



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y DE MATERIALES

**EVALUACIÓN DE RENTABILIDAD DE LA
RECUPERACIÓN DE COBRE POR MEDIO DE
PROCESAMIENTO DE RELAVE DE SAL AMONÍACAL**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL DE MINAS

AUTORA

LESLIE QUEZADA MUÑOZ

PROFESOR GUÍA

FRANCISCO RAMIREZ NAVARRO

PROFESORA CO-REFERENTE

FRANCISCA SAN MARTÍN ROBBIANO

Dedicatoria

A mis padres, Eloísa y Pedro; por su apoyo, esfuerzo y comprensión incondicional, este logro no habría sido posible sin su compañía y amor día a día.

A mi hermana, Evelyn y su esposo Pablo; por siempre darme ánimos y generar que confíe en mí y mis capacidades.

A mis sobrinas, Amanda y Florencia; por darme todo su amor.

A mi tía Carmen, mi tío Marcelo y mi prima Verónica por alentarme en las buenas y en las malas.

A mis amigos, Teresa, Diego y Carlos M; por las risas que nunca faltaron en todo momento.

A mi pololo, Carlos; por estar presente en este proceso conmigo, entregándome su apoyo y su amor.

A mis compañeras de cuatro patas, Dachi, Nikki, Molly y Abby, por moverme la colita en los malos momentos y estar a mi lado en mis estudios hasta la madrugada.

Agradecimientos

Le agradezco a mi profesor guía, Francisco Ramírez, por darme la oportunidad y confianza de realizar este proyecto junto a mí.

A mi profesora correferente, Francisca San Martín, por entregarme todo su apoyo en este proceso, además de ser una profesora con la que siempre pude confiar en mi vida universitaria.

A todos mis amigos que hicieron que este proceso fuera ameno por la compañía, risas y apoyo incondicional.

Agradezco a Ricardo Santa María y Marcelo Molina, académicos de laboratorio del departamento de ingeniería metalúrgica y de materiales; por ayudarme con mis extensos experimentos, dándome consejos y apoyo para que resultara todo un éxito.

Resumen

La industria minera desde 1800 es masificada por la llegada de la electricidad y hasta hoy en día se ha convertido en la principal fuente de ingresos del país; provocando así que sea una de las actividades más importantes a nivel nacional. Este negocio minero es una actividad fundamental y en la que Chile destaca por la cantidad de yacimientos mineros dentro del territorio, convirtiéndose así en líder a nivel mundial. Por esta y más razones es por lo que siempre se busca la innovación para procesar minerales de manera eficaz y con menos costos de procesamiento. Esto dado que, primero que todo, los minerales son un material limitado y además porque los insumos mineros que son mayoritariamente utilizados en la industria son muy caros.

Actualmente, dado el alto precio del cobre se optan a técnicas como procesar minerales que tienen baja ley que estaban en botaderos o ideas que anteriormente no estaban consideradas, como el procesamiento de relaves. En este estudio se evalúa la rentabilidad económica de procesar un mineral artificial encontrado en un relave, llamado sal amoniacal; además, se escogen dos métodos prometedores por los cual recuperar su contenido de cobre.

Como resultado se obtiene que el método de cementación es el más adecuado para la recuperación del metal de interés, dado que el mineral posee muchas impurezas para procesarlo por electroobtención; y en la rentabilidad de este proceso se opta por poner dos casos de estudio en el cual los altos niveles de inversión provocan que este tipo de procesamiento no sea rentable en ningún caso, provocando pérdidas de 9 y 2,5 millones de dólares en cada caso, respectivamente.

Abstract

The mining industry since 1800 is massified by the arrival of electricity and until today it has become the main source of revenue for the country, making it one of the most important activities at the national level. This mining business is a fundamental activity in which Chile stands out for mining deposits inside of the territory, becoming a world leader. For this and more reasons is why innovation is always looked for to process minerals in an efficient way and with less processing costs. Because minerals are a limited material and because the mining inputs that are mostly used in the industry are very expensive.

Currently, given the high price of copper, techniques such as processing low-grade ores that were in dumps or ideas that were not previously considered, such as tailings processing, are being used. This study evaluates the economic viability of processing an artificial mineral found in a tailing, called ammoniacal salt; considering two methods to recover the copper content.

As a result it is obtained that the cementation method is the most appropriate because is possible recovery of the metal of interest, given that the mineral has many impurities to process it by electrowinning; and in the rentability of this process it is chosen to put two cases of study in which the high levels of investment cause that this type of processing is not profitable in any case, causing losses of 9 and 2.5 million dollars in each case respectively.

Índice

Capítulo 1. Introducción	09
1.1 Introducción General	09
1.2 Planteamiento del Problema	10
1.3 Hipótesis	11
1.4 Objetivos	11
1.4.1 General	11
1.4.2 Específicos	11
Capítulo 2. Antecedentes	12
2.1 Minería Chilena del Cobre	12
2.2 Minerales de Cobre	14
2.2.1 Minerales Sulfurados de Cobre	14
2.2.2 Minerales Oxidados de Cobre	15
2.3 Lixiviación	15
2.3.1 Mecanismos de Disolución	16
2.3.1.1 Mecanismo Físico	16
2.3.1.2 Mecanismo Químico	17
2.3.1.3 Mecanismo Electroquímico	17
2.3.2 Lixiviación Amoniacal	17
2.4 Extracción por Solventes	20
2.4.1 Extracción	21
2.4.2 Reextracción	21
2.5 Electroobtención	22
2.5.1 Variables Involucradas	32
2.6 Cementación de Cobre	36
2.7 Sal Amoniacal como Mineral	42
Capítulo 3. Metodología	44
3.1 Preparación de Muestras	47
3.2 Electroobtención con Solución de Sal Amoniacal	49
3.3 Cementación de Cobre a partir de Solución de Sal Amoniacal	52
Capítulo 4. Resultados	53
4.1 Resultados Electroobtención	53
4.2 Resultados Cementación de Cobre	56
Capítulo 5. Análisis	59
5.1 Análisis Electroobtención	59
5.2 Análisis Cementación de Cobre	60
5.3 Rentabilidad Económica	61
5.3.1 Caso Uno	61
5.3.2 Caso Dos	66
Capítulo 6. Conclusiones	67
Capítulo 7. Recomendaciones	68
Capítulo 8. Referencias	72
Anexos	76

Índice De Figuras

Figura 1: Principales países productores de cobre y su participación a nivel mundial	12
Figura 2: Planta de extracción por solventes	20
Figura 3: Esquema de extracción por solventes	22
Figura 4: Montaje electrólisis convencional	23
Figura 5: Secuencia de burbujas que causan la neblina ácida	29
Figura 6: Cementación de cobre	40
Figura 7: Mineral artificial de sal amoniacal	42
Figura 8: Estructura cristalina de sal amoniacal	44
Figura 9: Tranque de relave Cerro Jarón	45
Figura 10: Tranque de relave de Cerro Jarón. (Foto: Roberto Rojas)	46
Figura 11: Sal amoniacal chancada	47
Figura 12: Disolución de sal amoniacal en agua desmineralizada	48
Figura 13: Vaso decantador en su montaje	49
Figura 14: Montaje electroobtención de cobre	51
Figura 15: Resultado electroobtención	53
Figura 16: Cobre depositado en bandeja	54
Figura 17: Depósito de pasta en cátodo	55
Figura 18: Cobre cementado en clavos de hierro	57
	58

Índice De Tablas

Tabla 1: Participación nacional de producción de cobre por región. Fuente: SERNAGEOMIN.	13
Tabla 2: Autores que han investigado sobre la lixiviación en medios amoniacales	19
Tabla 3: Potenciales de reducción estándar	25
Tabla 4: Elementos que participan en la composición de cátodo para electroobtención	32
Tabla 5: Variables a considerar en un proceso de electroobtención	33
Tabla 6: Características y propiedades de sal amoniacal	43
Tabla 7: Elementos encontrados en la solución de sal amoniacal	44
Tabla 8: Recuperaciones de cobre en cementación	58
Tabla 9: Principales componentes para la construcción de un cementador	62
Tabla 10: Componentes revestimiento externo	62
Tabla 11: Componentes revestimiento interno	63
Tabla 12: Equipo para extracción de gases	63
Tabla 13: Componentes de descarga	64
Tabla 14: Componentes adicionales	64
Tabla 15: Mano de obra	64
Tabla 16: Capex y opex para caso uno	66
Tabla 17: Capex y opex para caso dos	67
Tabla A.1: Datos para obtener el valor de ganancia	76
Tabla A.2: Costo de agua para procesar todo el depósito	76
Tabla A.3: Costo de ácido sulfúrico para procesar todo el depósito	77
Tabla A.4: Costo de chatarra de hierro para procesar todo el depósito	77
Tabla A.5: Costo asociado a tambores de disolución	78

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN GENERAL

El cobre mundialmente se comienza a utilizar significativamente durante fines del siglo XIX, esto ocurre debido a la electricidad y su masificación, este elemento proveniente de la corteza terrestre y el cual está presente en promedio un 0,006% en ella, posee variadas cualidades, especialmente su propiedad conductora. Este metal corresponde al segundo con menor resistencia eléctrica ($1,71 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$) después de la plata, por esta excelente capacidad es por la cual se ha utilizado en la fabricación de cables, alambres, monedas, arte, entre otros. Y por consiguiente es muy demandado a nivel global, siendo los países del continente asiático los mayores importadores de este.

Actualmente, la demanda de cobre a nivel anual es en promedio 28 millones de toneladas, tan solo Chile presenta una participación del 28%, exportando a China más del 50% producido (Cochilco, 2022). Es por esto por lo que la industria minera del cobre en Chile es la actividad más importante del país, dado que esta genera un PIB en torno al 10% (Barría, 2021); además, crea una significativa cantidad de empleos directos e indirectos. Como esta actividad es una fuente fundamental para los ingresos del país, las empresas mineras buscan innovación continuamente para cubrir su producción y así cumplir los requerimientos del mercado; además de buscar bajos costos de extracción y procesamiento de mineral, que a la vez incluyan altas recuperaciones. Por esto, es indispensable aprovechar al máximo el cobre que se tiene a disposición.

En este estudio de investigación se desarrolla el procesamiento de un relave de sal amoniacal que aún contiene cobre en su interior con la intención de descubrir si es factible económicamente. Esto se realiza por medios de prueba que poseen dos tipos de procesamiento distintos, conocidos como electroobtención y cementación de cobre.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Estudios indican que el agotamiento de recursos es un hecho. Cada día, la minería extrae elementos desde la corteza que tardaron miles de años en ser formados (Carmona, 2014), pero dado los requerimientos de los seres humanos y como del mercado en general, la minería ha sido indispensable para los avances tecnológicos y necesidades de las personas. Debido a que los recursos minerales no son renovables, las empresas mineras se han encontrado en la situación de volver a procesar material que ya había sido desechado en botaderos y/o relaves porque el mineral dentro de las faenas mineras luego de largos años de explotación se ha visto disminuido y el material descartado en los botaderos y/o relaves hace años atrás presenta leyes similares a las que se extrae hoy en día de la mina.

En el presente trabajo se investiga la recuperación de cobre desde un mineral artificial llamado Lecontite Salmmoniac, encontrado en el relave de Cerro Jarón en la región de Antofagasta. El procesamiento de relave desechado hace años atrás y las propiedades de este mineral promueven la investigación de la recuperación de cobre por dos distintos métodos, uno de ellos la conocida electroobtención y otro, la cementación de cobre como precipitado.

Cabe destacar, que este tipo de mineral o mineraloide, para facilitar su comprensión a lo largo del trabajo es mencionado como sal amoniacal, debido a su composición; esta es detallada en el avance de este estudio.

1.3. HIPÓTESIS

La recuperación de cobre por medio de un electrolito creado a partir de sal amoniacal es posible y económicamente rentable, por medio de dos distintos métodos de procesamiento; controlando variables del procesamiento.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. GENERAL

Evaluar el potencial económico de la recuperación de cobre del mineral artificial conformado por sal amoniacal.

1.4.2. ESPECÍFICOS

- Caracterizar mineralógica y químicamente el mineral de sal amoniacal.
- Determinar la solubilidad máxima del mineral de sal amoniacal en agua.
- Determinar el método óptimo para la síntesis de cobre a partir del mineral de sal amoniacal.
- Determinar la tasa de recuperación de cobre a partir del mineral de sal amoniacal.

CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES

2.1. MINERÍA CHILENA DEL COBRE

La industria minera del cobre en Chile es la actividad económica más importante que el país presenta. Esta ha formado parte de la historia desde la era precolombina, donde arqueólogos indican que este elemento fue utilizado por parte de las comunidades indígenas desde 500 a.C (Government of Canada, 2011). Sin embargo, no fue hasta la revolución industrial que este metal pasa a ser uno de los materiales más relevantes del momento, esto data entre los años 1820 y 1900, los requerimientos de minerales para los cambios tecnológicos hicieron que Chile produjera en grandes cantidades este metal, convirtiéndose así, en el líder mundial de producción y exportación de Cobre hasta el día de hoy.

En el año 2021, Chile alcanzó una producción de cobre aproximadamente de 5,6 millones de toneladas métricas finas; lo que convierte al PIB relacionado a la minería en el 14,6%, este nivel de participación a nivel mundial se destaca comparado a otros países potencias en minería (Anuario de la Minería, 2021).



