( $I$ ,  $t$ ) y propiedades específicas de la sustancia ( $M$ ,  $n$ ). Es importante notar que esta fórmula asume una eficiencia de corriente del 100%, lo cual raramente se cumple en la práctica debido a reacciones secundarias que consumen parte de la corriente. La masa real se calcula como  $m_{\text{real}} = m_{\text{teórica}} * (CE / 100)$ , donde  $CE$  es la eficiencia de corriente.

En la electroobtención de cobre a partir de soluciones de sulfato de cobre ( $\text{CuSO}_4$ ), la reacción catódica es la reducción de iones cúpricos a cobre metálico:



Para esta reacción específica:

El número de moles de electrones transferidos por mol de cobre es  $n = 2$ .

La masa molar del cobre es  $M(\text{Cu}) \approx 63.55 \text{ g/mol}$ .

Esta fórmula permite calcular la producción teórica de cobre bajo condiciones ideales.

Cálculo de la Velocidad de Deposición de Cobre

La velocidad de deposición (masa por unidad de tiempo,  $m/t$ ) se obtiene dividiendo la ecuación de Faraday por el tiempo 't':

Velocidad de deposición

$$6) (m/t) = (I * M) / (n * F)$$

Para el cobre ( $n=2$ ): Velocidad de deposición de Cobre ( $m/t$ ) =  $(I * M(\text{Cu})) / (2 * F)$

Esta relación indica que la velocidad de deposición teórica es directamente proporcional a la corriente aplicada ( $I$ ). Esto permite controlar la tasa de producción ajustando la corriente. Sin embargo, en la práctica, a altas densidades de corriente, la velocidad puede verse limitada por el transporte de masa de los iones  $\text{Cu}^{2+}$  hacia el cátodo o por una disminución en la eficiencia de corriente debido a reacciones secundarias (como la generación de hidrógeno), estableciendo un rango óptimo de operación.

### 2.2.5. Depositación dendrítica de cobre

En el proceso de electroobtención, el cobre es depositado sobre el cátodo, el cual es el electrodo con un polo de corriente negativa, este suele estar hecho de acero inoxidable 316L y se fabrica de manera muy bien lograda, teniendo mucho cuidado con las asperezas e imperfecciones que podrían llegar a haber en la superficie.

Los bordes afilados en los cátodos generan varios problemas que favorecen la nucleación preferencial y el crecimiento de depósitos dendríticos debido a que las puntas afiladas tienen un radio de curvatura pequeño. En electroquímica, la densidad de corriente tiende a ser mayor en las zonas con menor radio de curvatura. Esto significa que las rebabas y los bordes recibirán una cantidad desproporcionadamente alta de corriente eléctrica en comparación con las superficies planas del cátodo. A medida que las dendritas comienzan a crecer, la difusión de iones de cobre desde el electrolito hacia las puntas de las dendritas se vuelve más eficiente que hacia las zonas planas del cátodo. Esto se debe a que las puntas sobresalen hacia la solución, donde la concentración de iones de cobre puede ser ligeramente mayor. Esto alimenta el crecimiento continuo de las dendritas.

## 2.2.6. Propiedades del electrolito

El electrolito, en el contexto de la EW, es una solución acuosa compleja que juega un papel central en la transferencia de iones y la eficiencia del proceso. Su composición y propiedades fisicoquímicas son determinantes para la calidad del depósito catódico, el consumo energético, la generación de niebla ácida y la operatividad general de la planta. Los componentes principales de un electrolito de electroobtención de cobre son el sulfato de cobre ( $CuSO_4$ ), el ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) y el agua, junto con diversas impurezas y aditivos orgánicos. Cabe destacar que el ácido requerido para ejecutar un proceso exitoso podría no ser el sulfúrico, se podría preparar una solución electrolítica perfectamente funcional añadiendo ácido clorhídrico ( $HCl$ ), nítrico ( $HNO_3$ ) o fluorhídrico ( $HF$ ). La razón por la cual se tiene estandarizado el ácido sulfúrico es principalmente por su bajo valor y sus riesgos reducidos en comparación a las alternativas previamente mencionadas. En cuanto a los aditivos orgánicos, se utilizan para favorecer la recuperación de cobre en el proceso. Existen muchos de ellos, pero los principales son:

**Cola animal (animal glue):** Es uno de los aditivos más antiguos y ampliamente utilizados. Consiste principalmente en proteínas hidrolizadas (gelatina) que se adsorben en la superficie del cátodo. Actúa como un nivelador y refinador de grano, promoviendo la deposición de un cobre más denso, liso y brillante. Su mecanismo implica la inhibición del crecimiento preferencial de cristales y el aumento del sobrepotencial de deposición del cobre.

**Goma guar (guar gum):** Es un polisacárido que también funciona como un alisador, produciendo depósitos de cobre más uniformes. Se adsorbe en la interfaz catódica, influyendo en la nucleación y el crecimiento del cobre.

**Poliacrilamidas (PAM):** Son polímeros sintéticos que pueden actuar como floculantes en otras etapas de procesamiento, pero en EW se utilizan como alisadores y supresores de defectos. Se ha estudiado su capacidad para incrementar la eficiencia de corriente y disminuir los defectos estructurales en los cátodos.

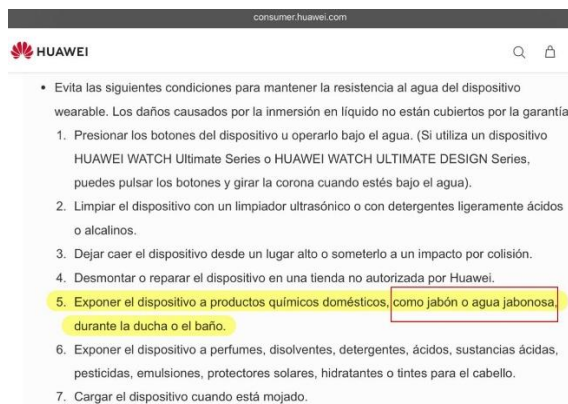
**Tiourea:** Este compuesto orgánico nitrogenado es un potente aditivo que a bajas concentraciones (0,5 a 5 mg/L) mejora significativamente la calidad del depósito al reducir la formación de dendritas, resultando en cátodos más uniformes y con mayor pureza. Sin embargo, su uso debe ser muy controlado, ya que en exceso puede actuar como contaminante y afectar negativamente el proceso o la pureza del cobre.

## 2.3 Tensoactivos

Los tensoactivos, también conocidos como surfactantes, son moléculas orgánicas que poseen una estructura química dual, denominada anfifílica, que les permite interactuar tanto con fases acuosas como no acuosas. Esta propiedad única les confiere la capacidad de modificar las propiedades interfaciales, como la tensión superficial, siendo fundamentales en una amplia gama de procesos industriales, incluyendo la minería y la metalurgia. La aplicación de estos compuestos mejora la humectación, permitiendo al agua penetrar más fácilmente en rendijas pequeñas.

El tensoactivo más presente en la vida cotidiana es el jabón, al ser mezclado con agua, esta solución tiene los mismos efectos de humectación mejorada que se describen. Este efecto se puede apreciar en la industria de la telefonía móvil.

Desde el año 2010 comenzaron a comercializarse masivamente teléfonos de alta gama con resistencia al agua, esta tecnología ha estado en constante mejora desde entonces. Esta protección característica tiene la nomenclatura IPNN, donde la primera N es la resistencia a la partículas de sólidos y la segunda es la resistencia a líquidos. Por ejemplo, un teléfono actual (comercializado desde mediados del 2024) como el Huawei Mate 50 Pro tiene protección IP68, lo que significa que está totalmente protegido contra el polvo fino y puede ser sumergido en agua convencional hasta un metro de profundidad. En la descripción de este tipo de equipos es donde el fabricante advierte sobre el tipo de solución que este dispositivo puede permitir, exceptuándose así el agua jabonosa, debido a la mayor capacidad que esta presenta para escurrir entre medios estrechos.



**Figura 4:** Advertencias de Huawei sobre las soluciones no soportadas por la protección IP68

En la industria metalúrgica, y específicamente en la electrodeposición de metales como el cobre, los tensoactivos se utilizan como aditivos para controlar diversos aspectos del proceso, incluyendo la calidad del depósito catódico y la supresión de emisiones no deseadas como la niebla ácida. Dado que los supresores de polvo empleados en etapas previas del procesamiento minero (como caminos, chancado y transporte) suelen ser formulaciones basadas en tensoactivos, es pertinente analizar su naturaleza y cómo su presencia residual, transportada inadvertidamente a etapas posteriores, podría influir en la eficiencia y resultados de la etapa de electroobtención de cobre.

### 2.3.1 Temperatura de Krafft

La temperatura de Krafft (TK) es la temperatura mínima por debajo de la cual un tensoactivo (o surfactante) no es soluble o es muy poco soluble en un solvente, formando micelas. Lleva ese nombre por su descubridor, Friedrich Krafft, quien fue un químico alemán que, a finales del siglo XIX, estudiaba la solubilidad de los jabones (un tipo de tensoactivo) en soluciones acuosas.

Esta es la temperatura en donde la solubilidad del tensoactivo aumenta drásticamente. Por debajo de esta temperatura, el tensoactivo tiende a precipitar fuera de la solución en forma de cristales o una fase gely cristalina, incluso si la concentración es baja.

Por debajo de TK la concentración de monómeros de tensoactivo es muy baja, y cualquier exceso de tensoactivo forma cristales o hidratos insolubles, mientras que por encima de TK la solubilidad del monómero aumenta hasta que se alcanza la Concentración Micelar Crítica (CMC), momento en el que los monómeros comienzan a autoensamblarse en micelas, aumentando enormemente la concentración total de tensoactivo en solución sin que precipite.

Esta temperatura es crucial en la formulación de productos que contienen tensoactivos, ya que define la temperatura mínima de almacenamiento y uso para mantener el producto en una solución estable y homogénea.

### 2.3.2. Funcionamiento y composición de los tenso activos

Los productos químicos utilizados para la supresión de polvo en diversas etapas de la operación minera (caminos, pilas de mineral, perforación, chancado, transporte) son frecuentemente formulaciones que contienen uno o más tensoactivos. Su función primordial es reducir la tensión superficial del agua utilizada para el riego o aspersión, mejorando significativamente la capacidad del agua para mojar las partículas de polvo, especialmente si son finas o hidrofóbicas (como algunos carbones o rocas quemadas). Al mojar las partículas, estas tienden a aglomerarse o adherirse a superficies, evitando su dispersión en el aire. Algunas formulaciones buscan combinar la humectación con funciones de coagulación, retención de humedad o formación de películas.



**Figura 5:** Camión de riego minero

Los tensoactivos son aditivos multifuncionales en la hidrometalurgia del cobre. En la electroobtención, su adición controlada es esencial para obtener cátodos de alta calidad (lisos, densos, puros) mediante el control de la morfología del depósito y para mantener un ambiente de trabajo seguro mediante la supresión efectiva de la niebla ácida. Sin embargo, la introducción no controlada de tensoactivos residuales, provenientes de su uso como supresores de polvo en etapas anteriores del procesamiento minero, representa una fuente potencial de interferencia significativa en la etapa de EW. Estos compuestos podrían alterar la tensión superficial del electrolito, competir por sitios de adsorción en los electrodos, afectar negativamente la calidad del cátodo y disminuir la eficiencia de corriente. Por lo tanto, resulta fundamental realizar investigaciones experimentales específicas para comprender y cuantificar el impacto real de los tensoactivos presentes en los supresores de polvo utilizados en las etapas previas sobre los parámetros clave de la electroobtención de cobre (eficiencia de corriente, calidad del depósito, generación de niebla ácida), y evaluar la necesidad y viabilidad de estrategias de mitigación (como la adsorción en carbón activado antes de SX o EW) para asegurar la eficiencia global del proceso.

La característica definitoria de un tensoactivo es su estructura molecular que combina una "cabeza" polar o iónica, que tiene afinidad por el agua (hidrofílica), y una "cola" no polar, generalmente una cadena hidrocarbonada larga, que repele el agua (hidrofóbica o lipofílica). Esta dualidad es la responsable de su tendencia a acumularse y orientarse preferentemente en las interfases (líquido-gas, líquido-líquido, sólido-líquido).

Los tensoactivos se clasifican comúnmente según la naturaleza de la carga eléctrica de su cabeza polar en solución acuosa. Las principales clases son:

Aniónicos: Cabeza con carga negativa (ej. carboxilatos, sulfatos, sulfonatos como SDBS o difenil óxido disulfonatos).

Catiónicos: Cabeza con carga positiva (ej. sales de amonio cuaternario como CTAB).

No iónicos: Sin carga neta (ej. alcoholes etoxilados como Triton X-100, polisorbatos).

Anfóteros (o Zwitteriónicos): Poseen tanto carga positiva como negativa, dependiendo del pH del medio (ej. betaínas, Genagen). Esta clasificación es relevante porque la carga (o su ausencia) influye directamente en cómo interactúan con las superficies cargadas (como los electrodos), con otros iones presentes en el electrolito y con otras moléculas de tensoactivo.

### 2.3.3. Propiedades clave en la electroobtención

**Reducción de la Tensión Superficial:** Al adsorberse en la interfase electrolito-aire, los tensoactivos disminuyen la energía necesaria para expandir dicha interfase, es decir, reducen la tensión superficial del líquido. Este es el mecanismo fundamental detrás de su uso como agentes supresores de niebla ácida, ya que altera la dinámica de las burbujas de gas (principalmente oxígeno generado en el ánodo) al llegar a la superficie del electrolito.

**Adsorción en Superficies:** Los tensoactivos tienden a adsorberse en la interfase sólido-líquido, es decir, sobre la superficie de los electrodos (cátodo y ánodo). Esta capa adsorbida puede modificar la estructura de la doble capa eléctrica, bloquear sitios activos, alterar la cinética de transferencia de carga y afectar la nucleación y el crecimiento del depósito metálico. La naturaleza de la adsorción (física o química) y la orientación de las moléculas adsorbidas dependen tanto del tensoactivo como de la naturaleza y potencial del electrodo.

**Micelización (breve mención):** Por encima de una concentración específica, conocida como Concentración Micelar Crítica (CMC), las moléculas de tensoactivo en el seno de la solución pueden autoagregarse formando estructuras organizadas llamadas micelas. La formación de micelas afecta la concentración de tensoactivo monomérico libre disponible para adsorberse en las interfases, aunque el rol directo de las micelas en la electrodeposición es complejo y menos estudiado que la adsorción interfacial.

**Posible Influencia en la Electroobtención:** Un desafío operativo importante surge si estos tensoactivos aplicados en etapas previas (minado, transporte, molienda) no se degradan o eliminan completamente y son arrastrados con el mineral o las soluciones de proceso hasta la planta de extracción por solventes (SX) y electroobtención (EW). La presencia no intencionada de estos tensoactivos residuales en el electrolito de EW podría tener diversos efectos, basados en sus propiedades generales y su potencial interacción con los componentes del sistema EW:

**Alteración de la Tensión Superficial:** Pueden modificar la tensión superficial del electrolito, interfiriendo con la acción de los supresores de niebla ácida específicos añadidos intencionalmente, o afectando directamente la generación de niebla (aumentándola o disminuyéndola, dependiendo de su naturaleza y concentración residual).

**Impacto en la Morfología del Cátodo:** La adsorción no deseada puede modificar la nucleación y el crecimiento del cobre, afectando la calidad final del cátodo (rugosidad, brillo, pureza, estructura cristalina, formación de nódulos o dendritas).

**Efecto en la Eficiencia de Corriente:** La interferencia en la reacción catódica principal (deposición de Cu) o la posible promoción de reacciones secundarias (como la evolución de hidrógeno en el cátodo) debido a la adsorción puede impactar negativamente la eficiencia de corriente (CE), que es un parámetro económico crucial.

**Interferencia en SX:** Aunque el foco aquí es EW, cabe mencionar que algunos tensoactivos residuales también pueden causar problemas en la etapa previa de extracción por solventes (SX), como la formación de emulsiones estables o la alteración de los tiempos de separación de fases (phase disengagement), afectando la eficiencia global del proceso SX-EW.

### 2.3.4. Efectos teóricos de los tensoactivos en la cadena de procesamiento.

Los tensoactivos, en las palabras más sencillas, ayudan a que el agua “moje más”, gracias a que por definición tienen una parte hidrofóbica y una hidrofílica. Esto ayuda a disminuir de manera significativa la tensión superficial del agua, permitiéndole penetrar más profundamente. La aplicación de estos reactivos puede comenzar con el regadío de caminos, la humectación de pilas de acopio o el rocío en correas transportadoras, siendo su formato una solución de agua con una pequeña concentración de los reactivos. Al tratarse de un líquido (no ácido) y en una cantidad tan baja (entre 1 y 10 g por tonelada seca), los reactivos no tienen un efecto directo en los procesos de chancado ni molienda. Cuando se aplican, sus moléculas se orientan en la interfase de forma organizada, creando una monocapa que es fundamental para la reducción de la tensión superficial y la humectación.

En lo que respecta a la hidrometalurgia, los efectos de los tensoactivos pueden ser más variados, ya que se involucran procesos físicos y químicos que van más allá de solo reducir el tamaño de las partículas.

**Efectos teóricos en la lixiviación en columnas (LX):** Por un lado, la función principal de un tensoactivo es mejorar la humectación. Teóricamente, su presencia en la solución de lixiviación podría mejorar la percolación y el contacto entre la solución ácida y las superficies minerales dentro de la columna. Un estudio de Prosser et al. (2021) sobre lixiviación de oro demuestra que ciertos tensoactivos biodegradables podían aumentar la extracción del metal al mejorar la distribución de la solución en el lecho de mineral. Este efecto positivo podría ser aplicable a minerales de cobre con características hidrofóbicas, facilitando una lixiviación más homogénea.

