



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA EN METALURGIA

**AUMENTO DE LEY DE CONCENTRADO DE MOLIBDENITA MEDIANTE
REMOCIÓN DE IMPUREZAS VÍA LIXIVIACIÓN E INCORPORACIÓN DE
SALMUERAS DE DESCARTE DE DESALADORAS COMO FUENTE
ALTERNATIVA DE AGUA**

Trabajo de titulación presentado en conformidad a los requisitos para obtener
el título de Ingeniera Civil en Metalurgia

Profesora guía: Dra. Rossana Sepúlveda Rivera

Katiuska Andrea Caravante Orrego

Copiapó, Chile 2024



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA EN METALURGIA

**AUMENTO DE LEY DE CONCENTRADO DE MOLIBDENITA MEDIANTE
REMOCIÓN DE IMPUREZAS VÍA LIXIVIACIÓN E INCORPORACIÓN DE
SALMUERAS DE DESCARTE DE DESALADORAS COMO FUENTE
ALTERNATIVA DE AGUA**

Trabajo de titulación presentado en conformidad a los requisitos para obtener
el título de Ingeniera Civil en Metalurgia

Profesora guía: Dra. Rossana Sepúlveda Rivera

Comisión: Dra. Rossana Sepúlveda Rivera

Dr. Jonathan Castillo Segura

Mg. Juan Chamorro González

Katiuska Andrea Caravante Orrego

Copiapó, Chile 2024

**AUMENTO DE LEY DE CONCENTRADO DE MOLIBDENITA
MEDIANTE REMOCIÓN DE IMPUREZAS VÍA LIXIVIACIÓN E
INCORPORACIÓN DE SALMUERAS DE DESCARTE DE
DESALADORAS COMO FUENTE ALTERNATIVA DE AGUA**

Este documento de Trabajo de Titulación fue aprobado por:

| Nombre de la comisión | Calificación | Firma |
|---|---------------------|--------------|
| Dra. Rossana Sepúlveda Rivera Departamento de Ingeniería en Metalurgia Universidad de Atacama Copiapó-Chile | 6.0 | |
| Dr. Jonathan Castillo Segura Departamento de Ingeniería en Metalurgia Universidad de Atacama Copiapó-Chile | 5.4 | |
| Mg. Juan Chamorro González Departamento de Ingeniería en Metalurgia Universidad de Atacama Copiapó-Chile | 5.8 | |

Mg. Juan Chamorro González

Director Departamento de Ingeniería en Metalurgia

Contenido

| | |
|--|----|
| CAPÍTULO I Marco introductorio. | 8 |
| 1.1. Introducción | 8 |
| 1.2. Objetivos | 8 |
| 1.2.1. Objetivo general | 8 |
| 1.2.2. Objetivos específicos..... | 8 |
| 1.3. Hipótesis..... | 9 |
| 1.4. Planteamiento del problema..... | 9 |
| 1.5. Justificación..... | 9 |
| 1.6. Limitaciones..... | 9 |
| CAPÍTULO II Marco Teórico. | 10 |
| 2.1 Molibdeno | 10 |
| 2.1.2 Mineralogía y geología | 10 |
| 2.1.3 Molibdenita | 11 |
| 2.1.4 Explotación de la molibdenita..... | 11 |
| 2.1.5 Uso del molibdeno | 11 |
| 2.1.6 Consumo mundial | 12 |
| 2.1.7 Oferta mundial | 13 |
| 2.1.8 Producción Chilena. | 14 |
| 2.1.9 Precio del molibdeno..... | 15 |
| 2.2 Proceso convencional de obtención del molibdeno..... | 16 |
| 2.3 Concentrado de molibdenita..... | 18 |
| 2.4 Hidrometalurgia..... | 19 |
| 2.4.1 Etapas principales de la hidrometalurgia | 20 |
| 2.4.2 Ventajas y desventajas de la hidrometalurgia | 21 |
| 2.5 Lixiviación..... | 22 |

| | |
|---|----|
| 2.5.1 Aspecto termodinámico | 23 |
| 2.5.2 Aspectos cinéticos | 24 |
| 2.6 Modelos cinéticos | 25 |
| 2.7 Lixiviación de molibdenita | 27 |
| 2.8 Agua de mar, desalinización. | 29 |
| 2.8.1 Desalinización del agua de mar..... | 29 |
| 2.8.2 Salmuera..... | 32 |
| CAPÍTULO III Metodología..... | 33 |
| 3.1 Materiales y accesorios | 33 |
| 3.1.1 Concentrado de molibdenita | 33 |
| 3.1.2 Reactivos utilizados | 33 |
| 3.1.3 Equipos y accesorios | 33 |
| 3.2 Procedimiento experimental..... | 34 |
| 3.2.1 Preparación del material..... | 34 |
| 3.2.2 Caracterización del concentrado de molibdenita inicial | 34 |
| 3.2.3 Lixiviación del mineral. | 35 |
| 3.2.4 Preparación de solución lixivante | 37 |
| 3.2.5 Lixiviación por agitación | 37 |
| 3.2.6 Preparación de muestras para análisis..... | 39 |
| 3.3 Caracterización del mineral inicial sin previo tratamiento..... | 40 |
| 3.3.1 Análisis químico del mineral inicial sin previo tratamiento | 40 |
| 3.3.2 Análisis mineralógico..... | 41 |
| 3.4 Caracterización de la salmuera..... | 45 |
| CAPITULO IV Resultado y discusión..... | 46 |
| 4.1 Caracterización inicial del mineral sin previo tratamiento de lixiviación por ICP | 46 |

| | |
|--|----|
| 4.2 Composición inicial de concentrado y condiciones del proceso | 46 |
| 4.3 Caracterización del mineral después de la lixiviación con salmuera de descarte como fuente alternativa de agua..... | 47 |
| 4.4 Evaluación de la consistencia del proceso de lixiviación..... | 48 |
| 4.5 Aumento de la ley de Mo y composición final del concentrado | 49 |
| 4.6 Comparación entre la molibdenita (MoS_2), pirita (FeS_2) y calcopirita (CuFeS_2) antes y después del proceso de lixiviación | 51 |
| 4.7 Influencia de la salmuera en la lixiviación | 53 |
| CAPITULO V Conclusión..... | 55 |
| CAPITULO VI Futuras investigaciones | 57 |
| Referencias | 59 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|-----------|
| Figura 1 Molibdeno..... | 10 |
| Figura 2 Demanda del molibdeno al año 2022 | 12 |
| Figura 3 Principales países productores de molibdeno año 2022 | 13 |
| Figura 4 Variación en el consumo de molibdeno de los principales países consumidores de Mo (%) | 14 |
| Figura 5 Producción Chilena de molibdeno. | 15 |
| Figura 6 Esquema del proceso convencional de la molibdenita. | 17 |
| Figura 7 Diagrama de Pourbaix para el sistema Mo-S-H₂O a 25°C | 24 |
| Figura 8 Esquema del modelo de la conversión progresiva. | 26 |
| Figura 9 Esquema del modelo del núcleo sin reaccionar..... | 26 |
| Figura 10 Esquema de planta desalinizadora..... | 31 |
| Figura 11 Concentrado de molibdeno..... | 33 |
| Figura 12 Lixiviación por agitación..... | 38 |
| Figura 13 Filtrado del mineral..... | 39 |
| Figura 14 Muestras de PLS para analizar..... | 40 |
| Figura 15 Micrografía SEM del concentrado de molibdenita | 42 |
| Figura 16 Mapas elementales obtenidos mediante EDS del concentrado de molibdenita | 43 |
| Figura 17 Espectro del EDS del concentrado de molibdenita | 44 |
| Figura 18 Variabilidad en la cantidad de Mo, Cu y Fe extraído en las 16 réplicas . | 49 |
| Figura 19 Ley de Mo en las 16 réplicas | 51 |
| Figura 20 Comparación de las concentraciones de Cu, Fe y Mo en ambos PLS | 54 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----------------|
| Tabla 1 Precio de molibdeno en los últimos 8 meses del año 2023 | 16 |
| Tabla 2 Caracterización de concentrado de molibdeno. | 18 |
| Tabla 3 Microscopía óptica de concentrado de molibdeno. | 19 |
| Tabla 4 ventajas y desventajas de la hidrometalurgia..... | 22 |
| Tabla 5 Ventajas y desventajas del proceso de lixiviación por agitación. | ¡Error! |
| Marcador no definido. | |
| Tabla 6 Composición química del concentrado de molibdeno inicial. | 41 |
| Tabla 7 Caracterización inicial del concentrado por ICP..... | 46 |
| Tabla 8 Composición inicial del concentrado antes de la lixiviación | ¡Error! |
| Marcador no definido. | |
| Tabla 9 Caracterización final del concentrado por ICP | 47 |
| Tabla 10 Resultados de lixiviación en las 16 réplicas | 48 |
| Tabla 11 Composición final del concentrado después de lixiviación..... | 50 |
| Tabla 12 Comparación entre la cantidad inicial y final de MoS_2, CuFeS_2 y FeS_2..... | 52 |
| Tabla 13 Comparación de la composición del PLS en agua destilada vs. salmuera | 53 |

RESUMEN

El presente estudio se centra en la mejora de la ley de concentrado de molibdenita mediante la remoción de impurezas a través de un proceso de lixiviación, utilizando salmuera de descarte de desaladoras como una fuente alternativa de agua. La investigación se llevó a cabo en dos etapas experimentales: la primera fase consistió en determinar las condiciones óptimas del proceso empleando agua destilada, mientras que en la segunda fase se replicaron estos parámetros utilizando salmuera de descarte para evaluar la viabilidad en la lixiviación.

En la etapa de agua destilada, se analizaron tres variables clave: tiempo de lixiviación (14, 24 y 48 horas), porcentaje de sólidos (5%, 15%, 30%) y concentración de ácido sulfúrico (50, 80 y 120 g/L). Tras la evaluación de los resultados, se determinó que las condiciones óptimas correspondían a 24 horas de lixiviación, 30% de sólidos y una concentración de H_2SO_4 de 80 g/L. Bajo estas condiciones, se llevó a cabo la segunda fase experimental, donde se realizaron 16 réplicas con salmuera de descarte, manteniendo los mismos parámetros óptimos.

Los resultados demostraron que el uso de salmuera de descarte en la lixiviación favoreció la eliminación de impurezas metálicas sin afectar la estabilidad del molibdeno en solución. Se observó una disminución significativa en la concentración de Cu y Fe, así como la eliminación completa de elementos no deseados como As, Sb y Se.

Adicionalmente, la ley final de molibdeno aumento de 51% a valores superiores al 52%, validando la efectividad del proceso. Estos hallazgos sugieren que la utilización de salmuera de descarte representa una alternativa viable y sostenible para la industria minera, pero para esto se deben hacer futuras investigaciones para ver si es viable a largo plazo.

ABSTRACT

This study focuses on improving the grade of molybdenite concentrate through impurity removal via a leaching process, using desalination plant waste brine as an alternative water source. The research was conducted in two experimental stages: the first phase aimed to determine the optimal process conditions using distilled water, while in the second phase, these parameters were replicated using waste brine to evaluate its viability in the leaching process.

In the distilled water stage, three key variables were analyzed: leaching time (14, 24, and 48 hours), solid percentage (5%, 15%, and 30%), and sulfuric acid concentration (50, 80, and 120 g/L). After evaluating the results, it was determined that the optimal conditions were 24 hours of leaching, 30% solids, and an H₂SO₄ concentration of 80 g/L. Under these conditions, the second experimental phase was carried out, where 16 replicates were performed using waste brine while maintaining the same optimal parameters.

The results showed that using waste brine in the leaching process favored the removal of metallic impurities without affecting the stability of molybdenum in solution. A significant reduction in Cu and Fe concentrations was observed, as well as the complete elimination of unwanted elements such as As, Sb, and Se.

Additionally, the final molybdenum grade increased from 51% to values above 52%, validating the effectiveness of the process. These findings suggest that the use of waste brine represents a viable and sustainable alternative for the mining industry; however, further research is required to assess its long-term feasibility.

CAPÍTULO I Marco introductorio.

1.1. Introducción

En la industria de la metalurgia extractiva, la obtención de concentrados de molibdenita de alta calidad es de vital importancia debido a su creciente demanda de este metal en aplicaciones industriales críticas. El molibdeno por su particular combinación de propiedades físicas y químicas desempeña un papel insustituible en la fabricación de aleaciones de acero, superaleaciones de alta temperatura, componentes electrónicos, entre otros.

El presente trabajo de investigación se enfoca en abordar dos temas principales de la metalurgia del molibdeno. La primera es la mejora de la calidad del concentrado de molibdenita mediante remoción eficiente de impurezas, y la segunda es ver la efectividad de fuentes alternativas de agua para procesos de lixiviación. Se espera que estos resultados de esta investigación tengan un impacto significativo en la eficiencia y sostenibilidad de la operación minero-metalúrgica del molibdeno.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Estudiar el aumento de ley de molibdeno en un concentrado de molibdenita, mediante remoción de impurezas aplicando un proceso de lixiviación e incorporación de salmueras de descarte de desaladoras como una fuente alternativa de agua.

1.2.2. Objetivos específicos

- Determinar las condiciones óptimas de operación en la etapa de lixiviación por agitación que permitan la remoción de impurezas del concentrado de molibdenita.
- Estudiar el impacto de la remoción de impurezas de la ley de concentrado de molibdenita y calidad del concentrado resultante en análisis de la composición.

1.3. Hipótesis

La implementación de un proceso de lixiviación, junto con la incorporación de salmueras de descarte de desaladoras como fuente alternativa de agua, es un proceso factible de utilizar para aumentar la ley de concentrado de molibdenita al remover de manera eficiente las impurezas presentes en el concentrado.

1.4. Planteamiento del problema

La metalurgia del molibdeno se enfrenta a desafíos críticos debido a las impurezas de los minerales de molibdeno, lo que hace que disminuya la calidad del concentrado y a su vez aumente el costo del procesamiento.

1.5. Justificación

En este estudio se abordará la necesidad de mejorar la calidad de ley de concentrado de molibdenita en la industria metalúrgica, buscando desarrollar métodos de lixiviación avanzados para eliminar impurezas y también explorar la incorporación de salmueras de desaladoras como fuente de agua alternativa.

1.6. Limitaciones

En este estudio se pueden ver involucradas ciertas condiciones que serán limitadas:

- La reactividad que pueden generar las impurezas con el medio a estudiar.
- Condiciones químico-físicas de la salmuera.
- Debido a la granulometría del concentrado sólo se utilizará lixiviación por agitación.

CAPÍTULO II Marco Teórico.

2.1 Molibdeno

El molibdeno (Mo) es un elemento químico de color gris plateado. No existe en estado puro en la naturaleza, sino que, como la especie mineralógica llamada molibdenita (MoS_2), un disulfuro de molibdeno de apariencia y de tacto similar al grafito. Este se puede hallar en distintas capas de la tierra mezclado con otros elementos (MOLYMET S.A, 2023).

