



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

SEDE VALLENAR

FACULTAD TECNOLÓGICA
ÁREA DE GEOMINERÍA

**IMPLEMENTACIÓN DE COLUMNAS DE LIXIVIACIÓN A
ESCALA DE LABORATORIO, SEDE VALLENAR, UNIVERSIDAD
DE ATACAMA.**

Trabajo de titulación presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título de
Técnico Universitario en Metalurgia.

Profesora Guía: Mg. Carolina Elizabeth Venegas Abarzúa.

ALEJANDRO ANTONIO BÓRQUEZ TABALÍ

JEREMI ATALIA FERNÁNDEZ GONZÁLEZ

MAURICIO JESÚS NARANJO CORTÉS

Vallenar, 2024.

AGRADECIMIENTOS

ALEJANDRO BÓRQUEZ TABALÍ

“Quiero agradecer a mi madre y abuelos que siempre estuvieron dispuestos a ayudarme en lo que necesitaba para la universidad, y los profesores que durante nuestros años nos fueron guiando para poder completar esta etapa de nuestras vidas, un agradecimiento especial a mi madre que siempre fue la primera en estar ahí cuando tenía un problema y fue la que más apoyo me dio en este proceso.”

JEREMI FERNÁNDEZ GONZÁLEZ

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a las personas que han contribuido de manera significativa en el desarrollo de este proyecto.

En primer lugar, quiero agradecer a mi familia, cuyo amor, apoyo y comprensión han sido constantes a lo largo de mi trayectoria. Han sacrificado tiempo, esfuerzo y recursos para que yo pudiera alcanzar mis metas, y su amor me ha dado la fuerza y la motivación necesarias para superar los obstáculos.

También quiero agradecer a la Profesora Carolina Elizabeth Venegas Abarzúa, quien se desempeñó como nuestra profesora guía durante todo el proyecto. Su orientación, apoyo y experiencia fueron fundamentales para la realización de esta investigación. Su dedicación y compromiso con nuestro aprendizaje y crecimiento profesional son verdaderamente apreciados.

Asimismo, quiero extender mi agradecimiento a la Profesora Dixiana Díaz Vigorena, quien nos brindó su apoyo y colaboración en momentos clave del proyecto. Su contribución fue invaluable y su disposición a ayudarnos fue siempre generosa.

Además, quiero agradecer de manera especial a Héctor Guerrero, quien se encargó de la gestión y obtención de las probetas y embudos de decantación necesarios para la

confección de la columna. Su ayuda fue crucial para el avance del proyecto, ya que su dedicación y eficiencia permitieron que se cumplieran los plazos y se alcanzaran los objetivos establecidos. Quiero destacar su buena disposición y colaboración en todo momento, siempre estuvo pendiente de nuestras necesidades y se mostró dispuesto a ayudar en lo que fuera necesario. Su actitud y profesionalismo fueron fundamentales para el éxito del proyecto, y le agradezco sinceramente por su apoyo y compromiso.

Finalmente, quiero expresar mi gratitud a la empresa Nutram, que amablemente aceptó analizar las muestras en su laboratorio. Su contribución fue fundamental para la obtención de resultados precisos y confiables.

A todos ellos, les estoy muy agradecido por su tiempo, esfuerzo y dedicación. Su apoyo y colaboración han sido esenciales para la realización de este proyecto y han contribuido significativamente en mi crecimiento profesional.

MAURICIO JESÚS NARANJO CORTÉS

ALICIA CORTÉS CASTILLO:

Agradezco rotundamente el apoyo de mi madre , gracias a ella que me entrego todo su apoyo , y ver en ella la referencia de una imagen de una persona muy luchadora, también por haberme transmitido buenos valores, el mantenerme humilde , la intensa lucha en la vida y de mucho esfuerzo, gracias a ella soy una persona completa que no decae con la adversidad ,y siempre con la mirada en alto con optimismo, y sin mirar por encima del hombro a los demás, **recordándome que no importa el cargo superior o inferior que tenga, todos somos iguales y que siempre hay que mantenerse humilde.**

DYLAN D. PIERO AGUILERA:

Muy agradecido de la Persona encargada del cuidado, organización y funcionamiento de la biblioteca, el bibliotecólogo ,Don DYLAN AGUILERA, ya que por su buen funcionamiento y organización en la biblioteca pudo orientarme a que bibliografía podría acceder y comprender mejor mi área de metalurgia dándome recomendaciones de los libros de los "fundamentos de la metalurgia" que existen actualmente en la biblioteca de la universidad de atacama , sede costanera, ampliando así aún más mi perspectiva sobre la ciencia de la Metalurgia. También muy agradecido por el apoyo constante que tuvo conmigo siempre, eso se valora demasiado ya que en la actualidad no existen personas con buenos deseos hacia otras personas.

ISRAEL BUSTAMANTE BADILLA

Muy agradecido y darle las gracias a Israel Bustamante, fue un pilar fundamental en esta investigación, su paciencia, humildad y sabiduría, se valoran por mucho. Para cada consulta siempre demostró buena disposición generando confianza en el hacer de esta investigación e impulsándonos a mejorar aún más.

CAROLINA VENEGAS ABARZÚA

Agradecido rotundamente de la profesora Carolina Vergara por su disposición para resolvernos nuestras dudas y consultas las cuales tuvimos muchas. También agradecer enormemente por la visita a la Universidad de Atacama, Copiapó, ya que ella nos trasladó junto al material para la reducción de tamaño el cual fue un éxito, como también para cualquier duda o consulta que teníamos nos resolvía de la mejor manera.

CRISTIAN URDIALES FLORES

Muy agradecido del profesor Cristian Urdiales, ya que para cada pregunta respecto a la investigación, siempre disponía de su tiempo y su apoyo para resolver mis dudas, también decir que es una excelente persona, una que resuelve, ya que nos ayudó mucho en resolver un problema de nuestra investigación de manera voluntaria y rápida, nos informó tal cosa debíamos cambiar del sistema de goteo, obteniendo buenos resultados en el regado de las columnas.

ARUM THIRUMUGAN

Agradezco la humildad y sencillez del profesor Arum que nos vio en problemas con el sistema de goteo y quiso resolver el problema a su manera con una mirada distinta, personas como él ya no existen en la actualidad, personas que quieren ayudar a otros a cambio de nada, agradecido enormemente la ayuda del profesor Arum Thirumugan.

DIXIANA DIAZ VIGORENA

Muy agradecido con la profesora Dixiana Diaz por acompañarnos desde un inicio a fin, aportando su conocimiento tanto en la teoría como también en la práctica que fue fundamental para mí, también por gestionar la visita a la universidad de Atacama, Copiapó y ayudarnos con el "Chancador III" para la reducción de tamaño al mineral, y también por su buena disposición en todo momento.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN.....	12
ABSTRACT.....	13
CAPÍTULO I. MARCO INTRODUCTORIO	14
1.1. INTRODUCCIÓN.....	14
1.2. OBJETIVO GENERAL	15
1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
1.4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
1.5. HIPÓTESIS	16
1.6. ANTECEDENTES	16
1.7. JUSTIFICACIÓN.....	16
1.8. ALCANCE	17
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	18
2.1. HIDROMETALURGIA	18
2.2. LIXIVIACIÓN DE MINERALES DE COBRE	19
2.3 PROCESOS DE LIXIVIACIÓN.....	20
A . LIXIVIACIÓN IN PLACE O IN SITU.....	21
B. LIXIVIACIÓN EN BOTADEROS (DUMP LEACHING).....	22
C. LIXIVIACIÓN EN BATEAS (POR PERCOLACIÓN).....	23
D. LIXIVIACIÓN EN AUTOCLAVES (A PRESIÓN).....	24
E. LIXIVIACIÓN POR AGITACIÓN.	24
F. LIXIVIACIÓN EN PILAS (HEAP LEACHING).	25
G. LIXIVIACIÓN EN COLUMNAS	27
2.4 AGLOMERACIÓN.....	28
2.5 CONO DE CUARTEO.....	29

2.6 CORTADOR DE RIFLES	30
2.7 TÉCNICA DE TAMICES (RO - TAP).....	30
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA	32
3.1 CONFECCIONAR COLUMNAS DE LIXIVIACIÓN A ESCALA DE LABORATORIO.....	32
3.2 CONFECCIÓN DE LAS COLUMNAS DE LIXIVIACIÓN	33
3.3 PROCEDENCIA DEL MATERIAL/ MINERAL	35
3.4. PREPARACIÓN DEL MATERIAL/MINERAL	36
A. CLASIFICACIÓN Y CHANCADO AL MATERIAL	36
B. CLASIFICACIÓN POR RO-TAP GILSON TEST-MASTER.	36
C. APLICACIÓN DE CHANCADO TERCIARIO PARA LA REDUCCIÓN DE TAMAÑO DEL MATERIAL	38
3.5 PRUEBAS DE LA RESISTENCIA DEL PEGAMENTO	39
3.6 SISTEMA DE GOTEO PARA LAS COLUMNAS DE LIXIVIACIÓN	40
3.7 CÁLCULO DEL VOLUMEN DE LA COLUMNA N°1	41
3.8 CÁLCULO DE LA DENSIDAD DEL MATERIAL	42
3.9. PEAP/ PESO APARENTE PARA AMBAS COLUMNAS.....	44
3.10 CÁLCULO DE LA CONCENTRACIÓN DE ÁCIDO 1N -2N	45
3.11 CÁLCULO DE CONCENTRACIÓN DE NORMALIDAD DEL ÁCIDO SULFÚRICO DESEADA PARA LIXIVIAR.....	46
3.12 CÁLCULO DE LA SOLUCIÓN ACIDULADA NECESARIA PARA EL SISTEMA DE GOTEO DE LAS COLUMNAS DE LIXIVIACIÓN.....	47
3.13 CALCULO FLUJO DIARIO	47
3.14 CÁLCULO PARA EL FLUJO TOTAL.....	48
3.15 RESUMEN DE LOS CÁLCULOS DE REGADO PARA CADA COLUMNA ..	49