Figura 1: Principales países productores de cobre y su participación a nivel mundial.

En la Figura 1 es posible observar que Chile presenta un 26,6% de participación mundial como productor de cobre, seguido por Perú con un 10,5%; el tercer lugar, lo comparten dos países, R.D. Congo y China con un 8,6%.

Esta producción es alcanzada por tres denominaciones dentro de la minería, la primera es la gran minería que está compuesta por empresas del ámbito privado y estatales; y que juntas aportan el 96% de la producción; la mediana minería es representada por mineras pertenecientes principalmente al ámbito nacional y su aporte es del 3%; en cuanto la pequeña minería representa el 1%. Además, con respecto a las principales regiones productoras de cobre se concentran en el norte de Chile. La región de Antofagasta destaca por producir el 53,0% del cobre del país, seguida por la región Atacama con un 8,3%.

Tabla 1: Participación nacional de producción de cobre por región. Fuente: SERNAGEOMIN.

<i>Región</i>	<i>Toneladas</i>	<i>Participación</i>
<i>Arica y Parinacota</i>	6.694	0,1%
<i>Tarapacá</i>	687.298	12,3%
<i>Antofagasta</i>	2.960.492	53,0%
<i>Atacama</i>	461.390	8,3%
<i>Coquimbo</i>	425.268	7,6%
<i>Valparaíso</i>	257.971	4,6%
<i>Región Metropolitana</i>	328.747	5,9%
<i>G. Libertador Bernardo O'Higgins</i>	460.024	8,2%
<i>Aysén del G. Carlos Ibáñez del Campo</i>	200	0,0%

2.2. MINERALES DE COBRE

El cobre se encuentra en abundancia natural en la corteza terrestre, su concentración es de alrededor de 60 miligramos por kilogramo (mg/Kg). Mientras que en los depósitos minerales su concentración alcanza entre 5.000 y 50.000 mg/Kg (Codelco, 2022). Existen más de cien minerales de cobre, aunque menos de veinte tienen una relevancia dentro de la industria minera. En Chile se pueden encontrar estos tipos de minerales como menas sulfuradas, menas oxidadas y en asociaciones con otro tipo de sulfuros metálicos. Los minerales más comunes dentro de un depósito mineral chileno son calcopirita (CuFeS_2), bornita (Cu_5FeS_4), calcosina (Cu_2S), atacamita ($\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$), crisocola ($(\text{Cu,Al})_4\text{H}_4(\text{OH})_8\text{Si}_4\text{O}_{10}\cdot n\text{H}_2\text{O}$) y malaquita ($\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$). Estos tipos de minerales se procesan para recuperar el cobre de distinta manera, dependiendo de su naturaleza, componentes y propiedades mineralógicas.

2.2.1. MINERALES SULFURADOS DE COBRE

Los minerales sulfurados de cobre se caracterizan por poseer en su estructura azufre en forma de sulfuro y su forma de procesamiento puede variar. Existen tipos de procesamiento para concentrados de estos minerales que es por medio de flotación y por otra parte se puede procesar por medio de biolixiviación en pilas, botaderos o in-situ. Cabe destacar que una manera para clasificar y diferenciar qué tipo de sulfuros van a cada tipo de procesamiento, es plenamente la concentración o ley de cobre presente en ellos: los minerales que son llevados a procesos de flotación suelen poseer una ley de cobre más alta que los que se procesan por lixiviación.

Otra característica de estos tipos de minerales es que son en general insolubles al agua, por lo tanto, la disolución de estos está dada netamente por la presencia de agentes oxidantes o ambientes reductores.

2.2.2. MINERALES OXIDADOS DE COBRE

Estos minerales son aquellos que se encuentran sobre la corteza terrestre que están formados por la acción del oxígeno atmosférico y acciones del tipo química. Dentro de los minerales más comunes en esta categoría, se encuentran la cuprita (Cu_2O) y la tenorita (CuO). Estos presentan coloraciones variadas y a su vez presentan una facilidad al ser atacados por soluciones ácidas, es por esto que su método de procesamiento es mediante hidrometalurgia. El proceso hidrometalúrgico es denominado lixiviación, que posteriormente pasa a procesos de extracción por solvente y electroobtención.

2.3. LIXIVIACIÓN

Es la etapa fundamental del proceso hidrometalúrgico, esta consiste en la disolución parcial o total del metal de interés, como el cobre; desde un mineral mediante la acción de agentes químicos presentes en una solución acuosa.

En el caso específico de los minerales oxidados de cobre, el agente lixivante más utilizado dentro de la industria es del ácido sulfúrico (H_2SO_4). Este ácido es usado ya que presenta una excelente selectividad, separando el cobre del resto de ganga presente en un mineral, además presenta una gran disponibilidad dentro del mercado, posee un costo relativamente bajo y se caracteriza por tener un manejo y transporte bastante sencillo.

Los procesos anteriores a una lixiviación corresponden a la extracción del material directo de la mina, una posterior conminución de este para reducir su tamaño y luego su aglomeración, para que se los finos se encuentren unidos a las partículas más gruesas, realizado mediante la adición de agua y ácido sulfúrico en tambores aglomeradores. Después de este proceso, los glómeros pueden ser apilados en pilas, las cuales son regadas con una solución acuosa rica en ácido sulfúrico mediante aspersores. Cuando esta solución acuosa entra en contacto con el mineral, el ácido se empieza a consumir ya que inicia las reacciones químicas tanto con la mena como con la ganga; por lo tanto, en la fase acuosa aparecen nuevas especies como cobre, hierro, entre otras; esta fase es conocida dentro de la industria como *pregnant leach solution* o PLS.

2.3.1. MECANISMOS DE DISOLUCIÓN

El mecanismo de disolución que realiza la solución acuosa puede ser físico, químico o electroquímico; depende netamente del tipo de mineral, es decir, su estructura.

2.3.1.1. MECANISMO FÍSICO

Los minerales que se disuelven mediante este tipo de mecanismo son los que contienen en su estructura tipos de enlace iónico, por lo tanto, no se observa una reacción química que esté involucrada. Además, se considera que el poseer este mecanismo todo tipo de incremento a la agitación del sistema produce una mayor disolución del material; sin embargo, al incrementar la temperatura no presenta mayor cambio en su disolución.

2.3.1.2. MECANISMO QUÍMICO

Los minerales que se disuelven mediante este tipo de mecanismo poseen dentro de su estructura enlaces iónico-covalente, por tanto, a mayor grado o cantidad de enlaces iónico-covalente presentes en el mineral, mayor es el comportamiento refractario que posee.

2.3.1.3. MECANISMO ELECTROQUÍMICO

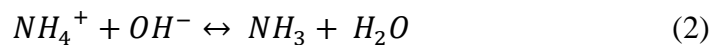
Los minerales que se disuelven mediante este tipo de mecanismo son conductores o semiconductores, como sulfuros de cobre primarios y secundarios, dado que dentro de ellos existe una transferencia de electrones en distintas zonas del sólido o entre el sólido y los iones de la solución, lo que se conoce como una reacción redox. Por lo tanto, el sólido es disuelto en la región que actúa como ánodo, es decir, en la zona que se produce la oxidación. En este mecanismo la disolución del sólido aumenta si se incrementa la temperatura y la concentración de reactantes.

2.3.2. LIXIVIACIÓN AMONIACAL

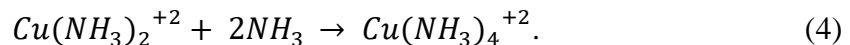
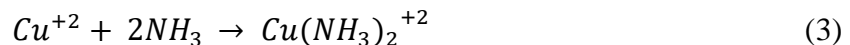
El procesamiento de minerales dentro de la industria minera es la parte fundamental de este negocio y la lixiviación convencional en ocasiones puede generar costo elevado dependiendo del tipo de mineral que se esté lixivando dado su consumo de ácido sulfúrico, como es el caso de los minerales oxidados de cobre los cuales presentan un carácter de tipo básico; este problema aparte de ser costoso por el consumo es altamente contaminante. Por ende, existe otra vía de lixiviación, la cual se caracteriza por implementar el amoniacal dentro de su estructura.

La lixiviación amoniacal emplea como agente complejante al amoniaco, el cual posee diversas ventajas cuando es empleado en un medio básico, ya que contiene una selectividad muy importante con respecto a los iones metálicos, además de eliminar el hierro presente en las soluciones de cobre porque el amoniaco evita que este elemento se disuelva; es decir, a partir del uso de amoniaco en la lixiviación es posible obtener una solución rica en cobre y sin presencia de impurezas como el hierro.

El mecanismo de reacción que poseen los complejos de amonio sobre el cobre se observa a continuación:



En las ecuaciones (1) y (2) ocurre una neutralización de los iones H^+ y OH^- con amoniaco y además con iones de amonio. Como se genera NH_3 mediante los iones de amonio, se forma el complejo $Cu(NH_3)_2^{+2}$ y si se genera con un exceso de amoniaco el complejo se transforma a $Cu(NH_3)_4^{+2}$. Esto ocurre debido al pH presente en la solución y en la concentración tanto del NH_3 como del NH_4^+ y las reacciones correspondientes son:



Por lo tanto, estos complejos de cobre y amoniaco dan paso a que ocurra una lixiviación. Esta es importante al momento de considerar las impurezas, pero presenta

un consumo de esta solución mayor al del ácido sulfúrico de una lixiviación convencional y está sujeta a permisos medio ambientales más complejos.

Este mecanismo además se caracteriza por no ser utilizado frecuentemente en las plantas de lixiviación, dado que su estudio aún es muy limitado. Sin embargo, diversos estudios detallan a autores innovando e investigando sobre este tema como los que se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2: Autores que han investigado sobre la lixiviación en medios amoniacales.

Antecedentes de autores	
Ntuli et al. (2011)	Investiga los efectos de la concentración de amoniaco y el tiempo de lixiviación así determinar condiciones óptimas.
Bryden (1975)	Estudió la cinética de lixiviación de la crisocola en soluciones de amonio/carbonato.
Paul y Ferron (1983)	Estudiaron de la cinética de lixiviación de malaquita en solución de carbonato de amonio.
Yartasi y Copur (1996)	Estudiaron la disolución de la malaquita en cloruro de amonio.
Chan y Liu (1998)	Estudiaron la viabilidad de una lixiviación de cobre usando soluciones de amoniaco.

2.4. EXTRACCIÓN POR SOLVENTES

El proceso de extracción por solventes, también conocido por sus siglas en inglés SX (Solvent Extraction), consiste en una extracción selectiva del cobre presente en una solución acuosa recuperada del proceso de lixiviación por medio de un solvente orgánico para posteriormente ser transmitido a una solución ácida concentrada con ácido sulfúrico como se observa en la figura 2.

Esta etapa recibe una solución que presenta una baja concentración de cobre y variadas impurezas provenientes de la lixiviación, como pueden ser Cl, Mn, Mg, Fe, entre otros elementos. Dado esto, el proceso de extracción por solvente tiene el objetivo de extraer el cobre mediante un intercambio iónico y consta de dos etapas, la extracción y la reextracción; como resultado de estas se produce una solución ya apta para un proceso de electroobtención.

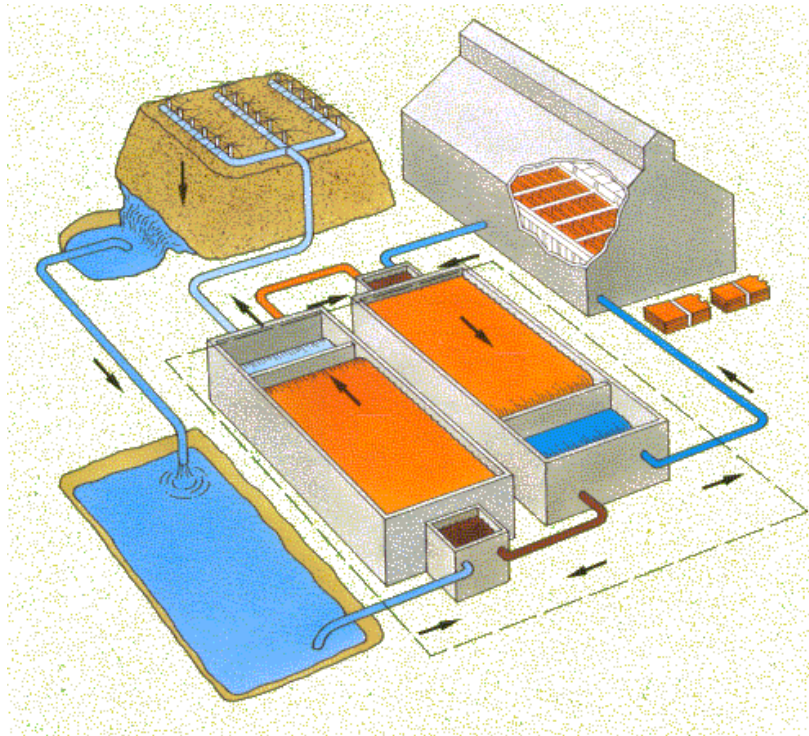


Figura 2: Planta de extracción por solventes.