2.1.2 Mineralogía y geología

En la tabla periódica de los elementos, el molibdeno que se observa en la Figura 1, representado por el símbolo Mo y el número atómico 42, es un elemento metálico perteneciente al grupo 6 (CODELCO- Corporación nacional del cobre, n.d). Posee una masa atómica de 95,94 y destaca por sus propiedades físicas y químicas excepcionales. Es uno de los elementos con la temperatura de fusión más alta, alcanzando los 2.610°C . Asimismo, presenta un bajo coeficiente de expansión térmica de $5,04 \times 10^{-6}$ (1/K), lo que le otorga estabilidad dimensional en condiciones de variación térmica, siendo clave en las fabricaciones de dispositivos electrónicos y sistemas de precisión. Otra de sus propiedades es su alta resistencia a la corrosión, permitiéndole mantener su composición estable tanto a temperatura ambiente como en condiciones de hasta 400°C (MOLYMET, 2023).

Figura 1 Molibdeno.



2.1.3 Molibdenita

Uno de los principales minerales de molibdeno es la Molibdenita (MoS_2), es un mineral sulfurado que se compone de un 60% de molibdeno y un 40% de azufre. Estos valores son aproximados ya que también se puede encontrar un porcentaje de renio. Se origina en depósitos minerales hidrotermales de altas temperaturas, y se encuentran asociados a ella diferentes minerales como piritita, calcopiritita, anhidrita, fluorita y sheelita. Es un disulfuro de molibdeno de apariencia similar al gráfico, con una estructura laminada donde se encuentra un átomo de molibdeno contenido en dos átomos de azufre, todo en forma de láminas. Su sistema cristalino es hexagonal, tiene una dureza de 1 – 1,5 (escala de Mohs) con una densidad de $4,73 \text{ g/cm}^3$.

2.1.4 Explotación de la molibdenita

La molibdenita se puede encontrar sola, pero comúnmente se puede encontrar con minerales sulfurados, especialmente de cobre. El contenido de molibdeno puede variar entre el 0,01 y 0,25%. La molibdenita se procesa mediante tostación para formar óxido de molibdeno y luego se reduce a metal (Neumann, 2019).

En función de los minerales contenidos en el yacimiento y su calidad, las minas de molibdeno se agrupan en tres clases:

- 1) Minas primarias: recuperación de molibdenita es el único objetivo.
- 2) Minas de subproductos: donde el objetivo es la recuperación de minerales de cobre y la recuperación de molibdenita es la que proporciona un valor económico adicional.
- 3) Minas de coproductos: donde la viabilidad comercial de la mina requiere que se recupere tanto molibdenita como minerales que contienen cobre (Neumann, 2019).

2.1.5 Uso del molibdeno

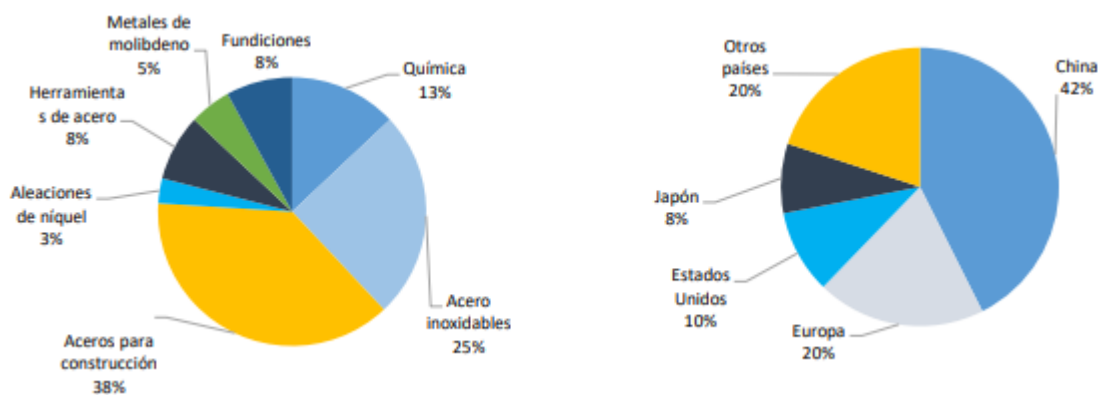
El molibdeno tiene dos tipos de usos, primarios y finales. En los usos primarios se utiliza principalmente como material para la producción de aplicaciones metalúrgicas, aceros estructurales e inoxidables, química y piezas de molibdeno puro. Los usos finales, en tanto, refieren a productos terminados que contienen diversos porcentajes de molibdeno, los que se utilizan en producción de piezas para industrias como la petrolera, química, automotriz, aeronáutica, entre otras (MOLYMET, 2023).

2.1.6 Consumo mundial

El molibdeno tiene un alto consumo mundial, siendo principalmente utilizado en aplicaciones de primer uso. Sus principales destinos incluyen el sector del acero inoxidable y la construcción, donde mejora la resistencia y durabilidad de los materiales, por otro lado, la industria química, donde se emplea como catalizador en diversos procesos y el sector de fundición, donde contribuye a la fabricación de piezas metálicas de alta resistencia y estabilidad térmica.

China es el país con el mayor consumo del metal representando el 42% del total mundial como se puede observar en la Figura 2. En este país el avance del consumo de molibdeno alcanzó 8,1% en 2022 en relación con el año 2021.(Garay, 2023)

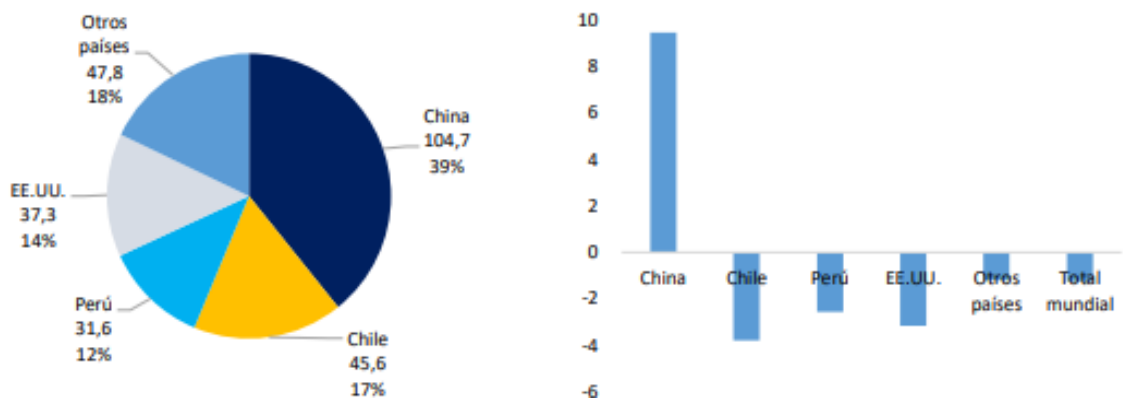
Figura 2 Demanda del molibdeno al año 2022 (Garay, 2023)



2.1.7 Oferta mundial

En 2022 la oferta mundial de molibdeno se mantuvo constante en 268,7 mil toneladas, con una producción minera global de 267,2 mil toneladas. La disminución en la producción de molibdeno en Chile y Perú “debido a factores como protestas y bloqueos de carreteras” tuvo un impacto significativo en la oferta secundaria como se puede observar en la Figura 3. Para el año 2023. Se prevé un aumento en la oferta de molibdeno a 282,3 mil toneladas, con un crecimiento esperado del 9,1% en la producción primaria y el 2,6% en la secundaria, especialmente en la minería del cobre en Chile y Perú. Estos datos son relevantes para entender la dinámica de mercado y la producción de molibdeno en el contexto de la minería global. (Garay, 2023)

Figura 3 Principales países productores de molibdeno año 2022 (Garay, 2023)

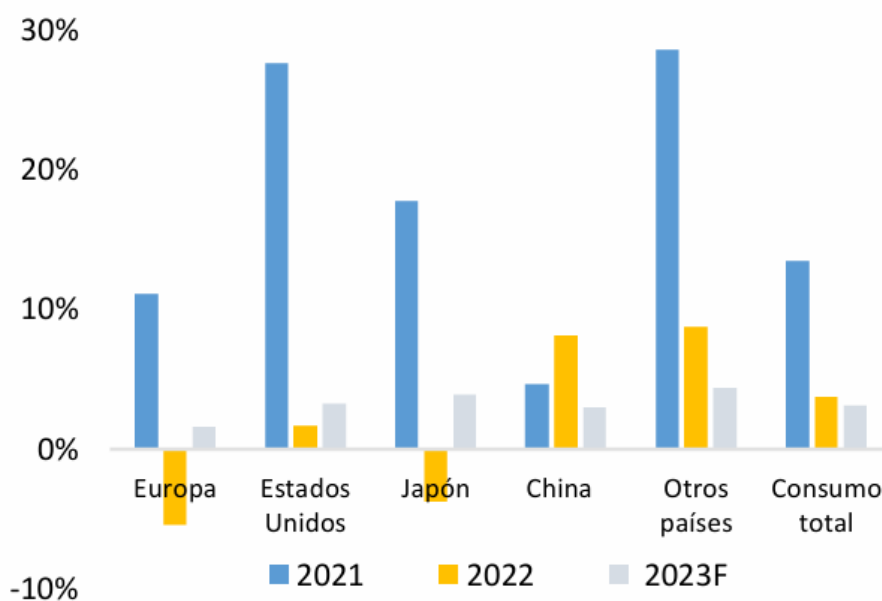


En la Figura 4 se observa que los principales consumidores de molibdeno experimentarían un alza superior del 3% en el consumo en 2023, salvo Europa que lo harían en 1,6%, atendiendo el freno económico de la región.

En 2023. Se observó que los principales consumidores de molibdeno experimentaron un aumento en el consumo, excepto Europa, que registró el crecimiento más modesto debido a los desafíos económicos en su región. El valor del molibdeno estuvo estrechamente relacionado con la evolución del petróleo, dado a su uso final en oleoductos, tuberías, petróleo, química y petroquímica. A pesar de que el precio del

petróleo WTI fue más bajo en los primeros cinco meses de 2023 en comparación con 2022, esto limitó un aumento significativo en el consumo de Mo, ya que gran parte de su demanda provino de estas industrias. Este análisis es relevante para comprender las dinámicas de mercado y la relación entre el molibdeno y el petróleo en el sector industrial. (Garay, 2023)

Figura 4 Variación en el consumo de molibdeno de los principales países consumidores de Mo (%) (Garay, 2023)

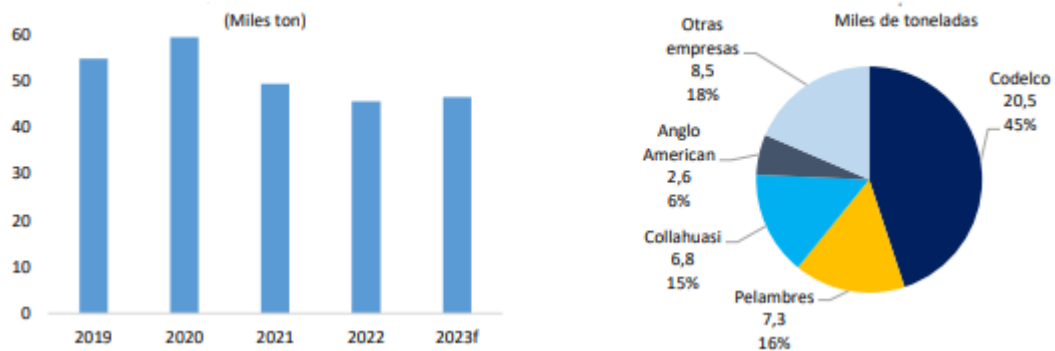


2.1.8 Producción Chilena.

En Chile, el molibdeno se extrae de la molibdenita, un mineral que se encuentra en yacimientos de cobre. La producción nacional en 2022 alcanzó de 45,6 mil toneladas, lo que representó una disminución del 8% en comparación con 2021. Para 2023, se proyectaba un aumento moderado a 46,5 mil toneladas, impulsado por la entrada en funcionamiento del proyecto Quebrada Blanca Fase 2 y una ligera mejora en la producción de otras mineras de cobre en Chile (Garay, 2023).

La Corporación Nacional del Cobre en Chile (Codelco) se mantuvo como el principal productor de molibdeno en el país, con una producción de 20,4 mil toneladas en 2022, lo que equivale al 45% del total nacional. Le sigue Pelambres con 7,3 mil toneladas y Collahuasi con 6,8 mil toneladas. Hasta abril de 2023, la producción acumulada alcanzó las 14,9 mil toneladas, mostrando una leve disminución del 0,9% en comparación con el mismo periodo en 2022, tal como se puede observar en la Figura 5. (Garay, 2023)

Figura 5 Producción Chilena de molibdeno. (Garay, 2023)



2.1.9 Precio del molibdeno

El precio del molibdeno es un indicador clave en la industria y la economía global. El Mo es un metal estratégico utilizado en una variedad de aplicaciones. Dado su papel fundamental, las variaciones en su precio tienen un impacto directo en la competitividad y los costos de producción de diversas empresas y sectores económicos.

Según la Corporación Nacional del Cobre en Chile y subproductos, el precio del molibdeno se detalla en la tabla 1, correspondiente a los últimos 8 meses del año 2023:

Tabla 1 Precio de molibdeno en los últimos 8 meses del año 2023

| MOLIBDENO - COMERCIANTES EE.UU. , PROMEDIO MENSUAL (Low-High) S&P Global Platts (MW) | (US\$/lb) |
|---|------------------|
| 05-2023 | 21,264 |
| 06-2023 | 22,257 |
| 07-2023 | 22,589 |
| 08-2023 | 24,882 |
| 09-2023 | 23,770 |
| 10-2023 | 19,951 |
| 11-2023 | 17,411 |
| 12-2023 | 18,534 |

2.2 Proceso convencional de obtención del molibdeno

La extracción del concentrado de molibdeno suele llevarse a cabo principalmente mediante dos métodos: la minería a cielo abierto y la minería subterránea (Los Pelambres, 2023).

- Minería a cielo abierto: Se inicia con el proceso de tronadura y carguío, tras el cual el mineral es transportado a través de camiones de tonelaje hasta la ubicación del chancador primario.
- Mina subterránea: El mineral se extrae de manera similar y también se transporta mediante camiones hasta el chancador primario.

En esta etapa, el mineral es reducido y luego dirigido hacia el área de procesamiento mediante una correa transportadora, donde se acumula es Stock pile (COLLAHUASI, 2014). Posteriormente, el mineral es enviado al área de chancado, que incluye varios molinos encargados de triturar el mineral hasta alcanzar el tamaño óptimo para liberar las partículas de cobre-molibdeno.