3.16 CÁLCULO DEL FLUJO POR MINUTO DE LA SOLUCIÓN ACIDULADA PARA EL REGADO DE CADA COLUMNA	49
3.17 ROLEO, CONO Y CUARTEO PARA CARGAR LAS COLUMNAS	50
3.18 FILTRO PARA LAS COLUMNAS	51
3.19 AGLOMERADO.....	52
3.20 CARGA DE MATERIAL EN COLUMNAS	53
3.21 PREPARACIÓN DE CONCENTRACIONES DE ÁCIDO	53
3.22 FLUJO DE GOTEIO	54
3.23 RECOLCCIÓN DE PLS	55
3.24 COTIZACIÓN DE ELEMENTOS NECESARIOS PARA REALIZAR UNA LIXIVIACIÓN EN COLUMNA.....	57
3.25 CONO CUARTEO PARA SELECCIONAR MUESTRA A ANALIZAR.....	58
3.26 ANÁLISIS VOLUMETRÍA LABORATORIO NUTRAM PLANTA COBRE NORTE.....	59
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS	61
4.1 OBJETIVO 1: CONFECCIONAR COLUMNAS DE LIXIVIACIÓN A ESCALA DE LABORATORIO.....	61
4.2 OBJETIVO 2: REALIZAR ANÁLISIS FISICOQUÍMICO A MINERAL DE ESTUDIO.....	62
4.3 PRUEBAS DE LIXIVIACIÓN.....	63
CONCLUSIÓN	66
BIBLIOGRAFÍA	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1. Esquema del proceso de hidrometalurgia del cobre	18
Fig. 2.2 Piscinas de Lixiviación	19
Fig. 2.3 Lixiviación in situ	21
Fig. 2.4 Lixiviación en botaderos.....	22
Fig. 2.5 Lixiviación en bateas	23
Fig. 2.6 Lixiviación en autoclaves	24
Fig. 2.7 A la izquierda, un tanque de agitación; al medio, esquema de lixiviación con agitación mecánica; a la derecha; esquema de lixiviación por agitación neumática.	25
Fig. 2.8 Lixiviación en pilas.....	27
Fig. 2.9 Lixiviación en columnas.....	28
Fig. 2.10 Aglomeración.....	29
Fig. 2.11 Técnica de muestreo Roleo, cono y cuarteo	29
Fig. 2.12 Técnica de muestreo cortador de rifles	30
Fig. 2.13 Tamices	31
Fig 3.1 Ideas de columnas	32
Fig. 3.2 Probetas 2000 mL	33
Fig. 3.3 Embudos de decantación	33
Fig. 3.4 Cortes realizados.....	33
Fig. 3.5 Durepoxi líquido	34
Fig. 3.6 Unión Realizada.....	34
Fig. 3.7 Prueba de filtración columnas.....	34
Fig. 3.8 Columnas instaladas en soportes	35
Fig. 3.9 Material a utilizar tamaño sobre 1 ^{1/4} ”	35
Fig. 3.10 Ro-Tap Gilson Test-Master en funcionamiento	37
Fig. 3.11 Clasificación del material por Ro-Tap Gilson Test-Master quedando retenido sobre 1 ^{1/4} ”	37
Fig. 3.12 Disposición del material ST en bandejas para comenzar la reducción de tamaño	38
Fig. 3.13 Chancador III para la reducción de tamaño del material	39

Fig. 3.14 Prueba de resistencia del durepoxi con ácido 1N	40
Fig. 3.15 Instalación del sistema de goteo para cada columna	41
Fig. 3.16 Medición de la densidad con tamaños intermedios del material utilizando una probeta de 100 mL	43
Fig.3.17 Probeta plástica de 500 cc para la prueba del peso específico aparente	44
Fig. 3.18 Técnica Roleo, cono y cuarteo para seleccionar muestra representativa.....	50
Fig. 3.19 Método de filtración mediante canicas y papel filtro, ...	51
Fig. 3.20 Aglomeración del mineral con una humedad de 2,6 %	52
Fig. 3.21 Carguío de ambas columnas con el material aglomerado al 2,6% de humedad	53
Fig. 3.22 Preparación del Ácido sulfúrico 1N y 2N para llenar los bidones.....	54
Fig. 3.23 Medición del Flujo del goteo que regara cada columna	55
Fig. 3.24 Primeras recolecciones de PLS (<i>pregnantleachsolution</i>)	55
Fig. 3.25 Recolección de PLS cada 12 h.....	56
Fig. 3.26 Columnas de lixiviación construidas y armadas con todos sus implementos listos	57
Fig. 3.27 Columnas finalizadas, con su respectivo soporte y en su determinado lugar...	61
Figura 4.1. Gráfico que representa la cantidad de Cobre obtenida de cada muestra, utilizando ácido sulfúrico 1N	64
Figura 4.2. Gráfico que representa la cantidad de Cobre obtenida de cada muestra, utilizando ácido sulfúrico 2N	65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1.Presupuesto columnas de lixiviación	61
Tabla 4.2.Resultados de análisis Físicos al mineral de estudio.	62
Tabla 4.3.Resultados de lixiviación en columna con riego de ácido 1N.....	63
Tabla 4.Resultados de lixiviación en columna con riego de ácido 2N.....	64

RESUMEN

En el laboratorio de la Universidad de Atacama, Sede Vallenar, se encuentra una columna de lixiviación para la extracción de metales. La lixiviación es un proceso químico que implica la extracción de metales o sustancias valiosas de minerales o materiales mediante el uso de una solución líquida que disuelve y separa los metales de la ganga. Sin embargo, la columna existente es de gran tamaño y requiere grandes cantidades de material para realizar un análisis, lo que hace que el proceso sea lento y costoso. Por lo tanto, es necesario crear una versión más pequeña y eficiente de la columna de lixiviación, que permita realizar análisis y comparaciones de manera más rápida y efectiva.

El objetivo de este proyecto es diseñar y construir una columna de lixiviación de laboratorio que pueda ser utilizada por los estudiantes dentro de los tiempos en que se cursa una asignatura. Para lograr este objetivo, se diseñaron y construyeron dos columnas de lixiviación, utilizando probetas y embudos de decantación que contiene un volumen de 2651 cc aproximadamente. Para asegurar la eficiencia del proceso de lixiviación, el tamaño del material que se utiliza debe ser específico, en este caso, bajo la malla $\frac{3}{4}$ (aproximadamente 19 mm). Posteriormente, se aglomera el material mediante un proceso que consiste en unir partículas finas de mineral en grumos más grandes y resistentes, lo que permite que el líquido lixivante penetre mejor y extraiga los metales de manera más eficiente. Luego, se riegan las columnas con un sistema de goteo, y para realizar una comparación entre las dos columnas, se cambia un parámetro, en este caso, la concentración de ácido sulfúrico (1N y 2N). Una vez regadas las columnas, se obtiene la solución rica (PLS), que se analiza mediante un análisis volumétrico para determinar el porcentaje de cobre presente en la solución, lo que permite a su vez calcular la masa de cobre obtenida en el periodo total de riego al considerar los volúmenes extraídos desde la columna durante el periodo completo.

Fue posible obtener resultados que permiten comparar el % de recuperación de cobre con ácido sulfúrico en diferentes concentraciones, es así que utilizando ácido sulfúrico 1N la recuperación metálica fue de %97,6 en 5 días, mientras que con el ácido de concentración 2N a los 4 días se recuperó el 100% de cobre soluble que había en 2,744 kg.

ABSTRACT

In the laboratory of the University of Atacama, Vallenar Campus, there is a leaching column for metal extraction. Leaching is a chemical process that involves extracting metals or valuable substances from minerals or materials using a liquid solution that dissolves and separates the metals from the gangue. However, the existing column is large and requires large amounts of material to perform an analysis, making the process slow and costly. Therefore, it is necessary to create a smaller and more efficient version of the leaching column, which allows for faster and more effective analysis and comparisons.

The objective of this project is to design and construct a laboratory leaching column that can be used by students within the time frame of a course. To achieve this objective, two leaching columns were designed and constructed, using graduated cylinders and separating funnels with a volume of approximately 2651 cc. To ensure the efficiency of the leaching process, the size of the material used must be specific, in this case, below a $\frac{3}{4}$ mesh (approximately 19 mm). Subsequently, the material is agglomerated through a process that consists of joining fine mineral particles into larger, more resistant clumps, allowing the leaching liquid to penetrate better and extract the metals more efficiently. Then, the columns are irrigated with a drip system, and to make a comparison between the two columns, a parameter is changed, in this case, the concentration of sulfuric acid (1N and 2N). Once the columns are irrigated, the rich solution (PLS) is obtained, which is analyzed using volumetric analysis to determine the percentage of copper present in the solution, which in turn allows the calculation of the mass of copper obtained in the total irrigation period by considering the volumes extracted from the column during the entire period.

It was possible to obtain results that allow comparing the % of copper recovery with sulfuric acid at different concentrations, thus using 1N sulfuric acid, the metal recovery was 97.6% in 5 days, while with 2N concentration acid, after 4 days, 100% of the soluble copper that was in 2.744 kg was recovered.

CAPÍTULO I. MARCO INTRODUCTORIO

1.1.INTRODUCCIÓN

En el tratamiento de minerales de cobre, existen diversas técnicas para la extracción de los minerales tanto oxidados como sulfurados.

Hoy en día existen una variedad de técnicas en la Ciencia de la metalurgia, una de ellas es la "HIDROMETALURGIA". Dentro de ella existe el "Proceso de Lixiviación", técnica ampliamente utilizada, y siendo una de ellas la más viable, de modo que genera menor impacto ambiental y no como las técnicas del proceso de minerales sulfurados que requieren electricidad o altas temperaturas.

A gran escala la técnica de lixiviación es la más utilizada por las grandes industrias de la minería, de modo que se utilizan en pilas de gran alberga dura de material apilado, a su vez estas industrias mineras aplican una solución acidulada sobre estas, y así extraen en forma líquida, todo el mineral que se encuentre en ella.

El siguiente estudio consiste en realizar el proceso de lixiviación a escala de laboratorio, desde la fabricación de dos columnas de vidrio de pequeñas dimensiones, que permitan realizar análisis en tiempo real dentro de un mismo semestre manejando los parámetros de la lixiviación, de manera de mantener la mayor parte constantes y uno variable cada vez. Los resultados podrán ser monitoreados a partir de la solución de PLS (*pregnantleachsolution*) obtenida.

1.2. OBJETIVO GENERAL

Implementar columnas de lixiviación a escala de laboratorio en la Sede Vallenar de la Universidad de Atacama.

1.3.OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Confeccionar columnas de lixiviación a escala de laboratorio.
- ✓ Realizar análisis fisicoquímico a mineral de estudio.
- ✓ Realizar pruebas de lixiviación utilizando las columnas y variando un parámetro a la vez.

1.4.PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el laboratorio de la Universidad de Atacama, sede Vallenar, se dispone de una columna de lixiviación de grandes dimensiones para la extracción de especies de interés comercial desde el mineral por vía húmeda o hidrometalurgia. Sin embargo, esta columna presenta limitaciones significativas para la investigación y el análisis de parámetros, debido a su gran tamaño. En efecto, la columna requiere grandes cantidades de material (mínimo 50 kg) para realizar un solo análisis, lo que hace inviable la comparación de parámetros en un plazo razonable toda vez que la lixiviación total del mineral en la columna demoraría cerca de 8 a 12 semanas, sería imposible realizar comparación de parámetros dentro de un mismo semestre, en el caso de los proyectos de titulación y más aún cuando se necesita resolver una experiencia de laboratorio para la cátedra de hidrometalurgia donde la lixiviación es una unidad dentro de la asignatura. Por lo tanto, es necesario implementar una columna de lixiviación a escala de laboratorio más eficiente, que permita realizar análisis y comparaciones de parámetros de manera más rápida y efectiva.

1.5.HIPÓTESIS

Se espera que la implementación de una columna de lixiviación a escala de laboratorio diseñada y construida específicamente para la investigación y el análisis de parámetros, permita reducir significativamente el tiempo y el costo de los análisis, mejorar la eficiencia del proceso de lixiviación y aumentar la precisión y la confiabilidad de los resultados obtenidos, en comparación con la columna de lixiviación de grandes dimensiones actualmente en uso en el laboratorio de la Universidad de Atacama, Sede Vallenar.