2.4.1. EXTRACCIÓN

En esta etapa la solución proveniente del proceso de lixiviación llamada PLS es mezclada con una fase orgánica o extractante conocido como orgánico descargado mediante continuidad orgánica, este extrae selectivamente los iones de cobre incorporándolos a su fase; ya que el ion cúprico reacciona con este extractante y forma un compuesto organometálico insoluble en agua y a su vez totalmente soluble en el orgánico. Por consiguiente, ocurre la descarga de la solución PLS; esta solución descargada comienza a llamarse refino; en cuanto al solvente orgánico, ya que presenta iones de cobre en su interior, comienza a llamarse orgánico cargado. Cabe destacar que ambas soluciones son inmiscibles entre sí y que necesitan un proceso de agitación para que este intercambio pueda ser llevado a cabo.

2.4.2. REEXTRACCIÓN

Este es el proceso posterior a la extracción, en donde el orgánico que está cargado de cobre entra en contacto con una solución llamada electrolito pobre, esta es una solución de alta acidez por estar concentrada de ácido sulfúrico, la cual por efecto de su cambio de pH da paso a que la reextracción, o también conocido como *stripping*, se lleve a cabo. Mediante una agitación de estas dos soluciones inmiscibles entre sí ocurre un nuevo intercambio iónico generando así un electrolito rico de alta pureza que contiene los iones de cobre de manera concentrada y un orgánico descargado de cobre

que es reutilizado para un nuevo proceso de extracción. Es posible observar en la figura 3 de manera gráfica los procesos mencionados y sus recirculaciones.

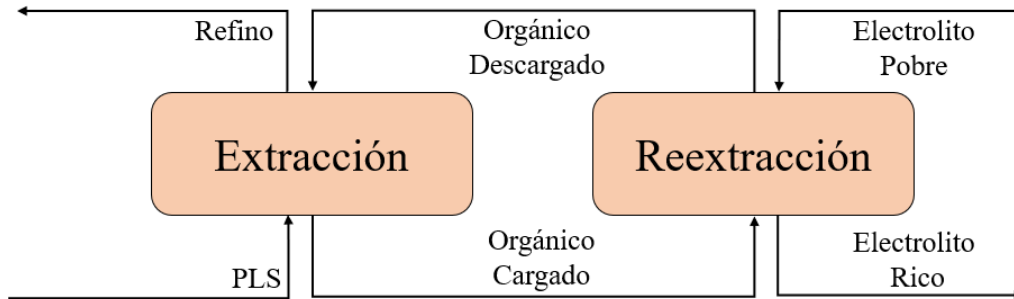


Figura 3: Esquema de extracción por solventes.

2.5. ELECTROOBTENCIÓN

Este proceso está definido dentro de la rama de la electrometalurgia y se basa en el proceso de electrólisis en donde mediante corriente continua se descompone una sustancia. Las reacciones electroquímicas que ocurren provocan que una sustancia se oxide (pierde electrones) y otra se reduzca (gana electrones).

La electroobtención convencional consta de un cátodo y un ánodo sumergidos en una solución electrolítica con contenido de cobre como se observa en la Figura 4.

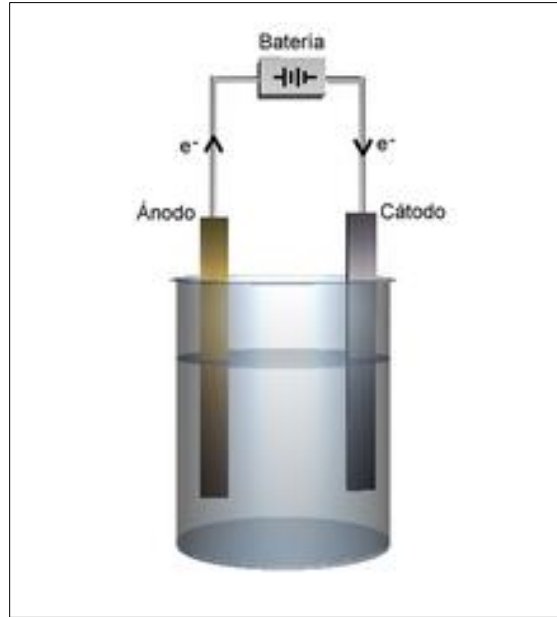


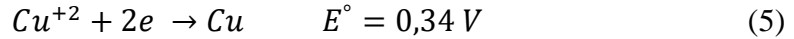
Figura 4: Montaje electrólisis convencional.

En este procedimiento, el cátodo es la placa por la cual se recupera el cobre y ánodo debe ser inatacable por las sustancias para que esta no contamine la solución. El cátodo es una lámina de acero inoxidable y el ánodo está compuesto de una aleación que contiene plomo (Pb), calcio (Ca) y antimonio (Sb).

El electrolito que se utiliza en este procedimiento es la solución proveniente de lixiviación y que fue tratada posteriormente en el proceso de extracción por solventes.

En una electroobtención convencional la corriente presente circula desde el ánodo al cátodo a través de un montaje con corriente continua y por medio de la solución conductora. Por consiguiente, el cobre se deposita en la superficie del cátodo y la solución se descompone sobre el ánodo; esto es conocido como reacciones catódicas y anódicas respectivamente; y se da paso al desprendimiento de oxígeno.

Se puede observar en las ecuaciones (5) y (6) a continuación, la reducción del ión cúprico y la oxidación del agua.



Este tipo de reacciones viene dado por una diferencia de potencial entre los elementos participantes, esta diferencia de potencial hace que las reacciones de reducción y oxidación dependan de ella. Por lo tanto, de esta forma se define el potencial estándar que tiene un elemento como el potencial de electrodo cuando la corriente neta que pasa a través es nula en condiciones estándar.

Los potenciales de reducción estándar en disolución acuosa están enlistados y corresponden a los observados en la Tabla 3.

Tabla 3: Potenciales de reducción estándar.

Semirreacción de reducción	E° (V)	
$Li^{+} + e^{-} \rightarrow Li_{(s)}$	-3,0401	+REDUCTOR
$K^{+} + e^{-} \rightarrow K_{(s)}$	-2,931	
$Ca^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Ca_{(s)}$	-2,868	
$Na^{+} + e^{-} \rightarrow Na_{(s)}$	-2,7144	
$Mg^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Mg_{(s)}$	-2,3568	
$Al^{3+} + 3e^{-} \rightarrow Al_{(s)}$	-1,676	
$Mn^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Mn_{(s)}$	-1,185	
$2H_2O + 2e^{-} \rightarrow H_{2(g)} + 2OH^{-}$	-0,8277	
$Zn^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Zn_{(s)}$	-0,7628	
$Cr^{3+} + 3e^{-} \rightarrow Cr_{(s)}$	-0,74	
$Fe^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Fe_{(s)}$	-0,440	
$Cr^{3+} + e^{-} \rightarrow Cr_{(s)}^{2+}$	-0,42	
$Cd^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Cd_{(s)}$	-0,40	
$Ni^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Ni_{(s)}$	-0,236	
$Sn^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Sn_{(s)}$	-0,13	
$Pb^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Pb_{(s)}$	-0,1266	
$2H^{+} + 2e^{-} \rightarrow H_{2(s)}$	0,0000	
$Cu^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Cu^{+}$	+0,159	
$SO_4^{2-} + 4H^{+} + 2e^{-} \rightarrow SO_{2(s)} + 2H_2O$	+0,17	
$Cu^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Cu_{(s)}$	+0,3394	
$O_{2(g)} + 2H_2O + 4e^{-} \rightarrow 4OH^{-}$	+0,414	
$Cu^{+} + e^{-} \rightarrow Cu_{(s)}$	+0,5180	
$I_{2(s)} + 2e^{-} \rightarrow 2I^{-}$	+0,535	
$MnO_4^{-} + 2H_2O + 3e^{-} \rightarrow MnO_{2(s)} + 4OH^{-}$	+0,597	
$Fe^{3+} + e^{-} \rightarrow Fe^{2+}$	+0,769	
$Ag^{+} + e^{-} \rightarrow Ag_{(s)}$	+0,7996	
$NO_3^{-} + 4H^{+} + 3e^{-} \rightarrow NO_{(g)} + 2H_2O$	+0,96	
$Br_{2(l)} + 2e^{-} \rightarrow 2Br^{-}$	+1,066	
$Br_{2(aq)} + 2e^{-} \rightarrow 2Br^{-}$	+1,0873	
$2IO_3^{-} + 12H^{+} + 10e^{-} \rightarrow I_{2(g)} + 6H_2O$	+1,2093	
$O_{2(g)} + 4H^{+} + 4e^{-} \rightarrow 2H_2O$	+1,2288	
$Cr_2O_7^{2-} + 14H^{+} + 6e^{-} \rightarrow 2Cr^{3+} + 7H_2O$	+1,33	
$Cl_{2(g)} + 2e^{-} \rightarrow 2Cl^{-}$	+1,3601	
$\beta - PbO_{2(s)} + 4H^{+} + 2e^{-} \rightarrow Pb^{2+} + 2H_2O$	+1,458	
$\alpha - PbO_{2(s)} + 4H^{+} + 2e^{-} \rightarrow Pb^{2+} + 2H_2O$	+1,468	
$ClO^{-} + 2H^{+} + 2e^{-} \rightarrow Cl^{-} + H_2O$	+1,46	
$MnO_4^{-} + 8H^{+} + 5e^{-} \rightarrow Mn^{2+} + 4H_2O$	+1,5119	
$Au^{3+} + 3e^{-} \rightarrow Au_{(s)}$	+1,52	
$H_2O_{2(l)} + 2H^{+} + 2e^{-} \rightarrow 2H_2O$	+1,78	
$Au^{+} + e^{-} \rightarrow Au_{(s)}$	+1,83	
$F_{2(g)} + 2e^{-} \rightarrow 2F^{-}$	+2,890	+OXIDANTE



Estos potenciales poseen mucha relevancia al momento de la electroobtención, ya que estos tienen que ser llevados al equilibrio en el sistema en el que se encuentran. Para poder determinar esto, es que se utiliza la ecuación (7) o ecuación de Nernst.

$$E_e = E^o - \frac{RT}{nF} \ln(Q) \quad (7)$$

Donde:

E_e = Potencial de equilibrio

E^o = Potencial estándar

R = Constante de los gases

T = Temperatura a la que se encuentra el electrolito

n = Número de electrones transferidos

F = Constante de Faraday

Q = Cociente de reacción

Esta ecuación ayuda a conocer si la reacción dentro del electrolito ocurre en dirección izquierda a derecha, o caso contrario, de derecha izquierda. Es por esta razón que si se considera la reacción como:



Y la expresión de Q se considera como:

$$Q = \frac{[a_B]}{[a_A]} \quad (9)$$

Si este valor de potencial de equilibrio es mayor a cero, la reacción ocurre en dirección de izquierda a derecha y si el valor de potencial de equilibrio es menor a cero la reacción

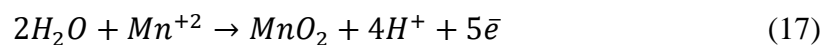
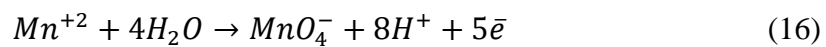
ocurre de derecha a izquierda; por tanto, es en este caso que se debe utilizar una fuente externa de electricidad para que ocasione la reacción inversa a esta.

En la electroobtención de cobre se pueden encontrar diferentes reacciones ocurriendo en el cátodo, las cuales pueden ser observadas en las ecuaciones (10), (11) y (12), mientras que en el ánodo se pueden encontrar las reacciones de las ecuaciones (13), (14), (15), (16) y (17).

Para el caso del cátodo:



Para el caso del ánodo:



Dado que dentro de un electrolito no existe la presencia de un equilibrio constante, esta información no es determinante. Por consiguiente, dentro de la electroobtención se estudia la cinética electroquímica, que a grandes rasgos debe cumplir con dos leyes determinadas por Michael Faraday, científico británico, que plantea:

1.- La masa depositada o consumida por electrólisis es directamente proporcional a la cantidad de carga eléctrica suministrada.

2.- La masa de una especie depositada en el electrodo, es directamente proporcional a los equivalentes químicos de la especie depositada.

Con estas leyes es posible obtener ciertos parámetros de transferencia de carga para la electrolisis que posteriormente se pueden comparar con eficiencias reales.

El proceso empírico de la electroobtención se realiza en celdas de electrólisis en una planta de procesamiento de minerales de diferentes dimensiones dependiendo de la capacidad de la planta. Cabe destacar que durante este proceso es común la producción de cantidades significativas de vapores tóxicos debido a que se liberan burbujas de gas desde los electrodos, específicamente oxígeno desde el ánodo e hidrógeno desde el cátodo y cuando estas burbujas son reventadas se genera una neblina ácida, por lo cual es sumamente importante los implementos de seguridad en este procesamiento. Sin embargo, aunque estos dos electrodos produzcan esta neblina ácida, en mayor proporción es el ánodo el que la genera; las grandes cantidades de oxígeno que se producen se basan en que este es el principal elemento abundante.

En la Figura 5 se puede observar la secuencia del proceso de generación de la burbuja hasta que es reventada, esto como consecuencia de la descomposición del agua en el ánodo; estas burbujas que contienen electrolito en su interior emergen a la superficie provocando liberación de los componentes como ácido sulfúrico.