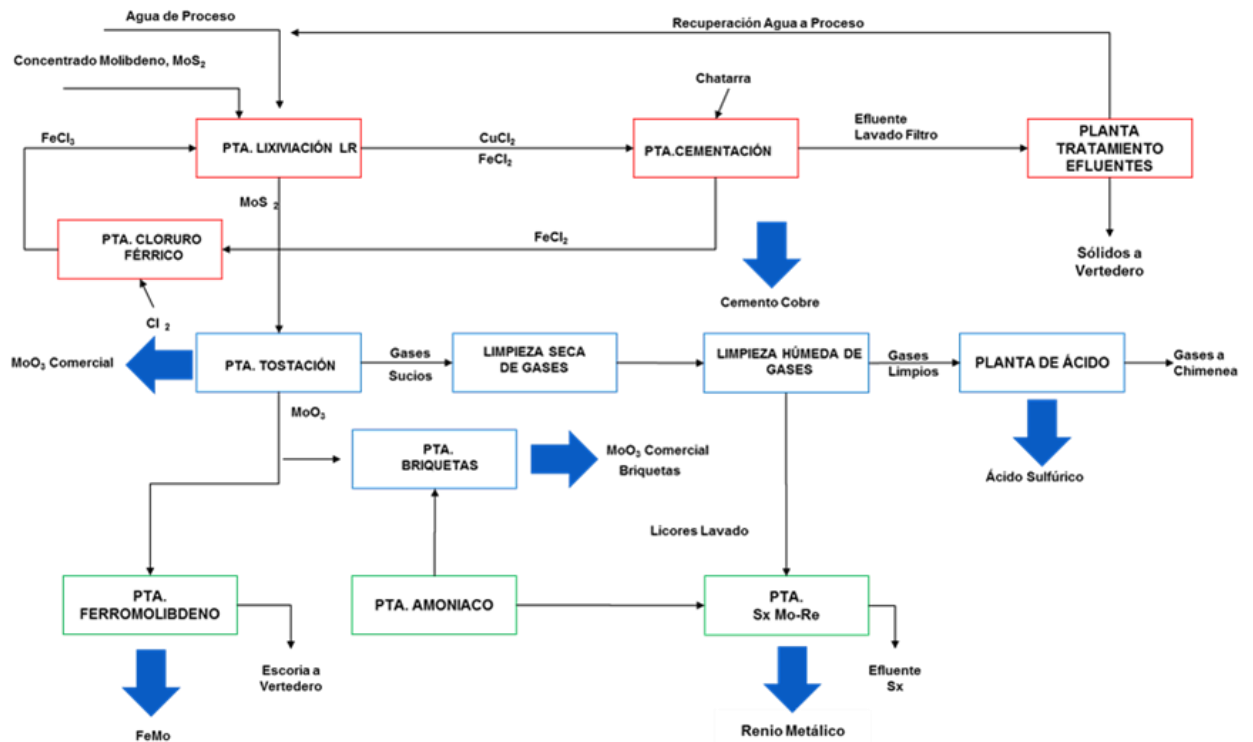
Una vez alcanzado el tamaño óptimo, el material ingresa al proceso de flotación. En esta fase, se agrega agua, reactivos y aire al mineral de cobre sulfurado, y se agita para

crear burbujas, permitiendo que las partículas sean arrastradas hacia la superficie. Luego el mineral se somete al proceso de concentración para obtener el concentrado de cobre, con el concentrado de molibdeno como subproducto.

El concentrado de molibdeno se somete a un proceso de lixiviación y posteriormente a tostación, lo que resulta en la obtención de MoO_2 comercial, conocido como óxido de molibdenita tostado (Los Pelambres, 2023).

La Figura 6 presenta un esquema sobre el proceso convencional de la molibdenita.

Figura 6 Esquema del proceso convencional de la molibdenita.



2.3 Concentrado de molibdenita

El concentrado de molibdeno es un subproducto del proceso de concentración del cobre, y consiste en un material particulado y oscuro, consistente en mineral de molibdeno mezclado con impurezas con un contenido de humedad de 3% (COLLAHUASI, 2014).

La teoría sugiere que los componentes enumerados en la Tabla 2 deberían estar presentes en el concentrado de molibdeno. Sin embargo, esta afirmación se basa en la caracterización realizada en el estudio (P.Navarro, s.f) que identificó los elementos específicos del concentrado analizado. Esto implica que la composición del concentrado puede variar dependiendo tanto del propio concentrado como del método de caracterización utilizado.

Tabla 2 Caracterización de concentrado de molibdenita.

| Elemento | Valor | Unidad |
|------------------|--------------|---------------|
| Mo | 49,71 | % |
| Cu | 3,41 | % |
| Fe | 0,47 | % |
| P | 0,06 | % |
| Na | 0,04 | % |
| K | 0,13 | % |
| SiO ₂ | 2,4 | % |
| Ca | 0,25 | % |
| Pb | 100 | PPM |
| Bi | 11 | PPM |
| SB | 26 | PPM |
| RE | 400 | PPM |

En el estudio realizado por Navarro, se contempló una lixiviación ácida en ambiente sulfúrico para remover el fósforo presente en el concentrado de molibdenita.

Con lo cual se logró eliminar alrededor de un 51% de fósforo presente en dicho concentrado, bajando el contenido de fósforo a valores inferiores a 0,03%. A través de microscopía óptica se observaron las fases que se representan en la Tabla 3. (P.Navarro, s.f)

Tabla 3 Microscopía óptica de concentrado de molibdenita.

| Fase | Contenido | Unidad |
|-------------|------------------|---------------|
| Pirita | 1.85 | % |
| Calcopirita | 7.51 | % |
| Covelina | 1.15 | % |
| Molibdenita | 86.38 | % |
| Ganga | 3.11 | % |

2.4 Hidrometalurgia

La hidrometalurgia es una rama de la metalurgia extractiva que estudia todos los procesos extractivos que ocurren en medios acuosos, permitiendo la extracción y obtención de metales y/o compuestos desde sus minerales o materiales de reciclaje, tales como, chatarras, escorias, cementos metálicos, barras anódicos, entre otros (Simpson, 2003). Este enfoque es especialmente relevante en la industria moderna, dado su menor impacto ambiental y su capacidad para manejar materiales complejos y de baja ley.

La hidrometalurgia se divide en tres ramas principales:

1. **Lixiviación:** Etapa donde los metales deseados son disueltos selectivamente utilizando agentes químicos.
2. **Concentración y purificación:** Donde las soluciones obtenidas son tratadas para eliminar impurezas y recuperar el metal de interés.
3. **Precipitación:** Proceso que transformara los metales disueltos en productos sólidos de alto valor comercial.

Ente sus principales ventajas se encuentran:

- **Menor impacto ambiental:** Comparada a otros procesos extractivos, como la pirometalurgia, reduce significativamente las emisiones de gases o desechos sólidos.
- **Control sobre las reacciones:** Las condiciones cinéticas y termodinámicas permiten optimizar la extracción de metales específicos.
- **Flexibilidad operativa:** Permite combinar operaciones unitarias para ajustar procesos a diferentes tipos de minerales y compuestos.
- **Bajo costo de inversión:** En comparación a otro proceso extractivo, especialmente para minerales de baja ley o materiales reciclados.

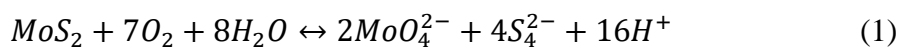
En la actualidad, la hidrometalurgia juega un papel importante en la transición hacia procesos minero-metalúrgicos más sostenibles, siendo una herramienta fundamental en la recuperación de metales estratégicos, como el molibdeno. Esto cobra una relevancia en el contexto de este estudio, que busca aprobar procesos hidrometalúrgicos avanzados para aumentar la ley del concentrado de molibdenita mediante la remoción de impurezas.

2.4.1 Etapas principales de la hidrometalurgia

En el contexto de la hidrometalurgia, se distinguen tres etapas principales que permiten la extracción y recuperación de metales desde minerales o materiales reciclados. Estas etapas son:

1. **Lixiviación:** es un proceso fundamental que se utiliza para extraer metales valiosos a partir de minerales o concentrados (Codelco, s.f). El proceso se basa en la capacidad que tienen ciertos reactivos químicos, llamados lixiviantes, utilizados para disolver selectivamente los componentes metálicos del material. El tipo de lixiviante y su concentración son factores críticos que afectan la eficiencia de dicha lixiviación. Todo este proceso se lleva a cabo para eliminar las impurezas no deseadas en el concentrado. El en caso de la molibdenita (MoS_2), el proceso de lixiviación se centra en oxidar el disulfuro de molibdeno para solubilizar el molibdeno en forma de iones

molibdato (MoO_4^{2-}) (Almonacid, n.d), mientras se eliminan impurezas como azufre o compuestos metálicos indeseables. Su reacción (1) típica es:



2. **Concentración y purificación:** Después de la lixiviación, la solución obtenida contiene tanto el metal deseado como impurezas disueltas. Esta etapa busca separar y concentrar el material valioso a través de procesos como:

- **Extracción por solvente (SX):** Transferencia selectiva del metal desde la solución acuosa a un solvente orgánico.
- **Intercambio iónico:** uso de resinas cargadas que retienen iones del metal objetivo, eliminando impurezas.
- **Purificación química:** precipitación selectiva de las impurezas mediante ajustes en el pH o la adición de reactivos específicos.

3. **Precipitación:** En esta última etapa, el metal es recuperado en forma sólida, ya sea como compuesto químico específico o como el metal puro. Alguno de los métodos más relevantes para el molibdeno son:

- **Electroobtención (EW):** Uso de corriente eléctrica para reducir el metal desde la solución, depositándolo al cátodo.
- **Cementación:** Uso de un metal más reactivo, como el hierro, para desplazar el molibdeno de la solución (2):



2.4.2 Ventajas y desventajas de la hidrometalurgia

A continuación, en la Tabla 4, se presenta un análisis comparativo de las ventajas y desventajas de los procesos hidrometalúrgicos en relación con otros métodos extractivos, como la pirometalurgia:

Tabla 4 ventajas y desventajas de la hidrometalurgia

| Ventajas | Desventajas |
|---|--|
| Menor impacto ambiental: Menos emisiones y residuos sólidos. | Alta dependencia de reactivos químicos, algunos con alto costo. |
| Gran selectividad y control de procesos para metales específicos. | Generación de residuos líquidos que deben ser gestionados adecuadamente. |
| Adecuado para minerales de baja ley. | |

2.5 Lixiviación

El proceso de lixiviación es una etapa fundamental en la hidrometalurgia, ya que permite la disolución selectiva de los metales de interés desde una materia prima sólida hacia una solución acuosa mediante el uso de agentes químicos. Este mecanismo facilita la transferencia del metal a recuperar a la fase líquida, separándolo de las impurezas y otros componentes no solubles presentes. En la hidrometalurgia del cobre y otros metales, como el molibdeno, la diversidad de sustancias sólidas que contienen los metales deseados y su interacción con agentes lixiviantes puede complicar la extensión de los fundamentos generales del proceso (Almonacid, n.d). Esto se debe a la variabilidad en las propiedades de los sólidos, los agentes químicos utilizados y los métodos aplicados. Por esta razón, es esencial ajustar las condiciones de lixiviación para cada caso específico, optimizando parámetros como el pH, la temperatura, la concentración de los reactivos y el tiempo de reacción.

En el caso del concentrado de molibdenita (MoS_2), los reactivos químicos oxidan el disulfuro de molibdeno, disolviendo impurezas como azufre, cobre y hierro, y liberando el molibdeno en forma de iones molibdato (MoO_4^{2-}).

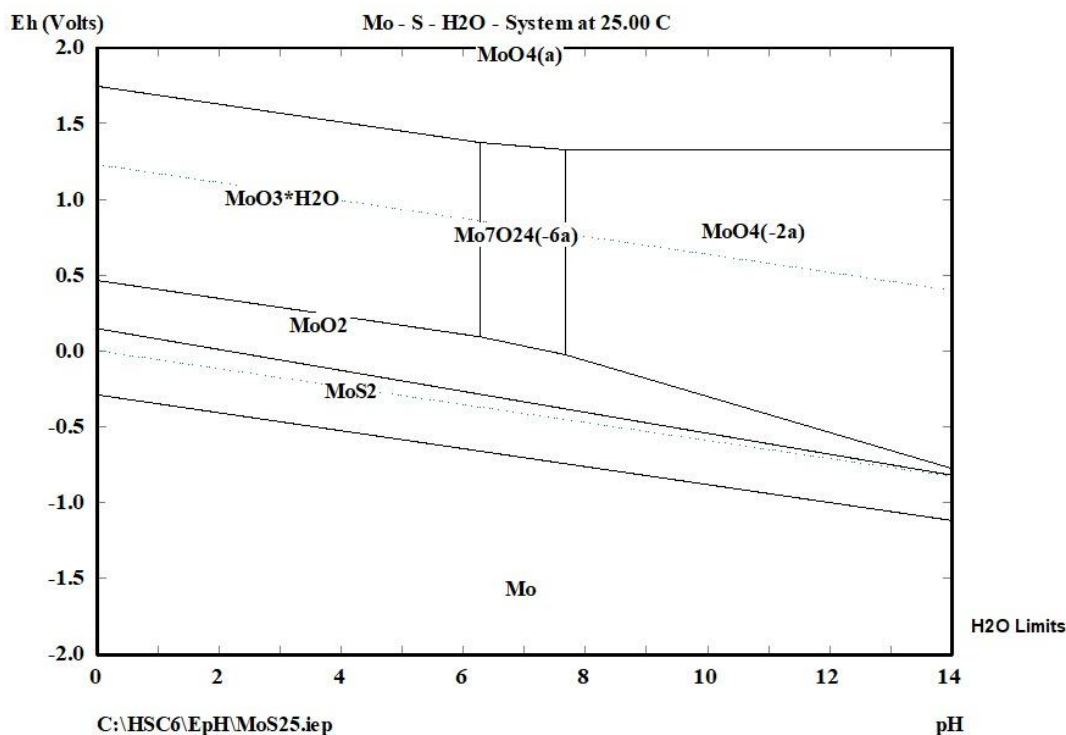
2.5.1 Aspecto termodinámico

El objetivo principal de la lixiviación es lograr la disolución completa o parcial de ion metálico de valor económico, que posteriormente puedan ser extraídos selectivamente de la solución por tratamientos posteriores de concentración como la extracción por solvente (SX) y la electroobtención (EW).

Los equilibrios químicos y electroquímicos suelen representarse en los diagramas de Pourbaix, que son gráficos de potencias versus pH. Los diagramas de Pourbaix son “una representación gráfica que muestra las regiones de estabilidad termodinámica de las especies en los sistemas metal – electrolito – acuoso” (Perez, 2013).

Los diagramas de Pourbaix se usan ampliamente para predecir procesos de corrosión. Dichos diagramas representan las áreas de estabilidad termodinámica de las especies sólidas o acuosas en función del potencial y del pH a la temperatura de interés. El diagrama de Pourbaix para el sistema Mo – S - H₂O que se observa en la figura 7, realizado mediante software HSC Chemistry 6.0, es una herramienta fundamental para comprender las condiciones de estabilidad de las especies químicas involucradas en el proceso de lixiviación del concentrado de molibdenita (MoS_2). En particular, el diagrama muestra cómo se comportan las principales especies de molibdeno, tales como MoS_2 , MoO_2 , MoO_4^{2-} y el propio Mo, en función del pH y del potencial redox (E_h) del medio.