1.6.ANTECEDENTES

Se cuenta actualmente con una columna de lixiviación en el laboratorio químico-metalúrgico de la Sede Vallenar, que se carga con aproximadamente 50 kg de mineral por cada vez que se usa, lo que hace inviable la comparación de parámetros dentro de un mismo semestre. Sin embargo, el uso previo de la columna por estudiantes de último año de la carrera de Técnico en Metalurgia ha dejado informes de proyecto de titulación previos, con los que es posible obtener información del proceso de lixiviación de minerales óxidos de cobre.

1.7.JUSTIFICACIÓN

La Intención del estudio es fortalecer las técnicas ya adquiridas y enseñadas anteriormente por la Universidad de Atacama de forma teórica, aplicando la práctica. Ya que con el “hacer” se logra desarrollar un aprendizaje significativo por parte de las y los estudiantes. Actualmente el laboratorio cuenta con una columna, pero de grandes dimensiones lo que no permite desarrollar estudios comparativos dentro de un semestre. Además se debe ocupar una gran cantidad de mineral y esto complica si se quiere repetir el análisis con el mismo mineral.

Al confeccionar columnas más pequeñas se podrá desarrollar en clases y en el tiempo destinado de un semestre académico pruebas comparativas y utilizar un mismo mineral de modo que sea real el que solo una variable se modifique a la vez.

El proyecto permitirá que se consoliden los conocimientos en las asignaturas de hidrometalurgia, así como Taller III Operaciones Industriales y apoyará a los y las estudiantes de Proyecto de titulación que quieran hacer análisis del proceso de lixiviación. Además, esto hará posible el desarrollo de investigación aplicada para los proyectos que se concursan desde la Sede.

1.8.ALCANCE

El proyecto permitirá que las y los estudiantes del área de geominería tengan posibilidad de aprender en forma práctica el proceso de lixiviación de minerales oxidados. Además servirá para que los docentes investigadores puedan realizar pruebas que permitan desarrollar nuevas metodologías e implementar mejoras a los procesos que actualmente se manejan. Por lo tanto el alcance es de las y los estudiantes de la Sede Vallenar así como beneficia a las y los docentes investigadores.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

El presente capítulo se dedica a la revisión del marco teórico que sustenta el proceso de lixiviación. Se busca proporcionar una visión general clara y concisa de los conceptos y principios teóricos que rigen este proceso, con el fin de establecer una base sólida para la comprensión y análisis de los resultados obtenidos en este estudio.

2.1. HIDROMETALURGIA

La Hidrometalurgia es la rama de la Metalurgia que cubre la extracción y recuperación de metales usando soluciones acuosas u orgánicas. Es por lo tanto, una ciencia que consiste en trasladar iones metálicos de una fuente de alimentación (como un yacimiento minero, concentrados, residuos intermedios o materias primas metálicas recicladas, incluidas las pilas) a una solución acuosa.

Los elementos valiosos se recuperan de la solución en forma de productos intermedios o finales comercializables obtenidos mediante reacciones que ocurren en medio líquido. (Universidad de Santiago de Chile, s.f.) (Ver figura 2.1)

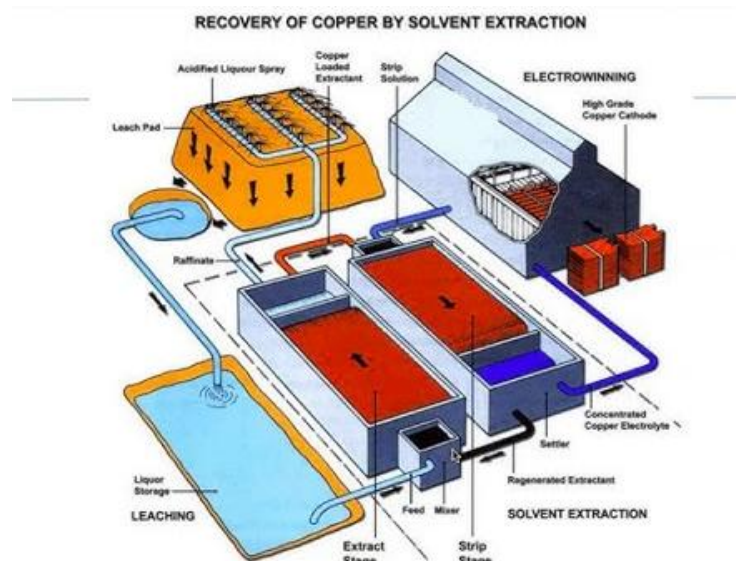


Fig. 2.1. Esquema del proceso de hidrometalurgia del cobre

2.2. LIXIVIACIÓN DE MINERALES DE COBRE

Tiene por objetivo la obtención del cobre de los minerales oxidados que lo contienen, aplicando una disolución de ácido sulfúrico y agua. Este proceso se basa en que los minerales oxidados son sensibles al ataque de disoluciones ácidas. Se realiza mediante el “heapleaching” (lixiviación en pilas), consistente en el apilamiento de grandes cantidades de minerales que se riegan con disoluciones diluidas de ácido sulfúrico formando una disolución de sulfato de cobre (CuSO_4) (Ver figura 2.2).

Estas pilas se realizan encima de superficies previamente impermeabilizadas y preparadas para recoger todo el líquido procedente de la lixiviación, que contienen óxidos de cobre así como sulfuros. Este proceso se alarga durante meses o incluso años hasta que se agota el cobre de la pila de

material. De la lixiviación se obtienen disoluciones de sulfato de cobre con concentraciones de hasta 9 g/l de cobre. (Universidad Politécnica de Valencia, s.f)



Fig. 2.2 Piscinas de Lixiviación

2.3 PROCESOS DE LIXIVIACIÓN

La lixiviación consiste en la disolución selectiva de la especie de interés del mineral, por acción de un agente lixivante externo o proporcionado directamente por el mineral en condiciones apropiadas.

La práctica industrial de la LX presenta diferentes sistemas de operación que se seleccionan de acuerdo a factores técnicos y económicos en el análisis de un proyecto, algunos de los cuales son:

- ✓ Ley de la especie de interés a recuperar.
- ✓ Reservas de mineral.
- ✓ Caracterización mineralógica y geológica.
- ✓ Comportamiento metalúrgico.
- ✓ Capacidad de procesamiento.
- ✓ Costos de operación y de capital.
- ✓ Rentabilidad económica, etc.

Los procesos de lixiviación dependiendo de las condiciones de concentración del mineral (mineral de alta ley o baja ley), y de sus características químicas y mineralógicas (sulfuros, óxidos o mixtos) se pueden efectuar en los siguientes tipos de procesos:

Lixiviación de lechos fijos.

- ✓ LX in place o in situ.
- ✓ LX en Botaderos.
- ✓ Lix. Bacteriana
- ✓ LX en Bateas.
- ✓ LX en Pilas.

Lixiviación de pulpas.

- ✓ LX por Agitación.
- ✓ LX en Autoclaves, a presión. (Universidad Arturo Prat Iquique - Chile, s.f)

A. LIXIVIACIÓN IN PLACE O IN SITU.

La LX in place se refiere a la LX de residuos fragmentados dejados en minas abandonadas, mientras La LX in situ se refiere a la aplicación de soluciones directamente a un cuerpo mineralizado.

Estas operaciones presentan actualmente un gran interés por los bajos costos de inversión y operación que se requieren, y que posibilitan recuperar valores metálicos que de otra manera no podrían ser extraídos.

Los bajos costos son consecuencia de evitar o al menos disminuir los costos de extracción minera, el transporte del mineral a la planta y de los desechos finales del proceso, y la construcción de una planta de LX. Se aplica cuando la ley es muy baja, el mineral o especie de interés es de poco valor, o como en el caso del Uranio, existe el peligro de hacer una mina abierta puesto que es necesario evitar la radiación.

La recuperación es baja $< 50\%$. Los tiempos de LX son de meses hasta años. (Universidad Arturo Prat Iquique - Chile, s.f) (Ver figura 2.3)

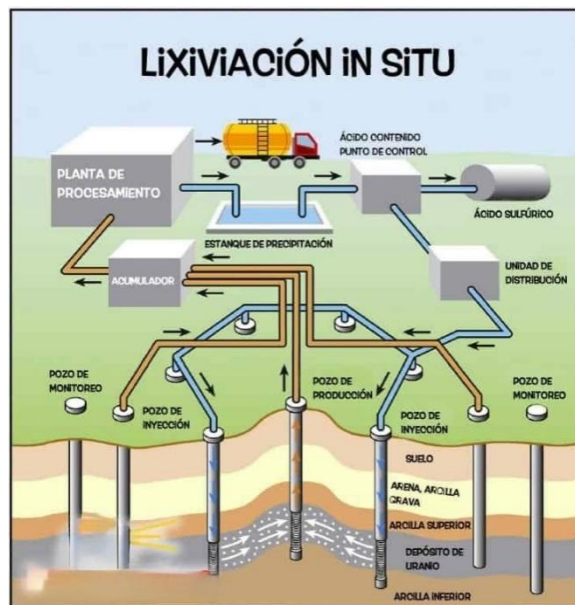


Fig. 2.3 Lixiviación in situ

B. LIXIVIACIÓN EN BOTADEROS (DUMP LEACHING).

Esta técnica consiste en lixiviar minerales de leyes marginales ($< 0.5\% \text{ Cu}$), manejando así grandes volúmenes de material que son depositados sobre la topografía existente en la zona, aprovechando las pendientes para el drenaje natural de soluciones.

La solución lixiviante es aplicada sobre la superficie, mediante un sistema de distribución, percolando a través del lecho por gravedad. Las soluciones se alimentan generalmente por aspersión.

Normalmente, son de grandes dimensiones, se requiere poca inversión y es económico de operar, pero la recuperación es baja (30-50 %). El tiempo de LX es excesivo para extraer todo el metal (varios años). La lixiviación en botaderos es una operación de bajo rendimiento (pero de bajo costo). Este tipo de LX permite recuperar el contenido del mineral que podría quedar sin explotar. (Universidad Arturo Prat Iquique - Chile, s.f) (Ver figura 2.4)

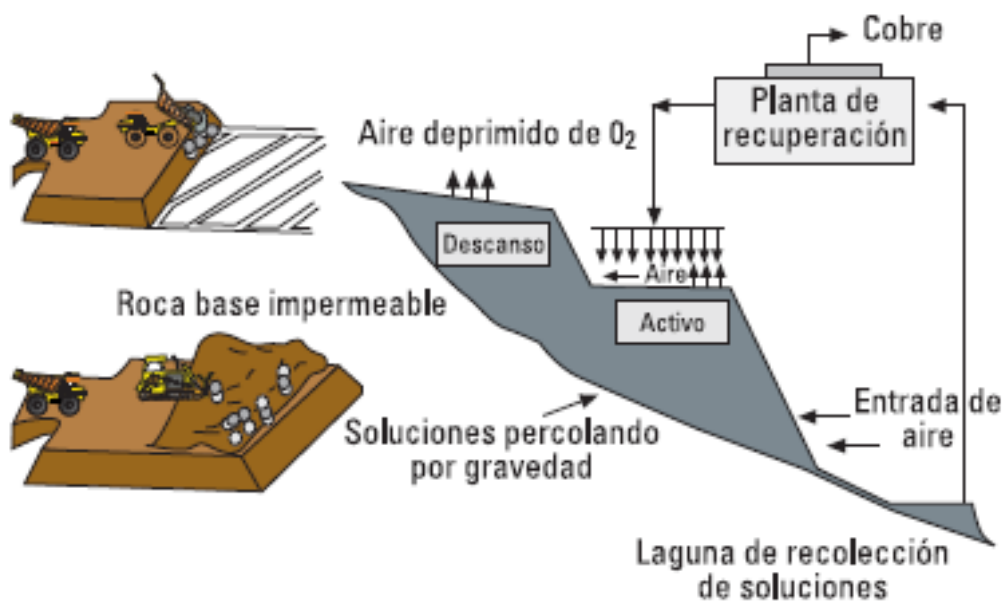


Fig. 2.4 Lixiviación en botaderos

C. LIXIVIACIÓN EN BATEAS (POR PERCOLACIÓN).

Esta técnica consiste en contactar un lecho de mineral con una solución acuosa que percola e inunda la batea o estanque, que está provista de un fondo falso cubierto con un medio filtrante. La geometría del lecho la establece la batea. Este proceso es efectivo en aquellos casos donde el mineral a lixiviar presenta contenido metálico alto, con características especiales: alta ley de óxidos y mineralización expuesta; alta porosidad; baja generación de fino durante el chancado y el ataque químico; baja retención de humedad y mínima compactación del lecho.