Por otra parte, la mayoría de los tensoactivos tienen la capacidad de generar espuma. La agitación causada por el riego y el flujo de la solución a través de la columna podría provocar una formación excesiva de espuma, lo que puede llevar a problemas de canalización preferencial del flujo, zonas muertas sin lixiviar y una disminución general de la eficiencia de riego. Más importante aún, la presencia de estos tensoactivos en la solución rica o PLS (Pregnant Leach Solution) que alimenta la siguiente etapa es la principal fuente de contaminación para el circuito de SX.

**Efectos teóricos en la extracción por solventes (SX):** Es la más vulnerable a este tipo de reactivos, puesto que se basa en la mezcla íntima de dos fases inmiscibles (la solución acuosa PLS y una solución orgánica con un reactivo extractante) seguida de una separación de fases limpia y rápida. Los tensoactivos están diseñados precisamente para hacer lo contrario, es decir, estabilizar emulsiones. A causa de esto, los estudios relacionados a esta etapa han evidenciado 2 principales consecuencias negativas (y ninguna positiva) en la aplicación previa de tenso activos.

- 1) Formación de "Crud": El más perjudicial de los efectos. Una emulsión estable de fase orgánica, fase acuosa, sólidos finos y aire (Kordosky, 2002). Los tensoactivos actúan como un "pegamento" que estabiliza esta emulsión, impidiendo la separación natural de las fases. El crud se acumula en la interfaz de los mezcladores-sedimentadores, causando una serie de problemas operativos graves.

Por ejemplo, en ocasiones el "crud" atrapa volúmenes significativos de la valiosa solución orgánica, que debe ser recuperada mediante costosos tratamientos o es directamente desechada, representando una pérdida económica directa. Así mismo, su acumulación reduce el volumen efectivo de los sedimentadores, disminuye los tiempos de residencia y puede causar rebalses, alterando la estabilidad de toda la planta de SX. Bajo este mismo concepto, algunos surfactantes han demostrado aumentar el arrastre de gotas de fase orgánica a la fase acuosa, entorpeciendo el proceso de separación de fases.

- 2) Aumento del Tiempo de Separación de Fases: Incluso en ausencia de crud severo, los tensoactivos aumentan el tiempo necesario para que las fases acuosa y orgánica se separen limpiamente (tiempo de disyunción), lo que reduce la capacidad de procesamiento de la planta (Rhamdhani et al., 2007).

**Efectos teóricos en la electroobtención (EW):** Se añaden intencionalmente al electrolito (solución de  $CuSO_4$  en  $H_2SO_4$ ) pequeñas cantidades de aditivos orgánicos para controlar y mejorar el proceso. Muchos de estos aditivos poseen características tensoactivas o actúan modificando las interfases.

La calidad física del cátodo de cobre es primordial. Sin aditivos, el depósito tiende a ser rugoso, nodular o incluso dendrítico, especialmente a altas densidades de corriente, lo que reduce la pureza (por oclusión de electrolito) y puede causar cortocircuitos entre ánodo y cátodo. Los aditivos actúan modificando los procesos de nucleación y crecimiento cristalino del cobre:

Ciertos aditivos, conocidos como niveladores o abrillantadores, se adsorben preferentemente en los puntos de mayor crecimiento (picos, salientes), inhibiendo la deposición en esas zonas y favoreciendo el crecimiento en los valles. Esto conduce a depósitos catódicos más lisos, densos, compactos y con mejor apariencia. Ejemplos clásicos o estudiados incluyen la cola animal, la tiourea (que también actúa como refinador de grano), la goma guar y polímeros como las poliácridamidas (PAM) o dextrinas. El mecanismo exacto puede implicar polarización (aumento del sobrepotencial necesario para la deposición) o depolarización (disminución del sobrepotencial), dependiendo del aditivo y las condiciones. Por ejemplo, se ha reportado que la goma guar actúa como depolarizador, mientras que las poliácridamidas tienden a polarizar el electrodo, actuando más como agentes niveladores.

**Inhibición de Dendritas:** Al modificar la cinética de deposición y promover una nucleación más uniforme, los aditivos ayudan a suprimir la formación de crecimientos dendríticos o nodulares indeseados.

Supresión de Niebla Ácida: Durante la electroobtención de cobre, en el ánodo inerte (generalmente Pb-Ca-Sn o ánodos dimensionalmente estables) ocurre la electrólisis del agua, generando oxígeno gaseoso ( $O_2$ ). Estas burbujas de oxígeno, al ascender a través del electrolito ácido ( $H_2SO_4$ ) y romperse violentamente en la interfase líquido-aire, arrastran y proyectan finas gotas de electrolito al ambiente de la nave de electroobtención, formando la denominada niebla ácida. Esta niebla es corrosiva para los equipos y estructuras, y representa un riesgo significativo para la salud respiratoria de los trabajadores. Se añaden tensoactivos específicos al electrolito en una concentración de alrededor de 30 ppm para mitigar este problema. El mecanismo principal se basa en la reducción de la tensión superficial del electrolito por la adsorción del tensoactivo en la interfase aire-líquido. Esto tiene varios efectos conjugados:

Estabilización de la película líquida de la burbuja: La película que rodea la burbuja de  $O_2$  se vuelve más elástica y drena más lentamente a medida que la burbuja asciende.

Ruptura menos violenta: Cuando la burbuja finalmente se rompe en la superficie, lo hace de forma menos energética, proyectando menos aerosol. La teoría sugiere que la niebla proviene principalmente de las "gotas de chorro" (jet drops) formadas tras el colapso de la cavidad de la burbuja, más que de las "gotas de película" (film drops).

Formación de espuma: Algunos tensoactivos generan una capa de espuma estable (de burbujas pequeñas y densas, o grandes y sueltas) en la superficie del electrolito, que actúa como una barrera física adicional, atrapando las gotas de aerosol antes de que escapen al ambiente. La efectividad de un supresor de niebla depende de su concentración (generalmente efectiva a niveles de ppm, ej. 10-30 ppm para FC-1100), la temperatura del electrolito, la densidad de corriente y la acidez.

Humectación y Dispersión (mención): La reducción de la tensión superficial también puede mejorar la humectación de la superficie del cátodo por el electrolito, asegurando un contacto más íntimo y uniforme, y potencialmente ayudando a dispersar pequeñas partículas sólidas o impurezas que pudieran estar presentes en el baño electrolítico.

Los problemas generados en SX por los tensoactivos se propagan inevitablemente a la etapa final de electroobtención. El principal mecanismo de afectación es el arrastre de orgánico contaminado hacia el electrolito de la nave de EW.

Aunque la mayoría del tensoactivo puede quedar atrapado en el crud o en el circuito de SX, una fracción, junto con el extractante orgánico y sus productos de degradación, llega a las celdas de EW. La presencia de estos compuestos orgánicos en el electrolito es conocida por causar:

- 1) Defectos en la Calidad del Cátodo: Los compuestos orgánicos pueden adsorberse en la superficie del cátodo, interfiriendo con la deposición ordenada de los iones de cobre. Esto provoca defectos físicos como picado (*pitting*), porosidad y la formación de nódulos, lo que disminuye la calidad y pureza del cobre producido, pudiendo llevar a su rechazo comercial (Robinson et al., 2005).

- 2) "Quemado de Orgánico": El arrastre de orgánico puede manifestarse como manchas oscuras o "quemaduras" en la superficie del cátodo, un claro indicador de contaminación que afecta directamente la calidad del producto.
- 3) Disminución de la Eficiencia de Corriente: La interferencia de los orgánicos en la superficie del cátodo puede promover reacciones secundarias, disminuyendo la eficiencia de corriente y, por lo tanto, aumentando el consumo de energía por tonelada de cobre producido.

El análisis en esta etapa es un poco más complejo. El proceso no se ve directamente afectado por la presencia de tenso activos o surfactantes, lo que daña el proceso de EW es el electrolito contaminado proveniente del proceso previo (SX).

**Efectos teóricos en la flotación (FL):** En caso de estar procesando sulfuros de cobre, esta suele ser la mejor opción. FL sería la etapa siguiente después de la molienda, se basa en hacer flotar las partículas del metal de interés mediante un proceso químico añadiendo colectores para juntarlas con burbujas de aire y así después recuperar esa parte rica de la solución por la parte superior de la celda. Este proceso se suele repetir para aumentar la concentración antes de pasar al proceso que le precede, el de fundición.

En este proceso en particular, los aditivos para la supresión de polvo añadidos previamente pueden tener impactos tanto positivos como negativos en el proceso.

Algunos tensoactivos crean una capa de burbujas estable en la superficie de la celda de flotación. Una buena espuma debe ser lo suficientemente fuerte para soportar el mineral flotado, pero también lo suficientemente frágil para romperse cuando el concentrado se vierte fuera de la celda. Estos espumantes modifican la tensión superficial del agua y facilitan la formación de burbujas de aire finas y uniformes, cruciales para la adhesión de las partículas de mineral. Este caso optimista en el que se utilizan los surfactantes requiere de un control para encontrar una concentración óptima. La adición previa en los caminos podría ser favorecedora si es igual o menor a la requerida en el proceso.

Las posibles consecuencias negativas de la presencia de surfactantes se basan principalmente en la competencia que tienen con los aditivos espumantes dedicados. Pueden alterar modificar la hidrofobicidad de las superficies minerales de manera no selectiva. Así mismo, dependiendo de su concentración, podrían llegar a generar espuma excesiva o insuficiente.

Por último, el escenario más pesimista es en el que los tenso activos presentes interfieran con la interacción burbuja partícula, disminuyendo así la flotación del mineral de interés, o por el contrario, ayudando a la flotación de partículas contaminantes, empeorando la calidad de la espuma recuperada.

Esto no es una norma general, está muy sujeto al surfactante en particular, por lo que un estudio empírico sería lo ideal para cuantificar sus efectos en este proceso, ya que podrían ser positivos o negativos.

## 2.4. Estudios similares

Los tensoactivos o surfactantes tienen el trabajo de reducir la tensión superficial del agua, esto es utilizado en la minería principalmente en 2 etapas de todo el proceso. La primera se aplica en el regadío, ya sea de caminos mineros o de pilas de acopio, para evitar el levantamiento de polvo. La segunda se aplica en el proceso de EW, en el cual estos compuestos son añadidos para disminuir la formación de niebla ácida, a causa de minimizar la explosión de las burbujas generadas.

Sin embargo, su introducción en el ciclo minero plantea un riesgo significativo, ya que el arrastre no intencionado de estos reactivos hacia procesos posteriores puede tener efectos perjudiciales y en cascada sobre los procesos de lixiviación en columnas (LX), extracción por solventes (SX) y electroobtención (EW).

En un estudio titulado "Evaluación de aditivos tensoactivos para la supresión de neblina ácida en la electroobtención de cobre", Vargas y Navarro (año de publicación y revista no especificados en la fuente) realizaron pruebas de electroobtención a escala de laboratorio para comparar el rendimiento de tres tensoactivos: Fluorad® FC-1100, Flotanol C-7 y Genapol PF-10, en concentraciones de 0, 5, 10, 15 y 20 mg/L. Las pruebas midieron el impacto en la tensión superficial del electrolito, la generación de neblina ácida, la eficiencia de corriente y la calidad física del cátodo de cobre. Los resultados mostraron que, si bien los 3 tensoactivos redujeron la tensión superficial y la neblina ácida, Genapol PF-10 tuvo un efecto perjudicial en la calidad catódica, produciendo depósitos rugosos y mal adheridos. En contraste, tanto Fluorad® FC-1100 como Flotanol C-7 suprimieron eficazmente la neblina ácida manteniendo una alta eficiencia de corriente (~94%) y produciendo cátodos de excelente calidad y lisos, lo que identificó a Flotanol C-7 como una posible alternativa viable al estándar de la industria, Fluorad® FC-1100.

En su tesis doctoral, "Mechanisms of acid mist formation in electrowinning", Al Shakarji (2012) investigó el rendimiento del tensoactivo ampliamente utilizado FC-1100. El estudio probó múltiples variables y descubrió que la temperatura de la solución y la concentración de FC-1100 eran los factores más significativos que influían en la generación de neblina ácida. Se determinó que la neblina ácida se reducía notablemente con la adición de FC-1100 hasta 30 ppm, con rendimientos decrecientes a concentraciones más altas. La investigación concluyó que la eficacia del FC-1100 no se debe principalmente a la reducción de la tensión superficial, sino más bien al aumento de la elasticidad y la viscosidad de la superficie, lo que altera el mecanismo de estallido de las burbujas. Además, cuando se utilizó FC-1100 en combinación con barreras físicas flotantes (esferas), la reducción total de la neblina ácida mejoró en un promedio del 29% en comparación con el uso del tensoactivo solo.

En la tesis de maestría "An Investigation of Acid Mist Formation and Suppression Mechanisms in Copper EW Plants", Roa (2022) evaluó posibles reemplazos ecológicos para el FC-1100, probando específicamente dodecilsulfato de sodio (SDS), SDS', DOW8390 y DOW2A. Un aspecto clave del estudio fue el uso de electrolito real de una mina de cobre activa en Arizona, probado a 20°C, 35°C y 50°C. Los resultados mostraron que los agentes de alta formación de

espuma como DOW2A y DOW8390 no eran adecuados debido a la creación de espumas gruesas y estables, que presentan un riesgo de incendio/explosión y agotan el tensoactivo de la solución. Sin embargo, el SDS exhibió propiedades de baja formación de espuma comparables a las del FC-1100, reduciendo eficazmente el número de "jet drops" generadoras de neblina de las burbujas que estallan. El estudio identificó al SDS como un candidato de reemplazo prometedor y de baja formación de espuma para el FC-1100, aunque señaló que el impacto en la calidad del depósito de cobre no fue un foco principal de la investigación.

La tesis de maestría "Laboratory Scale Experimental Analysis of the Effect of Surfactants on Acid Mist Suppression during Copper Electrowinning" de Elgin (2024) aborda la necesidad industrial de un reemplazo para el tensoactivo discontinuado FC-1100. El enfoque experimental del estudio fue integral, involucrando una evaluación de laboratorio de múltiples etapas de varios tensoactivos candidatos. La metodología incluyó tres pruebas críticas: muestreo de aerosoles sobre un electrolito burbujeado con oxígeno para medir directamente la supresión de neblina, pruebas de separación de fases para asegurar la compatibilidad con el proceso de extracción por solventes aguas arriba y, finalmente, pruebas de electroobtención para evaluar el efecto general en el proceso central. El resumen concluye que los resultados de esta evaluación sistemática identificaron con éxito un posible reemplazo para el FC-1100, demostrando la necesidad de un protocolo de prueba holístico para calificar nuevos reactivos.

Un estudio publicado en la Revista Ingeniería UDA titulado "Efecto de los elementos tensoactivos en algunas de las principales variables de proceso en extracción por solventes de cobre" investigó la influencia del tensoactivo Fluorad FC-1100 en el proceso de extracción por solventes (SX) que precede a la electroobtención. Las pruebas utilizaron el extractante LIX 984N y dosificaron el tensoactivo a 4, 16 y 40 ppm. Los investigadores evaluaron el efecto sobre la cinética de extracción y reextracción, las isotermas de distribución (equilibrio) y el tiempo de ruptura primario (separación de fases). El estudio concluyó que el tensoactivo no tuvo un efecto significativo en el equilibrio del sistema, ya que las isotermas de distribución se mantuvieron prácticamente sin cambios. Sin embargo, el aditivo sí afectó negativamente la cinética de las reacciones y, de manera crucial, el tiempo de ruptura primario, que es una medida de la rapidez con la que se separan las fases orgánica y acuosa.

No hay una norma clara sobre el impacto de los tensoactivos en los procesos hidrometalúrgicos, los resultados siempre están sujetos a las condiciones en las que se desenvuelve el proceso y la presencia de más agentes en la solución, los cuales pueden ser tanto activos como inertes. Por eso es tan importante la experimentación para una demostración empírica de los resultados.

# Capítulo 3: Metodología y desarrollo experimental

## 3.1. Antecedentes del proyecto

Veolia tiene como objetivo acotar los posibles efectos de la incorporación de los reactivos SP-1 y SP-2 en la cadena. Si bien el este proyecto como tal, busca acotar sus implicancias en procesos acotados, en la práctica cualquier efecto negativo que impida su uso es razón suficiente para postergar o cancelar su distribución.

Se requiere la mayor cantidad de información referente a su uso que se pueda obtener con los medios de los cuales dispone la empresa, que, para este caso en particular, son los instrumentos y materiales de la Universidad De Chile, específicamente del laboratorio de procesamiento de minerales.

## 3.2. Metodología

Previamente al desarrollo experimental se hizo un protocolo y se presentó a Omar Gaete (representante de Veolia en el proyecto), este sirvió para tener todo tipo de precauciones de seguridad y poder desempeñar de la manera más limpia y prolija que se puede la realización del proceso.

Sin embargo, no se definieron desde el principio las concentraciones con las que se iban a hacer las pruebas. Esto porque se esperaba modificar los experimentos próximos conforme se fuera concluyendo sobre los existentes. Como se mencionó previamente, los aditivos de supresión de polvo para los caminos y cintas transportadoras se añaden diluidos en agua en una concentración de entre 1 y 10 g de aditivo por cada tonelada seca de material. Esto no significa que necesariamente las pruebas que se realizaran serían probando valores que se encuentren en ese rango, el estudio busca encontrar la concentración en la que los surfactantes representen un problema perceptible, a menos que esta sea 50 veces la concentración máxima utilizada en la industria o más. Esta decisión se toma con la premisa de tener un factor de seguridad muy elevado, ya que las pruebas no son hechas en condiciones idénticas a las que se buscan acercar.