Figura 7 Diagrama de Pourbaix para el sistema Mo-S-H₂O a 25°C realizado mediante software HSC Chemistry 6.0



| ELEMENTS | Molality | Pressure |
|----------|-----------|-----------|
| Mo | 1.000E+00 | 1.000E+00 |
| S | 1.000E+00 | 1.000E+00 |

2.5.2 Aspectos cinéticos

Es de suma importancia comprender la velocidad o cinética de los procesos, ya que el objetivo principal es lograr un rendimiento óptimo en el menor tiempo posible. El conocimiento proporcionado por la cinética de reacción permite identificar los mecanismos involucrados y diseñar procesos de manera eficiente.

En el contexto de la hidrometalurgia, el estudio cinético es esencial dado que los procesos aplicados suelen ser de naturaleza lenta, especialmente cuando se trabaja a temperatura ambiente o ligeramente superior y las reacciones tienen un carácter heterogéneo (Simpson, 2003).

El mecanismo de reacción entre un líquido y un sólido se compone de las siguientes etapas secuenciales:

- 1) Transporte forzado de los reactantes en el líquido hacia la capa límite.
- 2) Difusión de los reactantes a través de la capa límite.
- 3) Difusión de los reactantes a través de los poros de las partículas hacia el centro de reacción.
- 4) Difusión de los reactantes a través de la capa de producto sólido hacia la superficie de reacción.
- 5) Reacción química de los reactantes con el mineral.
- 6) Difusión de los productos disueltos a través de la capa de producto sólido.
- 7) Difusión de los productos a través de la capa de producto sólido hacia la superficie de la partícula.
- 8) Difusión de los productos a través de la capa límite.
- 9) Transporte forzado de los productos solubles al seno de la solución.

La cinética de reacción de los óxidos de cobre depende de factores como la actividad de los iones hidrógeno en el sistema acuoso, el área de superficie de reacción, la geometría, el tamaño, el flujo específico, entre otros (Simpson, 2003).

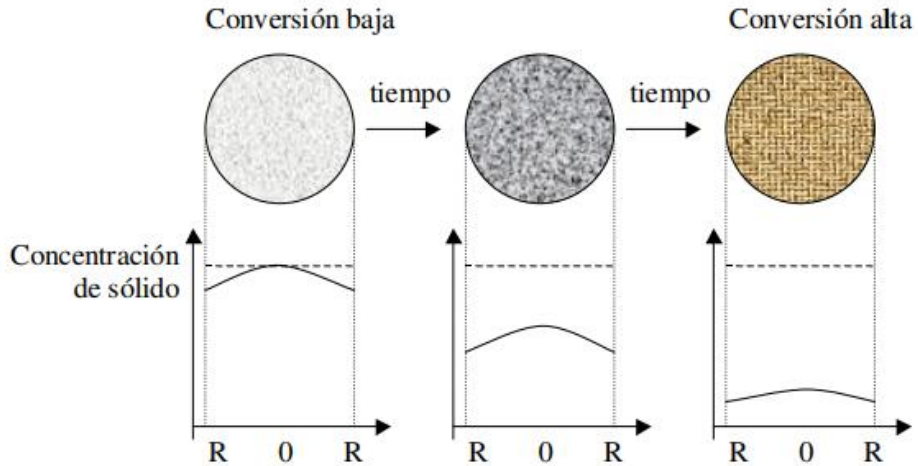
2.6 Modelos cinéticos

Los modelos cinéticos ofrecen una herramienta para la representación del proceso de lixiviación de minerales a lo largo del tiempo. Es esencial que este proceso se describa matemáticamente mediante una ecuación cinética. El modelo que logre representar de manera óptima el comportamiento de este proceso contendrá la expresión matemática que describirá con precisión la cinética del proceso que se necesitará en la realidad. Por el contrario, si el modelo no logra ajustarse al comportamiento real del proceso, esta ecuación no servirá. Para ello, existen los siguientes modelos cinéticos:

- Modelo de conversión progresiva: Aquí se considera que el gas reaccionante penetra y reacciona simultáneamente en toda la partícula sólida, de forma que el

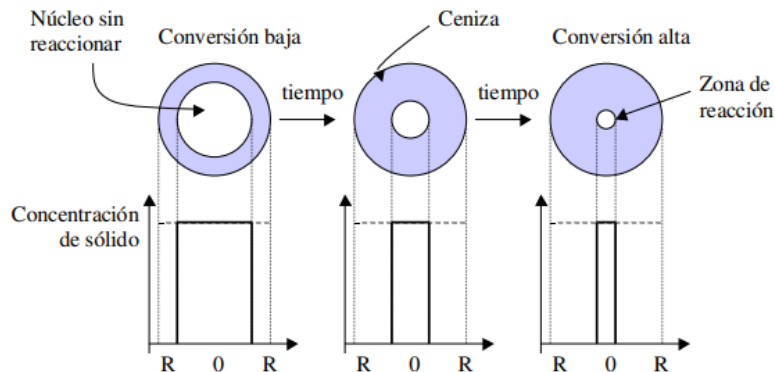
reactivo sólido se está convirtiendo continua y progresivamente en toda la partícula tal como se muestra en la Figura 8 (J.Conesa, s.f).

Figura 8 Esquema del modelo de la conversión progresiva.



- Modelo del núcleo sin reaccionar: En este caso la reacción tiene como primer lugar en la superficie exterior de la partícula sólida, después de la zona de reacción se desplaza hacia el interior del sólido, dejando atrás el material completamente convertido y sólido inerte. De este modo, durante la reacción existirá un núcleo de material sin reaccionar, como se muestra en la Figura 9. Este modelo no se aplica a sólidos catalizadores, debido a que estos la reacción se suele dar en todo el volumen (J.Conesa, s.f).

Figura 9 Esquema del modelo del núcleo sin reaccionar.



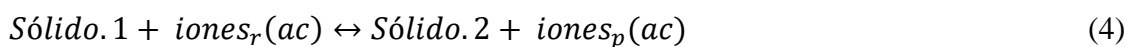
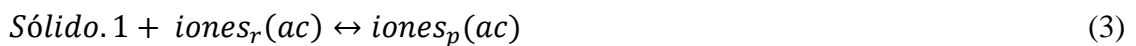
Los estudios experimentales llevados a cabo sobre la combustión de carbón, madera, etc. demuestran que el modelo de núcleo sin reaccionar se ajusta mejor al comportamiento real más que el modelo de conversión progresiva para partículas grandes.

2.7 Lixiviación de molibdenita.

La molibdenita es inusual debido a sus propiedades electrónicas y electroquímicas que son altamente direccionales. En 1982 Krishnaswamy y Fuerstenau demostraron la influencia de la orientación del cristal y mejoramiento foto inducido de la disolución anódica de la molibdenita tipo n. Ahn y Wadsworth (1984) identificaron la oxidación pasiva y transpasiva en regiones de bajo voltaje y alto voltaje como es indicado en las reacciones (3) al (6), con la misma estequiometría total dada en la reacción (4) (R.Almonacid, 2013).

Las reacciones de lixiviación, que tienen lugar durante la disolución de sulfuros de metales base específicos y metales, se analizan desde el punto de vista de las reacciones superficiales y su relación con la formación de productos intermedios o finales. Estos productos pueden adoptar la forma de capas sólidas, lo que implica la necesidad de procesos de difusión en fase sólida para permitir la continuación de la reacción. Alternativamente, los iones en solución pueden ejercer influencia sobre la cinética de la reacción al controlar el potencial mixto del sólido (R.Almonacid, 2013). Tres tipos generales de reacciones son propuestas para explicar las cinéticas de reacción observadas:

Las reacciones que representan la disolución de sulfuros metálicos y de metales frecuentemente pueden ser caracterizadas por uno o más de los siguientes tipos de reacciones de superficie (R.Almonacid, 2013):



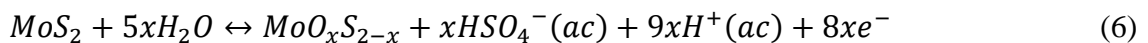
Las reacciones (3) y (4) representan un sólido en contacto con iones reactantes y los iones producto en solución. Sin embargo, los iones reactantes pueden no ser requeridos

para la reacción. También el sólido.1 puede reaccionar al solvente H₂O. La reacción 2 se forma un sólido poroso lo que permite el acceso de la solución al sólido.1 (R.Almonacid, 2013).

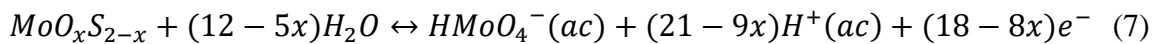
La reacción (5) representa el caso donde una nueva capa protectora sólida se forma, requiriendo difusión cristalina de los iones entre los límites para que la reacción pueda proceder. El sólido.2 puede ser visto como un electrolito solido con reacciones de oxidación-reducción que ocurren en dichos límites. La transferencia de carga entre el sólido.2 y la solución ocurren en función de la capa limite, las capas de solidos múltiples pueden formarse en el curso de las reacciones de lixiviación (R.Almonacid, 2013).

La reacción (5), bajo una variedad de condiciones, puede ser tomada en cuenta para la mayor parte de leyes cinéticas observadas durante la lixiviación. Por ejemplo, si el sólido.2 crece a un espesor por la cal, la transferencia neta de carga en ambos límites logra su equilibrio, quiere decir que estos se moverán a la misma velocidad constante, resultando una cinética lineal. Si esta condición es encontrada para muchas películas delgadas, la cinética lineal será observada durante la reacción completa (R.Almonacid, 2013). La transición de la cinética parabólica a lineal resulta en una cinética paralineal. La reacción de bajo voltaje de la molibdenita en soluciones ácidas, resulta en una cinética paralineal por la formación de la capa intermedia de oxisulfato Mo(IV).

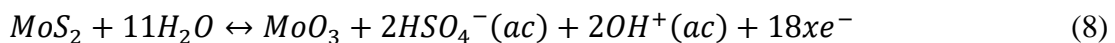
Reacción anódica de bajo voltaje de la molibdenita:



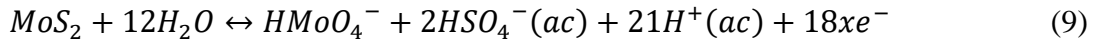
El oxisulfuro reacciona electroquímicamente con la solución formando iones molibdato y sulfato en solución:



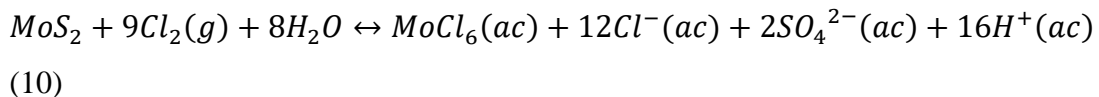
A más altos voltajes, la molibdenita forma el óxido **MoO₃** sobre la superficie:



El MoO_3 superficial reacciona rápidamente con la solución formando iones molibdato en solución. Capas delgadas transitorias de MoO_3 resultan y una cinética lineal es observada desde el comienzo de la reacción. Una vez que la reacción ya sea la (6) ó (7) (R.Almonacid, 2013), entran a la región cinética, la estequiometría total observada es:



Una muy rápida disolución ocurre a temperatura ambiente (R.Almonacid, 2013). Los balances de masa conforman la reacción total:



2.8 Agua de mar, desalinización.

En Chile, la creciente demanda de agua dulce para la industria minera, junto con el agotamiento de recursos hídricos disponibles, ha generado la necesidad de buscar alternativas sostenibles para el abastecimiento de agua. Este desafío surge no solo por la priorización del consumo humano del agua, sino que también por una mayor conciencia social sobre la preservación del medio ambiente. Por estas razones, el uso de agua de mar y su desalinización se han convertido en soluciones clave para atender las necesidades del sector minero. En particular, el agua desalinizada se emplea principalmente en procesos industriales como la flotación y lixiviación de minerales (Minería Chilena, 2016).

2.8.1 Desalinización del agua de mar.

La desalinización es un proceso fisicoquímico que permite la eliminación de los minerales y sales contenidos en el agua de mar, transformándola en agua dulce para el consumo humano o para uso industrial. Su principal objetivo es permitir el desarrollo de la industria y suministrar agua potable a la población con mayores dificultades de acceso a agua potable.

Existen diferentes métodos para minimizar los niveles de salinidad en el agua, aunque el proceso de ósmosis inversa es el sistema de desalinización más extendido y avanzado en el mundo (Acciona, 2020). A continuación, se describen los métodos más destacados:

- **Ósmosis inversa:** El proceso más usado y consume menos energía que el resto al basarse en el uso de membranas semipermeables que dejan pasar el agua, pero no la sal. Dichas membranas son de poliamida ultrafina, que se pueden contaminar con bacterias y por ese motivo el agua debe pasar por un tratamiento (Acciona, 2020).
- **Destilación solar:** Consiste en evaporar el agua de mar y posteriormente condensarla para obtener agua dulce (Iberdrola (s.f)). Este procedimiento se lleva a cabo en varias etapas, la temperatura y la presión van descendiendo en cada etapa hasta conseguir el resultado deseado.
- **Electrodiálisis:** Consiste en mover el agua salada a través de membranas cargadas eléctricamente que atrapan los iones de sal disueltos en el agua, permitiendo extraer agua dulce. Existen diversas variantes de electrodiálisis, como la convencional y la inversa.
- **Nanofiltración:** Es un proceso de separación que utiliza membranas con nanotubos, las cuales presentan una mayor permeabilidad en comparación con las empleadas en la ósmosis inversa. Esta característica permite tratar un mayor volumen de agua en menos espacio y con un menor consumo energético (Iberdrola (s.f)). Las membranas, fabricadas a partir de compuestos sulfonados, no solo retienen sales, sino que también elimina trazas de diversos contaminantes.
- **Formación de hidratos gaseosos:** Son cristales sólidos que se forman al combinar el agua con un gas, por ejemplo, propano, a alta presión y baja temperatura. Durante el proceso desaparecen todas las sales e impurezas presentes en el agua y al elevar la temperatura se puede recuperar el gas quedando el agua dulce.