Los ciclos de LX son varios días (3 a 14 días); es una tecnología antigua ya en desuso. (Universidad Arturo Prat Iquique - Chile, s.f) (Ver figura 2.5)



Fig. 2.5 Lixiviación en bateas

D. LIXIVIACIÓN EN AUTOCLAVES (A PRESIÓN).

Esta técnica consiste en la disolución selectiva de un mineral en medio acuoso ácido o básico, mediante la aplicación de altas presiones y temperaturas. El proceso se realiza en equipos denominados autoclaves. Éstos permiten controlar la presión interior del reactor y la temperatura de reacción. Este tipo de LX se realiza a mineral fino, cuya extracción por los métodos convencionales es complicada operacionalmente o sube el valor del negocio minero (Universidad Arturo Prat Iquique - Chile, s.f) (Ver figura 2.6)



Fig. 2.6 Lixiviación en autoclaves

E. LIXIVIACIÓN POR AGITACIÓN.

La lixiviación en reactores, es solo aplicable a material finamente molido, ya sean lamas, relaves, concentrados o calcinas de tostación, y se realiza utilizando reactores agitados y aireados. Esta operación permite tener un gran manejo y control del proceso de lixiviación. Además, la velocidad de extracción del metal es mucho mayor que la lograda mediante el proceso de lixiviación en pilas o en bateas. Es un proceso de mayor costo, ya que incluye

los costos de la molienda del mineral. (Universidad Arturo Prat Iquique - Chile, s.f) (Ver figura 2.7)

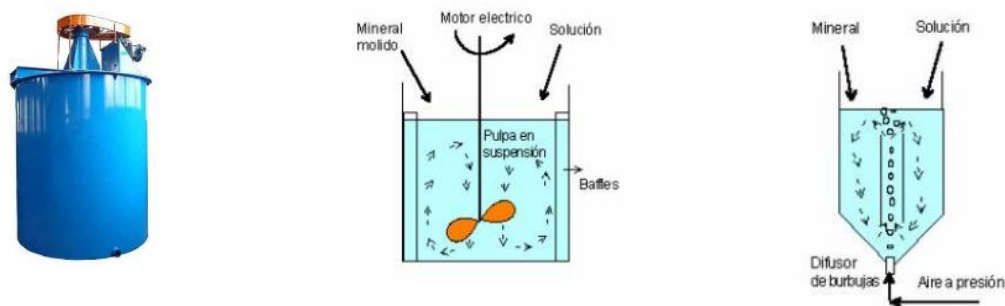


Fig. 2.7 A la izquierda, un tanque de agitación; al medio, esquema de lixiviación con agitación mecánica; a la derecha; esquema de lixiviación por agitación neumática.

F. LIXIVIACIÓN EN PILAS (HEAP LEACHING).

La lixiviación en pilas corresponde a un proceso mediante el cual se procede a extraer metales por percolación de una solución a través de un lecho o pila de mineral. De este modo se obtiene una solución cargada en metales y otros iones la que es conducida a un proceso de recuperación conocido como extracción por solventes. Esta técnica permite obtener el cobre de los minerales oxidados que lo contienen, aplicando una disolución de ácido sulfúrico y agua. Este proceso se basa en que los minerales oxidados son sensibles al ataque de soluciones ácidas. Previo a la formación de la pila, el mineral procedente de la explotación a cielo abierto o subterránea, debe ser preparado en una planta de chancado y/o aglomeración, para conseguir una granulometría controlada que permita una buena permeabilidad del lecho de mineral durante la lixiviación.

Esta lixiviación consiste en la percolación de la solución lixivante a través de un mineral chancado y apilado, el que está formando una pila sobre un terreno previamente impermeabilizado. La base de la pila tiene una pendiente que permita que el líquido escurra a la canaleta de recolección de soluciones. La solución drenada (solución rica) se

recolecta en un estanque, para luego ser enviada a la etapa de recuperación del metal de interés.

La solución rica (PLS pregnantleachsolution) es generalmente impura y diluida y por tanto debe ser purificada y concentrada antes de recuperar el metal. Esto se realiza mediante la extracción por solventes (SX) seguida por la electroobtención (EW) del Cobre. Los tiempos de lixiviación son de algunas semanas en el caso de minerales oxidados y varios meses en el caso de sulfuros.

Una primera clasificación de una pila de LX está dada en conformidad al piso que puede tener, es decir, en función de su método de construcción:

Pila Renovable: Su piso es reutilizable. Se carga el mineral en pila y luego de ser tratado (terminado el Ciclo de LX), se retira el ripio para reemplazarlo con material fresco.

Pila Permanente: Su piso no es reutilizable. El mineral se deposita en la pila y una vez terminado el ciclo de tratamiento no se retira el ripio, sino que se abandona o se utiliza como base para acopiar otra pila sobre él.

Una segunda forma es de acuerdo a su modo de operación, las pilas clasifican en:

Pila Unitaria: Se impermeabilizan diferentes sectores de la planta. Todo el material depositado en los diferentes sectores, pasa simultáneamente por las diversas etapas del ciclo de lixiviación.

Pila Dinámica: Se impermeabiliza un sector de la planta. Coexisten en la pila materiales que están en distintas etapas del ciclo de tratamiento. Con este método se requiere poco terreno, pero el pad debe ser resistente, para permitir un movimiento continuo de material en carga o descarga de las distintas zonas. (Universidad Arturo Prat Iquique - Chile, s.f)
(Ver figura 2.8)

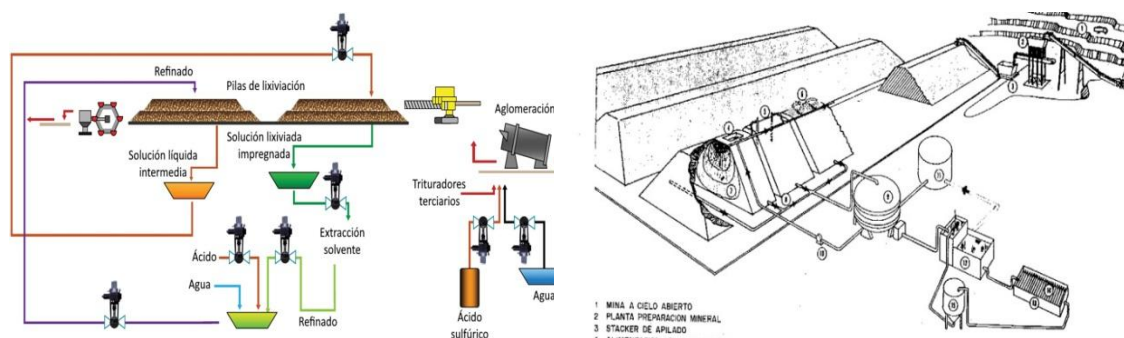


Fig. 2.8 Lixiviación en pilas

G. LIXIVIACIÓN EN COLUMNAS

La lixiviación en pilas es uno de los métodos más utilizados actualmente. De ahí nace el concepto de lixiviación en columna. La columna de lixiviación es la mejor representación de la pila de lixiviación. Este modelo es capaz de representar las mismas condiciones de tratamiento como tasa de riego y concentración de ácido sulfúrico, entregando resultados que también representa los de la pila, como consumo de ácido sulfúrico y recuperación de cobre. Así se intenta buscar a escala laboratorio cuales son los parámetros y condiciones ideales de trabajo de una pila de lixiviación y llevarlos a escala industrial. Los parámetros y condiciones de trabajo dependen de las características físicas, químicas como leyes de cobre e impurezas, etc. Y por último las características metalúrgicas como consumo de ácido, recuperación de cobre, interferentes, aglomerado-curado, lixiviación columnar, etc. Todos estos datos se obtienen de pruebas y metodologías detalladas de pruebas básicas metalúrgicas y de pruebas de lixiviación en columnas ISO-pH. (Donoso, 2013)



Fig. 2.9 Lixiviación en columnas

2.4 AGLOMERACIÓN

Con el fin de que los minerales tengan una mejor respuesta a la lixiviación, se realizan pretratamientos químicos conocidos como curado y aglomeración, los cuales consisten en adicionar reactivos para acondicionar el mineral de manera de facilitar la disolución de los metales de interés. Adicionalmente, permite que los finos se adhieran a las rocas de mayor tamaño, generando partículas conocidas como glómeros, los cuales mejorarán la permeabilidad de la pila, facilitando la reacción entre el mineral con la solución durante la lixiviación.

Luego de la etapa de curado y aglomeración, el mineral se deja reposar antes de comenzar el riego, con el objetivo de incrementar la tasa de extracción y una reducción de la competencia por el ácido al pasivar la ganga.