La fórmula idónea para la creación del electrolito es determinada mediante iteración, ya que no se sabe si los números teóricos funcionan para la realización de la solución en la práctica. Por ejemplo, al existir una concentración muy elevada de Sulfato de Cobre Pentahidratado, por mucho que la solución se agite, es imposible (sin temperaturas muy elevadas) evitar la formación de cristales en los recipientes de vidrio.

### 3.3. Experimentos preliminares

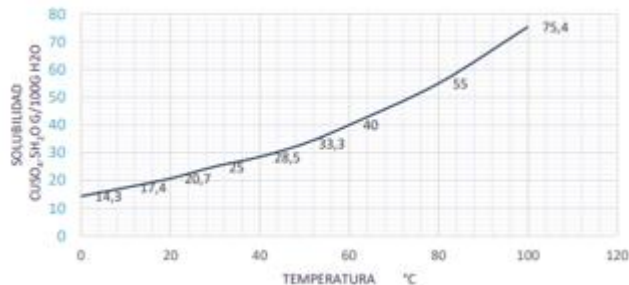
Los experimentos preliminares se denominan como grupo A, y se realizan con los cátodos 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7. Estos son principalmente para retroalimentarse y así realizar de la mejor manera posible los experimentos finales, denominados como grupo B, los cuales se realizan con los cátodos 8, 9, 10, 11, 12, 13 y 14.

Para la realización de las soluciones (electrolitos) se incorpora  $C_u$  en formato de sulfato de cobre pentahidratado, ya que en el tratamiento de óxidos de cobre (que es la cadena a la cual pertenece la etapa de EW), cuando la solución rica llega en formato acuoso a las celdas de electro obtención, esta posee el cobre en el compuesto  $C_uSO_4$ . El sulfato de cobre pentahidratado ( $C_uSO_4 \cdot 5H_2O$ ) es la forma más común, estable y pura de sulfato de cobre que se puede adquirir en grado de laboratorio para preparar soluciones acuosas.



**Figura 6:** Sulfato de cobre pentahidratado para uso de laboratorio.

El sulfato de cobre pentahidratado ( $C_uSO_4 \cdot 5H_2O$ ) es una sal inorgánica, su disolución en agua es una reacción endotérmica, por lo que su solubilidad es altamente susceptible a la temperatura.



**Gráfico 1:** Solubilidad del sulfato de cobre pentahidratado en función de la temperatura. Fuente: Adaptado de Nolasco León y Rojas Baltazar (2013)

### 3.3.1. Elaboración de fórmula para el electrolito

Para la realización de los experimentos se comienza con el cálculo de los compuestos para la realización de las soluciones. El electrolito debe ser representativo, es decir, parecerse lo más posible a la solución presente en la escala industrial, para ello se ajustan las proporciones en un rango de lo que se ve en la industria, teniéndose las siguientes restricciones:

- 1) El cobre presente en la solución debe estar como mínimo en una concentración de 36 g/L y un máximo de 45 g/L
- 2) La cantidad de ácido sulfúrico (puro) debe estar en una concentración de entre 200 y 250 g/L.

Encontrar empíricamente la fórmula ideal con las restricciones presentes, toma 3 intentos, puesto que en los primeros 2 ocurre una cristalización del sulfato de cobre pentahidratado.

Estos cristales son extremadamente difíciles de disolver.

Para los cálculos se utilizan los siguientes datos:

Pesos moleculares (PM): (Cu: 63,546), (S: 32,065), (O: 15,999), (H: 1,008)

PM de  $(CuSO_4 \cdot 5H_2O) = 63,546 + 32,065 + 4 \cdot 15,999 + 5 \cdot (2 \cdot 1,008 + 15,999) = 249,682$

Densidades: Agua destilada: 1 g/L, ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ): 1,84 g/L

El procedimiento es siempre el mismo a lo largo de toda la experiencia. Se comienza añadiendo una parte de agua destilada (1/2 aproximado de la solución total) a un matraz, posteriormente se añade la cantidad requerida de ácido sulfúrico al agua destilada. Esto genera una reacción exotérmica primaria, el calor de esta se aprovecha para disolver más fácilmente el sulfato de cobre pentahidratado (el cual presenta formato granulado como el azúcar), que es el tercero en ser añadido. Después se introduce una barra de agitación magnética de 3 cm dentro del matraz para luego dejarlo sobre un agitador magnético durante 1 hora a 280 RPM. Durante este lapso se añade más agua destilada, pero sin llegar a aforar el matraz. Finalmente, con el recuperador se remueve la vara de agitación del interior, se completa el aforo de la solución con agua destilada y con la tapa bien aprisionada se agita una última vez manualmente.

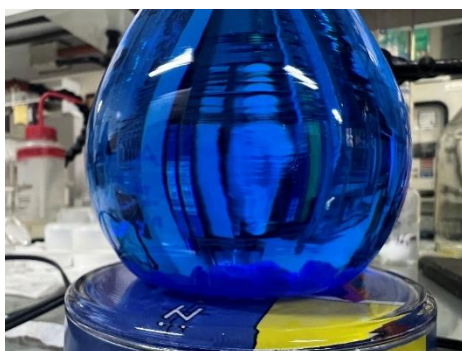
El primer cálculo se realiza con las siguientes concentraciones (para un litro):

- 1) 45 g/L de cobre (Cu) en solución
- 2) 250 g/L de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) en solución
- 3) Agua destilada para completar el resto del volumen

$$CuSO_4 \cdot 5H_2O \text{ en solución: } 45 \frac{g}{L} \cdot \frac{249,68 \text{ PM}}{63,54 \text{ PM}} = 176,94 \text{ g}$$

$$H_2SO_4 \text{ en solución: } 250 \frac{g}{1,84 \frac{g}{mL}} = 135,87 \text{ mL}$$

Esta solución, presenta cristales muy grandes 24 horas después de ser terminada.



**Figura 7:** Cristalización en solución de sulfato de cobre pentahidratado (primer intento)

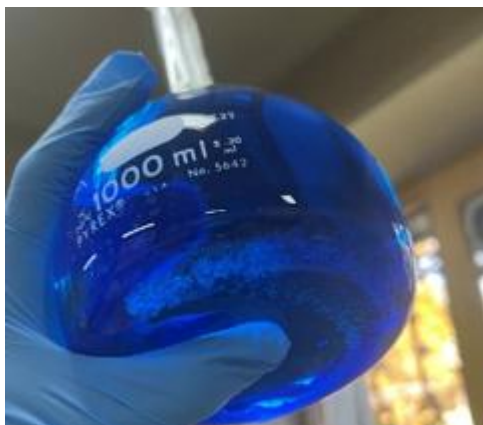
El segundo cálculo se realiza con las siguientes concentraciones (para un litro):

- 1) 40 g/L de cobre (Cu) en solución.
- 2) 250 g/L de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) en solución.
- 3) Agua destilada para completar el resto del volumen.

$$CuSO_4 \cdot 5H_2O \text{ en solución: } 40 \frac{g}{L} \cdot \frac{249,68 \text{ PM}}{63,54 \text{ PM}} = 157,18 \text{ g}$$

$$H_2SO_4 \text{ en solución: } 250 \frac{g}{1,84 \frac{g}{mL}} = 135,87 \text{ mL}$$

Esta solución, presenta cristales pequeños, que, con el transcurso de un día completo de agitación, finalmente pueden ser disueltos, no obstante, la solución que se debe obtener es una homogénea que sea fácil de reproducir y al mismo tiempo cumpla con las restricciones aclaradas en un principio. Por esta razón, la fórmula del segundo intento es descartada.



**Figura 8:** Cristalización menor en solución de sulfato de cobre pentahidratado (segundo intento).

El tercer cálculo se realiza con las siguientes concentraciones (para medio litro):

- 1) 40 g/L de cobre (Cu) en solución
- 2) 200 g/L de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) en solución
- 3) Agua destilada para completar el resto del volumen

$$CuSO_4 \cdot 5H_2O \text{ en solución: } 40 \frac{g}{L} \cdot \frac{249,68 \text{ PM}}{63,54 \text{ PM}} = 157,18 \text{ g}$$

$$\frac{157,18}{2} \text{ gr} = 78,59 \text{ g}$$

$$H_2SO_4 \text{ en solución: } 200 \frac{g}{1,84 \frac{g}{mL}} = 108,7 \text{ mL}$$

$$\frac{108,7}{2} \text{ gr} = 54,35 \text{ mL}$$

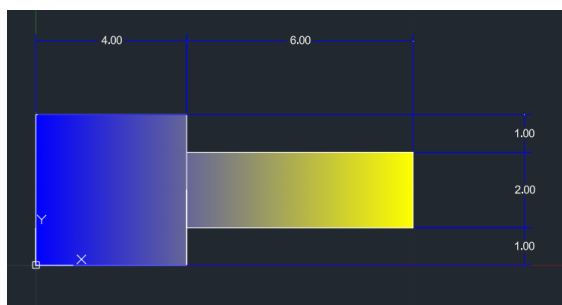
Esta solución resulta como se busca, también se homogeniza más rápido al hacerse una cantidad de medio litro en lugar de uno. Una vez documentada, se empieza a reproducir tal como se describe.



**Figura 9:** Solución exitosa de sulfato de cobre pentahidratado (tercer intento).

Es importante mencionar que 78,59 g de sulfato de cobre pentahidratado son imposibles de homogeneizar con 0,5 L (aproximados) de agua destilada a temperatura ambiente. Extrapolando la curva en el gráfico 1 de solubilidad en función de la temperatura, para que esta mezcla fuera posible se habría necesitado una temperatura de más de 120 °C. Aquí la reacción exotérmica del agua con el ácido sulfúrico hace un papel fundamental aportando un aumento en la temperatura. A esto se suma la agitación inducida para así obtener esta solución homogénea.

Los electrodos se recortan de los metales utilizando las siguientes plantillas hechas con el software Autocad.



**Figura 10:** Plano de los electrodos a utilizar.

Después de ser recortados con un esmeril, cada cátodo es cuidadosamente pulido con lijas al agua de grado 200, luego 600 y finalmente 1000. Esto para evitar que queden rebabas en los bordes metálicos, ya que esto podría interferir negativamente en la experimentación, específicamente causando una depositación dendrítica.

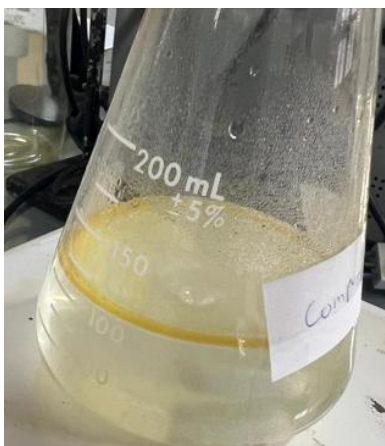
Teniendo en consideración que la concentración de reactivo comúnmente usada en el campo de la minería es de entre 1 y 10 g por tonelada seca, se utilizan las concentraciones de 3, 10 y 30 g/t en la primera experiencia, esto además de la realización de la prueba blanco, sin ningún tipo de agente externo.

Al utilizar celdas de 500 mL para realizar cada experimento, implementar cada una estas concentraciones de manera directa es casi imposible con exactitud, incluso con una micropipeta.

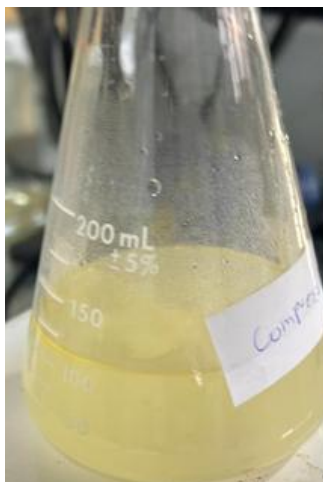
Es por esto que se opta por realizar una disolución primaria en agua destilada para poder medir las cantidades con mayor facilidad, trabajando con una base simple de cálculo, en cada matraz de 200 mL se agrega una parte de reactivo por 99 partes de agua destilada. Obteniendo así una solución 100 veces menos concentrada de SP-1 y SP-2.

Antes de empezar la experimentación en la Universidad de Chile, la empresa Veolia descarta por sí misma uno de los 3 reactivos, ya que este tiene un comportamiento totalmente oleoso, es decir, es completamente insoluble en agua. Esto lo descarta de inmediato del experimento, ya que independientemente de sus posibles efectos negativos en los procesos hidrometalúrgicos, es un requisito excluyente que cuente con un grado de solubilidad que permita incorporarlo al agua que le es rociada a las pilas.

El reactivo SP-1 es disuelto sin ningún problema, sin necesidad de un tiempo prolongado de agitación ni aumento temperatura, mientras que el reactivo SP-2 presenta más problemas. Este último, si bien no tiene un comportamiento totalmente oleoso como el primer reactivo, si es más difícil de homogeneizar con el agua, requiere un tiempo más prolongado de agitación y de una temperatura alrededor de los 65 °C. Sumado a esto, se tiene que la disolución en agua es inestable, después de un tiempo se vuelve a separar, no perfectamente como el agua y el aceite, pero si pierde bastante homogeneidad. Este es un muy mal indicador, que seguramente terminará con la suspensión de la producción de dicho reactivo, pero de igual manera se decide seguir con ambos hasta el final.



**Figura 11:** Reactivo SP-2 con disociado del agua destilada en condiciones regulares.



**Figura 12:** Reactivo SP-2 homogeneizado y disuelto con temperatura inducida externamente.

Para el cálculo de las concentraciones de cada reactivo se tienen presentes las siguientes condiciones:

- 1) La humedad en las pilas de acopio es del 30% en las grandes mineras interesadas en los reactivos de control de polvo.
- 2) La concentración en g por cada tonelada hace referencia a g de reactivo por cada tonelada de mineral seco.
- 3) La densidad de ambos reactivos es casi idéntica a la del agua destilada, para efectos prácticos se puede aproximar a 1

Para trabajar más cómodamente, se realizan los cálculos sobre el agua que se añade a una tonelada de mineral seco para tener el 30% de humedad que está presente en el proceso industrial.

$$300 \text{ Kg} * \frac{1000 \text{ Kg}}{700 \text{ Kg}} = 428,51 \text{ Kg}$$

Es decir, para aplicar reactivo a una tonelada seca, se deben añadir 428,51 Kg de agua con el reactivo en ella, de esta manera el agua representará el 30% del total (lo previsto en las condiciones de cálculo como humedad del 30%).

Utilizando esa base se calcula el volumen de cada reactivo diluido a añadir.

Para 3 g/t:

$$\frac{0,5_{Kg} * 3\frac{g}{t}}{428,51 Kg} = 0,0035 g$$

Para 10 g/t:

$$\frac{0,5_{Kg} * 10\frac{g}{t}}{428,51 Kg} = 0,012 g$$

Para 30 g/t:

$$\frac{0,5_{Kg} * 30\frac{g}{t}}{428,51 Kg} = 0,035 g$$

Como los reactivos fueron disueltos en 99 partes de agua destilada cada uno, se agrega 100 veces la cantidad calculada, dando así valores mucho más fáciles de manipular, los cuales son:

- 1) Para 3 g/t: 0,35 mL
- 2) Para 10 g/t: 1,2 mL
- 3) Para 30 g/t: 3,5 mL

Se hacen 7 soluciones de sulfato de cobre para obtener las primeras conclusiones. La primera sin ningún reactivo, 3 con concentraciones de 3, 10 y 30 g/t de reactivo SP-1 y 3 con concentraciones de 3, 10 y 30 g/t de reactivo SP-2.

### 3.3.2. Experimentación primaria

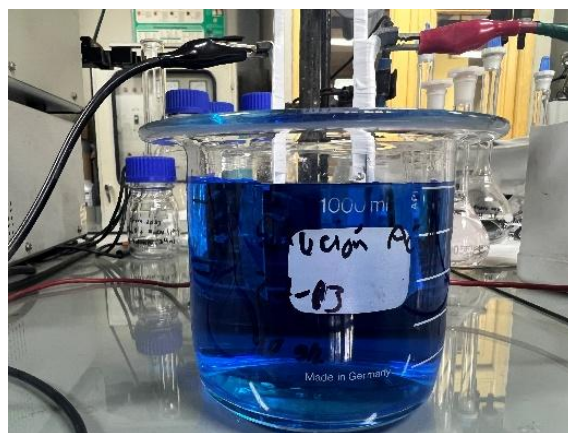
Antes de comenzar los procesos de electroobtención, se le realiza un proceso de pasivación al ánodo que será posteriormente utilizado. Esto se realiza haciendo el mismo proceso de EW durante 2 horas a una corriente de 0,4 A, una vez finalizado el proceso, se lava con agua destilada y se inician las pruebas.



**Figura 13:** Comparativa entre ánodo virgen y ánodo pasivado.

Como se puede apreciar en la imagen 13, el ánodo ya pasivado (el de la derecha), tiene un color mucho más oscuro que un ánodo igual sin pasivar. Esto se debe a una pequeña capa de óxido que se forma al rededor

Para cada una de las 7 primeras experiencias de electroobtención se pesa el cátodo en una balanza analítica recién calibrada, luego se introduce en la solución con el ánodo durante una hora sometido a una corriente de 0,8 A en una celda de 500 mL de cada solución, se extrae y se lava con agua destilada, posteriormente se seca con aire caliente y luego se vuelve a pesar en la misma balanza.