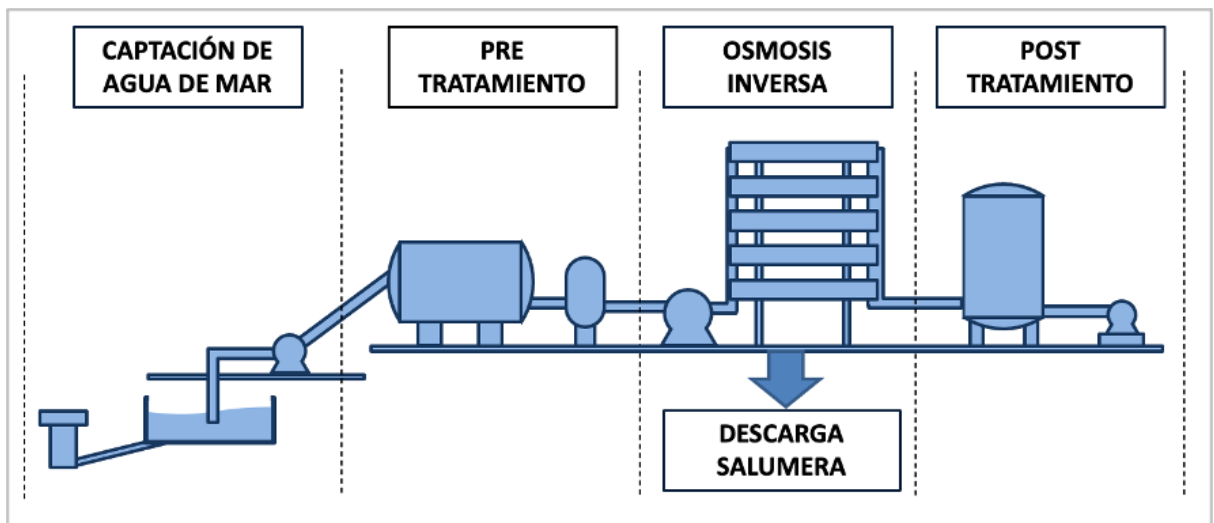
Un sistema típico de desalinización de agua de mar consta de los siguientes componentes principales:

- **Sistema de captación de agua de mar y descarga de residuos:** Incluye estructuras para captar el agua desde el océano y sistema de descarga de salmueras y otros residuos generados durante el proceso.
- **Planta desalinizadora:** Instalación donde se realiza el pretratamiento, desalinización y postratamiento del agua para obtener agua dulce.
- **Sistema de impulsión de agua:** Conjunto de tuberías y equipos que transportan el agua dulce hacia los puntos de consumo industrial o poblacional.

La Figura 10 muestra un esquema de la planta desalinizadora típica, compuesta por equipos e instalaciones necesarias para el proceso. En este tipo de plantas, el agua captada del océano para por una serie de etapas que incluyen el pretratamiento, desalinización mediante métodos como osmosis inversa, y postratamiento para adecuarla a su uso final. Cabe destacar que, además de agua dulce, estas plantas generan un subproducto en forma de salmuera, cuya gestión es un desafío ambiental importante.

En una planta desalinizadora, requiere una superficie importante. A continuación, se muestra un esquema de una planta, compuesta por equipos e instalaciones (C.Ñancuan, 2022).

Figura 10 Esquema de planta desalinizadora.



2.8.2 Salmuera

El proceso de desalinización genera un producto de descarte denominado salmuera que posee cerca de 1,5 a 2,5 veces la salinidad normal del agua de mar. La salmuera se refiere comúnmente a agua con altas concentraciones de sales disueltas (sólidos disueltos totales entre 70.000 y 80.000 mg/L) (C.Ñancuan, 2022). Este residuo, a menudo considerado un material de descarte, plantea desafíos ambientales debido a su potencial impacto en los ecosistemas marinos cuando es descargado directamente.

Sin embargo, en la industria minera, la salmuera puede considerarse un recurso valioso en lugar de un desecho. Al integrarla en procesos como lixiviación de minerales, se puede aprovechar sus características químicas únicas, como alta concentración de cloruros y sulfatos, que puede favorecer la disolución de ciertos minerales y la remoción de impurezas. Esta utilización no solo reduciría los costos asociados, sino que también promovería prácticas más sostenibles.

Actualmente, el uso de salmuera ha sido validado principalmente en la lixiviación de caliche. Sin embargo, dadas sus características fisicoquímicas, existe un gran potencial para extender su aplicación a la lixiviación de otros minerales. En esta investigación, se propone su uso en la lixiviación de concentrados de molibdenita como una alternativa innovadora. Este enfoque tiene la idea de mejorar la eficiencia del proceso al proporcionar un medio reactivo adicional, al mismo tiempo abordar problemas de escasez de agua en regiones mineras.

CAPÍTULO III Metodología.

3.1 Materiales y accesorios

3.1.1 Concentrado de molibdenita

El mineral utilizado en este estudio se muestra en la Figura 11. La caracterización del concentrado de molibdenita se realizó mediante diversas técnicas analíticas que permitieron una evaluación completa de sus características fisicoquímicas.

Figura 11 Concentrado de molibdenita.



3.1.2 Reactivos utilizados

Para el proceso de lixiviación se utilizará ácido sulfúrico calidad PA marca Merck, agua destilada y salmuera de descarte obtenida de una planta de tratamiento de agua de mar.

3.1.3 Equipos y accesorios

Los equipos y accesorios necesarios para el desarrollo de estudio son los siguientes:

- Material de vidrio.
- Fraccionador marca Gilson.
- Medidor pH/ORP Edge Hanna.
- Agitados mecánico SCILOGEX 0S20-S.
- Balanza analítica de laboratorio Radwag (modelo AS 220 R2).
- Estufa de laboratorio Fisher Scientific (modelo 230G).
- Campana extractora de laboratorio Esco Frontier.

3.2 Procedimiento experimental.

3.2.1 Preparación del material

1. Pesar en su totalidad el concentrado de molibdenita seco y registrar el valor obtenido.
2. Disgregar el material.
3. Colocar el material sobre un paño de roleo.
4. Homogenizar el material para realizar el cono y cuarteo.
5. Formar el cono del material mezclando sobre el paño de roleo.
6. Aplanar el material, haciendo un cono truncado y posteriormente realizar con el material una forma circular.
7. Dividir la forma circular en 4 partes iguales.
8. Repetir el cono y el cuarteo hasta obtener la cantidad de muestras necesarias para las pruebas experimentales.

Del material obtenido en el punto 8 se toma una sección para realizar la caracterización del concentrado de la molibdenita.

3.2.2 Caracterización del concentrado de molibdenita inicial

En primer lugar, se llevaron a cabo tomas de muestras representativas del mineral, siguiendo los procedimientos establecidos para asegurar su homogeneidad. Posteriormente, se realizó espectrometría de emisión óptica con plasma acoplado

inductivamente (ICP-OES). Además, se utilizó microscopía electrónica de barrido (SEM) para obtener imágenes detalladas de la morfología del mineral.

3.2.3 Lixiviación del mineral.

El proceso de lixiviación se llevó a cabo con el objetivo de aumentar la ley del concentrado de molibdenita mediante la remoción de impurezas. Para este propósito, se diseñó un experimento que incluyó la evaluación de tres variables principales:

1.-**Concentración de H₂SO₄**: Diferentes concentraciones de ácido sulfúrico fueron utilizadas para determinar su impacto en la eficiencia del proceso.

2.-**Porcentaje de sólidos**: Se variaron las proporciones de sólidos en suspensión para evaluar su efecto en la lixiviación.

3.-**Tiempo**: Se estudiaron diferentes intervalos de tiempo para identificar las condiciones óptimas de extracción.

Parámetros de operación:

- **Temperatura**: Se realizaron todos los ensayos a temperatura ambiente.
- **Velocidad de agitación**: 500 rpm, utilizando un agitador mecánico.

Etapas del estudio:

1- **Etapas con agua destilada**: En la primera etapa del estudio, se utilizó agua destilada como medio para preparar la solución lixivante para determinar las condiciones óptimas del proceso antes de aplicar la lixiviación con salmuera de descarte. El proceso experimental se llevó a cabo en tres fases consecutivas, optimizando una variable a la vez para garantizar la selección de los mejores parámetros operacionales.

Primero, se evaluó el efecto del tiempo de lixiviación, manteniendo constante el % de sólidos y la concentración de ácido (5% y 80g/L). Luego, con el tiempo óptimo determinado, se evaluó el porcentaje de sólido, manteniendo fijo el tiempo y el ácido sulfúrico. Finalmente, con el tiempo y el porcentaje de sólidos óptimos, se evaluó la concentración de ácido sulfúrico. Estos parámetros se

detallan en la Tabla 5, donde se presentan las variaciones evaluadas en cada etapa de optimización.

Tabla 5 Variación de parámetros en la lixiviación

| Tiempo de lixiviación (h) | Porcentaje de sólidos (%) | Ácido sulfúrico (g/L) |
|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------|
| 14 | 5 | 50 |
| 24 | 15 | 120 |
| 48 | 30 | 80 |

Tras los resultados obtenidos en cada una de las etapas del análisis por ICP, se presentan en la Tabla 6, donde se muestran las concentraciones de Cu, Fe y Mo en el PLS según la variable estudiada.

Tabla 6 Concentración de impurezas en el PLS según variables

| Tiempo de lixiviación (h) | Cu (mg/L) | Fe (mg/L) | Mo (mg/L) |
|----------------------------------|------------------|------------------|------------------|
| 14 | 184,5 | 170,2 | 10,3 |
| 24 | 218,4 | 175,4 | 11,2 |
| 48 | 242 | 174,9 | 10,3 |
| Porcentaje de sólidos | Cu (mg/L) | Fe (mg/L) | Mo (mg/L) |
| 5% | 185,1 | 141,5 | 10 |
| 15% | 563,4 | 379,8 | 27,3 |
| 30% | 1247 | 795,3 | 55,8 |
| Ácido sulfúrico (g/L) | Cu (mg/L) | Fe (mg/L) | Mo (mg/L) |
| 50 | 1219 | 810,5 | 50,2 |
| 120 | 1265 | 818,9 | 57,7 |
| 80 | 1742 | 918,7 | 59,5 |

Estos valores optimizados se resumen en la Tabla 7.

Tabla 7 Parámetros más eficientes

| Tiempo de lixiviación (h) | Porcentaje de sólidos (%) | Ácido sulfúrico (g/L) |
|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------|
| 24 | 30 | 80 |

Bajo estas condiciones, se logró una mayor eliminación de impurezas metálicas, sin comprometer la estabilidad del MoS₂. Estos parámetros fueron seleccionados como base para la siguiente fase experimental, la cual se realizaron 16 réplicas y se evaluó el desempeño del proceso utilizando salmuera de descarte en lugar de agua destilada.

- 2- **Etapa con salmuera de descarte:** en la segunda etapa, se realizaron 16 réplicas experimentales utilizando los mismos parámetros óptimos determinados previamente en la etapa con agua destilada (24 h, 30% de sólidos y 80 g/L de H₂SO₄).

En esta fase, el agua destilada fue reemplazada por salmuera de descarte proveniente de plantas desalinizadoras, con el objetivo de evaluar la viabilidad técnica de utilizar esta fuente alternativa de agua en procesos de lixiviación.

La realización de múltiples réplicas permitió verificar la confiabilidad y consistencia del proceso bajo estas condiciones.

3.2.4 Preparación de solución lixivante

Las soluciones lixiviantes se preparó en matraces aforados de 1000 mL, siguiendo el siguiente procedimiento:

- 1- Se añadió agua desmineralizada o agua de descarte de desaladora según corresponda hasta 1/3 de matraz.
- 2- Se agregó la cantidad calculada de ácido sulfúrico (H₂SO₄) según lo requerido.
- 3- Los matraces se agitaron hasta homogenizar completamente la solución.
- 4- Finalmente, se completó con agua desmineralizada o agua de descarte de salmuera, según correspondiera hasta su aforo, y las soluciones fueron selladas y rotuladas con las condiciones experimentales. hasta su aforo y se almacenan las soluciones.

3.2.5 Lixiviación por agitación

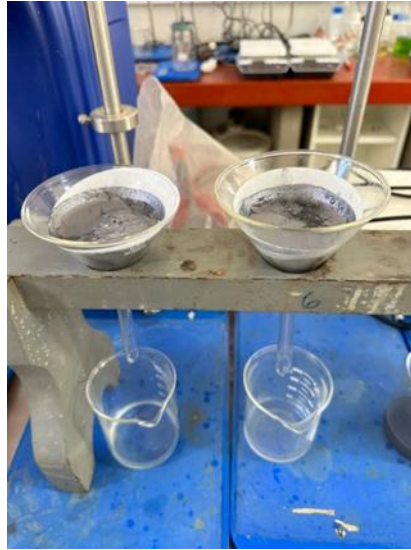
El proceso de lixiviación por agitación se realizó utilizando un agitador mecánico. Se colocaron 45 gramos de concentrado de molibdenita en un vaso precipitado, junto a 150 mililitros(mL) de solución lixivante previamente preparada, que contenía una concentración inicial de ácido sulfúrico de 80 g/L. El vaso precipitado se situó bajo el agitador, tal como se puede observar en la Figura 12, y se operó a una velocidad constante de 500 revoluciones por minuto (rpm) y a temperatura ambiente ($\sim 25^{\circ}\text{C}$) durante el tiempo experimental de 24 horas.

Figura 12 Lixiviación por agitación.



Una vez finalizado el proceso de agitación, el producto obtenido fue sometido a un procedimiento de filtrado para separar las partículas sólidas del líquido lixivante como se puede observar en la Figura 13. El material sólido restante fue secado cuidadosamente, mientras que la solución restante (producto líquido lixivante, PLS) se preparó para un análisis químico detallado, siguiendo los pasos establecidos que vienen a continuación.

Figura 13 Filtrado del mineral.



3.2.6 Preparación de muestras para análisis

La preparación de las muestras para el análisis químico se llevó a cabo de manera meticulosa para generar resultados precisos. En primer lugar, se tomó una alícuota exacta de 1 milímetro del producto líquido lixivante (PLS), esta alícuota se transfirió a un matraz aforado de 100 mL previamente limpio y seco. A continuación, se añadió 5 mililitros de ácido nítrico concentrado, cuidadosamente medidos, con el propósito de estabilizar los elementos presentes en la solución. Una vez agregado el ácido nítrico, se completó el volumen del matraz hasta la marca de aforo utilizando agua ultrapura de clase 1, la cual cumple con los estándares más altos de pureza para evitar contaminaciones que pueden interferir con el análisis. Finalmente, el matraz fue agitado durante varios segundos para garantizar la homogenización completa de la solución como se puede observar en la Figura 14. Este procedimiento permitió obtener una dilución precisa de 1:100, adecuada para las técnicas analíticas utilizadas posteriormente, como la espectroscopía de absorción atómica o la espectrometría de emisión óptica.

Figura 14 Muestras de PLS para analizar.



3.3 Caracterización del mineral inicial sin previo tratamiento

La caracterización del concentrado de molibdeno se realizó con el objetivo de identificar su composición química, mineralógica y morfológica. Este análisis inicial permitió establecer las propiedades fundamentales del mineral.

3.3.1 Análisis químico del mineral inicial sin previo tratamiento

El análisis químico se llevó a cabo mediante espectrometría de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES).