La dosificación de ácido u otros reactivos y el tiempo de reposo se determinan realizando pruebas metalúrgicas. (Vicente, 2021) (Ver figura 2.10)

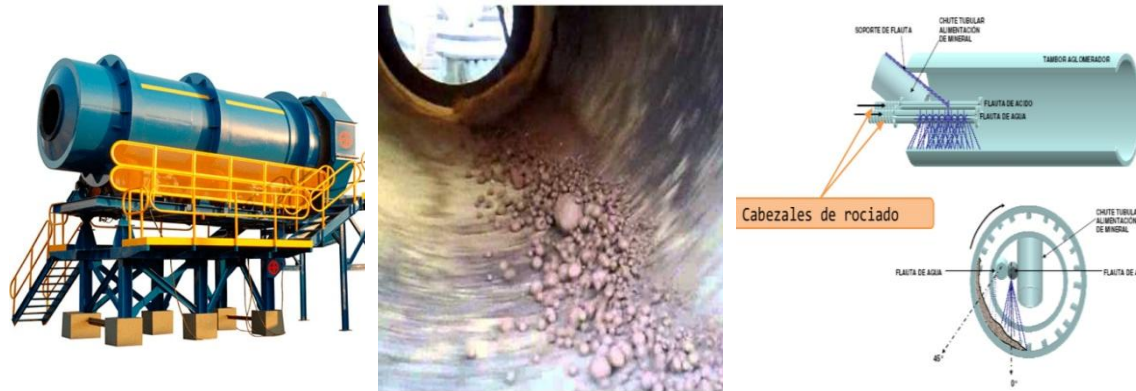


Fig. 2.10 Aglomeración

2.5 CONO DE CUARTEO

El cono de cuarteo es una técnica de muestreo utilizada para obtener una muestra representativa de un material granular. El procedimiento implica verter la muestra en forma de cono, aplanarla para formar una "tortilla", dividirla en cuatro partes iguales y tomar dos partes opuestas para el análisis (Martínez J. , 2010) (Ver figura 2.11)

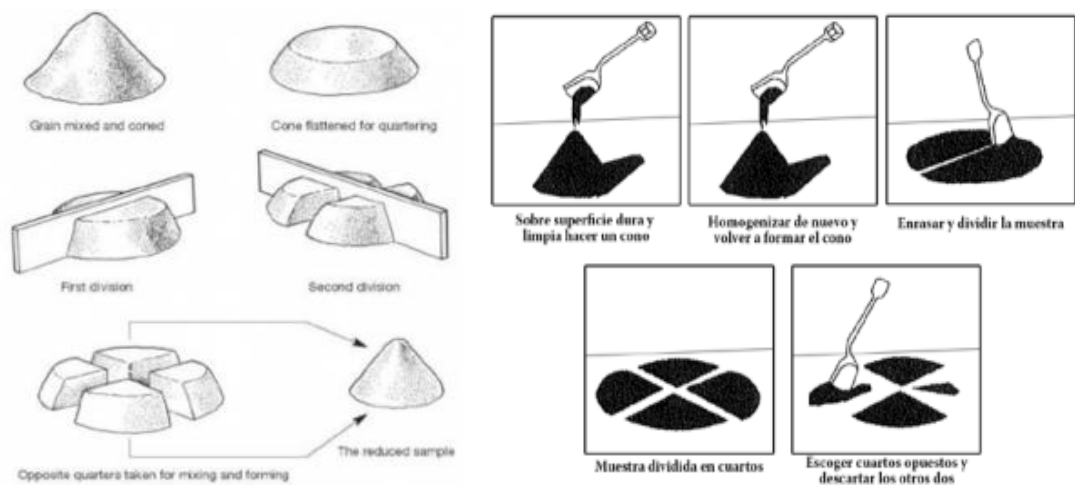


Fig. 2.11 Técnica de muestreo Roleo, cono y cuarteo

2.6 CORTADOR DE RIFLES

El cortador de rifles (o partidor de Jones) es una herramienta utilizada para dividir una muestra en dos sub-muestras representativas. Funciona vertiendo la muestra en el cortador, donde el material se divide en dos canales. Este proceso se puede repetir hasta obtener una muestra del tamaño adecuado para el análisis (González A. , 2015) (Ver figura 2.12)

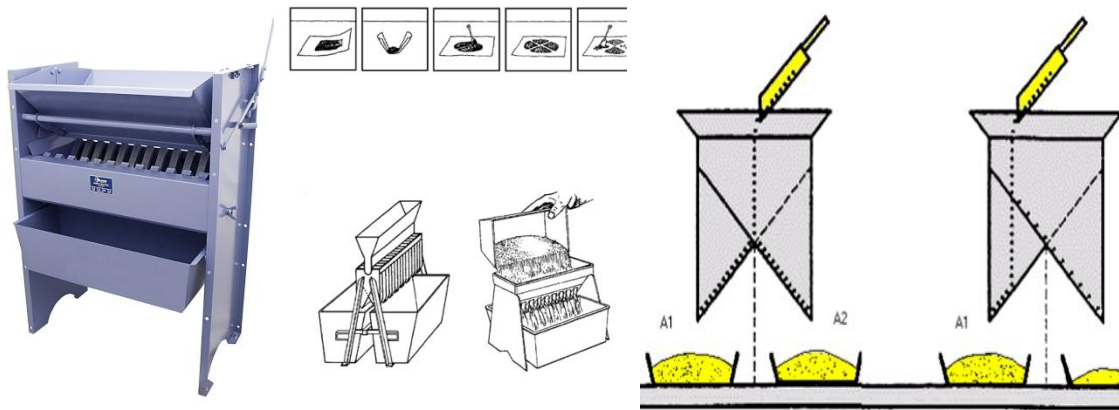


Fig. 2.12 Técnica de muestreo cortador de rifles

2.7 TÉCNICA DE TAMICES (RO - TAP)

El Ro-tap es un equipo utilizado para el análisis granulométrico de materiales, especialmente en minería. Las técnicas de tamices Ro-tap incluyen la preparación de la muestra, el tamizado y la recolección y análisis de las partículas separadas (López P, 2017) (Ver figura 2.13)

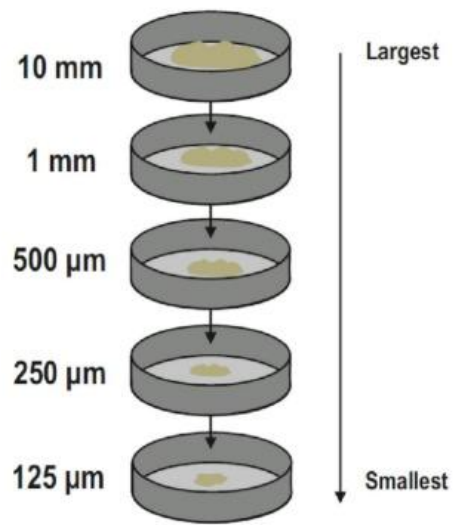


Fig. 2.13 Tamices

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

Para una mayor comprensión del capítulo III, se describirá el procedimiento de acuerdo a cada objetivo específico planteado

3.1 CONFECCIONAR COLUMNAS DE LIXIVIACIÓN A ESCALA DE LABORATORIO.

En primer lugar se visita la Casa Central de la Universidad, específicamente los laboratorios de la carrera de Ingeniería Civil en Metalurgia, en una salida a terreno a cargo de la profesora Carolina Venegas, en la oportunidad se solicita ver el laboratorio de Hidrometalurgia en el cual se encuentran varias columnas de lixiviación de distintas dimensiones pero que son a escala de laboratorio. Se toman las medidas y se obtienen fotos de las mismas con la finalidad de replicar sus dimensiones para poder realizar un diseño similar para poder construirlas. Gracias al recorrido por las instalaciones se pudo generar una idea más completa de cómo Fabricar las columnas de lixiviación. (Ver figura 3.1)



Fig 3.1 Ideas de columnas

3.2 CONFECCIÓN DE LAS COLUMNAS DE LIXIVIACIÓN

Una estudiante que forma parte del equipo de este proyecto de titulación realiza su práctica profesional en el laboratorio de la planta Cobre Norte. El encargado de laboratorio de dicha Planta proporciona asistencia técnica con el trabajo que se propone realizar en el proyecto y encarga dos probetas de 2000 mL (Ver figura 3.2). Para la realización de las columnas de lixiviación a escala de laboratorio. Para ello, se deben modificar las probetas para adaptarlas a las necesidades específicas del proceso de lixiviación. La primera etapa consiste en cortar la base de las probetas y la mitad de un embudo de decantación (Ver figura 3.3). Después de varios intentos, se logra cortar las probetas utilizando un disco de diamante, de la misma forma se corta el embudo de decantación, esto es para procurar que no queden relieves ni partes que puedan generar un daño por corte (Ver figura 3.4). A continuación, se busca un pegamento adecuado para unir las probetas y el embudo de decantación, teniendo en cuenta que el proceso de lixiviación implica el uso de ácido sulfúrico



Fig. 3.2 Probetas 2000 mL



Fig. 3.3 Embudos de decantación



Fig. 3.4 Cortes realizados

Se selecciona un pegamento que resiste al ácido sulfúrico y también es capaz de unir vidrio. Este pegamento se llama Durepoxi Líquido Loctite, un adhesivo epoxi de alta resistencia y durabilidad (Ver figura 3.5). Una vez que se tienen los componentes

necesarios, se procede a unir las probetas y el embudo de decantación para formar las columnas de lixiviación.

Para realizar la unión, se mezclan los componentes A y B del pegamento, según las instrucciones del fabricante. Luego, se aplica la mezcla a la zona de unión entre la probeta y el embudo, y se deja reposar durante 24 horas para permitir que el pegamento cure completamente. (Ver figura 3.6)

Posteriormente, se realiza una prueba de filtración para asegurarse de que la unión sea hermética y no presente fugas. Los resultados de la prueba confirman que el pegamento es eficiente y cumple con las necesidades, proporcionando una unión resistente y duradera que soporta las condiciones de la lixiviación. (Ver figura 3.7)



Fig. 3.5 Durepoxi líquido



Fig. 3.6 Unión Realizada



Fig. 3.7 Prueba de filtración columnas

Además, se confecciona una base para ubicar las columnas de lixiviación, lo que permitirá realizar el proceso de lixiviación de manera segura y eficiente.

Finalmente se llevan las columnas y sus soportes al laboratorio químico metalúrgico para poder realizar las pruebas de lixiviación del mineral óxido de cobre.

Con la finalización de esta etapa, se ha completado con éxito la confección de las columnas para lixiviación. (Ver figura 3.8)



Fig. 3.8 Columnas instaladas en soportes

3.3 PROCEDENCIA DEL MATERIAL/ MINERAL

Su Procedencia es del laboratorio de geología de la Universidad de Atacama Sede Vallenar entregado por el docente Felipe Pizarro Barraza. (Ver figura 3.9)



**Fig. 3.9 Material a utilizar tamaño
sobre 1^{1/4}”**

3.4. PREPARACIÓN DEL MATERIAL/MINERAL

A. CLASIFICACIÓN Y CHANCADO AL MATERIAL

El 30 de septiembre de 2024, los estudiantes se reúnen con su profesora tutora, Carolina Segovia, en la Universidad de Atacama, sede Vallenar, con el objetivo de viajar a Copiapó y aplicar una conminución al material sobre tamaño para utilizarlo en las columnas de lixiviación.

Al llegar a la Universidad de Atacama, sede Copiapó, son recibidos por los profesores del área de Metalurgia, quienes les proporcionan equipo de protección personal (EPP) para realizar las operaciones de clasificación por Ro-Tap (tamices) y la operación de chancado III.

Antes de comenzar con las actividades, disponen el material traído de Vallenar en bandejas, lo que facilita la manipulación de las muestras.

B. CLASIFICACIÓN POR RO-TAP GILSON TEST-MASTER.

Durante la clasificación del material, se utiliza el Ro-Tap Gilson Test-Master, que cuenta con una capacidad de 6 bandejas. Este equipo permite realizar separaciones precisas del tamaño de las partículas, especialmente adecuado para muestras grandes. Su capacidad para clasificar tamaños grandes lo convierte en un clasificador eficiente.

Para seleccionar la granulometría adecuada del material, se utiliza la malla o bandeja #3/4". Esta granulometría es necesaria para los procesos posteriores.