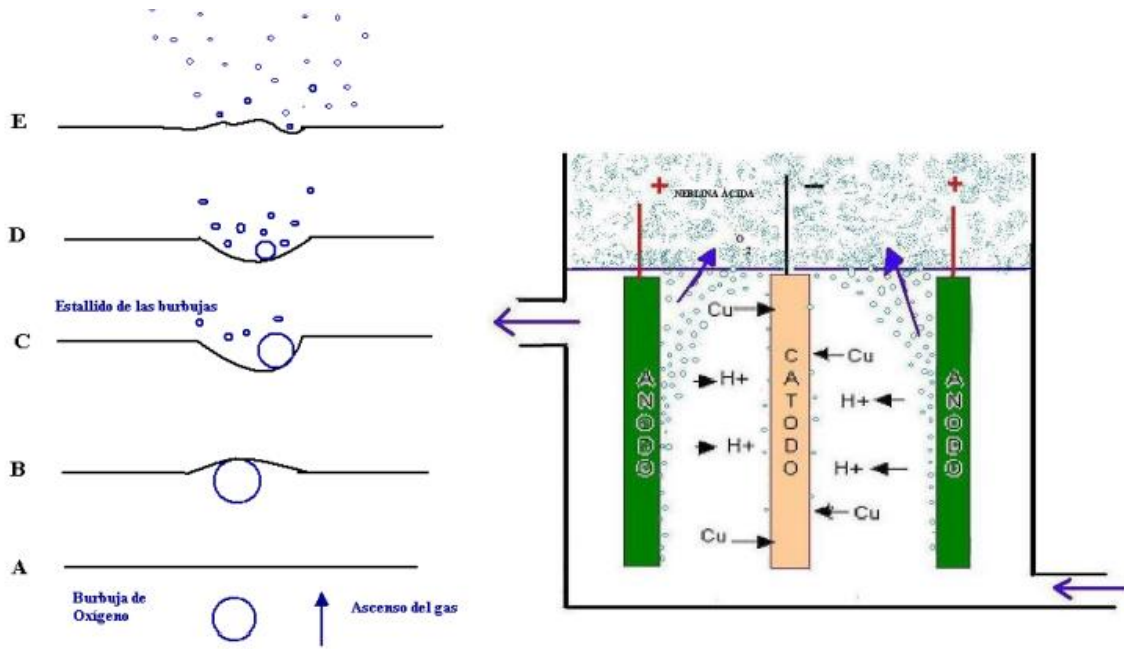


Figura 5: Secuencia de burbujas que causan la neblina ácida.

Como esta neblina ácida es sumamente tóxica, es que se añaden inhibidores o controladores como el uso de barreras mecánicas, ventilación y adición de aditivos surfactantes al electrolito (Vargas, 2006).

Actualmente, como la industria minera está en procesos de innovación y con la visión de generar menos contaminantes, además de cumplir con los permisos medioambientales dictados por ley, es que se ha implementado el uso de tenso activos en el electrolito, estos disminuyen la tensión superficial que posee este y por tanto modifican el comportamiento que poseen las burbujas. El cambio principal que se puede observar es que cambian la fuerza de estallido, por consiguiente, la emisión de la neblina ácida. Sin embargo, el uso de estos aditivos no siempre es compatible con el proceso de electroobtención, dado que estos poseen características que perjudican la electrólisis, como el pH extremo y las características químicas que poseen, las cuales afectan la polaridad del electrolito y a su vez

la calidad del depósito de cobre, además de que la eficiencia de corriente se ve disminuida (Urbina, 2008).

Por otra parte, los electrolitos poseen variados tipos de especies en su interior. Esto es dado que se genera un arrastre del proceso anterior (extracción por solventes) y estos a su vez poseen distintos tipos de composición porque provienen de faenas que tiene diferentes tipos de minerales y características únicas; es por esta razón que en el proceso de electroobtención se utilizan aditivos para mejorar la eficacia, los más comunes dentro de la industria son:

1. Sulfato de cobalto y cloro. Estos elementos al ser incorporados en el electrolito mejoran la participación que tiene el ánodo en el proceso, dado que estos disminuyen la corrosión que posee este, así evitando que se forme el barro anódico y reduciendo la tensión de la celda (Urbina, 2008).
2. Goma guar. Este aditivo tiene como finalidad mejorar la calidad del depósito de cobre, ya que este regula el depósito de manera granular. Este aditivo proviene de las plantas de reservas de carbohidratos y su uso en la industria se respalda por su buena solubilidad en el agua y su alta viscosidad en las soluciones acuosas. Su mayor ventaja es que disuelve los nódulos de la superficie catódica, homogeneizando el depósito (Urbina, 2008). Considerar, que la goma guar se va agotando dentro del electrolito y al aumentar la temperatura y la acidez su descomposición es aún mayor, por lo cual hay que ir reponiéndola constantemente. Adicionalmente hay que mantener la temperatura para que no supere los 50°C y un permanente control de la acidez del sistema.
3. Anti sulfatantes. Su objetivo es mantener la limpieza adecuada los contactos eléctricos, además de no agregar caídas de tensión al sistema.

4. Fluorad y Flotanol. Estos elementos son surfactantes que disminuyen la tensión superficial en el electrolito, y como ya fue mencionado anteriormente, esto provoca la disminución de neblina ácida del sistema. Es importante destacar que estos aditivos no afectan la eficiencia de corriente, consumo energético o calidad catódica.

Todos estos aditivos son agregados ya que un proceso de electroobtención no solo tiene la finalidad de recuperar cobre en un cátodo, sino también que este depósito sea interesante en su aspecto físico y su pureza. Los problemas más comunes dentro de este proceso es el arrastre de orgánico desde la extracción por solventes y además la contaminación de estos por el plomo que proviene desde el ánodo.

Esta liberación de plomo desde el ánodo se produce dado que este electrodo, en el proceso de electroobtención la capa de óxido se comienza a degradar, específicamente el compuesto PbO_2 . Esta situación ocurre mayoritariamente por dos motivos: por cortes de energía en la planta eléctrica, o por la presencia de MnO_2 , que desplaza la capa de PbO_2 del ánodo, el cual tiene como función proteger al ánodo para que no exista una corrosión.

Adicionalmente, las cualidades que presentan los ánodos que están formados por la aleación Pb, Ca y Sn y las razones por los cuales son elegidos en este proceso son:

1. Presentan propiedades mecánicas adecuadas para el proceso.
2. Son buenos conductores eléctricos.
3. Poseen un costo adecuado para la industria.
4. Destacan por su estabilidad química.
5. Actúa como catalítico de la reacción principal.

Por otra parte, en el cátodo se puede observar un fenómeno denominado *pitting*. Este consiste en una corrosión o desgaste de la superficie metálica que está siendo sometida a trabajos de electrodeposición, este genera una corrosión puntual y pueden observarse como

orificios en la placa del cátodo. Esta problemática puede ser minimizada mediante sistemas de control en la composición del electrolito y con prácticas operaciones adecuadas.

Los cátodos están diseñados con acero inoxidable. Este debe ser de un acero austenítico con bajo contenido de carbono y con otros elementos aleantes (Tabla 4), ya que bajo estas condiciones asegura un buen rendimiento a los ambientes corrosivos a los que se somete.

Tabla 4: Elementos que participan en la composición de cátodo para electroobtención.

Elementos aleantes	
Cromo (Cr)	6 – 18 [%]
Níquel (Ni)	10 – 14 [%]
Molibdeno (Mo)	2 – 3 [%]

2.5.1. VARIABLES INVOLUCRADAS

Dentro de la rama de las variables operaciones que se suelen trabajar en un proceso de electroobtención se tienen diversos parámetros, como lo son:

1. Una densidad de corriente entre 160 y 300 [A/m²]
2. El flujo del electrolito debe estar entre 100 y 150 [L/min]
3. La temperatura a la cual se trabaja debe estar entre 40 y 50 [°C]

Estas variables se usan dentro de la industria. Sin embargo, existen otras variables que dependen netamente de las condiciones de operación, como las que se pueden observar en la Tabla 5.

Tabla 5: Variables a considerar en un proceso de electroobtención.

Variables en una celda de electrólisis	
Variables inherentes a la solución	<ul style="list-style-type: none"> • Aditivos • Tipo de solvente • Concentración de impurezas • Concentración de especies electroactivas • pH de la solución
Variables de electrodo	<ul style="list-style-type: none"> • Área superficial • Material anódico • Material catódico • Geometría
Variables eléctricas	<ul style="list-style-type: none"> • Corriente eléctrica • Potencial eléctrico
Variables externas	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura • Presión • Tiempo de electrólisis

Además de todas estas variables, existen condiciones que afectan directamente la calidad y cantidad del producto; dentro de las más importantes se puede encontrar:

1. Densidad de corriente

Esta medida controla distintas variables dentro del proceso de electroobtención, como la producción, el consumo de energía, la eficiencia de la corriente de la celda y la calidad fisicoquímica del depósito catódico. Dado que, la eficiencia de corriente es inversamente proporcional a este parámetro, es decir, a mayor densidad de corriente, menor es la eficiencia; ya que esta provoca un favorecimiento en la probabilidad de cortocircuitos

y del crecimiento dendrítico. Adicionalmente, cuando la densidad de corriente es elevada provoca un aumento en la sobretensión catódica, provocando la reducción del ion hidrogeno y a su vez generando este en estado gaseoso; esto da como resultado un depósito de baja calidad y de mala adherencia. Por último, valores elevados de densidad de corriente provocan el aumento del voltaje dentro de la celda y por consiguiente un mayor costo energético.

2. Sobrepotencial del cátodo

Este posee su causa dado que existe una diferencia de la concentración de Cu^{+2} en la capa cercana al cátodo. A pesar de esta problemática, esta tiene una solución, la cual es que el electrolito se someta a una agitación en las cercanías del cátodo.

3. Sobrepotencial del ánodo

Esta tiene su causa en la liberación del oxígeno por las reacciones que se llevan a cabo y a su vez esto está asociada a la dificultad de la nucleación de las burbujas de oxígeno, además de que existe una baja presencia de ácido sulfúrico en la capa límite del ánodo; su solución es agregar a la solución Co^{+2} , así se puede reducir el sobrepotencial de 0,7 a 0,6 [V] en un rango de densidad de corriente de 0 a 100 [A/m^2] (Cifuentes, 2002).

4. Voltaje total

Dado que en un proceso de electroobtención existen las caídas de potencial, se debe entrar a discutir las variables que provocan este

fenómeno, ya que, cuando no se está en el valor adecuado, esta genera pérdida de carga cuando pasa la corriente a través de él. Para este caso las variables involucradas son la reacción de descomposición (ER), el sobrepotencial catódico (EC), el sobrepotencial anódico (EA), la resistencia óhmica del electrolito (E Ohm) y la resistencia en los conductores y contactos eléctricos (EK). Por lo tanto, de acuerdo con la ecuación (18) se puede determinar el potencial total que debe tener una celda para así operar el valor adecuado, evitando así caídas de potencial.

$$E_{total} = ER + EA + EC + E\text{ Ohm} + EK \quad (18)$$

5. Temperatura

Todas las especies que se encuentran en la solución pueden ser transportadas dentro de la misma de tres maneras distintas: por convección; esta se produce por el efecto de los gradientes de densidad del electrolito, por difusión; dado por el efecto que se tiene por los gradientes de concentración y por migración; que ocurre por efecto de los gradientes en el potencial eléctrico. Por lo tanto, el aumento de la temperatura provoca un cambio en estos procesos, como los mencionados a continuación:

- Provoca una disminución en la viscosidad de la solución, por lo tanto, esto se refleja en un aumento en las velocidades de convección.

- Ocurre un incremento en la solubilidad del cobre, esto conlleva el aumento de los gradientes de concentración y a su vez una mayor velocidad de difusión.
- Incrementa la movilidad de los iones, por lo tanto, aumenta la conductividad eléctrica y así las velocidades que se tiene en la migración.

Sin embargo, aunque la temperatura sea beneficiosa en este aspecto; también tiene consecuencias negativas como: el mayor desprendimiento de gases ácidos, pérdidas de agua por evaporación, incremento en la corrosión de la planta de procesamiento y se necesita un mayor aislamiento térmico.

6. pH en la solución

El pH en la solución debe ser el necesario para que se genere una conductividad eléctrica, así facilita la deposición de cobre. Una disminución del pH puede generar mayor corrosión del equipamiento y un aumento del pH puede ocasionar que no se deposite el cobre como es debido.

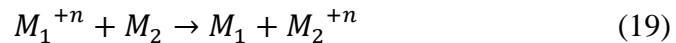
2.6. Cementación de cobre

La cementación es un proceso donde cementa o precipita un metal desde una solución acuosa debido a que existe la presencia de otro metal. El proceso de cementación se basa en que los potenciales de electrodo o potenciales electroquímicos, es decir, el metal que posea el potencial de electrodo más alto tiene mayor tendencia a la oxidación y quedará en la solución; reemplazando al metal que tenga un menor potencial.