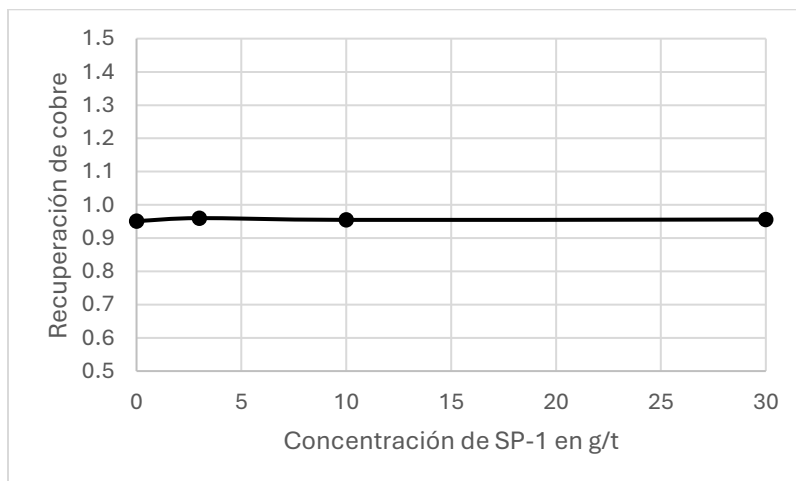
**Figura 14:** Celda de electro obtención.

### 3.3.3. Conclusiones primarias

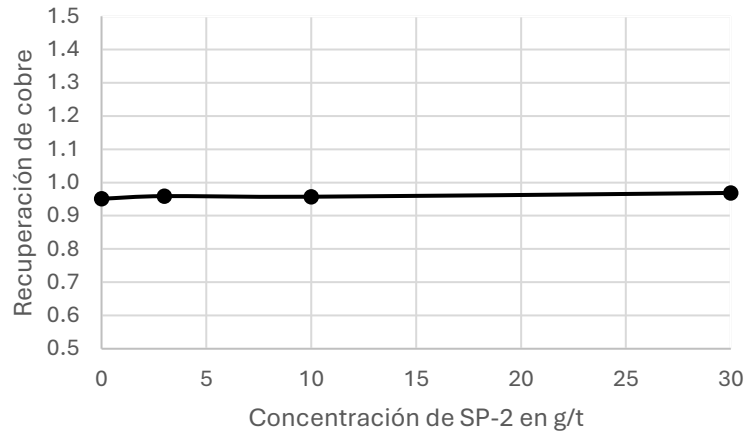
Como un primer resultado no se logra apreciar una correlación directa significativa entre la concentración de los reactivos y la recuperación de cobre en los cátodos.

Reactivo SP-1		
g/t	Recuperación	Variación
0	0,951	Ref
3	0,960	-0,96%
10	0,955	-0,39%
30	0,956	-0,52%
Reactivo SP-2		
g/t	Recuperación	Variación
0	0,951	Ref
3	0,959	-0,01
10	0,957	-0,01
30	0,969	-0,02

**Tabla 2:** Cobre depositado en cátodos para concentraciones de 3, 10 y 30 g/t (Grupo A).



**Gráfico 2:** Recuperación de cobre en función de la concentración de reactivo SP-1 (Grupo A).



**Gráfico 3:** Recuperación de cobre en función de la concentración de reactivo SP-2 (Grupo A).

Estos primeros experimentos son para tener una visión a grandes rasgos de lo que se puede esperar que suceda. A partir de estos resultados se definen las concentraciones a probar en la partida B, los cuales serán los 7 experimentos definitivos.

En un análisis rápido se percibe que la añadidura de los surfactantes para la disminución del levantamiento de polvo favorece la recuperación de cobre entre un 0,5 y un 1,8%.

Esto se asocia principalmente a los errores instrumentales y la manipulación humana en una primera instancia, ya que el fabricante especifica que tanto el reactivo SP-1 como el SP-2 son tensoactivos, no aditivos orgánicos para favorecer la recuperación. Es por eso que, en el nuevo protocolo, además de fijar las nuevas concentraciones a probar, se aumentan considerablemente las medidas para reducir el ruido en las mediciones.

Como se explica en el capítulo 2.3.4, un tensoactivo puede llegar a actuar como un nivelador, adhiriéndose a las caras del cátodo, específicamente en los puntos irregulares, disminuyendo la nucleación y la depositación preferencial, dando como resultado un cátodo de mayor calidad (sin dendritas) y mayor recuperación. Esto es poco probable en este caso, pero no se descarta por completo.

### 3.3.4. Diseño de plan experimental definitivo

Se opta por utilizar las concentraciones 4,29, 42,85 y 428,51 g/t, ya que así se prueban valores desde lo que puede ser normal en la industria hasta 10 y 100 veces más.

En cuanto al procedimiento de pesado de los electrodos, también se redefine. Esto en base a un experimento iterativo, esta vez realizado con una balanza micro analítica, con graduación de 0,0001 g. Este pequeño experimento consiste en colocar los nuevos 7 cátodos vírgenes en el horno durante 3,5 horas a 80 °C. Estos se pesan transcurridos 15 minutos desde su ingreso, luego a los 30 minutos, posteriormente a los 45 minutos y finalmente a las 3,5 horas. Las variaciones de masa promedio son las siguientes:

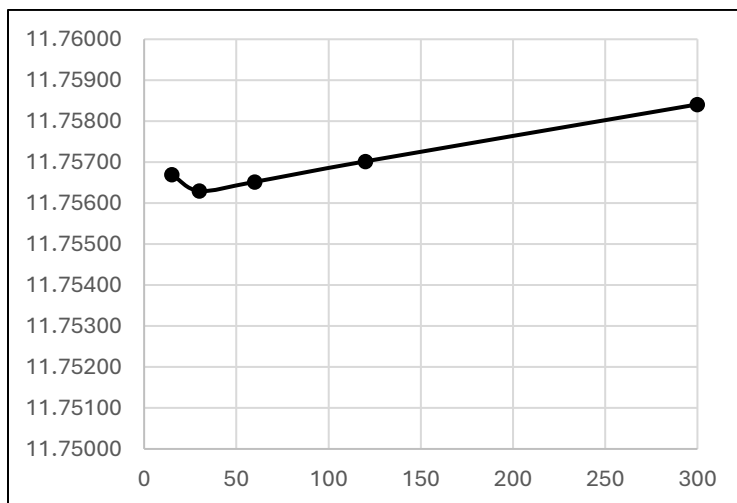
- a) Peso húmedo vs 15 min de exposición al horno: Disminución promedio del 0,009%
- b) Peso húmedo vs 30 min de exposición al horno: Disminución promedio del 0,008%
- c) Peso húmedo vs 45 min de exposición al horno: Disminución promedio del 0,016%
- d) Peso húmedo vs 210 min de exposición al horno: Disminución promedio del 0,016%

Con esta información se da por entendido que a partir de los 45 minutos de exposición a una temperatura de 80 °C en una cámara cerrada basta para quitar toda la humedad. Se hace también la prueba de dejar los electrodos deshidratados en un pote hermético con sílica gel, para no tener que repetir el proceso de secado entre experimentos, pero la masa de los cátodos, después de intentar aislarse de la humedad por un día, aumenta incluso a más que su valor inicial, es decir, no solo no se mantienen secos, se humedecen más que al almacenarlos en un cajón convencional.

El siguiente punto a definir, es el valor de la masa que considerar como válido al momento de pesar un cátodo al menos después de una hora de horno (15 min extra del tiempo asintótico, para tener margen de seguridad). Sucede que cuando se trabaja con una graduación de cienmilésima parte de gramo, el simple hecho de tener el objeto de estudio expuesto al ambiente cambia su masa a una velocidad muy rápida. Por esta razón para la definición de la masa “real” de cada cátodo. Se colocan nuevamente en el horno por una hora y se pesan al sacarse del horno habiendo transcurrido: 15 s, 30 s, 1 m, 2 m y 5 m. Después del registro, se grafican los valores obtenidos para tomar una decisión.

Experimento	Cátodo	15 s	30 s	60 s	120 s	300 s
1B	8	11,75670	11,75630	11,75652	11,75702	11,75841
2B	9	11,51653	11,51420	11,51647	11,51692	11,51826
3B	10	11,81136	11,81109	11,81122	11,81167	11,81305
4B	11	11,91744	11,91735	11,91758	11,91813	11,91959
5B	12	11,87547	11,87493	11,87511	11,87559	11,87705
6B	13	11,49258	11,49270	11,49276	11,49321	11,49462
7B	14	11,66152	11,66118	11,66126	11,66169	11,66308

**Tabla 3:** Masa de cátodos vírgenes en exposición a la humedad.



**Gráfico 4:** Masa de cátodo 8 virgen en función de la exposición a la humedad.

La variación de masa registrada es bastante pequeña en comparación a los valores que se ven en la vida cotidiana, se requiere graficar en un intervalo de 10 mg para apreciar el cambio, no obstante, este se mantiene como algo relevante para el estudio, ya que se trabaja con una pequeña escala y se desea cuantificar lo mejor posible la influencia de los surfactantes. Los gráficos de la variación de masa de los cátodos 9, 10, 11, 12, 13 y 14 se encuentran en la sección de anexos (capítulo 8). Lo ideal en este caso sería ilustrar las 7 curvas en el mismo gráfico, pero sucede que en todos los casos la variación total es ligeramente inferior a 10 mg, y la diferencia de masa entre cátodos está alrededor de los 300 mg, por lo que no se pueden apreciar las curvas con claridad si se grafican en el mismo intervalo. De igual manera, todas ellas tienen un comportamiento similar, teniendo una pequeña disminución en los primeros segundos y luego empezando a incrementar su masa de manera lineal. La proyección inferida, es que la curva pasados los 5 minutos comienza a adquirir un comportamiento sigmoide, es decir, va disminuyendo su pendiente hasta alcanzar la pendiente 0 en un valor asintótico alcanzado en un punto muy alejado del eje de las abscisas, que sería el tiempo en segundos en el que el cátodo recuperaría el 100% de la humedad que puede tener. Esto último, por supuesto está sujeto al clima que se tenga en el laboratorio. Se estima que ese tiempo sería cercano al 1800 segundos, es decir, media hora.

La discordancia con el comportamiento teórico de la curva se adjudica a un ajuste de la balanza micro analítica que tarda entre 15 y 20 segundos. En una versión simplificada del problema, se obtendría una curva perfectamente creciente, ya que se estaría midiendo la masa del electrodo más una añadidura de humedad que va constantemente aumentando. Por consiguiente, se estima que la primera medición (a los 15 segundos) no es representativa.

Teniendo esto en consideración, la medición considerada como masa virgen de cada cátodo es la realizada a los 30 segundos después de sacado de un horno hermético a una temperatura de 80 °C por al menos una hora.

### 3.4. Experimentos definitivos

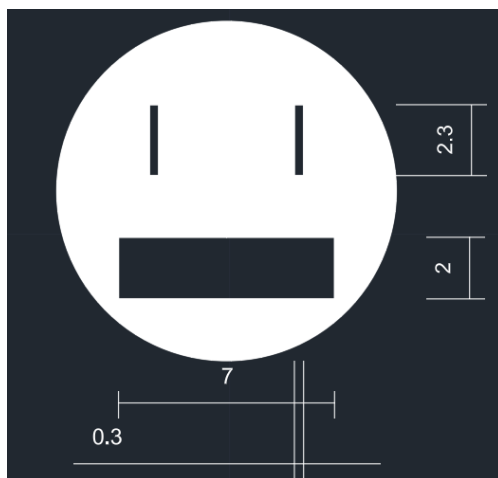
La realización de los experimentos definitivos suma un incremento en la exactitud de la medición de la masa de cobre recuperado, una medición básica en 2 formatos para la cuantificación de la niebla ácida producida y una medición de las condiciones del electrolito durante el tiempo que se somete a la corriente.

Estas nuevas condiciones medidas son:

- 1) Temperatura inicial
- 2) Variación de corriente durante la EW
- 3) pH estimado

Como se comenta en el capítulo 3.2.3, la ruptura de una burbuja en la superficie produce dos tipos de gotas, las “*film drops*” y las “*jet drops*”

Las gotas de tamaño más pequeño se cuantifican analizando un portaobjetos que es colocado muy cerca del nivel del electrolito, mientras que las gotas grandes, se miden (a grandes rasgos) en base a la diferencia entre la masa inicial y final de un papel filtro modificado para cubrir la mayoría de la superficie sobre la solución. El papel filtro modificado tiene la forma que se muestra a continuación.



**Figura 15:** Plano de papel filtro con ranuras para electrodos y portaobjetos.

Los 7 papeles filtro modificados son pesados en la balanza micro analítica de igual manera, pero estos se pesan sin ser previamente deshidratados, ya que al tratarse de una variación meramente de humedad, de cualquier forma, es muy difícil distinguir que parte de esa humedad es por el clima en que se encuentra y que parte es por la absorción de gotas de niebla ácida.

El sistema ya montado se muestra a continuación.



**Figura 16:** Montaje de experimento de electro obtención a escala.

El procedimiento que se realiza en cada una de las 7 pruebas del grupo B comienza (al igual que en el grupo A) con la preparación de un electrolito base (en las concentraciones definitivas), al cual se le añade (o no, en el caso de la prueba blanco) su respectivo supresor de polvo en la cantidad que corresponde al momento de aforar el matraz en el cual se encuentra esta solución.

Una vez homogeneizada la solución, se vierte siempre en la misma celda de 500 mL, se mide su temperatura inicial con un termómetro de mercurio, luego se mide el pH con papelillos de tornasol (medidores de pH que reaccionan cambiando de color) y finalmente se monta todo como se muestra en la fotografía.

Antes de inducir la corriente, el circuito se cierra a través un multi voltímetro, el cual es utilizado para poder documentar la variación de corriente durante el proceso a una exactitud superior a la entregada por la misma fuente.

Finalmente se induce la corriente durante una hora.

Posterior al proceso de EW, se limpian ambos electrodos con agua destilada y el cátodo se coloca nuevamente en el horno a 80 °C el cual se tiene precalentado a esa temperatura.

Inmediatamente después se pesa el papel filtro modificado correspondiente y se toma la temperatura final.

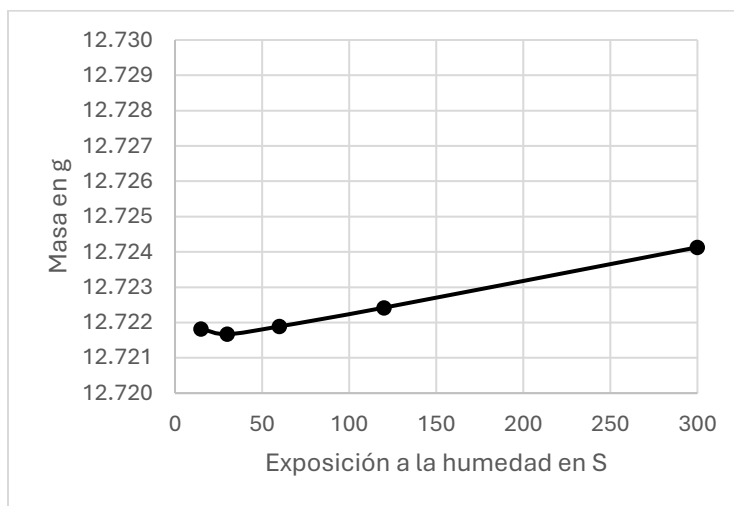
Durante todo el proceso se fotografían los cátodos y porta objetos para poder analizar cualquier indicador de carácter cualitativo.

Finalmente, habiendo transcurrido una hora o más en el horno con todos los cátodos en su interior, se realizan los pesajes de los cátodos de la misma manera en la que se pesaron previamente al proceso de EW del grupo B. Aquí se muestran sus masas en función de su exposición a la humedad.

Experimento	Cátodo	15 s	30 s	60 s	120 s	300 s
1B	8	12,72182	12,72167	12,72189	12,72242	12,72413
2B	9	12,47762	12,47744	12,47746	12,47789	12,47952
3B	10	12,76491	12,76567	12,76614	12,76663	12,76832
4B	11	12,89670	12,89240	12,89278	12,89378	12,89697
5B	12	12,83021	12,83078	12,83093	12,83154	12,83355
6B	13	12,44977	12,44982	12,44993	12,45032	12,45175
7B	14	12,62042	12,62054	12,62070	12,62133	12,62339

**Tabla 4:** Masa de cátodos vírgenes en exposición a la humedad.

Como era de esperarse, al igual que en el caso de los cátodos vírgenes, se obtiene el estilo de gráfica similar a un “tiket” en las recreaciones a escala del grupo B. A continuación, se muestra la gráfica del cátodo 8, perteneciente a la prueba blanco del segundo grupo. Los gráficos de los cátodos 9, 10, 11, 12, 13 y 14 se encuentran en el capítulo 8 (anexos).



**Gráfico 5:** Recuperación de Cu en cátodo 8 en función de la exposición a la humedad.

## 3.5. Errores asociados

La parte más importante de un estudio es la obtención de las conclusiones mediante el análisis de los resultados. En este punto se debe tener presente que los resultados no siempre son lo que aparentan, se deben evitar las conclusiones erradas comprendiendo que hay más allá de los resultados visibles, entendiendo que en los experimentos hay factores que no están bajo control, por lo que su influencia debe tomarse en cuenta también.

Un ejemplo muy claro en este estudio es que el proceso de EW se realiza de manera aislada, no se utiliza como entrada la fase acuosa purificada de un proceso a escala de extracción por solventes. Es por esto que la independencia entre la concentración presente de un tenso activo y la recuperación de cobre, solo significa que la concentración no afecta directamente al proceso. No obstante, sigue latente la posibilidad de que el proceso previo (SX) se vea afectado por la presencia de surfactantes al nivel de que entregue una solución contaminada al proceso de electroobtención, caso en el que los reactivos contra el levantamiento de polvo si estarían afectando la recuperación, solo que de una manera indirecta que un estudio centralizado no podría detectar.