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 8, donde se destacan las concentraciones de los elementos principales y secundarios presentes en el concentrado. El cobre (Cu) con 15.440,09 mg/L y el hierro (Fe) con 10.431,6902 mg/L. Asimismo, se identificaron trazas de elementos como níquel (Ni), plomo (Pb), y arsénico (As), los cuales podrían influir en el rendimiento del proceso de la lixiviación. Por otro lado, los elementos como el cadmio (Cd), manganeso (Mn), zinc (Zn), y talio (Tl), se encuentran en concentraciones menores al límite de detección.

Esta caracterización inicial es fundamental para entender la composición química del concentrado y establecer las condiciones experimentales necesarias para la remoción de

impurezas y el enriquecimiento del contenido del molibdeno. Además, permite evaluar la presencia de impurezas críticas que pueden afectar la eficiencia del proceso de lixiviación.

Tabla 8 Composición química del concentrado de molibdenita inicial.

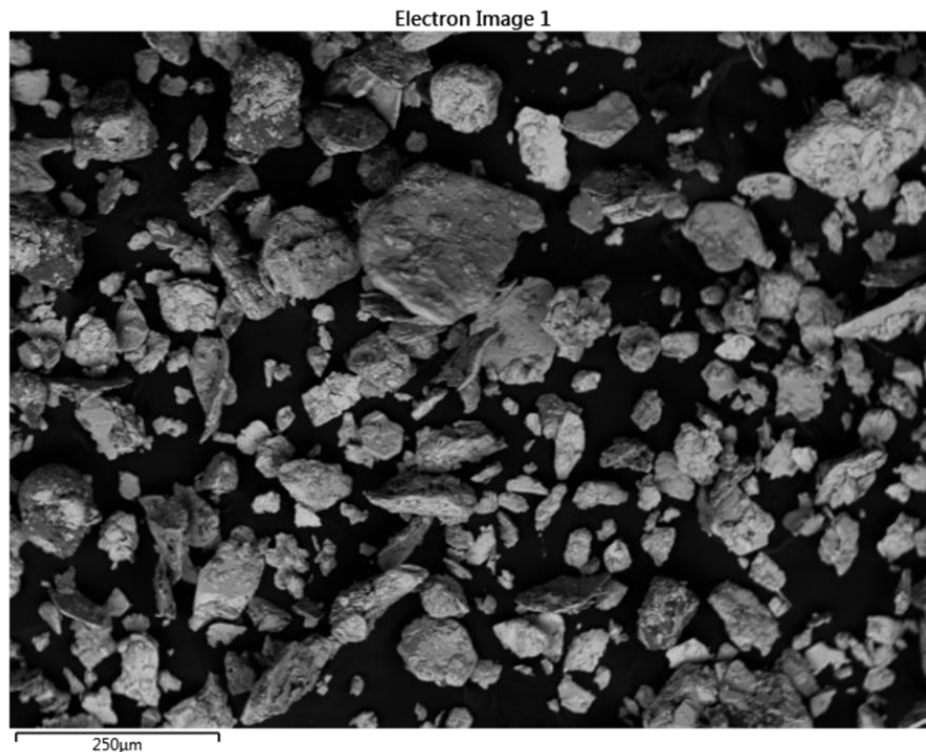
| Elemento | mg/L | Elemento | mg/L |
|-----------------|-------------|-----------------|-------------|
| Cd | <0,004 | Cr | 17,68 |
| Cu | 15440,09 | Fe | 10431,69 |
| Mn | <0,003 | Mg | 1225,92 |
| Co | 15,51 | Se | 60,36 |
| Ni | 13,73 | Sb | 472,69 |
| Pb | 49,39 | Sr | 14,028 |
| Zn | <0,04 | Ti | 28,65 |
| As | 30,23 | Tl | <0,1 |
| Be | <0,2 | V | <0,01 |
| Ca | 2369,85 | Li | 192,53 |

3.3.2 Análisis mineralógico

El análisis morfológico del concentrado de molibdenita se llevó a cabo mediante microscopía electrónica de barrida (SEM) acoplado a un sistema de espectroscopia de dispersión de energía (EDS), para evaluar las características físicas de las partículas, como su tamaño, forma y la distribución de elementos en la superficie.

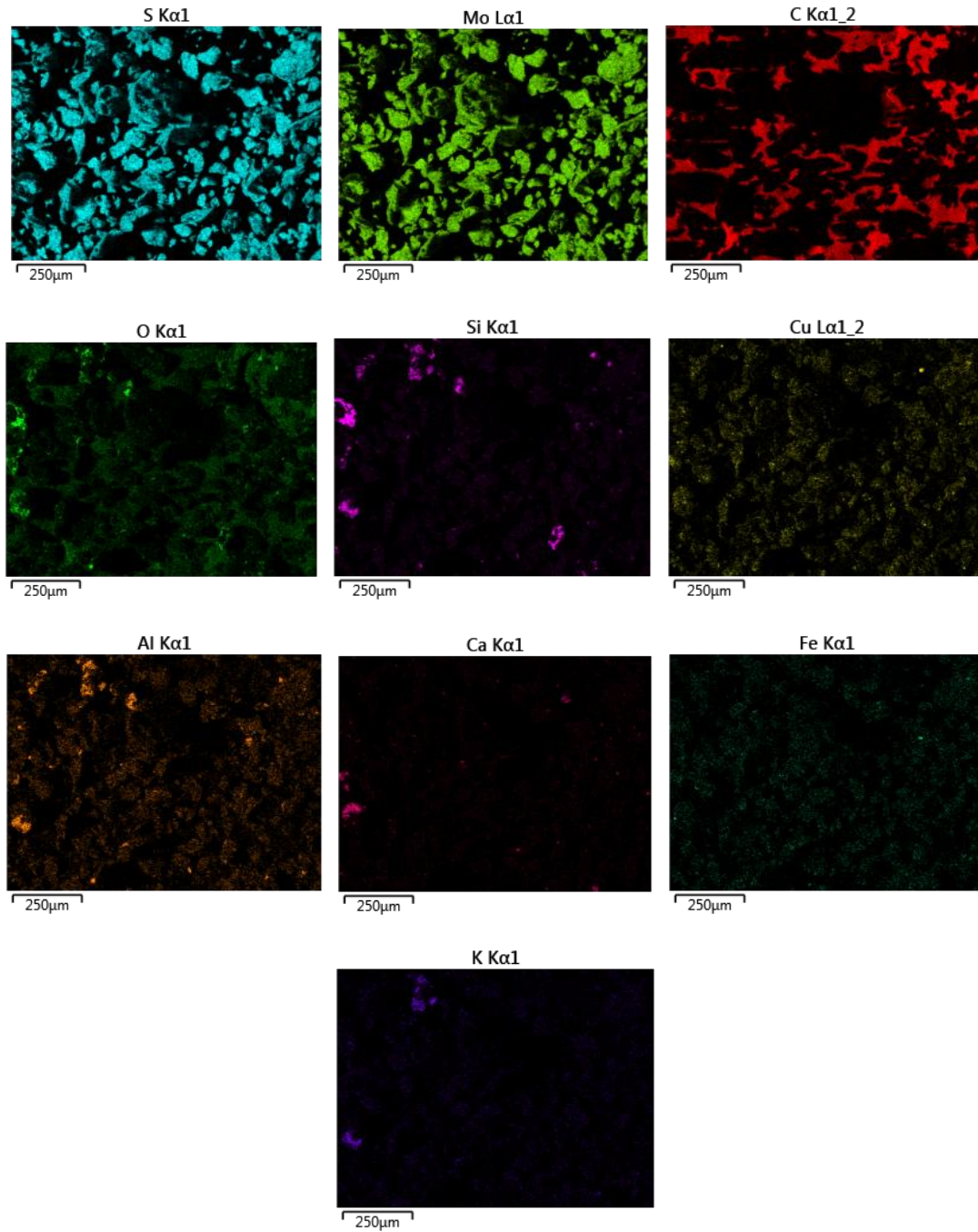
Las imágenes obtenidas bajo SEM, a un aumento de 100x, mostraron que las partículas del concentrado presentan una morfología irregular, con tamaños que oscilan entre 20 y 250 micrómetros que se observa en la Figura 15. Estas partículas incluyen agregados de forma laminares características de la molibdenita (MoS_2), combinados con partículas más pequeñas asociadas a impurezas minerales. Esta información sugiere que las características físicas del concentrado pueden influir en la reactividad durante el proceso de lixiviación, ya que las partículas más grandes podrían presentar una menor superficie de contacto con la solución lixivante.

Figura 15 Micrografía SEM del concentrado de molibdenita



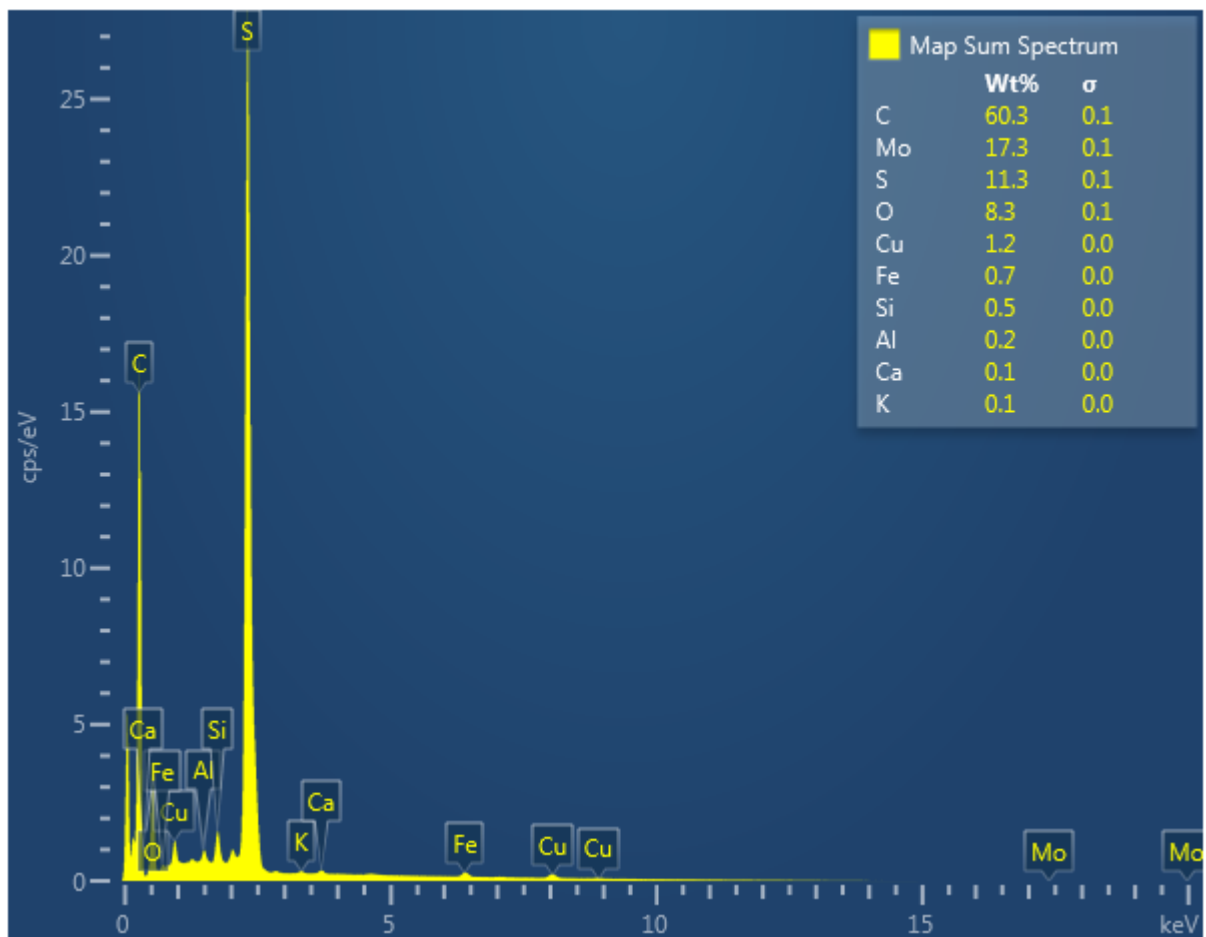
Para complementar el análisis morfológico, se realizó un mapeo elemental mediante EDS, lo que permitió determinar la distribución espacial de los elementos presentes en el concentrado. Los mapas elementales que se observan en la Figura 16, se muestra que el molibdeno (Mo) y el azufre (S) se encuentran distribuidas de manera homogénea en las partículas. Asimismo, se identificaron otros elementos como el oxígeno (O), cobre (Cu), calcio (Ca), aluminio (Al), y el hierro (Fe), distribuidos de forma localizada y probablemente este asociado a los minerales secundarios o gangas. Elementos como el silicio (Si) y potasio (K) también se detectaron en concentraciones menores.

Figura 16: Mapas elementales obtenidos mediante EDS del concentrado de molibdenita



El espectro EDS que se muestra en la Figura 17, mostró que los elementos mayoritarios del concentrado son carbono (60,3%), molibdeno (17,3%) y azufre (11,3%), lo que confirma la composición predominante de MoS_2 . El oxígeno (8,3%) y el cobre (1%) aparecen en menos proporción, mientras que otros elementos como calcio, aluminio, hierro y silicio, se encuentran en niveles bajos (<1%). Esta composición está de acuerdo con la naturaleza mineralógica que se espera del concentrado de molibdenita, pero también resalta la presencia de impurezas que podrían influir en el proceso de lixiviación, ya sea por su interferencia química o por su consumo de reactivos.

Figura 17: Espectro del EDS del concentrado de molibdenita



3.4 Caracterización de la salmuera

Para establecer las condiciones iniciales de la salmuera utilizada en esta investigación, se realizaron mediciones de sus propiedades fisicoquímicas fundamentales. Estos parámetros son determinantes para evaluar su comportamiento. Las mediciones realizadas incluyeron pH, conductividad eléctrica y potencias redox, empleando instrumentos previamente calibrados y bajo condiciones controladas. Los resultados obtenidos se describen en la Tabla 9.

Tabla 9 Caracterización de la salmuera

| pH | Conductividad eléctrica mS/cm | Potencial mV |
|-----------|--------------------------------------|---------------------|
| 8,2 | 77,44 | -57,1 |

CAPITULO IV Resultado y discusión

4.1 Caracterización inicial del mineral sin previo tratamiento de lixiviación por ICP

Para conocer la composición química del concentrado de molibdenita antes del proceso de lixiviación, se realizó un análisis por ICP en muestra sólida. En la tabla 10, se presentan las concentraciones iniciales de elementos metálicos e impurezas en el concentrado.