Este proceso posee características distintivas dentro de la metalurgia, como:

- Es un proceso bastante rápido ya que la reacción se produce a gran velocidad.
- El precipitado es fácilmente separado de la solución sin contaminación.
- La solución resultante puede ser reciclada, dado que se puede someter a una reacción volviéndola a su estado inicial.
- Sus costos de operación son bajos y el espacio en donde se procesa puede ser reducido dependiendo de la capacidad a procesar.

Dentro de los aspectos termodinámicos de este proceso se puede mencionar que este mecanismo de recuperación de cobre es espontáneo. Para representarlo en la ecuación (19); la especie que precipita será llamada M_1 , mientras que la especie sólida que es incorporada a la solución es denominada M_2 ; esta situación ocurre mediante una reacción redox y de forma general se puede ver representada así:



El resultante de esta reacción es un metal M_2 , el cual se oxida por lo tanto se disuelve anódicamente; mientras que M_1^{+n} es un ión que se ve reducido, es decir, se descarga catódicamente. Teóricamente, los electrones son intercambiados mediante la conexión directa de los metales que están involucrados; por consiguiente, es imposible cuantificar la corriente de cementación. Por lo tanto, en este caso es posible medir los cambios en el potencial en la interfaz electrodo – solución (Lazo, 2011).

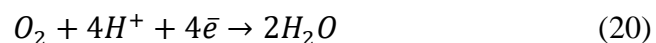
Para la elección del metal sólido que va a cementar al disuelto en la solución se observan los potenciales estándar de electrodos a condiciones normales, es decir, a 298 [K] y en disolución acuosa de 1 M (Tabla 3). En efecto, los metales más nobles, los que se encuentran en la parte superior de la figura poseen mayor capacidad de reducir a los menos nobles, esto

es, a los que se encuentran en la parte inferior de la figura. Asimismo, mientras la diferencia de potencial entre ambos metales sea mayor, el gradiente termodinámico que provoca la precipitación también será mayor.

La mayoría de las reacciones de los procesos de cementación son irreversibles. Experimentalmente, se ha demostrado que solo en los casos donde el potencial de la celda es menor a 0,3 [V] puede ocurrir la reacción en sentido contrario, es decir, de productos a reactantes (Jackson, 2010).

Es importante destacar que mientras el potencial de la celda en el que se realiza este proceso sea mayor, también lo será la posibilidad que, junto al metal que precipita, también lo hagan impurezas presentes en la solución. Es común, dado los potenciales de electrodo que poseen, que elementos como el hierro, estaño y el plomo precipiten junto con el metal de interés, como el cobre, aunque existe la posibilidad de que ocurran cementaciones selectivas, en donde es posible separar metales de otros.

El proceso de cementación puede ser considerado como un mecanismo de desgaste en el cual el metal menos noble se ve afectado debido a la reducción de los iones metálicos, los cuales son más nobles, que están presentes en la solución. Cuando se efectúa la inmersión del metal que actúa como precipitante, ocurren diferencias de potencial en la superficie de estos con los de los metales que se encuentran en la solución; esto genera que en donde se encuentren las áreas más negativas son las áreas que están más propensas a disolverse, es decir, actúan como ánodo; y por ende donde se encuentre el metal en estado sólido actuará como un área catódica. Es en el área catódica donde es probable que se encuentren reacción de reducción de hidrógeno (ecuación (20)) y reducción de oxígeno (ecuación (21)).



Se debe considerar que se debe rehuir la presencia de oxígeno en el procesamiento, ya que este genera una disminución en la eficiencia. Como se observa en la ecuación (20) donde está presente el oxígeno, este tiene un potencial de 1,23 [V] lo cual es considerado un potencial alto y provoca que ocurra con preferencia en ambientes reductores de otros metales en la solución.

Por otro lado, el pH de la solución, los valores de potencial de los metales, y el sobrepotencial del hidrógeno controla la ocurrencia de la ecuación (21); en el primer caso, la disminución de protones de la solución incurre en un gasto operacional mayor, dado que se genera una hidrólisis del metal que está presente en la solución y por tanto una menor precipitación de este.

Teniendo en cuenta todas las consideraciones mencionadas, se puede determinar que la transferencia de masa en el proceso de cementación se puede realizar de tres maneras distintas, al igual que la electroobtención:

1. Difusión, como resultante de un gradiente de concentración.
2. Migración, como producto de diferencia de potencial de la celda.
3. Convección

Es importante destacar que la convección no es de gran relevancia dentro de los primeros instantes de la cementación dado que el depósito en un inicio posee un grano muy fino lo cual provoca un proceso lento.

Para un buen resultado de este proceso se deben tener presentes variados factores que harán que la eficiencia sea adecuada, como la viscosidad de la solución, el flujo, la difusividad del metal más noble, el área superficial del metal que se inmersa, concentración inicial del metal de interés que precipita y la temperatura. De todas estas variables, una es fundamental para la cantidad de metal a precipitar: el área superficial disponible del metal

inmerso; dado que esta modifica las condiciones que se tienen para la transferencia de masa, además influye en la velocidad de cementación por el área disponible para que ocurra la reacción.

Como es posible observar en la Figura 6, el proceso de cementación se produce cuando se adhiere el metal de interés al metal inmerso y el proceso de precipitación es cuando este, por gravedad, baja al fondo del recipiente.

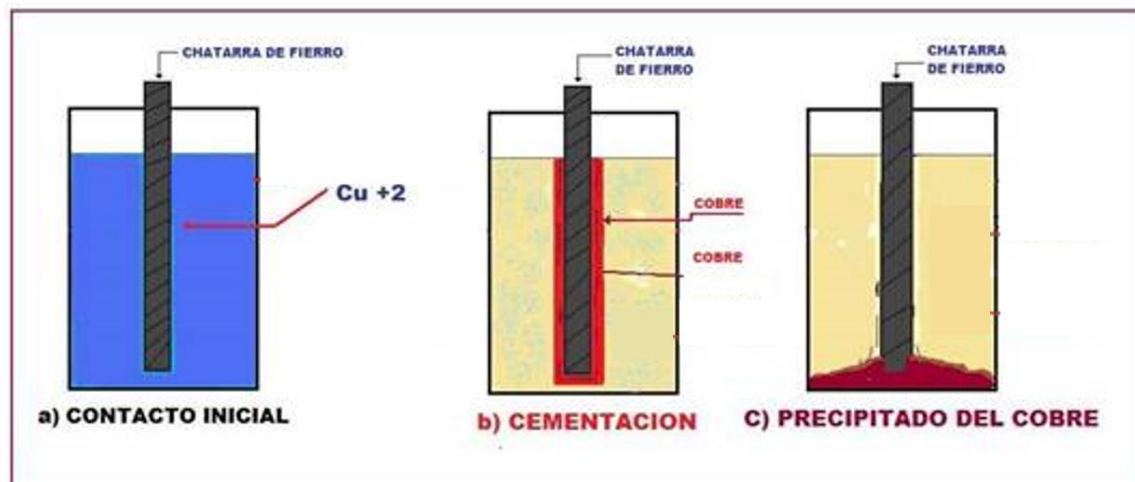


Figura 6: Cementación de cobre.

En cuanto al precipitado de cobre, este fenómeno sucede por gravedad y ocurre cuando los iones metálicos que están en solución realizan un intercambio de electrones de valencia, y por este efecto es que el metal es reducido y como su resultante es una partícula neutra que cae en la base del recipiente. Este precipitado corresponde a una recuperación entre el 80 y 90% de cobre desde la solución inicial.

La solución en la cual es sumergido el metal proviene de etapas de lixiviación; proceso que fue explicado con anterioridad. Sin embargo, dentro de la industria la innovación y la investigación es el pilar fundamental; por esta razón este estudio no busca

solo recuperar cobre desde un proceso convencional, sino recuperar este cobre desde un material dispuesto en un tranque de relaves, como lo es el relave de sal amoniacal.

2.7. FUNDAMENTO DEL TIPO DE PROCESAMIENTO

Se escogen como métodos de procesamiento la electroobtención y cementación de cobre. El primer método se escoge dado que existe un estudio hecho por Garrido, Fredes y Cifuentes en el 2019; en donde se realiza una electrodeposición de cobre por medio de un electrolito compuesto amoniacal. En este estudio los autores comparan la eficacia de la electroobtención mediante la electrodiálisis utilizando membranas de intercambio iónico y una electroobtención convencional.

Como resultado de este estudio, los autores concluyen que es posible depositar cobre desde una solución amoniacal en una celda de electroobtención convencional. Por lo tanto, es un indicio para que en este proyecto se pueda realizar este método de manera eficaz. Sin embargo, es importante mencionar que el material usado en el estudio de Garrido, Fredes y Cifuentes no es el mismo que en este proyecto, pero si contienen elementos en su interior que son similares, como en amoniaco.

Por otra parte, el proceso de cementación de cobre es escogido de acuerdo con un documento expuesto por Codelco el 2019 llamado obteniendo la máxima pureza, donde indica que La implementación de procesos de sedimentación requiere una inversión menor a la requerida para las plantas tradicionales de extracción por solventes y electroobtención. Es decir, que realizar esta metodología para la síntesis de cobre puede resultar más beneficioso que una electroobtención por su menor costo en el procesamiento.

2.8. SAL AMONIACAL COMO MINERAL

Este estudio se referirá al mineral artificial o comercialmente conocido como lecontite salmmoniac o sal amoniacal para términos prácticos.

Este mineral artificial, como se observa en la Figura 7, destaca por su llamativo color celeste. Sin embargo, hasta el día de hoy no existe literatura o estudios que indaguen sobre este.



Figura 7: Mineral artificial de sal amoniacal.

Este mineral artificial posee esa coloración debido a los iones de cobre presentes en él y representa la mayor parte de su matriz. También es importante destacar que en la mayoría de los casos está asociado a lecontita. En este estudio se detallan las características de su componente principal, como lo es la sal amoniacal y por lo que se puede decir que su fórmula química posee una aproximación a NH_4Cl . Ver Tabla 6.

Tabla 6: Características y propiedades de sal amoniacal.

Propiedades sal amoniacal	
Dureza (Escala de Mohs)	1-2
Tenacidad o cohesión	Séctil
Fractura	Concoide
Electricidad y magnetismo	S/I
Lustre	Vítreo
Color	Celeste
Transparencia	Translúcidos
Densidad [g/cm ³]	1,5
Raya	Blanca
Solubilidad	En agua

La estructura cristalina viene representada por la Figura 8 y se observan los átomos de amoniaco y cloruro. Sin embargo, esta estructura es de una sal amoniacal convencional, pero sin duda posee alguna relación con la que se está tratando en este estudio.

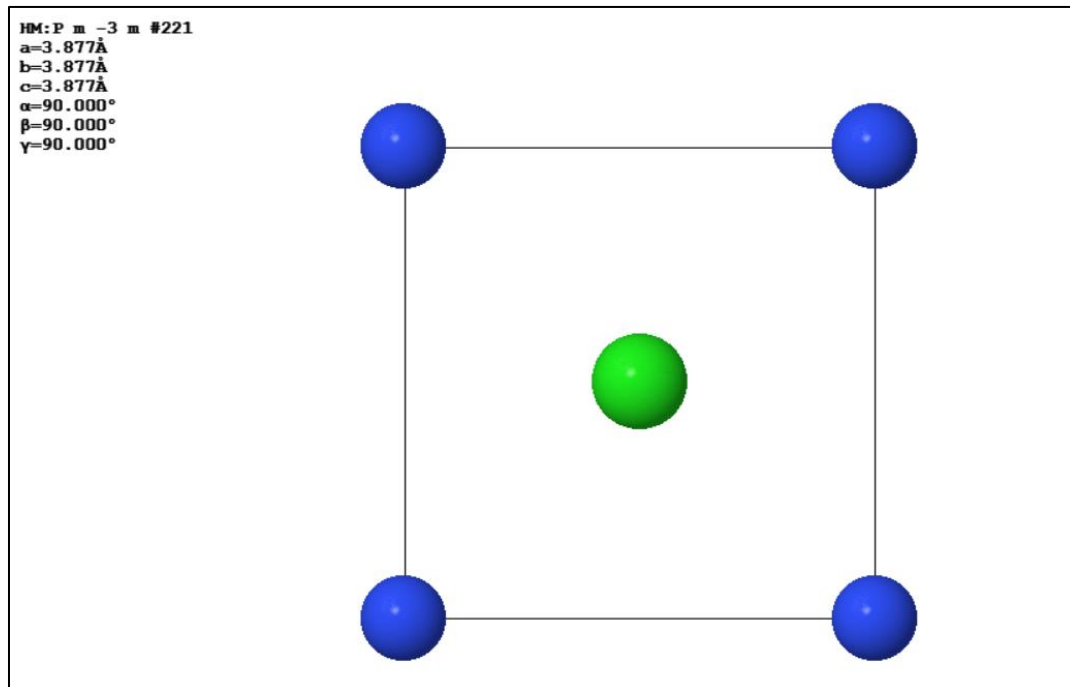


Figura 8: Estructura cristalina de sal amoniacal.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

Dentro de los análisis químicos y absorción atómica realizados con el equipo de medición Perkin pinnacle 900F flame y el software analítico Winlab 32 a este cloruro de amonio, conocido como sal amoniacal, se determinó que contiene diversas especies además de cobre; estos datos fueron medidos posterior a la dilución de la sal amoniacal en agua desmineralizada y se observan en la Tabla 7.