### 3.5.1. Ruido en las mediciones

Bajo el mismo concepto de interpretar los resultados dentro de un contexto, es imperativo mencionar las siguientes aclaraciones referentes al proceso experimental.

- 1) La balanza micro analítica en condiciones ideales tiene una graduación de una cienmilésima de gramo, pero para funcionar de manera impecable requiere de un elemento sin disponibilidad. Este elemento en particular es una mesa que inhibe las vibraciones, permitiendo así que la balanza funcione bien. Al tener la balanza micro analítica ubicada en una mesa convencional, el dígito final (que indica la cienmilésima) se vuelve menos representativo.
- 2) El aumento en la masa del papel filtro por la absorción de la niebla ácida producida puede verse afectado por la absorción de agua pura en consecuencia de exposición a un clima húmedo como lo fue junio en Chile en 2025.
- 3) La evaporación del agua presente en la solución por la temperatura cálida genera una especie de niebla ácida estando aún en estado inerte, antes de comenzar la EW. Esta niebla es menos tóxica, ya que la composición de esta es principalmente agua.
- 4) El reactivo SP-2 presenta una disociación parcial a lo largo del tiempo después de ser homogeneizado con agua destilada, ese proceso puede ocurrir en una pequeña medida dentro de la celda durante la EW, interfiriendo de manera desigual en el proceso.

En cuanto al ruido o error presente en los instrumentos, no todos está sujetos a una posible falla en la máquina como tal, algunas interferencias son producto de factores externos.

Un ejemplo de esto es el ruido eléctrico producido por el circuito cerrado de la EW, el multi voltímetro marca un valor de 0,0016 A como promedio antes de encender la fuente de poder en cada caso. Valor que está en un orden de magnitud 100 veces menor a la graduación de interés, por lo que no se considera relevante.

## Capítulo 4: Resultados

Mediante la experimentación y los elementos a disposición, el objetivo principal es cuantificar los posibles efectos que tengan los reactivos SP-1 y SP-2 en la depositación de cobre en los cátodos. Paralelo a esto, una parte del estudio busca analizar los posibles efectos positivos que estos aditivos podrían tener en el control de la niebla ácida producida en el proceso de EW. Durante el proceso se registra todo comportamiento fuera de lo esperado además de lo que es medido numéricamente.

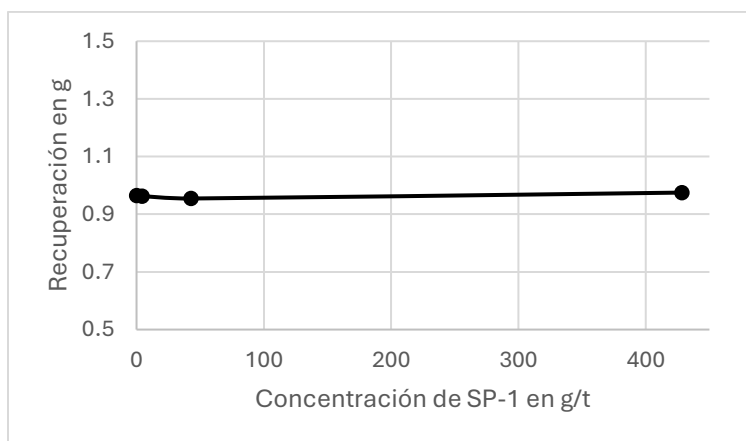
### 4.1. Resultados cuantitativos

La recuperación de Cu promedio en un experimento como este está siempre entre 0,9 y 1 g. Para poder apreciar correctamente la variación en la recuperación, el eje que la representa (las ordenadas) debe estar ajustado a un rango de 0,1 g.

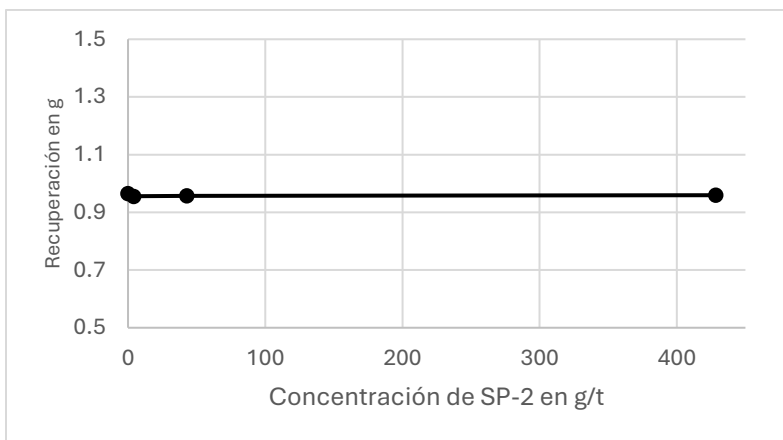
La recuperación en las 3 concentraciones testeadas para cada uno de los dos reactivos en conjunto con el volumen producido de niebla ácida se muestra a continuación.

Reactivo SP-1				
g/t	Recuperación	Variación %	V de N cm3	T prom. en °C
0	0,9654	Ref	19040	20
4,2851	0,9632	0,22%	42020	22
42,851	0,9546	1,12%	99840	21
428,51	0,9751	-1,00%	11420	24
Reactivo SP-2				
g/t	Recuperación	Variación %	V de N cm3	T prom. en °C
0	0,9654	Ref	19040	20
4,2851	0,9559	0,99%	234120	38
42,851	0,9571	0,85%	45440	32
428,51	0,9594	0,62%	108420	26

**Tabla 5:** Información recopilada en cada experimento del grupo B.

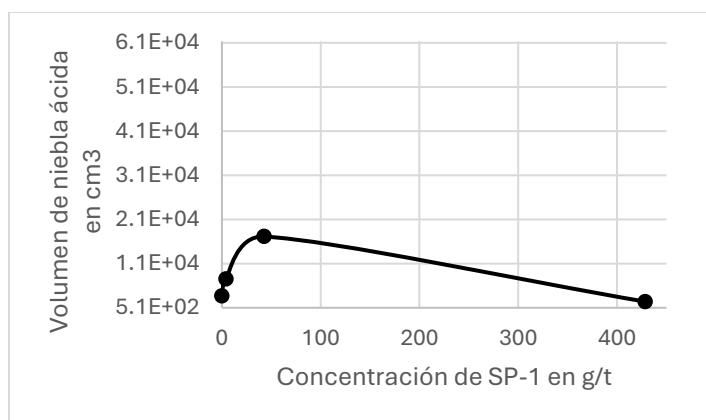


**Gráfico 6:** Recuperación de cobre en función de la concentración de reactivo SP-1 (Grupo B).

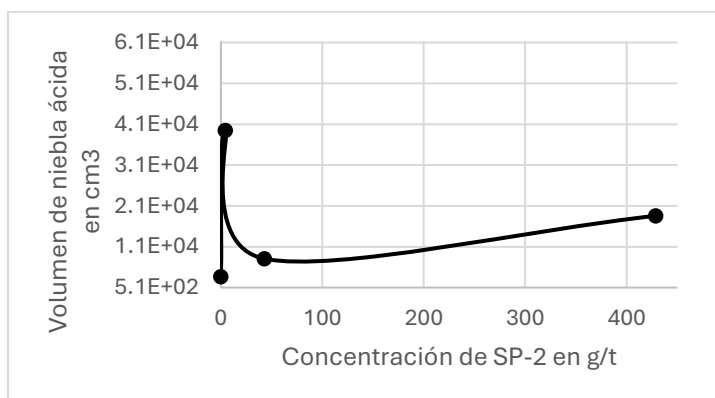


**Gráfico 7:** Recuperación de cobre en función de la concentración de reactivo SP-2 (Grupo B).

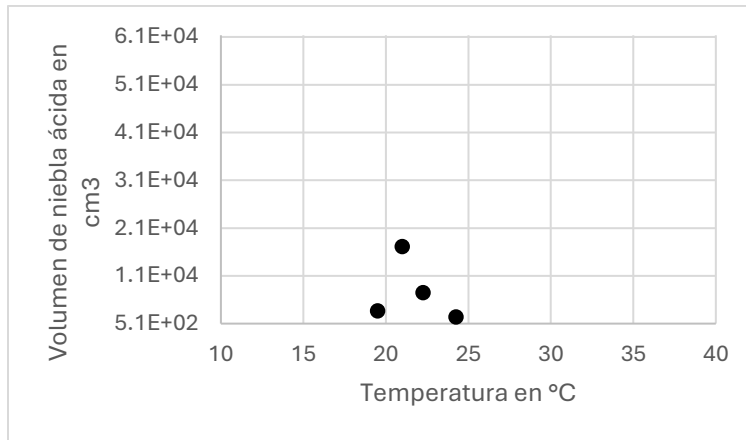
Para poder interpretar la variación en la producción de niebla ácida se grafica su volumen en función de la concentración de ambos reactivos utilizados y de la temperatura en la cual se lleva a cabo cada experimento.



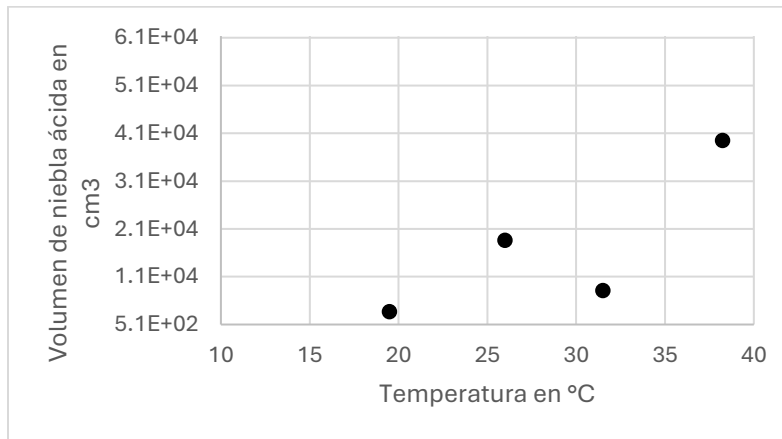
**Gráfico 8:** Generación de niebla ácida en función de la concentración del reactivo SP-1 (Grupo B).



**Gráfico 9:** Generación de niebla ácida en función de la concentración del reactivo SP-2 (Grupo B).



**Gráfico 10:** Generación de niebla ácida en función de la temperatura en las EW con SP-1 (Grupo B).

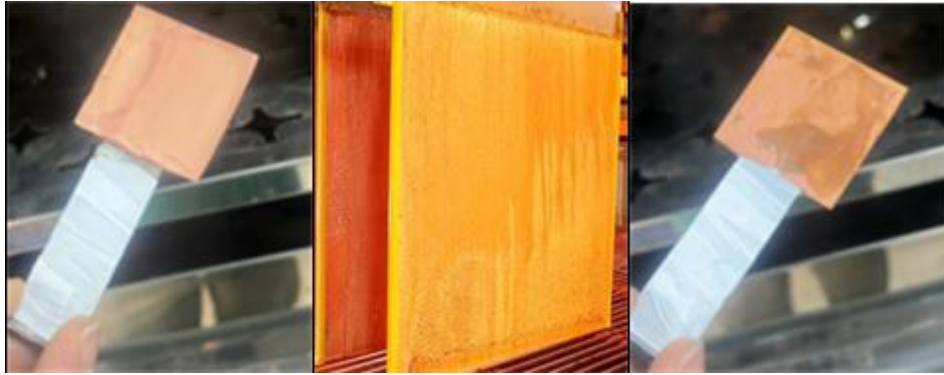


**Gráfico 11:** Generación de niebla ácida en función de la temperatura en las EW con SP-2 (Grupo B).

En el caso del primer gráfico, no existe correlación alguna entre las variables, mientras que el segundo, existe un comportamiento un poco más lineal con pendiente positiva, como debe ser en la teoría.

## 4.2. Resultados cualitativos

En cuanto al aspecto de los cátodos de cobre, estos varían un poco. En la cara A se asemejan mucho a uno obtenido en la industria. En la cara B (la opuesta al ánodo, se nota una depositación menor y no tan pareja. Las fotografías de ambas caras de cada cátodo del grupo B están en el capítulo 7 (Anexos).



**Figura 17:** Comparativa entre los cátodos obtenidos experimentalmente y uno de la industria.

La medición de pH podría ser agrupada como cuantitativa o cualitativa, ya que es un número que se encuentra en un rango de 0 a 14. Hay dos formas de medirlo, la más exacta es con un pH metro, un instrumento que lamentablemente no se tiene a disposición al momento de hacer todo el trabajo experimental. La segunda opción es el papel pH o papel tornasol, el funcionamiento de este sistema es un papelillo del tamaño de un fósforo que tiene una paleta de 4 colores en un extremo y un lado blanco para poder tomarse con la mano. Se introduce el papelillo en la solución que se desea medir y el color del cual se tornan esos 4 tramos de la paleta se compara con los colores de la tabla que trae la misma caja de los papelillos.

Esto entrega un rango aproximado del pH en el que se encuentra la solución (graduación aproximada de una unidad), pero es más que suficiente para determinar si se trata de un medio ácido o básico.

La adición de reactivos en todas las proporciones no afecta en ningún momento el pH de ninguna solución, al menos de manera apreciable



**Figura 18:** Prueba rápida de pH a electrolito de experimento 2B.

El electrolito en cada una de las 7 celdas marcó un pH de este estilo, siendo 0 o extremadamente cercano a 0, lo que es de esperarse por su gran cantidad de ácido sulfúrico.

En lo que respecta a la niebla ácida, se fotografió el portaobjetos de cada experimento de la manera en la que se pudieran apreciar de mejor manera las gotas depositadas, probando distintos ángulos y enfoques.



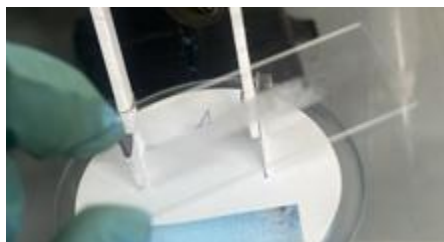
**Figura 19:** Portaobjetos de experimento 1B.



**Figura 20:** Portaobjetos de experimento 2B.



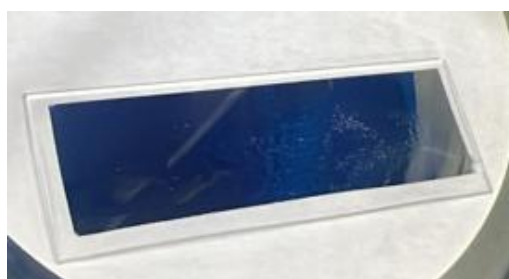
**Figura 21:** Portaobjetos de experimento 3B.



**Figura 22:** Portaobjetos de experimento 4B.



**Figura 23:** Portaobjetos de experimento 5B.



**Figura 24:** Portaobjetos de experimento 6B.



**Figura 25:** Portaobjetos de experimento 7B.

Este aspecto en particular es difícil de ver en fotografías, pero en una observación presencial se puede apreciar mucho mejor la cantidad y forma de las gotas.

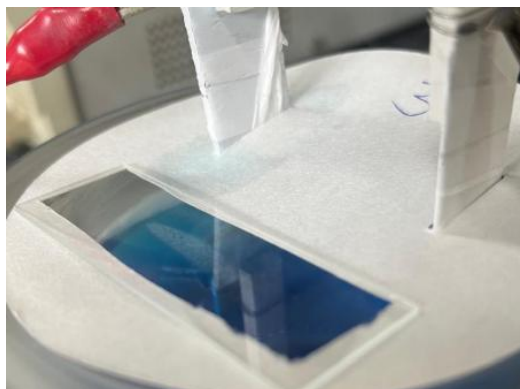
Es por esto, que la única forma de cuantificar esta característica es colocando una puntuación al nivel de líquido presente en base a criterio humano. Esta escala del 1 al 10, toma como máximo el estado del portaobjetos resultante del experimento 6B, y como mínimo el del experimento 5B, los demás se ubican en un lugar proporcional.

Nombre de experimento	Nº Cátodo	Puntuación del 0 al 10
1B	8	0,0
2B	9	0,0
3B	10	3,0
4B	11	4,0
5B	12	0,0
6B	13	10,0
7B	14	9,5

**Tabla 6:** Puntuación de *film drops* percibidas por el ojo humano.

El método de análisis ideal sería fotografiar cada portaobjetos con luz de fondo en un microscopio electrónico. Con imágenes muy claras y sacadas bajo las mismas condiciones, mediante el software Image J, se podrían contar las gotas utilizando algún criterio de tamaño. Lamentablemente, el equipo requerido no se encuentra a disposición.

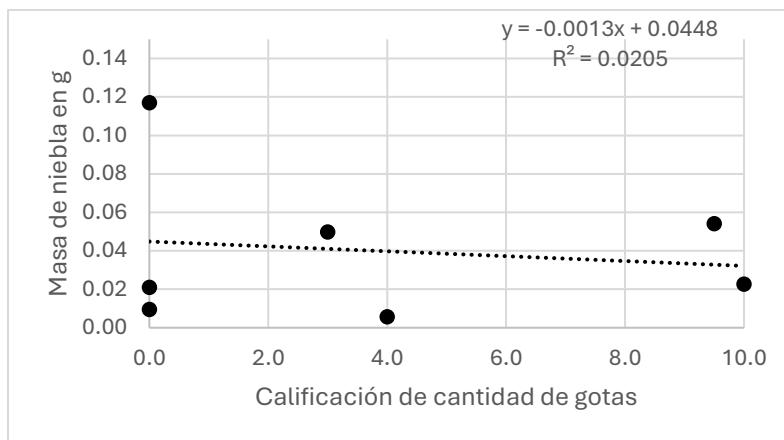
Un aspecto para tener en cuenta es que hay una humectación preferencial muy marcada en los papeles filtro modificados, siendo el agujero para el ánodo el más humedecido en los 7 casos del grupo B.