Una vez que se prepara el Ro-tap con la malla $\frac{3}{4}$ " y se dispone el material para clasificar, se enciende el Ro-tap Gilson Test-Master para iniciar la operación de clasificación del material. A continuación, se vierte el material sobre el Ro-Tap Test-Master, aplicando esta operación durante al menos 5 minutos de funcionamiento. (Ver figura 3.10)



Fig. 3.10 Ro-Tap Gilson Test-Master en funcionamiento

Una vez finalizada la clasificación, se observa que todo el material se encuentra retenido en la malla de 1" de tamaño, es decir, por encima de esta medida. De hecho, ninguna partícula logra pasar por las mallas, lo que indica que todo el material tiene un tamaño superior a 1" y, por lo tanto, se clasifica como sobre tamaño en la malla correspondiente. (Ver figura 3.11)

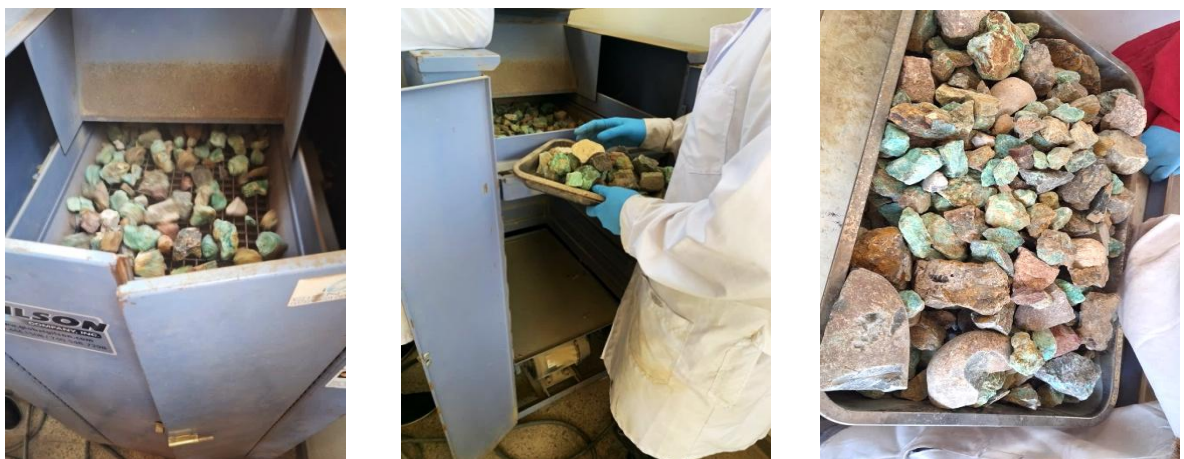


Fig. 3.11 Clasificación del material por Ro-Tap Gilson Test-Master quedando retenido sobre 1^{1/4}"

Teniendo en cuenta el Factor “Sobre Tamaño” del material, solo queda aplicar la operación de Chancado Terciario al material para realizar la reducción de Tamaño y obtener la granulometría deseada. (Ver figura 3.12)



Fig. 3.12 Disposición del material ST en bandejas para comenzar la reducción de tamaño

C. APLICACIÓN DE CHANCADO TERCIARIO PARA LA REDUCCIÓN DE TAMAÑO DEL MATERIAL

Antes de utilizar el chancador de la Universidad de Atacama, sede Copiapó, el docente del área de Minería/ Metalurgia don Francisco Donoso, verifica la abertura del chancador. Para ello, mide las aberturas de la bandeja o malla #3/4 del Ro-Tap Gilson Test-Master utilizando un pie de metro. Luego, calibra una manilla reguladora de distancia en el chancador, ajustándola a una abertura de compresión exacta de 19 mm (3/4"). De este modo, se garantiza el chancado III para obtener la granulometría deseada, que es inferior a la malla #3/4.

En aproximadamente 2 horas, se completa la operación de chancado terciario del material sobre tamaño traído desde la sede Vallenar. Posteriormente, se recolecta el material en un contenedor con la granulometría deseada y se almacena en bolsas plásticas para su posterior análisis. (Ver figura 3.13)



Fig. 3.13 Chancador III para la reducción de tamaño del material

3.5 PRUEBAS DE LA RESISTENCIA DEL PEGAMENTO

En el marco de las pruebas de resistencia del pegamento, se evalúa su capacidad para soportar el ácido sulfúrico. En una primera instancia, se aplica directamente ácido sulfúrico al 98% a una película de pegamento y resina dispuesta en un vaso precipitado. Sin embargo, los resultados son negativos, ya que la película de durepoxi se desintegra, lo que sugiere que el pegamento podría contaminar la muestra (PLS) y provocar daños en la unión de las columnas durante el proceso de lixiviación.

Ante estos resultados, se decide realizar una segunda prueba, diluyendo el ácido sulfúrico a 1N. En esta ocasión, se utiliza un vaso precipitado con otra película de pegamento y resina, y se aplica el ácido sulfúrico 1N, dejándolo reposar durante 24 horas. Los resultados de esta prueba son positivos, ya que la película de pegamento y resina no se desintegra ni presenta defectos después de estar en contacto con el ácido sulfúrico 1N durante 24 horas. Esto permite continuar con mayor seguridad en el proceso de lixiviación. (Ver figura 3.14)



Fig. 3.14 Prueba de resistencia del durepoxi con ácido 1N

3.6 SISTEMA DE GOTEO PARA LAS COLUMNAS DE LIXIVIACIÓN

Antes de diseñar un sistema de goteo, se modifica cuidadosamente la columna de lixiviación de grandes dimensiones existente en el laboratorio de Metalurgia. Se realiza una modificación específica en la estructura de soporte de la columna, reemplazando la madera original.

Posteriormente, se realizan cuatro perforaciones precisas en la madera de soporte de la columna, con el objetivo de instalar bidones con soluciones aciduladas a una altura óptima que no afecte la presión del goteo. Además, se disponen sondas a través de los orificios para conectarlas directamente a las columnas de lixiviación. (Ver figura 3.15)



Fig. 3.15 Instalación del sistema de goteo para cada columna

3.7 CÁLCULO DEL VOLUMEN DE LA COLUMNA N°1

Teniendo ya la estructura y los soportes de las columnas listas se procede a los cálculos de las mismas, para determinar el Volumen que soportan, de la siguiente manera:



Volumen de un Cilindro

$$\pi r^2 h$$

$$3.1416 \times (4,15)^2 \times 49 = 2.651,197894$$

$$V = 2.651,197894 \text{ cm}^3$$

Cálculo del Volumen la Columna N°2



Volumen de un Cilindro

$$\pi r^2 h$$

$$3.1416 \times (4,15)^2 \times 49 = 2651,197894$$

$$V = 2.651,197894 \text{ cm}^3$$

3.8 CÁLCULO DE LA DENSIDAD DEL MATERIAL

Para calcular la densidad del material, se realizaron 6 pruebas para tener un valor representativo de la densidad de este.

Consiste en extraer y seleccionar 6 piedras de un tamaño intermedio (ni muy pequeñas ni muy grandes) desde el material/lote seleccionado anteriormente mediante cono cuarteo, con un peso total de 2.744 kg, se realizó lo siguiente:

Materiales

- 1 Probeta de 100ml
- Balanza
- 6 piedras de Tamaño intermedio
- Pinzas

Una vez teniendo los materiales listo, se comienza pesando una probeta de 100 mL, en una balanza para luego tarar el peso de la probeta vacía, una vez hecho esto se le agrega a la probeta 60mL de agua de la llave para tomar las mediciones correcta.

En la primera prueba se dispone la probeta de 100mL, en un lugar que no tenga desnivel, luego con 1 pinza, se toma la primera piedra y se pesa en la balanza teniendo un peso de 10,02g.

Con mucho cuidado de salpicar agua, se introduce en la probeta con los 60 mL aumentando a un valor de 64 mL, luego de ver un aumento de 4ml quedando en 64 mL, se realiza una división de por el valor de los 4 mL que aumento el agua en la probeta para luego dividirlos por el peso de la partícula del material, la primera prueba tuvo un peso de 10,02g, los cuales se dividen por los 4 mL que aumento el volumen del agua , se realiza la división dándonos un resultado de $2,5 \text{ g/cm}^3$ de densidad de la primera partícula del material. Para las siguientes pruebas se realiza la misma metodología tratando de no desperdiciar ningún mL de agua, para luego promediar los 6 valores de las 6 pruebas de densidad para determinar la densidad específica del material, quedando de la siguiente manera los resultados: (Ver figura 3.16)

$$\checkmark \frac{10,02}{4} = 2,5 \text{ g/cm}^3$$

$$\checkmark \frac{6,08}{3} = 2,0 \text{ g/cm}^3$$

$$\checkmark \frac{12,68}{4} = 3,2 \text{ g/cm}^3$$

$$\checkmark \frac{9,67}{3} = 3,2 \text{ g/cm}^3$$

$$\checkmark \frac{8,63}{3} = 2,8 \text{ g/cm}^3$$

$$\checkmark \frac{12,11}{4} = 3,0 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{PROMEDIO DE LA DENSIDAD } \frac{16,7}{6} = 2,8 \text{ g/cm}^3$$



Fig. 3.16 Medición de la densidad con tamaños intermedios del material utilizando una probeta de 100 mL

3.9. PEAP/ PESO APARENTE PARA AMBAS COLUMNAS

Para calcular el peso que soportara la columna se debe obtener la incógnita del peso específico aparente, una vez teniendo la densidad del mineral y el volumen se puede resolver la siguiente ecuación

$$PEAP = \frac{M}{VAP}$$

Cálculo del peso aparente para las columnas 1 y 2, esta medición se tomó con una probeta plástica, para determinar el espacio que existe entre el material y la probeta, llenando así, la probeta plástica hasta unos 500ml, dándonos el siguiente resultado: (Ver figura 3.17)



Fig.3.17 Probeta plástica de 500 cc para la prueba del peso específico aparente

$$PEAP = \frac{M}{VAP} \rightarrow \frac{793,12g}{500cm^3} = 1,58424 \text{ g/cm}^3$$

Entonces reemplazamos el volumen original de la probeta plástica de 500mL por el volumen de las columnas de vidrios que tienen 1900 mL c/u quedando el cálculo de la siguiente manera.

$$M = PEAP \cdot VAP$$

$$M = PEAP \cdot VAP = 1,58424 \cdot 1900 = 3010$$

$$M = 3010g$$

3.10 CÁLCULO DE LA CONCENTRACIÓN DE ÁCIDO 1N -2N

Para saber la normalidad del ácido sulfúrico, que se encuentra en el laboratorio Metalúrgico de la sede costanera, se debe aplicar una fórmula que va de la siguiente manera.

En la formula el “N” significa la NORMALIDAD, esa es la normalidad de la concentración total que queremos obtener en la solución a preparar a partir de:

- M/M % = significa es el porcentaje masa/masa que está en la solución inicial que vamos a utilizar (98%)
- D = es la densidad del ácido sulfúrico en específico (este dato es intensivo)
- 10 = el por 10 en la ecuación, siempre va en la formula, va por regla
- EQ = el Peso Equivalente también es intensivo no depende de la concentración, a diferencia de la Densidad, la Densidad depende de la Concentración, porque mientras más agua va hacer más denso el ácido.

Todos estos datos se encuentran en el rotulado del envase del ácido sulfúrico.

$$N = \frac{\frac{m}{m}\% \cdot D \cdot 10}{Eq}$$

% M/M = 98%.