Tabla 7: Elementos encontrados en la solución de sal amoniacal.

Elementos encontrados en análisis químicos	
Cobre [g/L]	1,33
Zinc [g/L]	0,003

Hierro [g/L]	<0,001
Níquel [g/L]	<0,001

Cabe destacar que estos elementos encontrados posiblemente no sean los únicos existentes en la solución, dado las limitaciones del proyecto y del laboratorio; solo estos elementos pudieron ser medidos.

Asimismo, el origen de este mineral artificial data de la segunda región de Chile, región de Antofagasta. Este mineral está dispuesto en un depósito de relave ubicado en el sur de la ciudad a Antofagasta, a seis kilómetros de la costa. Este depósito es de propiedad de Minera Escondida Ltda; y se encuentra inactivo actualmente (Cochilco, 2010).

En las Figuras 9 y 10 se puede observar la disposición de todo este mineral artificial dentro del tranque de relave.



Figura 9: Tranque de relave Cerro Jarón.



Figura 10: Tranque de relave de Cerro Jarón. (Foto: Roberto Rojas)

Hoy en día, este tranque de relaves posee un área de 771 m^2 e inicialmente su capacidad superaba los 610 mil m^3 . Por lo que, si se consideran estos datos, se puede obtener $915 \text{ mil toneladas}$ de este mineral en este tranque.

Este mineral artificial tiene su origen en una lixiviación amoniacal que fue llevada a cabo durante los años 90, donde los contenidos de refino iban a este tranque como desechos. Lo anterior se debió a que esta lixiviación en medio amoniacal provocó un gran costo para la empresa productora, dado que el consumo de amoniaco para la lixiviación superó las expectativas y adicionando que el uso de amoniaco sobre los niveles permitidos compromete los permisos medioambientales, como también la salud de las poblaciones aledañas. Es importante destacar que su estado sólido es originado por la evaporación de aguas y la concentración de las sales en su interior.

3.1. PREPARACIÓN DE MUESTRAS

El mineral de sal amoniacal originalmente provenía de un volumen de 15x15x15 cm; por lo que fue procesado mediante una trituration con mortero manual para su disminución de tamaño de roca, llegando las partículas más finas a un tamaño entre 200 y 250 [μm], mientras que las más gruesas entre 0,5 a 1 [cm] como muestra la Figura 11.



Figura 11: Sal amoniacal chancada.

Posteriormente, se masaron 350 [g] de muestra para ser disueltos en 600 [ml] de agua desmineralizada (Figura 12).



Figura 12: Disolución de sal amoniacal en agua desmineralizada.

Esta preparación se sometió a agitación mecánica durante 3 horas para una rápida disolución. Cabe destacar que los valores de agua desmineralizada agregados al mineral para su disolución fueron experimentados en la primera disolución, encontrando así el punto de saturación de la muestra, teniendo así 1 [L] de solución por cada una de las muestras. Luego, estas fueron filtradas con una bomba de succión junto con un matraz; para quitar todo material en suspensión de la solución. Posteriormente, parte de estas muestras de solución amoniacal fue destinada al procesamiento por electroobtención y otra parte fue destinada al proceso de cementación de cobre. Las muestras destinadas a electroobtención fueron 20 y a cementación 10.

3.2. ELECTROOBTENCIÓN CON SOLUCIÓN DE SAL AMONICAL

Para que pueda ser llevado a cabo el proceso de electroobtención, cada muestra debía ser llevada a un proceso intermedio denominado extracción por solventes.

En este proceso se utiliza un vaso decantador de 250 [ml] como el de la Figura 13.

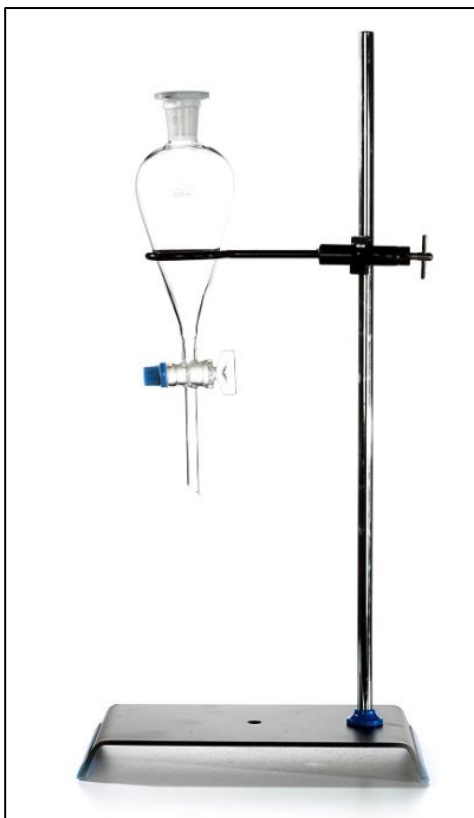


Figura 13: Vaso decantador en su montaje.

En el vaso decantador se introdujeron primero 100 [ml] de orgánico, compuesto por 20% extractante LIX984N y 80% por el diluyente ESCAID110; y luego se incorporaron 100 [ml] de solución de sal amoniacal. El orden en el que fueron agregados los reactivos permitió tener continuidad orgánica. Posteriormente, se realizó una agitación vigorosa de manera manual durante 5 [min]; para después esperar 2 [min] la separación de ambas fases.

En esta etapa se podía observar que el orgánico, que ya estaba cargado, obtenía una tonalidad más oscura de la que inicialmente tenía. Más adelante, cuando ambas fases se separaban, la que se encontraba en la parte superior era una especie de refino con baja concentración de cobre, esta era vaciada en un vaso precipitado y apartada del experimento. El orgánico cargado que estaba en el nivel superior del vaso decantador, pasaba a estar en el nivel inferior al ser descargado el refino; por lo que se procedía a añadir el electrolito pobre.

El electrolito pobre estaba compuesto de ácido sulfúrico con una pureza del 97,2% y en una proporción de 180 [g/L], este fue añadido al vaso decantador y se procedió a agitar vigorosamente durante 5 [min] más y posteriormente se dejó reposar por 2 [min] para separar las fases.

Finalmente, la solución que ocupaba la parte inferior del vaso decantador, el electrolito rico en cobre era vaciado en un vaso precipitado, mientras que el orgánico ya descargado de cobre era reutilizado para la siguiente extracción por solventes.

Como en cada extracción por solvente se utilizaban 100 [ml] de solución de sal amoniacal, cada muestra tenía que repetir este proceso 10 veces para completar 1 [L], lo cual era lo requerido para cada electroobtención; siendo 20 agitaciones de 5 [min] por cada una de las muestras.

Para el proceso de electroobtención, con el electrolito rico listo para procesar, se montó una celda con un cátodo y ánodo con las características dichas con anterioridad, se conectó a un calentador para subir la temperatura del electrolito y a una fuente de poder, además de la

Evaluación de rentabilidad de la recuperación de cobre por medio de procesamiento de relave de sal amoniacal

incorporación de un sistema de bombeo para que existiera un flujo y disponibilidad de cobre en la solución en todo momento, como se observa en la Figura 14.



Figura 14: Montaje electroobtención de cobre.

Se incorporó el electrolito rico y se encendió la fuente de poder. Durante este trabajo de laboratorio, se fueron variando las áreas a depositar del cátodo y por ende la densidad de corriente por razones que se explican en la sección de Resultados.

3.3. CEMENTACIÓN DE COBRE A PARTIR DE SOLUCIÓN DE SAL AMONICAL

En este proceso se utilizó la solución obtenida en la Sección 3.1 de preparación de muestras. Este mecanismo de procesamiento destaca por su simplicidad comparado al procesamiento que se realizaba en la electroobtención.

A los 1000 [ml] de muestra que se tenía, se añadió ácido sulfúrico en razón muestra/ácido 10:0,2 para agregar conductividad a la transferencia de masa. Este recipiente se depositó sobre un equipo de aumento de temperatura hasta llegar a temperaturas entre 50 y 60 [°C] y se agitó para obtener una solución homogénea. Finalmente, se introdujo el metal de hierro y se esperó dos horas la precipitación del cemento.

En este proceso de cementación se realizaron pruebas con viruta de hierro y con clavos de hierro sin revestimiento de zinc; con el objetivo de conocer cuál era el mejor objeto para precipitar el cobre. Esta información se puede conocer el Capítulo 4 de Resultados.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

4.1 RESULTADOS ELECTROOBTENCIÓN

1. Las primeras tres muestras de solución que fueron al proceso de electroobtención, obtuvieron como resultado una pasta de tonalidad morada; como se puede observar en la Figura 15. No se aprecia cobre en el cátodo, por lo que se asume que se mantuvo en la solución. Este resultado indica que hay un error de operación, es por esto por lo que se continuaron haciendo pruebas.

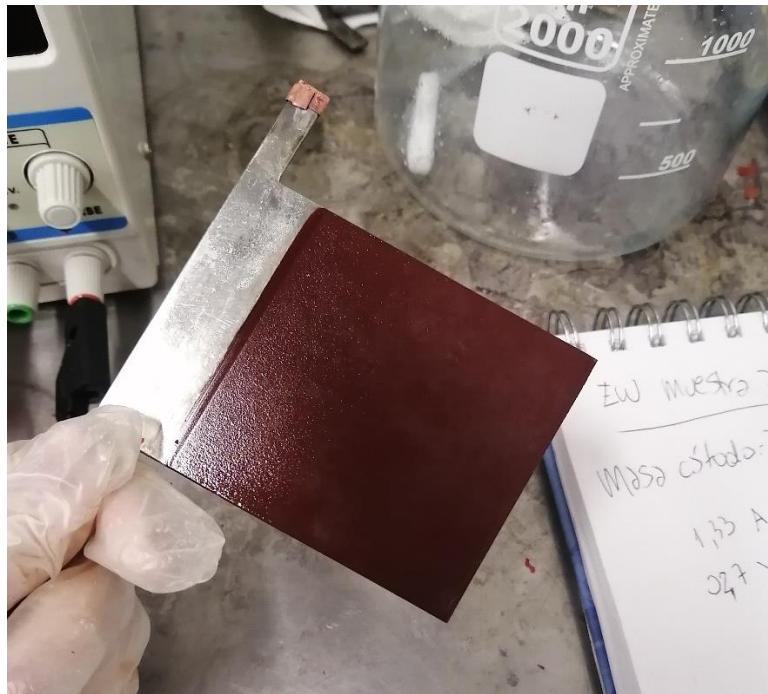


Figura 15: Resultado de electroobtención.

2. En las siguiente dos pruebas, fue modificada el área a depositar que poseía el cátodo. En un comienzo la barrera protectora que se utilizó para que el cobre no fuera depositado en las dos caras del cátodo fue un esmalte proveniente del laboratorio. Esta se dispuso en una cara del cátodo de dimensiones 6,5x4 cm. Este contaminó la solución, dado que no era un esmalte natural y de buena calidad. Por lo cual, con la

elevada temperatura se despegó en la solución, aunque cabe destacar que en este caso tampoco se observó una deposición en ninguna cara del cátodo, solo una fuerte corrosión del ánodo.

3. En las siguientes tres pruebas, se disminuyó aún más el área para la deposición de cobre en el cátodo, por tanto, se disminuyó la densidad de corriente y se cambió el esmalte. Sin embargo, la presencia de barro anódico contaminaba mucho la solución y el cobre no se estaba depositando en ninguna parte.
4. Por el resultado del punto tres, se realizaron dos pruebas más añadiendo aditivos como goma guar y sulfato de cobalto al electrolito. Como se observa en la Figura 16, la celda estaba mal diseñada; ya que existía un material que conducía electricidad a la bandeja inferior de la celda. Es por esta razón que se vio un depósito de cobre, pero en la bandeja y no en el cátodo.



Figura 16: Cobre depositado en bandeja.

5. A continuación, se realizaron cuatro pruebas más, pero esta vez se procedió a realizar la extracción por solventes con un orgánico nuevo, . dado que el inicial poseía cierta antigüedad, además de poder ser el causante de la contaminación de algún componente en el experimento. Lamentablemente, la pasta de tonalidad morada continuaba siendo la resultante de todos estos experimentos como se observa en la Figura 17.



Figura 17: Depósito de pasta en cátodo.

6. Por último, en las seis pruebas de electroobtención que se realizaron; fue imposible la recuperación de cobre como un cátodo de alta pureza. Estas nuevas pruebas se realizaron netamente para variar los parámetros operacionales, como densidad de

corriente, voltaje y velocidad de recirculación del electrolito. Además, se comprobó que el sistema estuviese funcionando correctamente con *tester* de conductividad y aislando las partes donde la celda conducía esta electricidad.

4.2 RESULTADOS CEMENTACIÓN DE COBRE

1. Para el comienzo del proceso de cementación, se hicieron cuatro pruebas:

- Un litro de solución de sal amoniacal en proporción de 10:0,2 con ácido sulfúrico y como metal inmerso viruta de hierro.
- Un litro de solución de sal amoniacal y como metal inmerso viruta de hierro.
- Un litro de solución de sal amoniacal y como metal inmerso clavos sin recubrimientos de zinc.
- Un litro de solución de sal amoniacal en proporción 10:0,2 con ácido sulfúrico y como metal inmerso clavos sin recubrimiento de zinc.