**Figura 26:** Niebla ácida focalizada en el sector del ánodo en experimento 3B.

En este caso destaca la zona preferencial en la que se deposita la niebla, pero en todos los casos ocurre algo similar.

Por último, se realiza un gráfico de dispersión que compara la cantidad de *film drops* recuperadas en el portaobjetos y el aumento en las masas de los papeles filtro modificados por las *jet drops*. Esto para visualizar la consistencia de las mediciones y cuantificar que tanto ruido hay presente en las muestras.

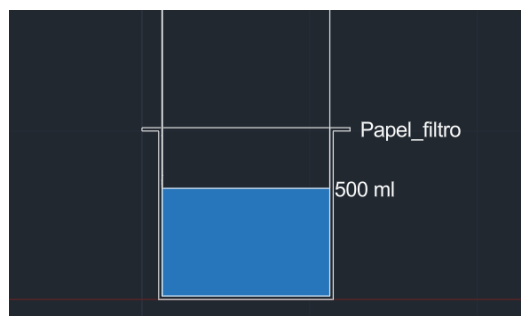


**Gráfico 12:** Comparativa entre la medición de *film drops* y *jet drops*.

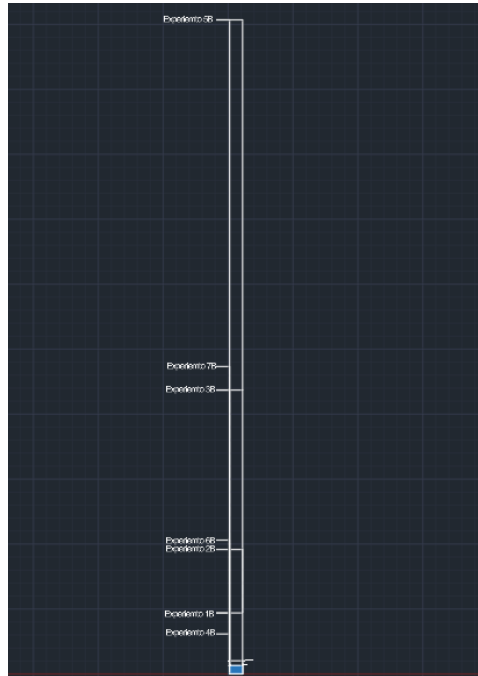
Este gráfico presenta un  $R^2$  de 0.02, lo que significa que hay mucha variabilidad, seguramente causada por un error instrumental y ruido que debe haber en la toma de datos sobre la niebla ácida. De tener una medición limpia, la variabilidad sería menor entre ambas mediciones y la recta tendría una pendiente positiva.

Otra razón por la que los resultados de la recuperación de niebla no son confiables, es por la diferencia tan extrema entre la recuperación de niebla ácida en los papeles filtro. Para ejemplificarlo de manera más gráfica, se hace una representación del espacio que ocupa el volumen de la niebla ácida “recuperada” en cada experimento.

Para esto, se asume que la densidad de la niebla ácida es la misma que la de una nube gris (cargada de gotas), es decir 3 gr/m<sup>3</sup>. Luego el volumen se divide en el área de la base de la celda utilizada, para que de esta manera se pueda visualizar el volumen variando solo su altura dentro de una columna. A continuación, el volumen percibido.

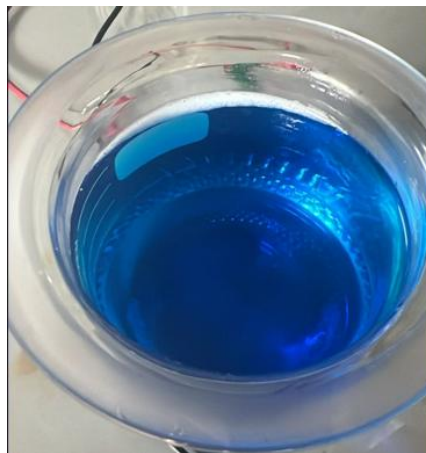


**Figura 27:** Representación de celda de electro obtención utilizada.

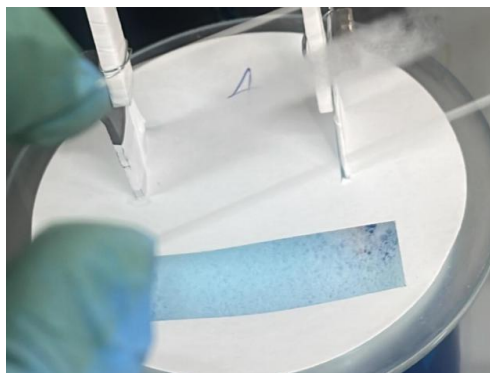


**Figura 28:** Volumen teórico de niebla producida por cada experimento.

Otra reacción que vale la pena mencionar, es la formación de espuma en la superficie del nivel del electrolito en la celda, específicamente en los experimentos 3 y 4 del grupo B. Como es lógico, en el experimento 4 se produce muchísima más espuma, a causa de que el reactivo estaba en una concentración 10 veces superior.

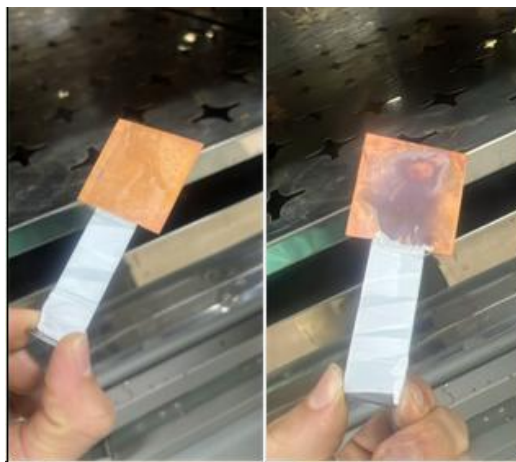


**Figura 29:** Formación de espuma por la incorporación de tensoactivos a la solución de experimento 3 (grupo B).



**Figura 30:** Formación de espuma por la incorporación de tensoactivos a la solución de experimento 4 (grupo B).

En todos los experimentos, tanto los del grupo A como los del grupo B se aprecia a simple vista una clara diferencia entre la cara “A” y la cara “B”, siendo la cara “A” la cara que se enfrenta al ánodo, mientras que la “B” es la que da hacia el lado de la celda. Esto es apreciable en las imágenes comparativas de todos los experimentos del grupo B, pero resalta especialmente en el cátodo de la EW 6B.



**Figura 31:** Ambas caras de cátodo de experimento 6B.

Finalmente, se tiene como característica atípica la formación de una pequeña costra blanquecina en la base del cátodo de la prueba blanco.

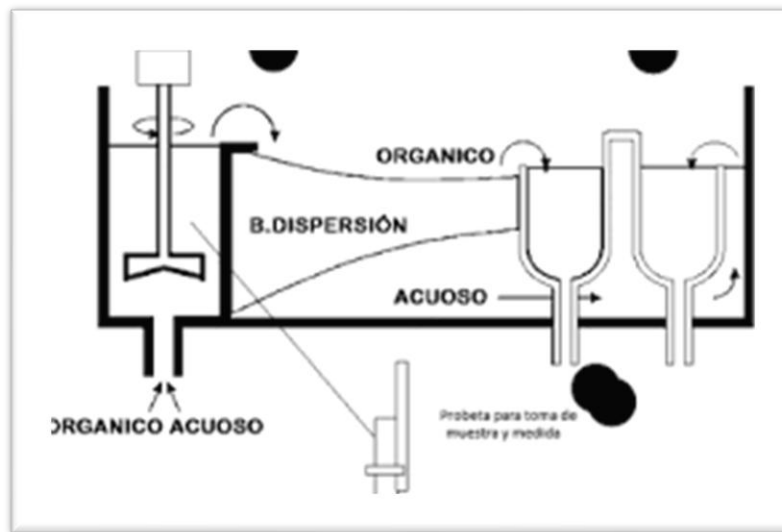


**Figura 32:** Formación costra en cátodo de experimento 1 del grupo B.

### 4.3 Comparativa con la escala industrial

Para establecer una comparativa entre el proceso experimental a escala de laboratorio y la operación a gran escala, es necesario describir las características generales de las plantas industriales de hidrometalurgia del cobre. Estas plantas presentan variaciones en su diseño y configuración dependiendo de la empresa y la naturaleza del mineral, pero comparten principios operativos fundamentales y escalas de producción que difieren drásticamente de las condiciones de laboratorio.

La fase acuosa purificada que alimenta las celdas de la EW proviene de un proceso previo de extracción por solventes (SX), el cual, a su vez, toma como entrada la solución rica de lixiviación (PLS).

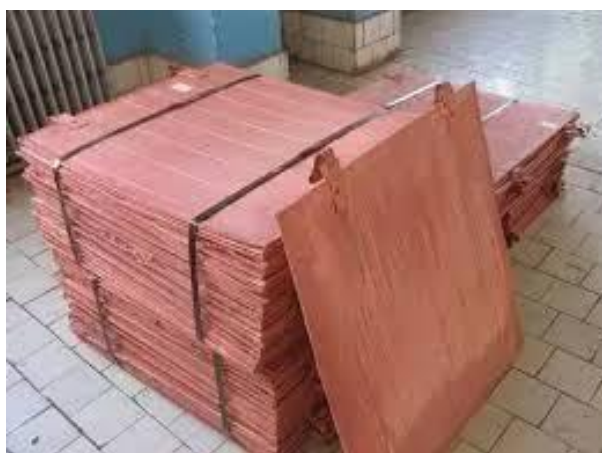


**Figura 33:** Proceso de Extracción por solventes (SX) previo a la electroobtención (EW).

En la industria minera moderna, el procesamiento de óxidos involucra un circuito hidrometalúrgico que culmina en la electroobtención (EW). Este proceso se caracteriza por el manejo de grandes volúmenes de solución y material, la operación continua y el uso de equipos de dimensiones considerables para alcanzar los volúmenes de producción requeridos. Por ejemplo, en una planta típica, los cátodos de cobre obtenidos son de alta pureza (generalmente superior al 99,99%) y pesan entre 70 y 90 Kg, siendo el resultado de procesos de EW que pueden extenderse de 10 a 14 días en las celdas electrolíticas.



**Figura 34:** Nave de electro obtención industrial.



**Figura 35:** Cátodos de cobre listos para comercializar.

Las celdas de electroobtención a escala industrial son estructuras de gran volumen, capaces de albergar múltiples electrodos. En estas celdas, los cátodos y ánodos se intercalan, operando con densidades de corriente que suelen rondar los 250 A/m<sup>2</sup>. La eficiencia y estabilidad de la operación industrial dependen de un riguroso control de variables como la temperatura del electrolito (comúnmente entre 35 °C y 60 °C) y el pH, siendo este bastante bajo, propio de un medio ácido.

La magnitud de la producción en las plantas industriales implica un desafío constante en el control de calidad, la eficiencia energética y la gestión ambiental. La integración de sistemas de automatización y monitoreo avanzado es esencial para mantener la estabilidad del proceso y la pureza del producto final.

No es justo dar una escala fija para hacer una comparación entre el proceso a escala y el industrial ya que, por disponibilidad de implementos en los laboratorios, nunca se tendrá la misma relación entre los instrumentos de laboratorio que entre los instrumentos de la industria. Para tener una noción de la diferencia, utilizando el tamaño de los electrodos como base, se puede decir que la proporción de tamaños entre los procesos es de 1:25.

### 4.3.1. Semejanzas con el proceso industrial

En cuanto a las similitudes que se tienen en el proceso experimental con el proceso industrializado, existen características como el uso de un mismo ánodo para depositar cobre en varios cátodos. El ánodo queda preparado para ser utilizado después de un proceso previo de pasivación o anodizado. Este proceso consiste en la formación electroquímica de una capa superficial de óxido sobre el material del ánodo. Esta preparación es crucial para el correcto funcionamiento de la celda de electroobtención. Por supuesto, el ánodo de los experimentos de ambos grupos es correctamente limpiado con agua destilada al finalizar cada proceso, para no contaminar el siguiente electrolito con un reactivo diferente.

También cabe aclarar que cada cátodo tiene depositación de cobre por sus dos caras (al igual que en el proceso a gran escala), esto puede no ser así si se opta por aislar una de ellas con resina epóxica, con la finalidad de quitar la “interferencia” de la depositación de la cara que no está enfrentada al ánodo. Esto es debido a que la recuperación de cobre no es la misma en ambas caras, siendo superior la que está enfrentada y más cercana al ánodo. Esto está relacionado con las líneas de campo magnético que se producen al inducir corriente.

La densidad de corriente utilizada fue la misma que en el proceso industrial, siendo esta de 250 A/m<sup>2</sup>.

Teniendo las dimensiones de los electrodos, siendo sus superficies de contacto áreas cuadradas de 4 cm, la intensidad de corriente a utilizar es de 0.8 amperes para la escala experimental (duplicando la intensidad necesaria para una sola superficie, ya que se dejan ambas caras del cátodo expuestas).

$$(0,04 \text{ m} * 0,04 \text{ m}) * 250 \frac{\text{A}}{\text{m}^2} * 2 = 0,8 \text{ A}$$

El electrolito utilizado en las pruebas es elaborado especialmente para ellas, es decir, no es la fase acuosa purificada proveniente de una extracción por solventes a escala de laboratorio. Esto con la finalidad de aislar lo más posible los posibles causantes de los efectos negativos que los reactivos pudieran tener en los procesos.

La concentración de cobre presente en el electrolito en los 14 experimentos oficiales es de 40 gr/L, al igual que la concentración usual en las plantas de procesamiento en la etapa de EW.

Por último, una similitud que se debe tener en cuenta también es el calentamiento del electrolito previo a la electroobtención. Si bien, no se calientan las muestras con un aparato externo, la elaboración del electrolito en sí lo calienta bastante. Esto debido a que la primera etapa de su confección es añadir la parte de ácido sulfúrico a una parte de agua ya colocada en el matraz (nunca al revés, añadir agua al ácido es peligroso). El ácido sulfúrico se hidrata fuertemente, liberando una gran cantidad de energía en forma de calor. Este calor intenso ayuda a la disolución del sulfato de cobre pentahidratado y la homogenización del reactivo dentro de la solución. Incluso después de terminada la mezcla, la temperatura de la solución sigue entre 10 y 20 °C por sobre la temperatura ambiente. La temperatura a la que llega la solución en cada planta, no suele ser pública ni fija, pero es probable que esté en el mismo rango basándose en información bibliográfica.

### 4.3.2. Diferencias con el proceso industrial

Aun teniendo a disposición el laboratorio de procesamiento de minerales de la Universidad de Chile, hay ciertas características de los procesos industriales que no se pueden representar a escala de laboratorio, es por esto que para cuantificar los posibles efectos de los reactivos añadidos se comparan solo pruebas realizadas en el laboratorio sometidas a las mismas condiciones bajo las que se tiene control.

Un ejemplo de esto es que, en algunas ocasiones, los procesos de electroobtención se realizan en celdas que tienen agitación, en este caso, la solución de la cual se extrae el cobre está en completo reposo sin ninguna perturbación de movimiento. El nivel de agitación de la solución en las celdas de una planta es variable, pero suele estar presente en el proceso.

Lo mismo sucede con el tiempo de reacción. Mientras que los grandes procesos mineros involucran una electroobtención que dura varios días (entre 10 y 14), el proceso replicado a escala experimental tuvo una duración de una hora por cada prueba.

En lo que respecta a la preparación de los electrodos, los materiales más fieles al proceso industrial son acero inoxidable 316L y plomo (con porcentaje añadido de estaño y calcio) para los cátodos y los ánodos respectivamente. Estos materiales son prácticamente imposibles de conseguir en unidades de detalle, por lo que, si bien se intenta adquirirlos para su uso en los experimentos de electro obtención, finalmente se opta por alternativas similares que cumplen igualmente con las propiedades necesarias para replicar el proceso. Estos materiales son acero inoxidable 304 para la fabricación de cátodos y plomo (en estado puro) para la fabricación de ánodos.

Por supuesto, un aspecto muy importante que hay que destacar es que el electrolito utilizado en las plantas para el proceso de electroobtención es el producto resultante de la fase previa que es la extracción por solventes, es decir, su fase acuosa purificada. En este caso el electrolito es elaborado especialmente para el proceso de electroobtención a escala.

Por último, una diferencia que vale la pena mencionar es que en los grandes procesos de EW se suelen añadir componentes adicionales para mejorar la eficiencia del proceso, esto por supuesto no se lleva a cabo en esta escala para poder aislar lo más posible los efectos de los tensoactivos en la reacción.

## 4.4. Discusión

Antes de sacar conclusiones, es necesario comprender los fenómenos físicos y químicos que ocurren en cada parte del proceso. Teniendo comprensión de la explicación de cada uno de los aspectos que se pueden apreciar, concluir se vuelve trivial.

### 4.4.1. Inferencias basadas en la evidencia

Según la ley de Faraday (mencionada en el capítulo 2.2.4) el cálculo para obtener la masa teórica de cobre depositada en este caso sería el siguiente:

$$\frac{63,55 \frac{gr}{mol} * 0,8 A * (60 * 60)Seg}{2 mol * 96485 \frac{C}{Mol}} = 0,9484 gr$$

El cobre depositado calculado con la ecuación unificada fundamental de Faraday asume una eficiencia del 100% en esa forma, la depositación práctica es obtenida ponderando el valor obtenido por el cociente entre la eficiencia de corriente y 100.