D = Densidad H₂SO₄ = 1.84 g/ml.

Eq= Peso equivalente Ácido Sulfúrico.

$$98/2 = 49\text{g/Eq}$$

$$N = \frac{98\% \times 1.84 \times 10}{49 \text{ Eq}} = 36,8N$$

Resultado de la normalidad del ácido Sulfúrico concentrado que tenemos en la solución sería de = 36,8N

Ahora que sabemos la normalidad de esta solución podemos preparar una solución con una normalidad esperada como por ejemplo de “1N o 2N”

3.11 CÁLCULO DE CONCENTRACIÓN DE NORMALIDAD DEL ÁCIDO SULFÚRICO DESEADA PARA LIXIVIAR

Reemplazando los datos anteriores en esta Formula dice:

$$C1 \cdot V1 = C2 \cdot V2$$

- C1= Representaría a la concentración 1, los datos se reemplazan por los 36,8N.
- V1= Representa el Volumen 1, Esta sería nuestra “incógnita” ya que estamos buscando el volumen de la solución 1, la cual se requiere utilizar.
- C2= Representaría la Normalidad esperada (ejemplo “2N”).
- V2= Representa el Volumen 2 (esto se refiere a la cantidad de volumen que tiene un matraz aforado de 1000ml).

$$C1 \cdot V1 = C2 \cdot V2$$

$$36,8N \cdot X = 2N \cdot 1000mL$$

$$2N \rightarrow N = \frac{2N \times 1000}{36,8} = 54,347 \text{ mL}$$

$$1N \rightarrow \frac{54,4}{2} = 27,2mL$$

3.12 CÁLCULO DE LA SOLUCIÓN ACIDULADA NECESARIA PARA EL SISTEMA DE GOTEO DE LAS COLUMNAS DE LIXIVIACIÓN

Para calcular los litros o cantidad de solución acidulada que se requieren para regar las columnas durante 5 días de pruebas de lixiviación, es necesario calcular el “Flujo Diario de riego” y el “Tiempo de lixiviación” donde:

$$\textbf{Flujo Total} = \textbf{Flujo diario} * \textbf{Tiempo de prueba de lix.}$$

- ✓ Flujo Diario = X
- ✓ Tiempo de prueba de lixiviación = 5 Días

3.13 CALCULO FLUJO DIARIO

Flujo diario se obtiene multiplicando el área de la columna por las 24 hrs diarias de riego equivalentes a 1 día completo de riego y por la tasa de riego referenciada de una planta minera

$$\textbf{Flujo Diario} = \textbf{Area de la columna} * \textbf{Horas diarias} * \textbf{Tasa de riego planta}$$

- ✓ Horas diarias = 24h
- ✓ Tasa de riego = 15L/h m²

- ✓ Área de la columna = $2\pi * r^2$
- ✓ Área de la columna = $2\pi * (4,15)^2$
- ✓ Área Columna = 108,2122 cm²
- ✓ Área de la columna = 0,01082122 m²

RESULTADOS

Entonces:

$$\textbf{Flujo Diario} = \textit{Area de la columna} * \textit{Horas diarias} * \textit{Tasa de riego planta}$$

✓ $\text{Flujo Diario} = 0,01082122 \text{ m}^2 * 24\text{h} * 15\text{L/h m}^2$

✓ **Flujo diario** = 3,90 Litros

El Flujo diario de la solución acidulada que regaría cada columna de lixiviación por separado serían unos 3,90 L por Día.

3.14 CÁLCULO PARA EL FLUJO TOTAL

Para sacar el cálculo del Flujo total se debe multiplicar el Flujo Diario por el Tiempo de prueba de lixiviación para obtener el resultado.

$$\textbf{Flujo Total} = \textit{Flujo diario} * \textit{Tiempo de prueba de lix.}$$

Entonces:

✓ $\text{Flujo Diario} = 3,90 \text{ L/días}$

✓ $\text{Tiempo de Prueba} = 5 \text{ días}$

Resultados:

- $\text{Flujo Total} = 3,90 \text{ L/días} * 5 \text{ días}$

- $\text{Flujo Total} = 19,5 \text{ Litros}$

El resultado del Flujo Total de riego al mineral en las columnas de lixiviación, estimados en 5 días de riego es de 19,5 Litros

3.15 RESUMEN DE LOS CÁLCULOS DE REGADO PARA CADA COLUMNA

- ✓ Flujo Diario de la solución acidulada de riego = 3,90 Litros
- ✓ Flujo Total de solución acidulada de riego a la columna = 19,5 Litros

3.16 CÁLCULO DEL FLUJO POR MINUTO DE LA SOLUCIÓN ACIDULADA PARA EL REGADO DE CADA COLUMNA

Antes de lixiviar se debe tener el conocimiento del Flujo por minuto que regara la columna, gracias a esto se tiene una noción del flujo para evitar cualquier problema como por ejemplo el “apozamiento” de la solución acidulada en cada columna, esto se determina dividiendo el Flujo diario por el tiempo de lixiviación diario.

$$\text{Flujo por Minuto} = \text{Flujo Diario} \cdot \text{Tiempo de lixiviación diario}$$

- ✓ Flujo diario = 3,90 litros
- ✓ Flujo diario en CC. = 3900 cm³
- ✓ T. lixiviación diario = 24h · 60min
- ✓ T. lixiviación diario = 1440

Resultados del Flujo por minuto:

- Flujo por minuto = 3.900cm³ /1.440 min
- **Flujo por minuto = 2.710 cm³/min.**

Se determina que el Flujo por minuto de la solución acidulada del riego para cada Columna de lixiviación es de 2.710 cc/min

Al realizar todos estos cálculos se refieren a:

- ✓ El Flujo por minuto de riego para cada una de las columnas es: 2.710cc/min
- ✓ El flujo diario de riego para cada columna: 3.90 Litros
- ✓ El flujo total de riego para c/u de las columnas es: 19,5 Litros

3.17 ROLEO, CONO Y CUARTEO PARA CARGAR LAS COLUMNAS

Antes de cargar las columnas de lixiviación, es necesario comenzar con el proceso de cono cuarteo, que tiene como objetivo homogenizar y mantener la representatividad de la muestra del lote. Este proceso comienza con un roleo, que permite mezclar y homogenizar el material, asegurando que todo el material quede bien representado.

A continuación, se seleccionan dos partes opuestas de la muestra, de manera que se destaquen las características del material. El peso total de la muestra es de 43,904 kilogramos. Luego, se realiza el cono cuarteo, que consiste en reducir la mezcla y homogenizar la muestra a través de un proceso de roleo y partición.

En este proceso, se crea una "torta" con el material, que se corta en cuatro partes. Luego, se seleccionan las partes opuestas, lo que permite obtener una muestra representativa del material. Este proceso se repite hasta que se obtenga una muestra de aproximadamente 2,5 kilogramos para cada columna de lixiviación. (Ver figura 3.18)

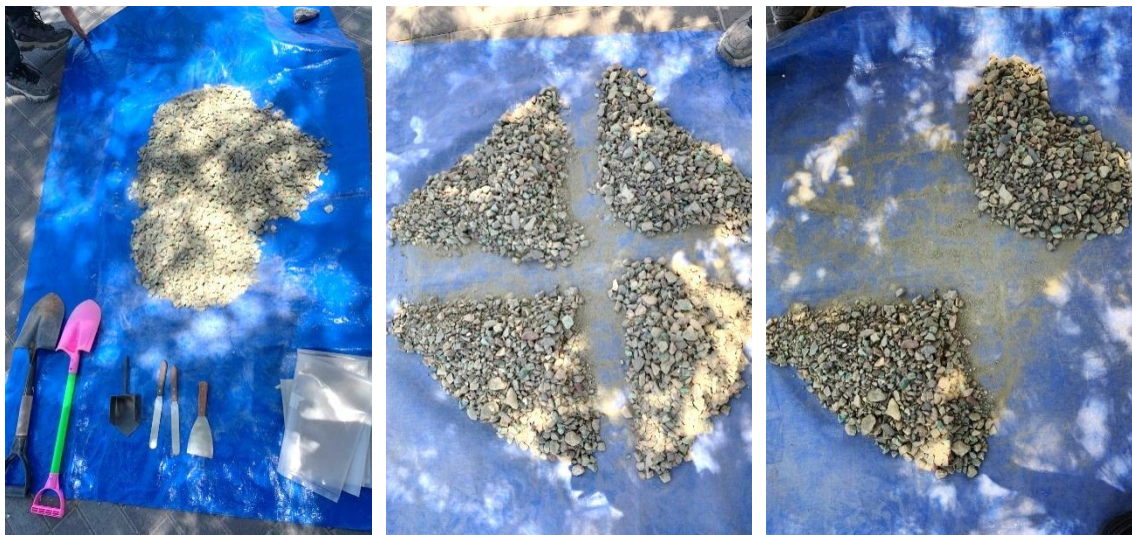


Fig. 3.18 Técnica Roleo, cono y cuarteo para seleccionar muestra representativa

3.18 FILTRO PARA LAS COLUMNAS

Una vez que se ha completado el proceso de cono cuarteo y se ha seleccionado el material para cada columna, se procede a preparar la base de la columna para la lixiviación. Para ello, se agregan bolitas de filtro en la parte inferior de la columna, específicamente en el embudo de decantación, con el objetivo de retener los sólidos y permitir el paso de los líquidos.

Sobre las bolitas de filtro, se coloca un filtro de papel redondo, comúnmente conocido como filtro Whatman, que se utiliza ampliamente en laboratorios para la filtración de líquidos y gases. Este filtro adiciona una capa extra de protección y asegura que los líquidos que pasan a través de la columna estén libres de impurezas. (Ver figura 3.19)

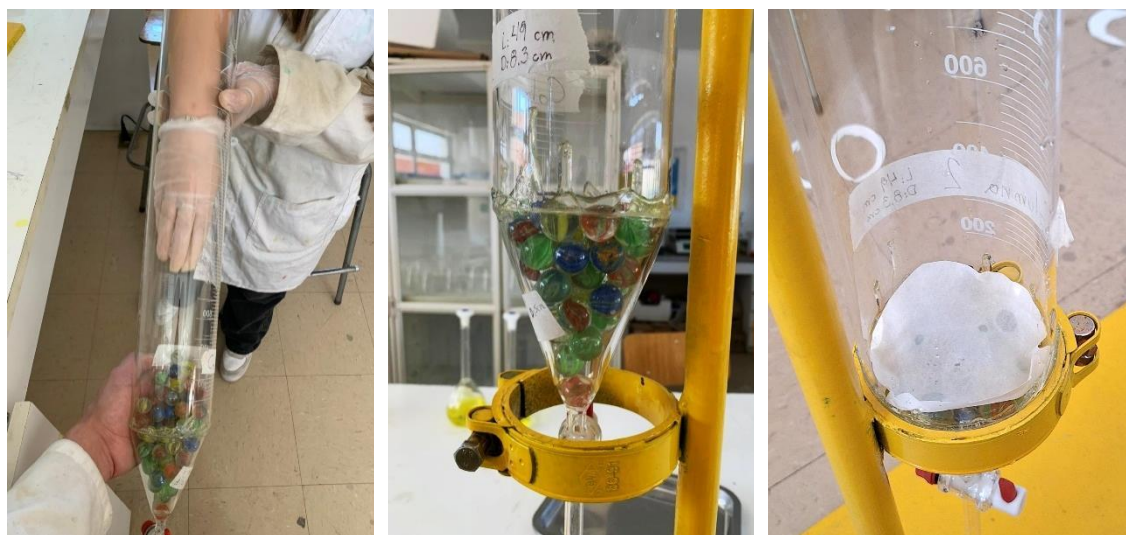


Fig. 3.19 Método de filtración mediante canicas y papel filtro,

3.19 AGLOMERADO

Una vez que se ha configurado el sistema de filtración, se procede a realizar el aglomerado del material, que en este caso se lleva a cabo utilizando solo agua, sin la adición de ácidos. El aglomerado es un paso crucial en el proceso de lixiviación, ya que permite la formación de una masa homogénea y estable que puede ser sometida a la lixiviación

Una vez realizado el filtro, se procede a combinar el material con agua para crear una mezcla homogénea. Esta etapa es crucial para asegurar la uniformidad del material antes de cargar las columnas.