Estas cuatro pruebas se realizaron con el objetivo de conocer cuál era el mejor método de procesamiento. El primer punto fue descartado dado que en el proceso de extraer el cobre atrapado y cementado en la viruta se perdía mucho contenido en los filtros, ya que la viruta quedaba mojada luego de ser extraída y tenía que pasar por un proceso de filtrado, donde la mayor parte del cemento quedaba atrapado en el filtro y era imposible medir con exactitud esa proporción por la gran cantidad de partículas finas.

El segundo punto fue descartado, ya que la solución al no ser lo suficientemente ácida; con la presencia del hierro empezaron a precipitar innumerables impurezas además de cobre, que contaminaron toda la solución.

En el tercer punto, después de dos horas de realizar el proceso, la recuperación que se obtenía era muy baja para toda la presencia de cobre dentro de la solución y es por esta razón que se opta por realizar todo el procesamiento posterior con el cuarto punto, siendo este el método de mayor eficacia dentro del estudio. A continuación, en la Figura 18 se puede verificar el cemento de cobre alrededor de la superficie de los clavos de hierro.



Figura 18: Cobre cementado en clavos de hierro.

Las seis pruebas finales se realizaron con distintos tiempos de 105, 120 y 135 [min] respectivamente y con este mecanismo arrojaron recuperaciones que pueden ser estudiadas dentro de la Figura 19.

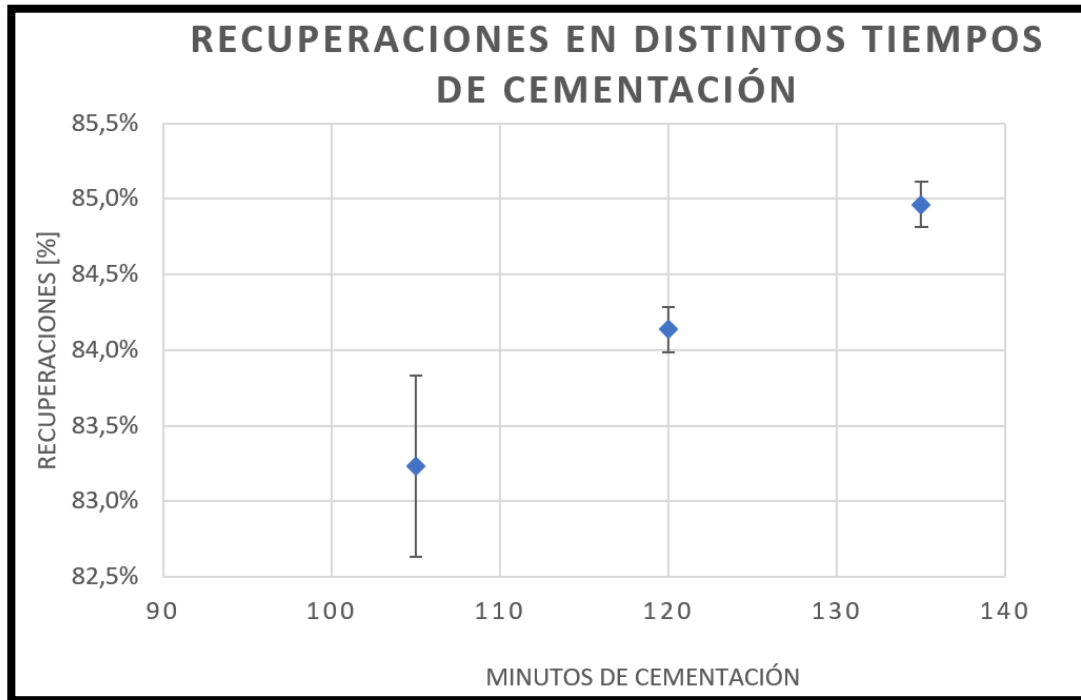


Figura 19: Cobre recuperado del proceso de cementación.

A partir de estos datos, es posible determinar los porcentajes de recuperación que se tiene en cada caso (ver Tabla 8).

Tabla 8: Recuperaciones de cobre en cementación.

Recuperaciones [%]		[g]
Muestra 1	83,8	1,115
Muestra 2	82,6	1,099
Muestra 3	83,9	1,117
Muestra 4	84,3	1,121

Muestra 5	84,8	1,128
Muestra 6	85,1	1,132

Las recuperaciones superan el 80%, lo que indica un gran porcentaje del cobre en solución fue cementado por este método, transformándolo en un metal neutro que se transforma en estado sólido, mientras la solución pasa a ser un óxido de hierro y este cambia de color por este intercambio iónico.

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS

5.1 ANÁLISIS ELECTROOBTENCIÓN

En este estudio, al poseer limitaciones financieras, no fue posible encontrar por medio de análisis químicos el causante de la recuperación de esta pasta color morada. Sin embargo, por su coloración es probable que, en el proceso de extracción por solventes, un elemento tuviera propiedades semejantes a las del cobre y por eso en este proceso el orgánico cargado retuvo este elemento en su interior. Además, es probable que la corriente que se le suministraba a la celda produjera potenciales que hayan sido más compatibles de forma electroquímica, es decir, en su potencial y que se viera beneficiado por el área que tenía a disposición para depositarse a este elemento que al cobre por lo que se depositó en el cátodo, impidiendo que el cobre se posara en él.

Adicionalmente, se descubrió que las celdas impresas en impresoras 3D con filamentos pueden conducir la electricidad. Se desconoce el material exacto que se utiliza para ese tipo de impresiones dentro de las instalaciones de la universidad; sin

embargo, este material es conductor de electricidad, dado que transmitía corriente eléctrica a la bandeja que se encontraba por debajo de la celda de Electroobtención, ocasionando una deposición de una lámina de cobre sobre la bandeja. Es probable que se haya depositado en la bandeja debido a que posee mayor área disponible que el cátodo. Además, como el electrolito estaba siendo bombeado para que siempre existieran iones de cobre disponibles en la solución y en la cara del cátodo; se estaba produciendo un circuito eléctrico transmitido por el electrolito, donde la corriente estaba siendo continua entre la celda de electroobtención, la bandeja, la bomba de recirculación, para luego regresar a la celda. La deposición en la bandeja puede ser atribuida al flujo constante que transmitía la corriente eléctrica; por lo que se optó por interrumpir este flujo en el rebalse de la celda de electroobtención. para dar seguridad que no ocurra esta deposición en bandeja nuevamente, aumentando la distancia entre la celda y la bandeja de la parte superior; además de agregar cinta aislante en todos los contactos de estas dos.

Es importante mencionar que las impurezas que se notaron en este proceso, es posiblemente la formación de permanganato dentro de la solución. Esto ocurre debido a la presencia de Mn^{+2} en la solución, este da paso a la formación de Mn^{+3} ya que ocurre una oxidación electrolítica en el ion Mn^{+2} . Posterior a esto, adicionalmente se forman compuestos amorfos de manganeso ($MnOOH$), lo que permite la formación de permanganato y este a su vez el dióxido de manganeso que ocasiona, además, la corrosión en el ánodo.

Algunas maneras de evitar que esto ocurra, es la presencia de iones de Fe^{+2} . Sin embargo, se contrapone a la lixiviación amoniacal de este proyecto dado que esta

lixiviación provoca que no exista hierro en la solución. Por estos motivos se atribuye la formación de esta impureza de tinción violeta.

5.2. ANÁLISIS CEMENTACIÓN DE COBRE

El cobre obtenido en el proceso de cementación está dentro del rango de recuperaciones conocidas dentro de la industria. Es importante considerar que se escoge el hierro como metal reductor dado que posee un potencial de oxidación mayor que el cobre y tiene un bajo costo. Además, la adición de ácido sulfúrico ayuda a trabajar un medio ácido, para así evitar la hidrólisis del catión Cu^{+2} . Teniendo en cuenta estas consideraciones, se atribuyen las buenas recuperaciones de cobre obtenidas al buen manejo práctico del proceso. Con estos valores es posible obtener un análisis económico de procesamiento a gran escala.

5.3. RENTABILIDAD ECONÓMICA

Debido a que el tranque de relave en donde se encuentra este mineral artificial está en medio de cerros y dunas en el norte de Chile y debe ser procesado en una planta de procesamientos; es que se plantean dos situaciones y a cada una se le calcula un valor final de costos e ingresos.

5.3.1. CASO UNO

El primer caso es la instalación de una planta de procesos en el lugar desértico en donde se encuentra el tranque. Una característica beneficiosa de este caso; es que no se implementan gastos de transporte, solo la disponibilidad de un cargador frontal

para mover el material. El desglose de los costos que involucraría la instalación de una planta es el siguiente (Rojas, F. 2019):

- Para obtener un cementador de cobre en una planta es necesario su construcción de acuerdo con las capacidades de producción. En un comienzo se debe tener un costo de los componentes que incluyen la construcción de un cementador como lo son (Tabla 9)

Tabla 9: Principales componentes para la construcción de un cementador.

Componente	Total
Estanque fibra de vidrio	\$20.283.940
Plataforma	\$5.695.201

- Considerando que este cementador, con capacidad de 33 [m³], debe poseer un tipo de recubrimiento externo para mayor seguridad y para que opere de la manera óptima, es que se tienen los siguientes costos a considerar (Tabla 10).

Tabla 10: Componentes revestimiento externo.

Componente	Total
Polietileno de alta densidad (HDPE) para coraza manto	\$133.714
Soldadura HDPE para manto	\$21.500
Polietileno de alta densidad para coraza tapa	\$35.143
Soldadura HPDE para tapa	\$4.300

- Adicionalmente, es necesario realizar un recubrimiento interno. Esto dado que, al tenerlo, alarga considerablemente la vida útil del estanque; dado que el recubrimiento absorbe la mayor parte del daño mecánico al ser introducida la chatarra de hierro en él (Tabla 11).

Tabla 11: Componentes revestimiento interno.

Componente	Total
Coraza manto	\$1.262.171
Coraza Tapa	\$9.933.714
Pernos de recubrimientos	\$1.190.400

- Se debe tener en consideración que el proceso de cementación genera gases tóxicos, por lo cual es necesario incluir un sistema de extracción de gases. Dentro de las ventajas que posee este sistema, se tiene que minimizar la exposición a gases nocivos y disminuye una posible explosión (Tabla 12).

Tabla 12: Equipo para extracciones de gases.

Componente	Total
Ventilador	\$3.200.000
Descarga	\$50.000
Filtro de neblina	\$500.000
Cañerías HDPE	\$170.000
Estructura	\$624.000

- Además, para recuperar el cobre que se cementa en este proceso, debe instalarse un sistema de descarga, llamado chute de descarga, que reciba la solución sin iones de cobre que queda como resultado de la cementación y el cobre cementado (Tabla 13).

Tabla 13: Componentes de descarga.

Componentes	Total
Estructura chute	\$304.000
Chute	\$500.000

- Adicionalmente, considerando equipos de montaje de la estructura (Tabla 14).

Tabla 14: Componentes adicionales.

Componentes	Total
Carga de chatarra de hierro	\$753.000
Sistema de carga	\$989.900
Recipiente	\$1.900.000
Equipo de filtrado	\$3.500.000

- Por último, para poder instalar esta planta de cementación se necesita mano de obra, que por medio de referencias (Rojas, F. 20) se estima que será de siete meses lo que tardará la planta en ser construida. Esto se desglosa en la Tabla 15.

Tabla 15: Mano de obra.

Cargo	Sueldo	Tiempo [meses]	Cantidad trabajadores	Total c/u
-------	--------	----------------	-----------------------	-----------

Jefe de proyecto	\$2.000.000	7	10	\$14.000.000
Soldador acero	\$800.000	7	10	\$5.600.000
Soldador HDPE	\$700.000	7	10	\$4.900.000
Proyectista	\$800.000	6	10	\$4.800.000
Ayudante	\$500.000	7	20	\$3.500.000
Operador	\$700.000	7	20	\$4.900.000

Por lo tanto, generar una planta de procesamiento al lado de la locación donde se encuentra el depósito de sal amoniacal tiene un costo de \$97.150.983 CLP o 107,3 mil USD por cementador. Para los cálculos se consideraron diez de estos, dado que si se realiza con un solo cementador el procesamiento tardaría sobre los 230 años considerando una cementación diaria; por esta razón los cálculos se basan en 10 cementadores con una cementación al día, disminuyendo el tiempo a 23 años.

Además, considerando que desalar agua para el proceso posee un costo de 0,6 [US\$/m³] (BCN, 2017), un precio de cemento de cobre de 3,04 [US\$/lb] considerando los datos de Enami 2022 y se utiliza una tonelada de chatarra por cada cementación. El valor absoluto neto usando la ecuación (22) es de -11,2 millones dólares.

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+i)^t} - I_0 \quad (22)$$

Siendo:

F_t = Flujo de ingresos menos egresos

i = tasa de descuento

t = período

I_0 = inversión inicial

Este valor de VAN representa los costos de la creación de la planta (incluyendo mano de obra), hierro usado por cada cementación, ácido sulfúrico y agua, incluye los costos mensuales de mano de obra para operar y energía necesaria.