Se puede observar que el valor teórico (sin aplicar ningún ponderador) solo es un 1.01% inferior a la masa de cobre promedio depositada en los experimentos del grupo A y un 1,3% inferior al del grupo B. Esto respalda que la eficiencia de corriente en la experimentación fue casi perfecta.

Para el cálculo de la niebla ácida teórica realizamos una comparación con la niebla ácida a nivel industrial (en forma espontánea, sin supresores).

Como se comenta en el capítulo 2.2.3, la proporción es 0,17 metros cúbicos de niebla por cada kilogramo de cobre depositado. Ya que el cobre depositado promedio entre las pruebas blanco del grupo A y B es de 0,96 g, la niebla ácida teórica aproximada se calcularía como:

$$\frac{0,17m^3 * 0,00096 gr de Cu}{1000} = 1,00016 m^3 = 161,24 cm^3$$

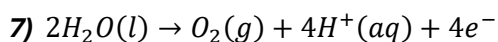
De esta manera, se demuestra que la forma de cuantificar la niebla ácida producida presenta una diferencia de entre 1000 y 11000%, con el volumen teórico esperado, lo que descarta las mediciones como concluyentes.

Esto también explica el comportamiento errático de las curvas en los gráficos 8, 9, 10, 11 y 12.

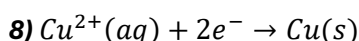
Si bien está científicamente demostrado que la presencia de tensoactivos puede disminuir la niebla ácida producida, no se puede apreciar el efecto particularmente en este estudio.

Con los medios necesarios y una metodología mejorada, se podría comprobar que en efecto los reactivos SP-1 y SP-2 pueden favorecer el proceso de EW en cuanto a la reducción de niebla ácida si estos son añadidos directamente en esa etapa del proceso en una concentración similar a la utilizada en la industria, alrededor de las 30 ppm.

Como es de esperarse, en los 7 experimentos de EW la producción preferencial de niebla ácida fue por sobre el ánodo. Es donde se produce la oxidación del agua, formando así oxígeno gaseoso que emerge rápidamente en forma de burbujas que estallan en la superficie.

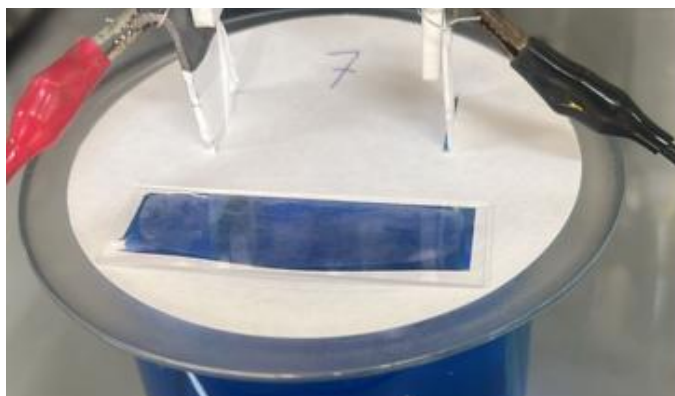


Mientras que la reacción (comentada en el capítulo 2.2.4) ocurrida en el ánodo no produce ningún tipo de gas.



Por otra parte, ambos gráficos que comparan la niebla ácida capturada por los papeles filtro modificados y la temperatura promedio de los procesos de WE, tienen un comportamiento más lógico. A pesar de la dispersión que muestran, se puede apreciar en ellos una tendencia un poco más definida a ser ambas variables directamente proporcionales. Por ende, se puede confirmar que, como se menciona en el capítulo 2.2.3, la niebla ácida es altamente dependiente de la temperatura, conclusión también demostrada en otros estudios similares.

Esto es perfectamente razonable, ya que en proceso industrial la solución electrolítica es previamente calentada para su tratamiento, por lo que una temperatura alrededor de 30 °C como se tuvieron en esta experiencia, puede ser representativa. Con esto en consideración, es de esperar que parte considerable de la niebla ácida producida sea producto de una simple evaporación del agua presente en el electrolito que arrastra consigo moléculas de los demás compuestos presentes en menor concentración. Otra prueba de eso es que el portaobjetos de cada experimento del grupo B se empaña y llena de gotas antes de inducir la corriente.

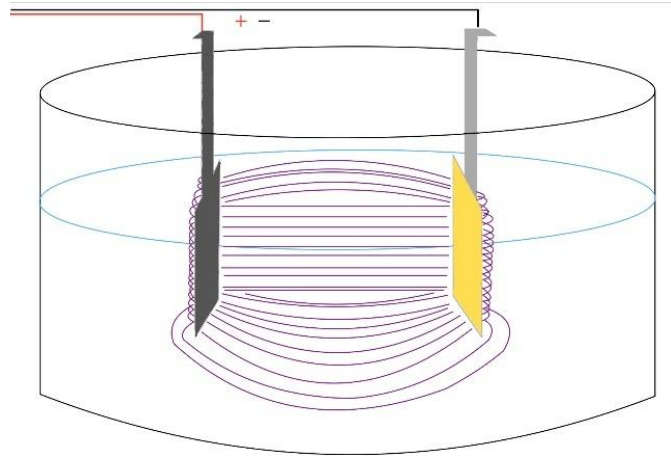


**Figura 36:** Vapor depositado en portaobjetos proveniente de electrolito de experimento 7 del grupo B.

Otro aspecto interesante es la presencia de una depositación heterogénea en las superficies de los cátodos de cobre. En el proceso industrializado la depositación nunca es perfectamente homogénea, pero se acerca bastante. Esta diferencia también es algo esperable, ya que se trata de una característica que se regula mediante aditivos orgánicos que mejoran notablemente ese resultado, los cuales no son incorporados a los electrolitos utilizados en este estudio. Estos aditivos no son añadidos solo para tener un resultado más estético, también facilita el manejo, almacenamiento y seguridad durante el proceso.

En resumen, esta heterogeneidad presente solo se puede atribuir a la naturaleza del proceso simplificado o a imperfecciones muy pequeñas en el confeccionamiento de todos los cátodos, no a un efecto secundario de los reactivos en estudio.

La diferencia entre los lados “A” y “B” de cada cátodo también se pueden justificar. Sucede que, al aplicar corriente, el circuito eléctrico se “cierra” a través de ambos electrodos. El campo magnético que se forma entre ellos no es uniforme en todo el espacio, tiene una mayor intensidad donde la distancia entre polos es menor.



**Figura 37:** Naturaleza de campo magnético generado entre ambos electrodos.

Como se menciona en el capítulo 2.2.3, la masa depositada de un metal de interés (en este caso cobre), es directamente proporcional a la intensidad de corriente, la cual es mucho mayor en las caras enfrentadas que en las caras orientadas hacia afuera. Por esto, el cobre depositado en la cara exterior “B” es menor en todos los experimentos.

El color oscuro disperejo en la cara B de algunos de los cátodos del experimento puede ser más que solo una depositación más débil, también podría deberse a un quemado orgánico. Como se menciona en el capítulo 2.3.4, algunos tensoactivos pueden llegar a actuar como contaminantes, causando esta apariencia tan característica.

En lo que respecta a la aparición de la costra blanquecina en la base del cátodo de la prueba blanco, se plantea que esta se debe a la deposición no uniforme de cobre alrededor de burbujas de gas adheridas a la superficie, formando así una estructura porosa y un aspecto blanquecino menos metálico. La formación de estas burbujas podría deberse al atrapamiento de burbujas de oxígeno migradas desde el ánodo, o bien, a una evolución de hidrógeno localizada en puntos específicos del cátodo (poco probable con la intensidad de corriente utilizada). Las burbujas adheridas interfieren con la transferencia de iones  $\text{Cu}^{2+}$ , lo que lleva a un crecimiento anómalo del depósito. La observación cualitativa de que los experimentos con SP-1 y SP-2 no presentan estas costras blanquecinas sugiere que los tensoactivos, al reducir la tensión superficial, facilitan la liberación de estas burbujas, impidiendo su adherencia al cátodo y mitigando así este tipo de defectos de deposición.

Lo más esperable (aunque sin total seguridad), basándose en los resultados obtenidos aquí, es que el proceso de LX, añadiendo los reactivos SP-1 o SP-2, los resultados sean los mismos que en un proceso puro sin presencia de surfactantes. Esto basado en que el único posible riesgo es la percolación dispareja a causa de una preferencia de flujo causada por la espuma que producen este tipo de reactivos, pero como se pudo apreciar en la experimentación, esta espuma solo es producida en concentraciones cercanas a 40 gr/L, la cual es una concentración experimental, ya que en la industria el rango utilizado es entre 1 y 10 gr/L.

En un futuro experimento de extracción por solventes se podrían aislar en detalle los efectos negativos de la presencia de los reactivos SP-1 y SP-2. Pero con base en el estudio bibliográfico se asegura que en el mejor de los casos serían inertes, mientras que en un caso más realista se infiere que podrían llegar a causar problemas tanto en el proceso como tal como indirectamente en la siguiente etapa del proceso.

En lo que respecta al proceso de flotación, habría que hacer un estudio dedicado para concluir correctamente, pero basándose en la evidencia de este estudio, es probable que los reactivos causen alguna diferencia en el proceso.

## Capítulo 5: Conclusiones

El reactivo SP-2 evidenció que posee una TK alrededor de los 65 °C, por ende, queda descartado como competente para su utilización en la industria minera, por su mala miscibilidad en el agua en condiciones regulares. En contraste, el reactivo SP-1 tiene una TK inferior a los 25 °C, lo que es ideal para su fácil manejo en la industria.

### 5.1. Efectos de los reactivos en la depositación de cobre

Las variaciones en la recuperación de cobre casi no excedieron el 1%, por lo tanto, se concluye que los reactivos SP-1 y SP-2 son al menos inertes al ser añadidos al proceso de electroobtención. En ningún caso su aplicación perjudica la recuperación de cobre en los cátodos dentro de la celda de EW.

### 5.2. Efectos de los reactivos en la supresión de niebla ácida

Basándose en la revisión bibliográfica, la composición de los reactivos SP-1 y SP-2, al ser principalmente de tensoactivos, los vuelve unos buenos candidatos para la disminución de la niebla ácida generada en el proceso de electroobtención. Con los resultados del estudio no basta para definir qué tipo de relación hay entre la concentración de ellos y la disminución en el volumen de niebla producida, esto se podría obtener con un sistema más eficiente de captura de la niebla.

## Capítulo 6: Recomendaciones

Este estudio plantea que, para tener un grado de confianza total, es necesario replicar los mismos experimentos, pero utilizando como electrolito la fase acuosa purificada de una extracción por solventes a la cual se le añadió el reactivo como tal, o bien, más representativo aún, hacer las 3 etapas del procesamiento de óxidos de cobre en una escala de laboratorio, añadiendo los reactivos de interés en la solución de regadío de una pequeña lixiviación en columnas y luego utilizando la PLS resultante como entrada para el proceso de SX.

Parte de las mejoras en la calidad de los resultados en este nuevo experimento se podrían obtener utilizando una cantidad  $n$  de cátodos y una cantidad  $n+1$  de ánodos, ambos intercalados, (en un recipiente con más electrolito), de esta forma la intensidad de corriente sería similar en cada cara del cátodo. También sería bueno alargar el tiempo de exposición a la corriente de 1 hora a 3 horas. Con estos cambios el proceso experimental se parecería más al industrial, volviéndose más representativo. Los resultados de este estudio podrían tener la solidez necesaria para dar pie a la comercialización (o reformulación) de los reactivos SP-1 y SP-2.



**Figura 38:** Experimento de lixiviación en columnas a escala de laboratorio.



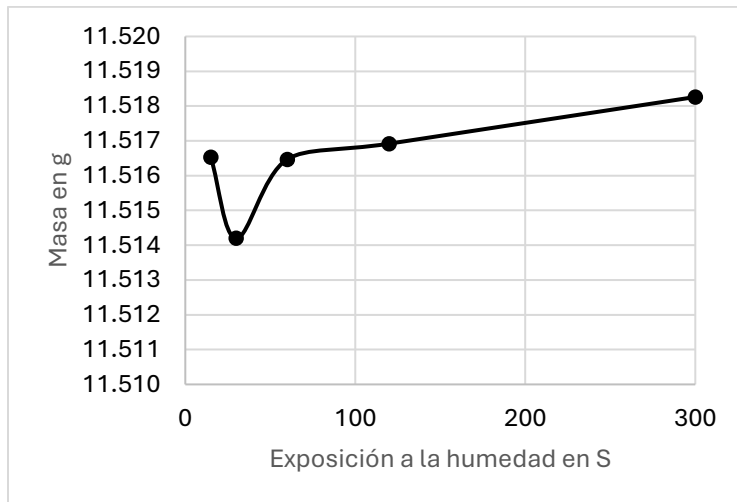
**Figura 39:** Separación de fase orgánica y acuosa en experimento de extracción por solventes a escala de laboratorio.

## Capítulo 7: Referencias

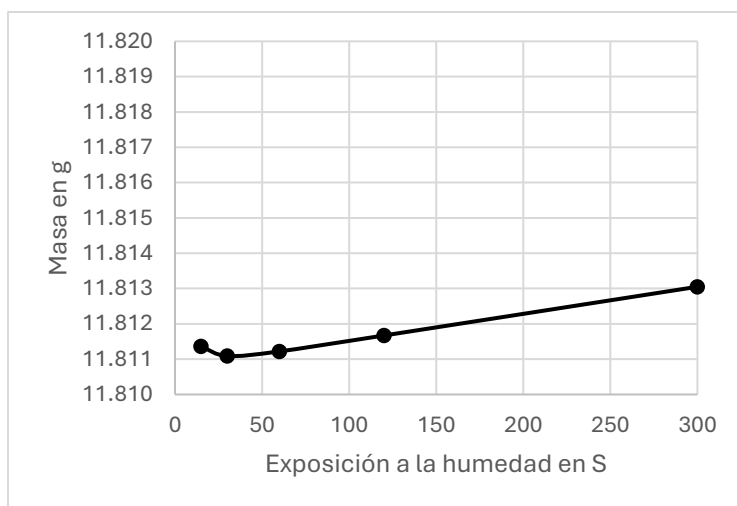
1. Dong, H., Yu, H., Xu, R., Cheng, W., Ye, Y., et al. (2023). Review and prospects of mining chemical dust suppressant: Classification and mechanisms. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 18–35. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23840-w>
2. Ehsani, A., Yazici, E. Y., & Deveci, H. (2016). Influence of polyoxometallates as additive on electro-winning of copper. *Hydrometallurgy*, 162, 79–85. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2016.03.002>
3. Moats, M. S., Luyima, A., & Oliveira, T. (2014). Examination of selected copper electrowinning additives. *Conference Proceedings. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum*.
4. Masoga, I. L. (2023). Investigation of characteristics of polyacrylamide-based additives for copper electrowinning.
5. Strokova, V. V., Ryazanova, A. Y., Markova, I. Y., Stepanenko, M. A., & Ishmukhametov, E. M. (2024). Evaluation of the effectiveness of water dust-suppressing emulsions based on acrylic and alkyd polymers. *Journal of Mining Institute*, 1–9. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23840-w>
6. Zuowei, L., Guo, X., Xu, Z., & Tian, Q. (2024). Recent advancements in aqueous electrowinning for metal recovery: A comprehensive review. *Minerals Engineering*, 216, 108897. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2024.108897>
7. Ehsani, A., Yazici, E. Y., & Deveci, H. (2016). Influence of polyoxometallates as additive on electro-winning of copper. *Hydrometallurgy*, 162, 79–85.
8. Freire, N. H. J., Majuste, D., Angora, M. A., & Ciminelli, V. S. T. (2017). The effect of organic impurities and additive on nickel electrowinning and product quality. *Hydrometallurgy*, 169, 112–123.
9. Manuel Saldaña, Norman Toro, Jonathan Castillo, Pía Hernández and Alessandro Navarra. (2019). Optimization of the Heap Leaching Process through Changes in Modes of Operation and Discrete Event Simulation. *Minerals*, 9(421), 1–13.
10. Saldaña, M., Toro, N., Castillo, J., Hernández, P., & Navarra, A. (2019). Optimization of copper recovery in heap leaching using chloride. *Minerals*, 9(421), 1–13.
11. Sheehan, J. (2017). The development of an effective technology for heap leaching of chalcopyrite ores by the use of synergistic catalytic additives. *Murdoch University Engineering Thesis*.
12. Fabian, C., Ridd, M., & Sheehan, M. (2007). Assessment of activated polyacrylamide and guar as organic additives in copper electrodeposition. *Hydrometallurgy*, 86(1-2), 64-74. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2006.11.004> (Referenciado indirectamente en Fabian, 2005 y Moats et al., 2016)
13. Great Process Ltda. (2014). *Product Information*. (Referenciado indirectamente en van Rensburg, 2015) He, Y., & Nicol, M. (2011). Performance evaluation of acid mist reduction techniques in copper electrowinning. *Hydrometallurgy*, 106(1-2), 119-123. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2010.12.014>
14. Jenkins, J., Moats, M. S., Robertson, E. P., & Ernst, D. (1999). *Copper Electrowinning Additives*. (Referenciado indirectamente en Moats et al., 2016) <https://patents.google.com/patent/US20240052514A1/en>