Tabla 10 Caracterización inicial del concentrado por ICP

| | M-1 inicial (mg/mL) |
|-----------|----------------------------|
| Cu | 15440,087 |
| Ni | 13,731 |
| Pb | 49,392 |
| As | 30,228 |
| Co | 15,509 |
| Cr | 17,683 |
| Fe | 10431,690 |
| Se | 60,358 |
| Sb | 472,686 |

Los resultados muestran que en el concentrado de molibdenita contiene una alta cantidad de Cu (15440,087 mg/mL) y Fe (10431,69 mg/mL), además de impurezas como Pb (49,391 mg/mL) y Sb (472,686 mg/mL). Estos elementos deben ser removidos para mejorar la pureza de MoS₂. En particular, la presencia de As y Sb es crítica debido a su impacto negativo en la calidad de concentrado final y en restricciones ambientales para su comercialización.

4.2 Composición inicial de concentrado y condiciones del proceso

Para evaluar la remoción de impurezas y su impacto en la ley final de Mo, se realizaron 16 pruebas experimentales (réplicas) utilizando la misma composición inicial del concentrado de molibdenita como se detalló anteriormente. Se presenta la

caracterización inicial del mineral, destacando la ley de Mo es del 51%, con una proporción estable de molibdenita (38,291 g) y una presencia significativa de calcopirita (4,459 g) y pirita (2,241 g).

Cada réplica fue sometida a idénticas condiciones de lixiviación, utilizando una solución de salmuera de descarte acidificada con H₂SO₄ de 80 g/L, con una cantidad de sólido de 45 g por muestra, manteniendo fijo su RPM en 500, con un tiempo de 24 horas, también ajustando el pH a -0,05 para favorecer la solubilización de impurezas metálicas. Se ha demostrado en estudios previos que la lixiviación en medios ácidos mejora la disolución de sulfuros como la calcopirita, favoreciendo la eliminación de Fe y Cu sin afectar significativamente la estabilidad de la molibdenita (Rivero Tarrau,2020)

4.3 Caracterización del mineral después de la lixiviación con salmuera de descarte como fuente alternativa de agua.

Después del proceso de lixiviación, se realizó un segundo análisis por ICP en muestra sólida para evaluar la reducción de impurezas en el concentrado. En la Tabla 11, se presentan las concentraciones finales de los elementos analizados.

Tabla 11 Caracterización final del concentrado por ICP

| | M-1 inicial (mg/mL) | M-1 final (mg/mL) |
|-----------|----------------------------|--------------------------|
| Cu | 15.440,087 | 7.987,200 |
| Ni | 13,731 | <0,003 |
| Pb | 49,392 | <0,01 |
| As | 30,228 | 0,000 |
| Co | 15,509 | <0,002 |
| Cr | 17,683 | <0,002 |
| Fe | 10.431,690 | 9.785,500 |
| Se | 60,358 | 0,000 |
| Sb | 472,686 | 0,000 |

Los resultados indican una reducción significativa en la concentración de impurezas, especialmente en Cu (reducido a 7.987,2 mg/mL), Fe (9.785,5 mg/mL), y la eliminación completa de As, Sb y Se. Esto confirma la efectividad del proceso en la

purificación del concentrado. La eliminación de estos elementos es crucial, ya que su presencia afecta directamente la calidad del producto final y su viabilidad comercial.

4.4 Evaluación de la consistencia del proceso de lixiviación

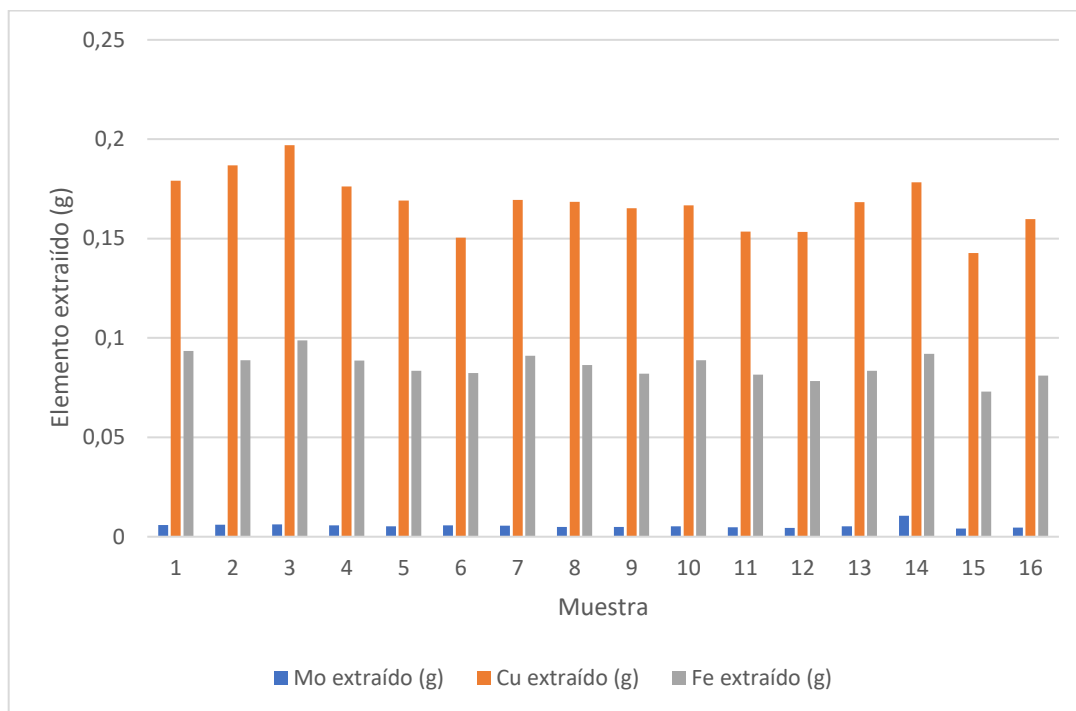
Para determinar la consistencia del proceso, se analizaron los cambios en la cantidad de Mo, Cu y Fe lixiviado en cada una de las 16 réplicas mediante ICP. En la Tabla 12 se presentan los valores obtenidos.

Tabla 12 Resultados de lixiviación en las 16 réplicas

| Muestra | Mo extraído (g) | Mo final (g) | Cu extraído (g) | Cu final (g) | Fe extraído (g) | Peso Fe final (g) |
|----------------|------------------------|---------------------|------------------------|---------------------|------------------------|--------------------------|
| 1 | 0,00592 | 22,944 | 0,1792 | 1,365 | 0,093 | 0,950 |
| 2 | 0,00597 | 22,944 | 0,1868 | 1,357 | 0,089 | 0,954 |
| 3 | 0,00613 | 22,944 | 0,197 | 1,347 | 0,099 | 0,944 |
| 4 | 0,00564 | 22,944 | 0,1762 | 1,368 | 0,089 | 0,955 |
| 5 | 0,00517 | 22,945 | 0,1691 | 1,375 | 0,083 | 0,960 |
| 6 | 0,00567 | 22,944 | 0,1504 | 1,394 | 0,082 | 0,961 |
| 7 | 0,00549 | 22,945 | 0,1695 | 1,375 | 0,091 | 0,952 |
| 8 | 0,00494 | 22,945 | 0,1685 | 1,376 | 0,086 | 0,957 |
| 9 | 0,00487 | 22,945 | 0,1652 | 1,379 | 0,082 | 0,961 |
| 10 | 0,0053 | 22,945 | 0,1668 | 1,377 | 0,089 | 0,954 |
| 11 | 0,00477 | 22,945 | 0,1535 | 1,391 | 0,081 | 0,962 |
| 12 | 0,00444 | 22,946 | 0,1533 | 1,391 | 0,078 | 0,965 |
| 13 | 0,00526 | 22,945 | 0,1684 | 1,376 | 0,084 | 0,960 |
| 14 | 0,01055 | 22,939 | 0,1784 | 1,366 | 0,092 | 0,951 |
| 15 | 0,00408 | 22,946 | 0,1427 | 1,401 | 0,073 | 0,970 |
| 16 | 0,00464 | 22,945 | 0,1598 | 1,384 | 0,081 | 0,962 |

Para visualizar la estabilidad del proceso, en la Figura 18 se presenta la variabilidad en la cantidad de Mo, Cu y Fe lixiviado en cada réplica. Se busca determinar la estabilidad del proceso y su reproducibilidad a lo largo de los ensayos experimentales.

Figura 18: Variabilidad en la cantidad de Mo, Cu y Fe extraído en las 16 réplicas



Se observa que las diferencias entre réplicas son mínimas, lo que confirma que el proceso de lixiviación aplicado es consistente y repetible. La mayor variabilidad se presenta en la cantidad de Cu extraído, lo que podría atribuirse a ligeras diferencias en la distribución de calcopirita dentro del concentrado inicial.

4.5 Aumento de la ley de Mo y composición final del concentrado

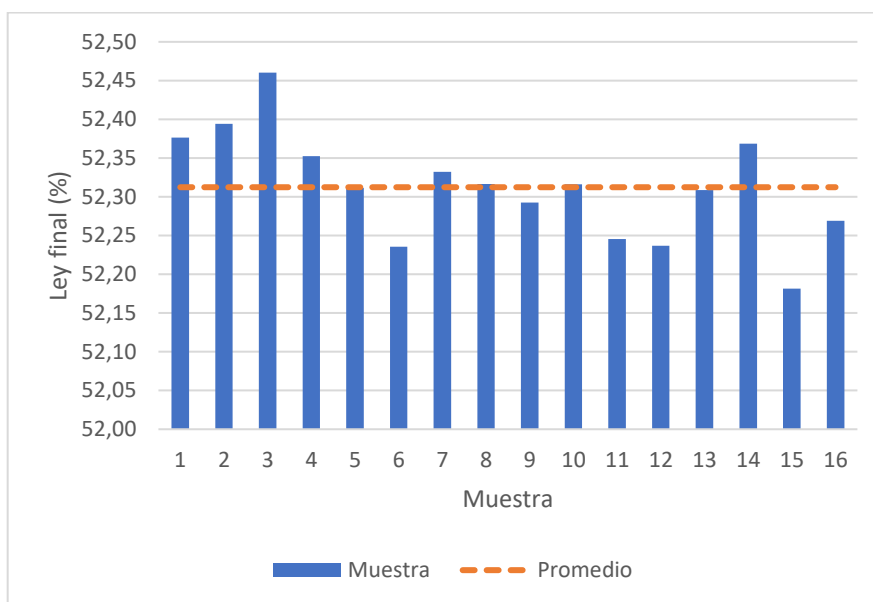
Después de la lixiviación, se determinaron las cantidades finales de molibdenita, calcopirita y pirita en cada réplica, así como la ley final de Mo obtenida. La Tabla 13 resume estos resultados, evidenciando el impacto del proceso sobre la pureza del concentrado.

Tabla 13 Composición final del concentrado después de lixiviación

| Muestra | Molibdenita final (g) | Peso calcopirita final (g) | Peso pirita final(g) | Ley final (%) |
|----------------|------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|----------------------|
| 1 | 38,281 | 3,095 | 2,040 | 52,38 |
| 2 | 38,281 | 3,102 | 2,050 | 52,39 |
| 3 | 38,280 | 3,112 | 2,029 | 52,46 |
| 4 | 38,281 | 3,092 | 2,051 | 52,35 |
| 5 | 38,282 | 3,084 | 2,062 | 52,31 |
| 6 | 38,281 | 3,066 | 2,064 | 52,24 |
| 7 | 38,282 | 3,085 | 2,045 | 52,33 |
| 8 | 38,282 | 3,084 | 2,055 | 52,32 |
| 9 | 38,283 | 3,081 | 2,065 | 52,29 |
| 10 | 38,282 | 3,082 | 2,050 | 52,32 |
| 11 | 38,283 | 3,069 | 2,066 | 52,25 |
| 12 | 38,283 | 3,069 | 2,073 | 52,24 |
| 13 | 38,282 | 3,084 | 2,062 | 52,31 |
| 14 | 38,273 | 3,094 | 2,043 | 52,37 |
| 15 | 38,284 | 3,058 | 2,084 | 52,18 |
| 16 | 38,283 | 3,075 | 2,067 | 52,27 |

En la Figura 19 se presenta la ley de Mo en cada una de las 16 réplicas, mostrando la tendencia general en la mejora de la pureza del concentrado tras la lixiviación.

Figura 19 Ley de Mo en las 16 réplicas



Como se observa en la figura 19, la ley de Mo se mantiene estable por encima del 52%, con variaciones mínimas entre ensayos. Esto confirma que el proceso de lixiviación aplicado es efectivo y consistente para la eliminación de impurezas sin afectar la molibdenita.

4.6 Comparación entre la molibdenita (MoS_2), pirita (FeS_2) y calcopirita (CuFeS_2) antes y después del proceso de lixiviación

Para evaluar la eliminación de impurezas y los cambios en la composición del concentrado después de la lixiviación, se compararon las cantidades iniciales y finales de molibdenita, calcopirita y pirita en cada réplica. En la Tabla 14, se presentan estos valores junto con la diferencia entre las cantidades iniciales y finales de cada compuesto, lo que permite analizar la efectividad del proceso en la disolución de impurezas.

Tabla 14 Comparación entre la cantidad inicial y final de MoS₂, CuFeS₂ y FeS₂

| M | MoS₂ inicial (g) | MoS₂ final (g) | CuFeS₂ inicial (g) | CuFeS₂ final (g) | FeS₂ inicial (g) | FeS₂ final (g) | Diferencia de MoS₂ (g) | Diferencia de CuFeS₂ (g) | Diferencia de FeS₂ (g) |
|----------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| 1 | 38,291 | 38,281 | 4,459 | 3,095 | 2,241 | 2,040 | 0,010 | 1,365 | 0,201 |
| 2 | 38,291 | 38,281 | 4,459 | 3,102 | 2,241 | 2,050 | 0,010 | 1,357 | 0,191 |
| 3 | 38,291 | 38,280 | 4,459 | 3,112 | 2,241 | 2,029 | 0,010 | 1,347 | 0,212 |
| 4 | 38,291 | 38,281 | 4,459 | 3,092 | 2,241 | 2,051 | 0,009 | 1,368 | 0,190 |
| 5 | 38,291 | 38,282 | 4,459 | 3,084 | 2,241 | 2,062 | 0,009 | 1,375 | 0,179 |
| 6 | 38,291 | 38,281 | 4,459 | 3,066 | 2,241 | 2,064 | 0,009 | 1,394 | 0,177 |
| 7 | 38,291 | 38,282 | 4,459 | 3,085 | 2,241 | 2,045 | 0,009 | 1,375 | 0,196 |
| 8 | 38,291 | 38,282 | 4,459 | 3,084 | 2,241 | 2,055 | 0,008 | 1,376 | 0,186 |
| 9 | 38,291 | 38,283 | 4,459 | 3,081 | 2,241 | 2,065 | 0,008 | 1,379 | 0,176 |
| 10 | 38,291 | 38,282 | 4,459 | 3,082 | 2,241 | 2,050 | 0,009 | 1,377 | 0,191 |
| 11 | 38,291 | 38,283 | 4,459 | 3,069 | 2,241 | 2,066 | 0,008 | 1,391 | 0,175 |
| 12 | 38,291 | 38,283 | 4,459 | 3,069 | 2,241 | 2,073 | 0,007 | 1,391 | 0,168 |
| 13 | 38,291 | 38,282 | 4,459 | 3,084 | 2,241 | 2,062 | 0,009 | 1,376 | 0,179 |
| 14 | 38,291 | 38,273 | 4,459 | 3,094 | 2,241 | 2,043 | 0,018 | 1,366 | 0,198 |
| 15 | 38,291 | 38,284 | 4,459 | 3,058 | 2,241 | 2,084 | 0,007 | 1,401 | 0,157 |
| 16 | 38,291 | 38,283 | 4,459 | 3,075 | 2,241 | 2,067 | 0,008 | 1,384 | 0,174 |

La molibdenita, principal mineral de interés en este estudio, mostró una variación mínima en su masa, con diferencias que oscilan entre 0,007 y 0,018 g. Estos valores corresponden a disoluciones menores al 0,05%, lo cual indica una alta estabilidad del MoS₂ bajo las condiciones experimentales empleadas. Este resultado es coherente con la naturaleza inerte de la molibdenita frente a agentes lixiviantes convencionales, especialmente en ausencia de oxidantes fuertes o medios altamente ácidos.