Los costos son representados por capex y opex de acuerdo con la Tabla 16. Cabe destacar que en capex se añaden todos los equipos anteriormente mencionados adicionando seis estanques de disolución y una planta de filtración. El opex, la mano de obra, consumo de agua total, ácido sulfúrico total y chatarra de hierro para todo el proceso.

Tabla 16: Capex y opex para caso uno.

CAPEX [US\$]	10.610.899
OPEX [US\$]	18.384.422

Por lo tanto, este sistema de procesamiento no cumple con una utilidad positiva. No se recupera la inversión en ningún momento; por ende, no es rentable procesarlo.

5.3.2. CASO DOS

En este caso se considera el traslado del material directo a una faena que tenga procesamiento por cementación, es decir, la planta ya realizada. Sin embargo, hay que destacar que los caminos que posee Antofagasta desde el relave hasta la faena más cerca no están adaptados para el tránsito de camiones mineros. Por lo que lo primero que hay que considerar es la compra de un camión tolva.

- La compra de este camión tolva de capacidad 32 [t] requiere una inversión de 122.570 dólares.
- La planta más cercana corresponde a una faena ubicada a 200 [km], por lo tanto, se necesita el traslado de material hacia esas dependencias.
- Además, hay que considerar que el consumo del camión de 2,5 [km/L] y el precio del petróleo ronda 1 [US\$/L]. Por ende, se requiere 160 dólares en ir y volver de la planta al relave.

De acuerdo con la ecuación (22), el valor absoluto neto en este caso es de -1,2 millones de dólares. Este valor representa los costos asociados a la compra del camión, gasto en gasolina para el traslado a la planta, consumo de agua, ácido y hierro. Como también a los ingresos por la venta del cemento de cobre.

Para este caso, el capex y opex vienen dados por la Tabla 17:

Tabla 17: Capex y opex para caso dos.

CAPEX [US\$]	122.570
OPEX [US\$]	22.450.030

En este caso número dos, el proyecto está imposibilitado de realizarse por la utilidad negativa que presenta. Netamente con los costos que presenta en traslado e insumos, el proyecto queda totalmente fuera de rentabilidad.

CAPITULO 6. CONCLUSIONES

En este estudio se evaluó si es rentable económicamente procesar el relave de sal amoniacal y a su vez si este es procesable por electroobtención y/o cementación. Los principales hallazgos en esta investigación fueron:

- Se descarta la hipótesis planteada, dado que en ningún caso es rentable procesar este mineral.
- Fue posible caracterizar el mineral, dentro de las limitaciones del proyecto, tanto como sus propiedades geológicas y los elementos químicos presentes en él.
- La muestra de relave de sal amoniacal es altamente soluble en agua, por lo que bastaban 600 [ml] para disolver 350 [g] de muestra.
- El proceso en que fue posible la recuperación de cobre fue el proceso de cementación.
- Para el proceso de electroobtención es necesario realizar un barrido de elementos, dado que el motivo por el cual no funcionó este proceso se atribuye a las impurezas presentes en el sistema.
- Además, es importante considerar que algunos casos fueron negativos dado la celda de electroobtención que se utilizaba, es por esto por lo que también se atribuye el

resultado de estos experimentos a los instrumentos y herramientas usados: es probable que la celda no haya sido la óptima para este tipo de proceso.

- Las limitaciones del proyecto obstaculizaron las pruebas de electroobtención, impidiendo buscar soluciones en el laboratorio al proceso.
- El proceso de cementación al no utilizar ácido sulfúrico también cementaba impurezas, esto se atribuye a que este ácido le genera una mayor conductividad al cobre para su deposición, no así a los demás elementos.
- En el proceso de cementación, a la temperatura y pH trabajados solo ocasionaba la cementación de cobre y no de otros elementos, lo que facilitó el proceso.
- Las recuperaciones en el proceso de cementación varían entre un 80 y 90%. Por lo que este proceso a escala de laboratorio para esta investigación cumple a cabalidad con lo establecido.
- El caso número uno de la rentabilidad de este estudio, no da una buena oportunidad de procesar el mineral. Dado que la instalación de una planta de procesamiento y su operación no genera ganancia, solo pérdidas, y por ende no existe recuperación de inversión.

- El caso dos presenta una ventaja en cuanto a que la planta ya se encuentra instalada. Sin embargo, en el ámbito económico no genera ingresos, todo lo contrario.

CAPITULO 7. RECOMENDACIONES

- Para futuros trabajos se recomienda realizar un análisis químico de todas las especies que componen este relave de sal amoniacal.
- Adicionalmente, es recomendable realizar un análisis químico al cemento de cobre para verificar si solo se cementa cobre o existe la presencia de alguna impureza.
- Dado que no existen mayores estudios respecto a este mineral artificial, se recomienda realizar un análisis de difracción de Rayos X para conocer a fondo este tipo de material.
- Si se encuentran impurezas en la solución, realizar un barrido de estas para una eventual electroobtención exitosa.
- En el caso que se realice una electroobtención, asegurarse de que la celda a utilizar sea de un material que no conduzca la corriente eléctrica.

- Se podría analizar con detalle la incidencia de la agitación en el proceso de cementación para este tipo de material. Además de conocer la incidencia de las distintas temperaturas en el mencionado proceso de cementación.
- Para trabajos futuros se puede plantear la creación de una planta de separación de aguas con ácido sulfúrico para minimizar gastos de ese tipo, una recirculación de agua y la reutilización de la chatarra.

CAPÍTULO 8. REFERENCIAS

1. Alguacil, F., García J., Magne, L., Gómez A., Navarro P., Dorado, M., Simpson, J., y Enríquez J. (2004) Procedimiento para la recuperación de cobre mediante lixiviación de materiales metálicos oxidados con disoluciones de carbonato de amonio.
2. Allende, S. (2017) Efecto del ión ferroso en la estructura cristalina de depósitos de cobre desde soluciones de electroobtención.
3. Arzutug M. E, Kocakerim M. M. (2004) Leaching of malachite ore in NH₃- saturated water. Industrial & Engineering Chemistry Research.
4. Atlas Copco, (2017). “Catálogo de equipos ligeros para minería”.
5. Barría, C. (2021) Como el enorme aumento del precio del cobre encendió el debate en Chile sobre el aporte de las mineras privadas a las arcas públicas.
6. Biblioteca del congreso nacional de Chile (2017). Análisis económicos asociados a la desalinización del agua en la minería.
7. Bryden, (1975) Estudio de cinética de lixiviación de la crisocola en soluciones de amonio/carbonato.
8. Castañeda, A., Eduardo, C. (2006) Cementación de cobre.
9. Cuno, C., Yarred E. (2017) Lixiviación de minerales mixtos de cobre de U.M tacaza ciensa con agentes clorurantes en medio ácido.
10. Cáceres, G. (2016) Hidrometalurgia avanzada.
11. Carmona (2014) Una visión termodinámica del agotamiento de los recursos naturales.
12. Chan, Liu. (1998) Viabilidad de una lixiviación de cobre usando soluciones de amoniaco.

13. Cifuentes, L. (2002) Electro obtención de cobre. En: Conceptos de electro refinación y electroobtención de cobre.
14. Cochilco. (2020) Mercado Chileno del ácido sulfúrico al año 2029.
15. Cochilco. (2022) Sulfuros primarios: desafíos y oportunidades.
16. Codelco. (2022) El cobre y la buena salud.
17. Codelco. (2022) Electroobtención: Obteniendo la máxima pureza.
18. Domic M., Esteban M. (2001) Hidrometalurgia fundamentos, procedimientos y aplicaciones.
19. Dondo, M., Converte, L. (2021) El sector minero en Chile: Análisis comparativo con países mineros de América Latina.
20. E. Domic Mihovilovic, Hidrometalúrgia: Fundamentos, Procesos y Aplicaciones, Santiago: Consejo Minero de Chile, 2001.
21. Enami. (2022) Tarifas de compra.
22. E-rocks. (2018) Actualización sobre hallazgo chileno blues.
23. F. Pamplona, «Memoria de Magister en Ciencias-Química: Difusividad de gases en soluciones acuosas de sales de amonio cuaternario,» Universidad Nacional de Colombia, 2004.
24. Fredes, S. (2015) Diseño de mejores prácticas operacionales en el procesamiento de concentrado de molibdeno para minera los pelambres.
25. Government of Canada (2011) Manual informativo sobre minería en Chile.
26. Groth (1906) Como cloruro de amonio.
27. Gutiérrez, B. (2018) Control de la concentración de cloruro en electrolito de electroobtención mediante el uso de celda de sacrificio.

28. Hernández, P. (2013) Estudio del equilibrio sólido-líquido de sistemas acuosos de minerales de cobre con agua de mar aplicados a procesos de lixiviación.
29. Jackson, E. (2010) Hydrometallurgical extraction and reclamation.
30. Lazo, A. (2011) Estudio de la cementación de molibdeno sobre cinc en soluciones acuosas de hidróxido de amonio. Tesis para optar al grado de doctor en ciencias de la ingeniería mención química.
31. Lovera, D., Arias, V.(et al.) Kinetics of the reaction of hardening of copper minerals from complex sulphur of Marañon complex.
32. Manual general de minería y metalurgia. (2021).
33. Minería Chilena. (2022) Exportación de cobre concentrado: Reporte detalla participación chilena en mercado y su proyección.
34. Ntuli et al. (2011) Efectos de la concentración de amoniaco y el tiempo de lixiviación.
35. Paul, Ferron. (1983) Estudio de la cinética de lixiviación de malaquita en solución de carbonato de amonio.
36. Rojas, F. (2019) Diseño y cálculo de un sistema motriz para un reactor rotativo para la cementación de cobre en el conjunto de una valorización del sistema.
37. Roldan, F., Urbina J. (2015) Lixiviación amoniacal del mineral de cobre de tipo crisocola utilizando nitrato de amonio.
38. Sernageomin. (2021) Anuario de la minería de Chile.
39. Sernageomin. (2010) Catastro de depósitos de relaves activos y no activos.
40. U. d. Valencia. Fenómenos de Transporte y Conductividad Electrolítica.
Disponible: https://www.uv.es/tunon/QFIII/tema_4.pdf.

41. Urbina, C. (2008) Evaluación catódica de aditivos tensoactivos en el proceso de electroobtención de cobre.
42. Vainshtein BK (1956) Refinamiento de la estructura del grupo NH_4 en la estructura del cloruro de amonio.
43. Vargas C. (2006) Curso De Capacitación Operación de plantas de Electroobtención.
44. Yartasi, Copur. (1996) Disolución de la malaquita en cloruro de amonio.
45. Zenteno, C. (2016) Electroobtención de cobre empleando el método electro dialítico reactivo.

ANEXOS

- La manera en que se calcula la rentabilidad económica comienza obteniendo la ganancia neta por cemento de cobre de la siguiente manera:

Tabla A.1: Datos para obtener el valor de ganancia.

Precio cemento de cobre [US\$/lb]	3,04
Cobre recuperado laboratorio [g]	1,13
Tasa máxima de recuperación [%]	85,11
Cobre recuperado total depósito [t]	2.959

- Considerando estos valores se puede determinar que la ganancia neta por venta de cemento de cobre sería de 19.815.408 dólares.
- Para determinar cuánta agua se utiliza se necesita considerar el agua total necesaria para procesar el depósito:

Tabla A.2: Costo de agua para procesar todo el depósito.

Agua para 350 g de sal amoniacal [ml]	600
Agua total requerida [m ³]	1.568.571
Precio desalinizar agua [US\$/ m ³]	0,6
Costo agua [US\$]	941.143

- Para determinar el costo del ácido sulfúrico se debe tener en consideración los siguientes datos:

Tabla A.3: Costos de ácido sulfúrico para procesar todo el depósito.

Ácido ocupado en 350 [g] de sal amoniacal [ml]	20
Precio del ácido sulfúrico [US\$/t]	65
Ácido para procesar depósito [m ³]	52.286
Densidad ácido sulfúrico [t/ m ³]	1,83
Costo ácido total [US\$]	6.219.386

- Los datos utilizados para conocer el costo de la chatarra se basan en:

Tabla A.4: Costo de chatarra de hierro para procesar todo el depósito.

Precio hierro [kg]	0,133
Precio hierro [t]	133
Toneladas necesarias para cementar todo el depósito [t]	80.805
Costo chatarra de hierro [US\$]	10.714.501

- Para el caso uno es necesario implementar tambores para disolución, se consideraron 6 para cada cementador y de capacidad 5 mil litros.

Tabla A.5: Costo asociado a tambores de disolución.

Precio tambor [US\$]	780
Cantidad de tambores	60
Costo por adquisición de tambores [US\$]	46.800

- Adicionalmente, se considera un equipo de filtración que posee un costo desde 10 millones de dólares.
- En el caso de la maquinaria necesaria, como se menciona anteriormente, se calcula para 10 cementadores y usando mano de obra para cada uno de ellos de manera simultánea. Estos costos corresponden a 1.072.292 dólares.
- Si se procesara, se necesitarían 23 años para terminar de consumir todo el mineral.
- En el caso número dos, lo distinto que se debe tener en consideración es el costo de transportar el material hasta la faena más cercana, lo cual el camión gastaría 4.575.000 dólares.