15. Valarezo Tenesaca, E. I., Astudillo Echeverría, J. S., Ordóñez Paladinez, V. D., Cuenca Vaca, A. B., & Leon Cueva, W. P. (2024). Reactivos Usados para Mejorar la Lixiviación del Oro con Cianuro: Una Revisión. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8(3), 12248. [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v8i3.12248](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i3.12248)
16. van Rensburg, J. (2015, August). *Evaluation of dextrin-based smoothing agents as alternatives to polyacrylamide and guar gum products in copper electrowinning*. Proceedings of Copper Cobalt Africa, Incorporating the 8th Southern African Base Metals Conference, Livingstone, Zambia. SAIMM. [http://www.saimm.co.za/Conferences/Copper2015/37\\_CCBM05\\_van\\_Rensburg\\_377-388.pdf](http://www.saimm.co.za/Conferences/Copper2015/37_CCBM05_van_Rensburg_377-388.pdf)
17. Wang, J. (2013). *An investigation of acid mist formation and suppression*. University of Arizona Repository. <https://repository.arizona.edu/handle/10150/667948>
18. Kordosky, G. A. (2002). Copper solvent extraction: The state of the art. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 102(8), 435-442.
19. Prosser, B., Jones, F., & Bruckard, W. (2021). The use of biodegradable surfactants to enhance gold leaching in a simulated heap leach. *Minerals Engineering*, 171, 107085. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107085>
20. Readett, D., & Miller, G. (2011). Copper solvent extraction – The importance of design in the control of operating costs. En Proceedings of the ALTA 2011 Nickel-Cobalt-Copper, Uranium and Gold Conference. ALTA Metallurgical Services.
21. Robinson, T., Laranjeiro, S., & de Wet, C. (2005). The effect and control of organic entrainment in copper electrowinning at Skorpion Zinc. En Proceedings of the International Solvent Extraction Conference (ISEC 2005) (pp. 1472-1477). Society of Chemical Industry.
22. ChileCodelco. (20 de octubre de 2014). Planta Extracción por Solventes y Electro Obtención de Cobre Colón <https://www.youtube.com/watch?v=9ISz09wISUg>
23. Vargas, C., & Navarro, P. (s.f.). Evaluación de aditivos tensoactivos para la supresión de neblina ácida en la electroobtención de cobre. *Revista Geológica*, 13(26), 133-142.
24. Al Shakarji, R. (2012). Mechanisms of acid mist formation in electrowinning. JCU Research Online. <https://researchonline.jcu.edu.au/27530/>
25. Roa, T. (2022). *An Investigation of Acid Mist Formation and Suppression Mechanisms in Copper EW Plants*. University of Arizona Campus Repository. <https://repository.arizona.edu/handle/10150/667948>
26. Elgin, T. K. (2024). *Laboratory Scale Experimental Analysis of the Effect of Surfactants on Acid Mist Suppression during Copper Electrowinning*. Scholars' Mine. [https://scholarsmine.mst.edu/masters\\_theses/8195/](https://scholarsmine.mst.edu/masters_theses/8195/)
27. Autores no especificados. (s.f.). Efecto de los elementos tensoactivos en algunas de las principales variables de proceso en extracción por solventes de cobre. *Revista Ingeniería UDA*, 11(22), 29-37.
28. Nolasco León, L. G., & Rojas Baltazar, J. C. (2013). *Cinética de Cristalización de Sulfato de Cobre a partir de Chatarra en un Reactor Batch*. (Tesis para optar al título de Ingeniero Químico). Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo - Perú.

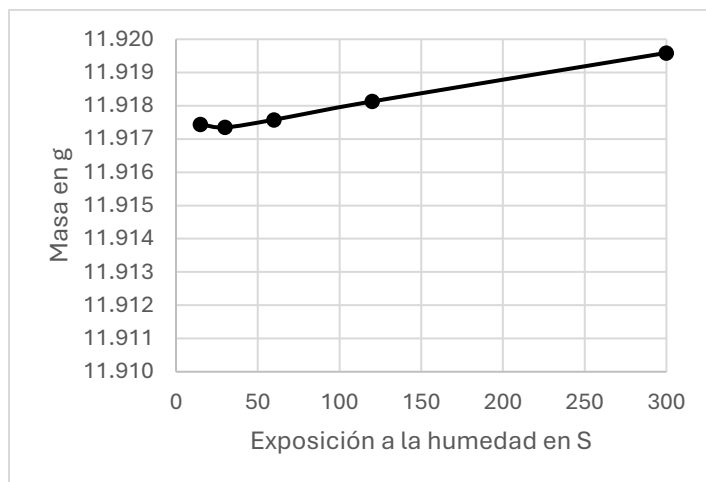
## Capítulo 8: Anexos



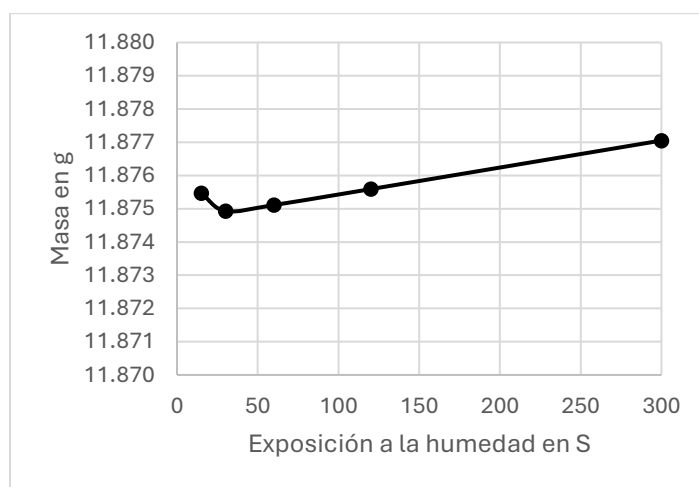
**Gráfico 13:** Masa de cátodo 9 (virgen) en función de la exposición a la humedad.



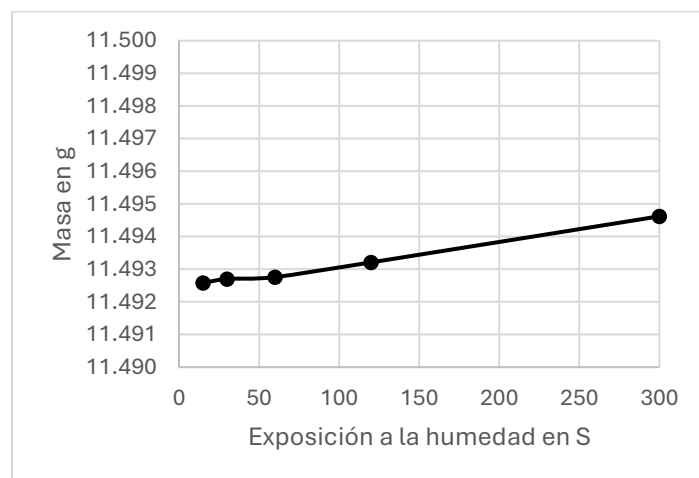
**Gráfico 14:** Masa de cátodo 10 (virgen) en función de la exposición a la humedad.



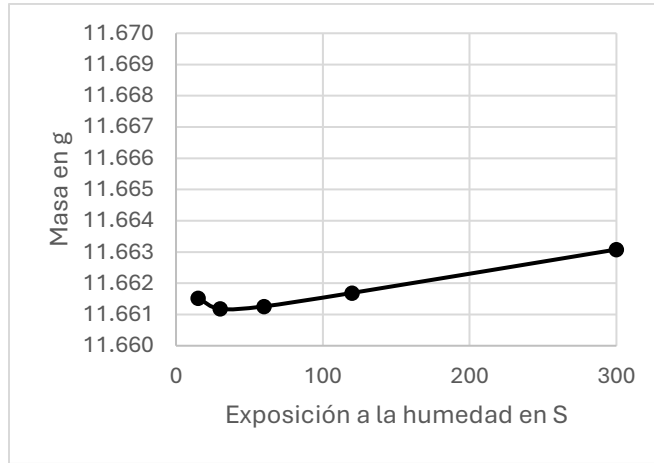
**Gráfico 15:** Masa de cátodo 11 (virgen) en función de la exposición a la humedad.



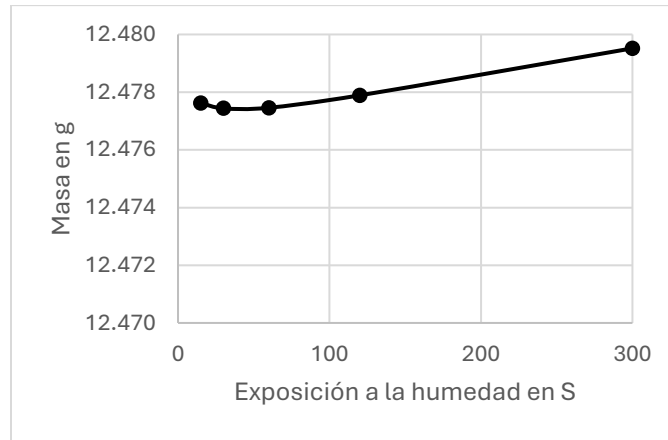
**Gráfico 16:** Masa de cátodo 12 (virgen) en función de la exposición a la humedad.



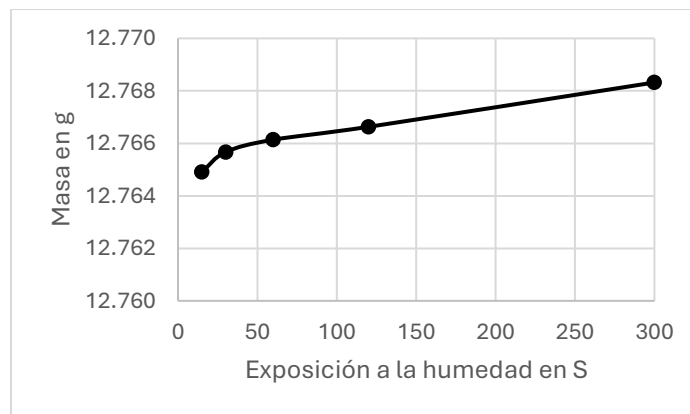
**Gráfico 17:** Masa de cátodo 13 (virgen) en función de la exposición a la humedad.



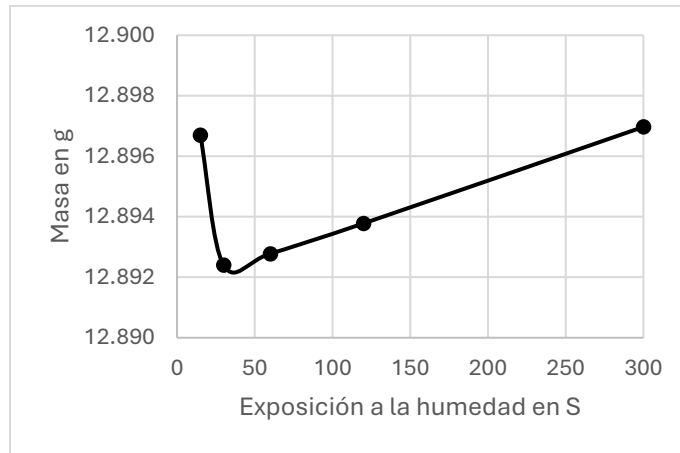
**Gráfico 18:** Masa de cátodo 14 (virgen) en función de la exposición a la humedad.



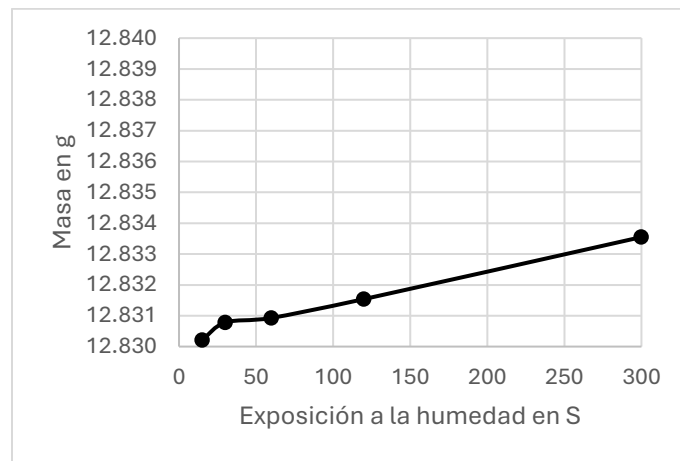
**Gráfico 19:** Masa de cátodo 9 con recuperación de Cu en función de la exposición a la humedad.



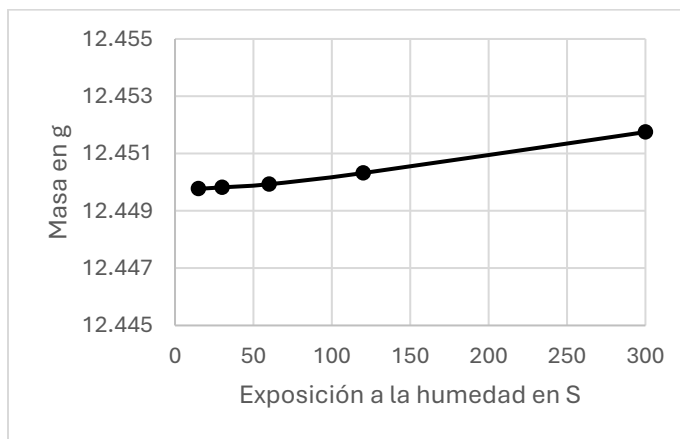
**Gráfico 20:** Masa de cátodo 10 con recuperación de Cu en función de la exposición a la humedad.



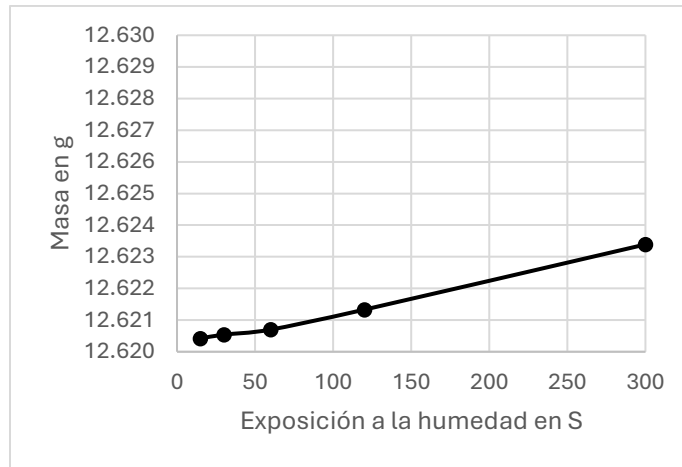
**Gráfico 21:** Masa de cátodo 11 con recuperación de Cu en función de la exposición a la humedad.



**Gráfico 22:** Masa de cátodo 12 con recuperación de Cu en función de la exposición a la humedad.



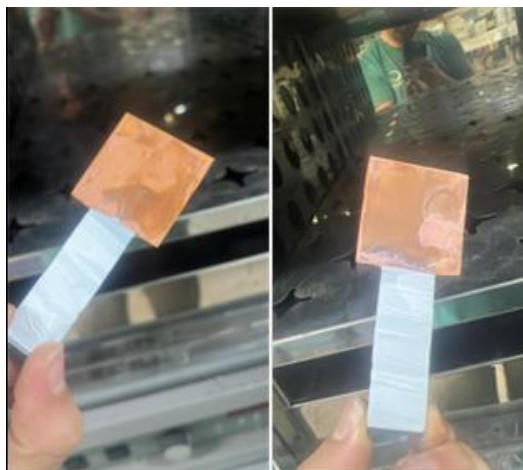
**Gráfico 23:** Masa de cátodo 13 con recuperación de Cu en función de la exposición a la humedad.



**Gráfico 24:** Masa de cátodo 14 con recuperación de Cu en función de la exposición a la humedad.



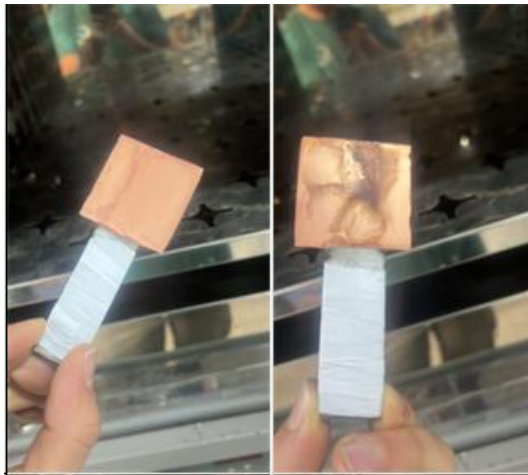
**Figura 40:** Ambas caras de cátodo de experimento 1B.



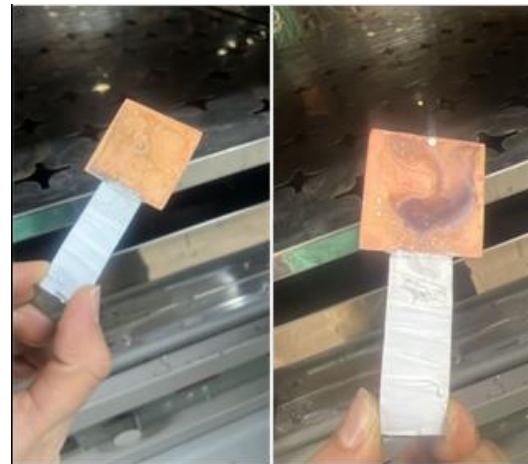
**Figura 41:** Ambas caras de cátodo de experimento 2B.



**Figura 42:** Ambas caras de cátodo de experimento 3B.



**Figura 43:** Ambas caras de cátodo de experimento 4B.



**Figura 44:** Ambas caras de cátodo de experimento 5B.



**Figura 45:** Ambas caras de cátodo de experimento 7B.