Por otro lado, la calcopirita presentó pérdidas de masa más significativas, con diferencias entre 1,347 y 1,401 g, equivalentes a una disolución parcial de aproximadamente un 30–32% respecto a su masa inicial. Este comportamiento sugiere que el medio lixiviante favoreció, en cierta medida, la liberación de cobre y hierro contenidos en este sulfuro, aunque sin alcanzar una disolución completa, lo que se alinea con el carácter refractario conocido de la calcopirita en sistemas sin catalizadores.

Finalmente, la pirita evidenció una disolución moderada, con pérdidas de entre 0,157 y 0,212 g, lo que representa hasta un 9,5% de su masa inicial. Este resultado confirma que la pirita es más susceptible a la lixiviación que la molibdenita, aunque menos que la calcopirita, bajo las condiciones específicas de este estudio.

Estos datos permiten concluir que el proceso aplicado logra una disolución diferencial de los sulfuros presentes, siendo eficaz en la remoción parcial de minerales acompañantes (como CuFeS_2 y FeS_2), mientras preserva la integridad de la molibdenita. Esta selectividad es deseable cuando se busca concentrar o purificar MoS_2 a partir de mezclas minerales.

4.7 Influencia de la salmuera en la lixiviación

Para evaluar el impacto del uso de la salmuera acidificada en la lixiviación, se compararon los resultados obtenidos con los de una prueba realizada con agua destilada como medio lixivante (PLS A-D). La Tabla 15 muestra las concentraciones de Cu, Fe y Mo en las soluciones lixiviantes obtenidas tras el proceso en ambos medios.

Tabla 15 Comparación de la composición del PLS en agua destilada vs. salmuera

| | Cu (mg/L) | Fe (mg/L) | Mo (mg/L) |
|---------------------------|------------------|------------------|------------------|
| PLS agua destilada | 1.742 | 918,7 | 59,5 |
| PLS Salmuera | 2.202 | 1.057 | 61,800 |

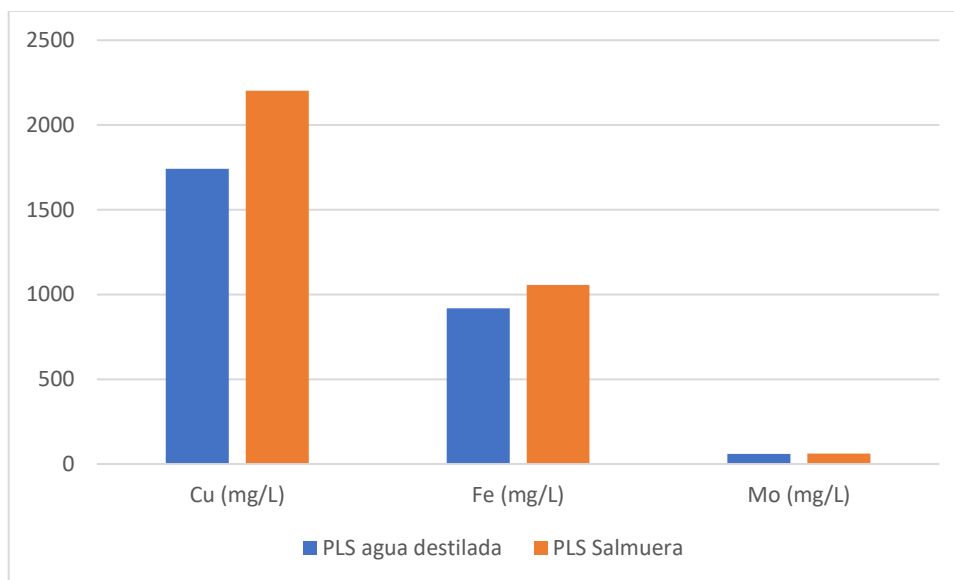
Los resultados muestran que la lixiviación con agua destilada produjo un PLS con 1.742 (mg/L) de Cu y 918,7 (mg/L) de Fe, mientras que la lixiviación con salmuera generó un PLS con 2.202 (mg/L) de Cu y 1.057 (mg/L) de Fe. Esto indica que el proceso con salmuera permitió una mayor extracción de impurezas metálicas, especialmente cobre y hierro.

En cuanto a la recuperación de Mo, se observa que la lixiviación con salmuera alcanzó un valor de 61,8 (mg/L), en comparación con los 59,5 (mg/L) obtenidos en agua destilada, lo que indica que la presencia de cloruros y sulfatos en la salmuera no afectó negativamente la estabilidad del molibdeno en solución. Este resultado sugiere que la salmuera acidificada no solo actúa como un medio lixivante efectivo, sino que también

potencia la disolución de impurezas, favoreciendo la eliminación de metales no deseados sin comprometer la recuperación de molibdeno.

En la Figura 20, se presentan las diferencias en la concentración de Cu, Fe y Mo en el PLS obtenido con agua destilada y con salmuera, permitiendo visualizar el efecto del medio lixiviantes en la disolución de estos elementos.

Figura 20 Comparación de las concentraciones de Cu, Fe y Mo en ambos PLS



El gráfico muestra que la lixiviación en salmuera permitió extraer una mayor cantidad de impurezas metálicas en comparación con el agua destilada, lo que refuerza la hipótesis de que la presencia de cloruros y sulfatos en la solución lixivante puede mejorar la cinética de disolución de Cu y Fe.

CAPITULO V Conclusión

El presente estudio tuvo como objetivo principal evaluar el aumento de la ley de molibdeno en un concentrado de molibdenita mediante la remoción de impurezas, aplicando un proceso de lixiviación con la incorporación de salmuera de descarte como fuente alternativa de agua. Tras diferentes pruebas realizadas, los resultados obtenidos demostraron que la lixiviación en un medio salino favorece la eliminación de impurezas metálicas sin comprometer la estabilidad en un concentrado final.

Para la etapa de lixiviación, se determinaron las condiciones óptimas de operación, estableciendo que la mejor remoción de impurezas se alcanzó con una concentración de 80 g/L de ácido sulfúrico en un matraz de 150 mL con agua destilada, el cual se preparó y tomo un tiempo de reacción de 24 horas a 500 rpm a temperatura ambiente (25°C), utilizando un concentrado de molibdenita de 45 g. Estos parámetros fueron obtenidos a partir de pruebas preliminares con agua destilada y debido a su eficacia en la remoción de impurezas, se replicaron 16 muestras experimentales con salmuera de descarte.

Los resultados confirmaron que la lixiviación en salmuera favoreció la disolución de impurezas metálicas, logrando reducciones significativas en los principales contaminantes (Cu) y un 6,2 % en hierro (Fe), mientras que elementos como arsénico (As) y antimonio (Sb) fueron completamente eliminados del sistema. Asimismo, se logró una reducción superior al 99,9% en la concentración de níquel (Ni), plomo (Pb) y cobalto (Co), lo que confirma la alta eficiencia del proceso en la eliminación de impurezas críticas.

En términos de calidad del concentrado final, la ley de molibdeno se incrementó de 51% a valores superiores al 52% en promedio, lo que sugiere que la mejora en la pureza se debe a la remoción selectiva de impurezas sin afectar la estabilidad de la molibdenita. Además, la incorporación de salmuera de descarte como medio lixivante representa una alternativa sostenible, permitiendo la reducción del consumo de agua dulce en la minería y optimizando la eficiencia de la lixiviación sin comprometer la recuperación del molibdeno.

En conclusión, la aplicación de salmuera acidificada en la lixiviación de molibdenita es un método viable y eficiente para la eliminación de impurezas, con potencial para ser implementado a mayor escala en la industria, para este caso se

recomienda realizar estudios adicionales en planta piloto e industrial para optimizar el proceso y evaluar su impacto en condiciones operacionales reales, así como explorar estrategias para el tratamiento y reutilización de efluentes generados en el sistema.

CAPITULO VI Futuras investigaciones

Los resultados obtenidos en este estudio han demostrado que la lixiviación con salmuera de descarte permite mejorar la ley de concentrado de molibdenita mediante remoción de impurezas. Sin embargo, existen diversas áreas en las que se puede profundizar para optimizar el proceso y evaluar su posibilidad de aplicación a nivel industrial. A continuación, se presentan algunas propuestas para futuras investigaciones:

- **Optimización de parámetros en lixiviación con salmuera:**

Si bien este estudio determinó condiciones óptimas de operación con 80g/L de H_2SO_4 , 150 mL de medio lixivante y un tiempo de reacción de 18 horas a 500 rpm en temperatura ambiente. Se recomienda explorar variaciones en estos parámetros para evaluar su impacto en la eficiencia de remoción de impurezas.

- **Análisis cinético del proceso de lixiviación**

Un estudio más detallado sobre la cinética de disolución de las impurezas permitirá entender mejor los mecanismos involucrados en la lixiviación en medio salino. Aplicar modelos matemáticos, como por ejemplo el modelo del núcleo sin reaccionar, esto permitirá determinar la velocidad de disolución de Cu, Fe, entre otros.

- **Comparación con otros agentes lixiviantes**

En este estudio se utilizó H_2SO_4 como agente lixivante principal, se sugiere evaluar su eficiencia con otros medios lixiviantes, como soluciones amoniacales, peróxido de hidrogeno. Comparar estos sistemas con la lixiviación en salmuera permitirá identificar un método más eficiente y ambientalmente más viable para el aumento de ley del concentrado de molibdenita.

- **Análisis de viabilidad económica y ambiental**

Se recomendaría realizar un estudio de viabilidad económica que compare costos operacionales del uso de salmuera Vs. Agua destilada, considerando factores como el ahorro de agua frescas, costos de reactivos, mejoras en la calidad del concentrado o también analizar los posibles efectos corrosivos de la salmuera en equipos de procesamiento.

Referencias

- Acciona. (2020). *desalinización de agua*. Recuperado de https://www.acciona.com/es/tratamiento-de-agua/desalacion/?_adin=02021864894.
- Almonacid, R. &. (n.d). *Recuperación hidrometalúrgica de cobre y molibdeno de las menas de la unidad minera de Toromocho*. Universidad Nacional del Centro del Perú recuperado de https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/578/TIMM_24.pdf?sequence=1: Tesis.
- C.Ñancuan. (2022). *Desalinización del agua de mar en Chile*.
- Cochilco. (2023). *Precio de los metales*. Recuperado de <https://www.cochilco.cl/Paginas/Estadisticas/Bases%20de%20Datos/Precio-de-los-Metales.aspx>.
- CODELCO s.f. (2023). *Codelco*. Obtenido de <https://www.codelco.com/innovacion/nuevos-usos-del-cobre/molibdeno>
- Codelco. (s.f). *Codelco, Lixiviación*. recuperado de https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109005316/lixiviacion_media_t_cnico_080119.pdf.
- COLLAHUASI. (2014). *REPORTE GESTION DE CAMBIO CLIMATICO*. Recuperado de <https://www.collahuasi.cl/wp-content/uploads/2016/07/reporte-gestion-cambio-climatico-2014.pdf>.
- Garay, V. (2023). *nota de mercado de molibdeno*. chochilco.
- Iberdrola (s.f). (s.f). *La desalinización del agua del mar, ¿un método para luchar contra la escasez?* Recuperado de <https://www.iberdrola.com/innovacion/desalinizacion>.
- Idmining. (22 de Septiembre de 2016). *IDMining*. Obtenido de <http://idmining.cl/molyb-filial-de-codelco-concreto-su-primer-embarque-de-molibdeno/>
- J.Conesa. (s.f). Reacciones sólidos-fluidos no catalíticas.
- L.Lombana, A. S. (2018). *Variables influyentes en el proceso de lixiviación para recuperación de metales contenidos en lodos galvánicos*. recuperado de <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7739/1/6122928-2018-1-IQ.pdf>.

- Los Pelambres. (2023). *Pelambres* . Obtenido de <https://web.pelambres.cl/que-hacemos/proceso-productivo/>
- Minería Chilena. (2016). Obtenido de Agua de mar y desalinización: Una solución más amigable, pero a mayores costos.: <https://www.mch.cl/informes-tecnicos/agua-de-mar-y-desalinizacion-una-solucion-mas-amigable-pero-a-mayores-costos/#>
- MOLYMET S.A. (2023). *¿Qué es el molibdeno?* Obtenido de <https://molymet.com/more/que-es-molibdeno/>
- n.d, U. d. (s.f.). *Capítulo 14: Proceso de Lixiviación*. Recuperado de <https://metalurgia.usach.cl/sites/metalurgia/files/documentos/capitulo14.pdf>.
- Neumann, A. (2019). *Recuperación de Molibdeno desde PLS del Proceso de Tostación-Lixiviación de Concentrados de Cobre por Intercambio ionico*.
- P.Navarro. (s.f). *ELIMINACIÓN DE FÓSFORO DESDE CONCENTRADOS DE MOLIBDENITA VIA LIXIVIACIÓN*. recuperado de <https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/iigeo/article/view/2545/2235>.
- Perez, J. (2013). *Diseño experimental del proceso de lixiviación de un mineral de malaquita. [Tesis]*. Instituto Politécnico Nacional. Recuperado de <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/16930/25-1-16581.pdf?sequence=1>.
- Quimica.es S.A. (s.f.). *Quimica.es*. Obtenido de https://www.quimica.es/enciclopedia/%C3%81cido_n%C3%ADtrico.html
- R.Almonacid. (2013). *Recuperación hidrometalurgica de cobre y molibdeno de las menas de la unidad minera de toromocho*.
- S.A. (2021). *lixiviación en metalurgia y en la recuperacion de metales*. Obtenido de <https://emew.com/es/lixiviacion-en-metalurgia-y-en-la-recuperacion-de-metales/#:~:text=El%20lixivante%20es%20lo%20que,la%20disoluci%C3%B3n%20del%20metal%20deseado>.
- Simpson, J. (2003). *Introducción a la metalurgia* . Chile, Universidad de Santiago de Chile.