El porcentaje de humedad de la mezcla se determina utilizando la fórmula [insertar fórmula aquí]. Esta medida es esencial para entender las propiedades del material y su comportamiento en el proceso de lixiviación. (Ver figura 3.20)



Fig. 3.20 Aglomeración del mineral con una humedad de 2,6 %

3.20 CARGA DE MATERIAL EN COLUMNAS

Posteriormente, se carga el material preparado en las columnas, utilizando guantes para manejarlo con cuidado y evitar daños a las columnas de vidrio. (Ver figura 3.21)



Fig. 3.21 Carguío de ambas columnas con el material aglomerado al 2,6% de humedad

3.21 PREPARACIÓN DE CONCENTRACIONES DE ÁCIDO

A continuación, se preparan los ácidos N1 y N2, cada uno con diferentes concentraciones, y se cargan en bidones separados. Los bidones se colocan en altura y se conecta el sistema de goteo, que consiste en una bajada de suero, para regular el flujo de ácido. (Ver figura 3.22)



Fig. 3.22 Preparación del Ácido sulfúrico 1N y 2N para llenar los bidones

3.22 FLUJO DE GOTEO

Una vez que el ácido está cargado y el sistema de goteo está implementado, se procede a regular el flujo de goteo. Se ajusta el sistema para obtener 60 gotas por minuto. Para determinar el volumen de líquido que se recoge en un minuto, se utiliza un cronómetro para medir el tiempo que tarda en recogerse 7 mL de líquido, lo que resulta ser 2 minutos. Dado que la probeta comienza a medir desde los 5 milímetros, se toma en cuenta este valor para realizar la medición.

Se calcula que en 1 minuto se recogen 3,5 mL de líquido, lo que equivale a 210 mL en 60 minutos. Por lo tanto, en 24 horas se recogen aproximadamente 5.040 mL. (Ver figura 3.23)

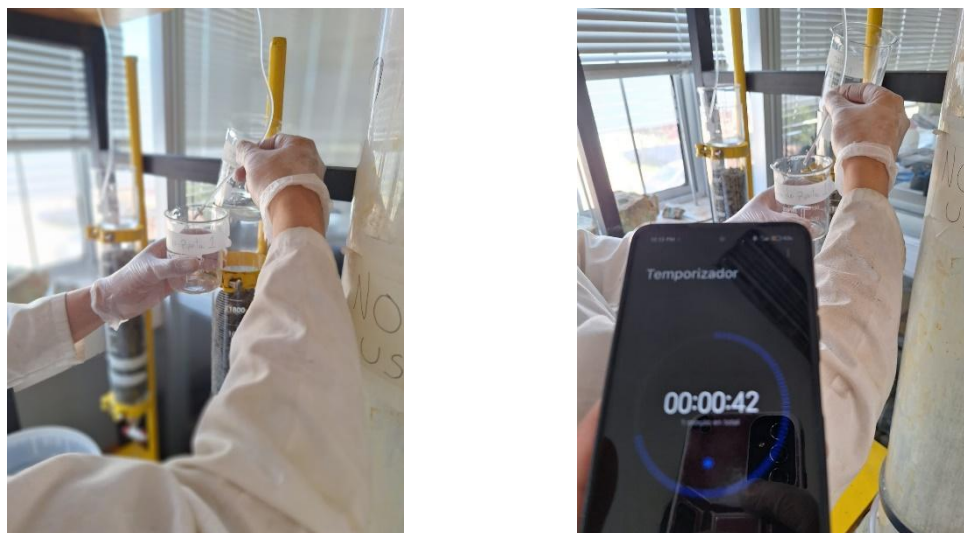


Fig. 3.23 Medición del Flujo del goteo que regara cada columna

3.23 RECOLECCIÓN DE PLS

A medida que el proceso de lixiviación avanza, se van recolectando muestras de líquido cada 12 horas, específicamente a las 9 de la noche y a las 9 de la mañana. Las muestras se recogen en matraces y se rotulan con la siguiente información: día (fecha), columna (ácido 1N o 2N), y hora (AM o PM). Esta información es crucial para llevar un registro detallado del proceso y analizar los resultados obtenidos. (Ver figura 3.24)

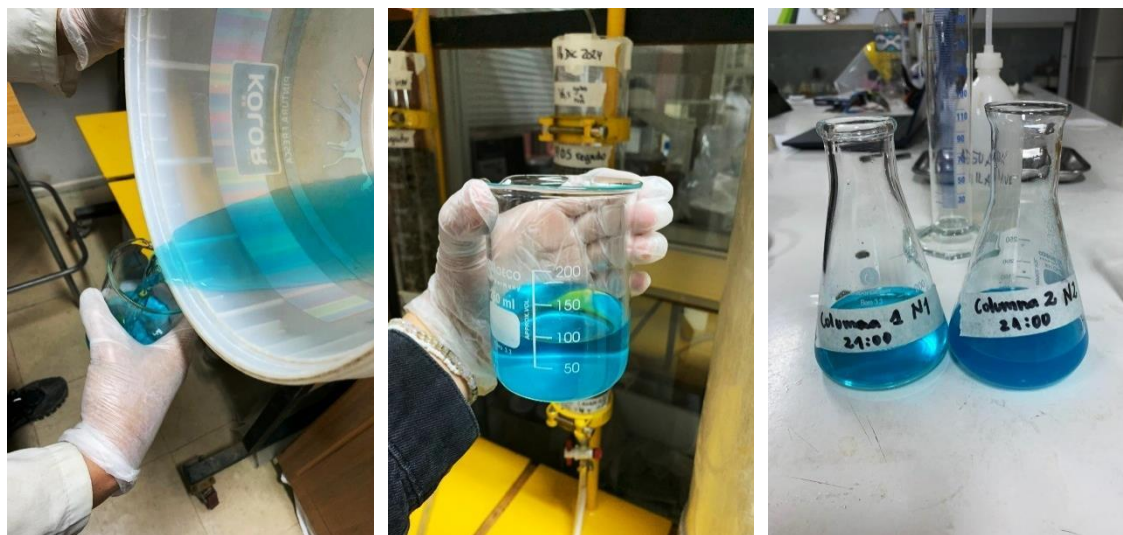


Fig. 3.24 Primeras recolecciones de PLS (*pregnantleachsolution*)

Durante un período de cinco días, se realiza un seguimiento cada 12 horas, recolectando todo el PLS obtenido desde cada columna a las 9 de la mañana y a las 9 de la noche. Cada muestra se rotula y se almacena en el lugar correspondiente, garantizando su integridad.

Una vez que ha pasado el período de cinco días, se ordenan todas las muestras por día, columna y concentración de ácido. La primera muestra se tomó el 16 de diciembre de 2024 y la última el 20 de diciembre de 2024.

Posteriormente, se realiza un análisis volumétrico para determinar la concentración de cobre en cada una de las muestras. Además, se calcula la cantidad de cobre disuelto en gramos por litro (g/L) y se determina el porcentaje de recuperación total de cobre. Esto permite evaluar la eficiencia del proceso de lixiviación y comparar los resultados obtenidos con diferentes concentraciones de ácido y en diferentes días. La recuperación total de cobre se calcula considerando la cantidad total de cobre inicial y la cantidad de cobre recuperado en el PLS, lo que proporciona una visión clara del rendimiento del proceso. (Ver figura 3.25)



Fig. 3.25 Recolección de PLS cada 12 h.

3.24 COTIZACIÓN DE ELEMENTOS NECESARIOS PARA REALIZAR UNA LIXIVIACIÓN EN COLUMNA

Para iniciar la construcción de las columnas de lixiviación, se adquieren dos probetas de 2000 mL con un costo de \$22.000 mil pesos cada una. Además, se compran dos embudos de decantación, valorados en \$15.000 mil pesos cada uno, necesarios para el ensamblaje de las columnas. Para unir las piezas, se adquieren dos pegamentos resistentes al ácido con un precio de \$5.190 pesos cada uno.

En el sistema de goteo, se integran dos sondas de suero, cada una con un costo de \$990 pesos. Para la recolección de la solución rica (PLS), se compran cuatro anillos de abrazadera de manguera, valoradas en \$300 pesos cada una, y dos mangueras a un precio de \$2.000 pesos cada una. Además, durante el ensamblaje, las columnas se colocan sobre soportes valorados en \$15.000 mil pesos cada uno, adquiriéndose dos unidades.

Dando un total en gastos de \$128.730 pesos. Con estos elementos, se completa exitosamente la construcción de las columnas de lixiviación, asegurando su funcionalidad.



Fig. 3.26 Columnas de lixiviación construidas y armadas con todos sus implementos listos

3.25 CONO CUARTEO PARA SELECCIONAR MUESTRA A ANALIZAR

El material, que inicialmente pesa 44,28 kg, se divide en tres bolsas, cada una con un peso de 14,76 kilogramos. A cada bolsa se le realiza un cono cuarteo, efectuando tres reducciones sucesivas.

En la primera reducción, se selecciona una muestra de 7,78 kg, que posteriormente se somete a una nueva homogeneización. Luego, se realiza un cono cuarteo, se forma una torta, se divide en cuatro partes y se seleccionan dos esquinas. El rechazo se elimina y se selecciona una nueva muestra.

Este proceso se repite para cada una de las tres bolsas, obteniendo muestras de 7,38 kg, 7,16 kg y 7,96 kg, respectivamente. Posteriormente, se realizan reducciones sucesivas mediante cono cuarteo, seleccionando muestras de 4,10 kg, 3,66 kg y 3,90 kg.

Finalmente, se combinan las muestras finales de cada bolsa, obteniendo una muestra total de 5,90 kg. A esta muestra se le realiza un cono cuarteo adicional, seleccionando una muestra de 3,38 kg y un rechazo de 2,72 kg.

Después de descartar el peso de las bolsas, la muestra final seleccionada para su análisis en laboratorio pesa 3,32 kg, mientras que el rechazo pesa 2,58 kg.



Torta



Torta dividida en 2



Torta dividida en 4



Muestra sin rechazo

3.26 ANÁLISIS VOLUMETRÍCO EN LABORATORIO NUTRAM PLANTA COBRE NORTE

Una vez seleccionada la muestra, se transporta al laboratorio de la planta Cobre Norte Nutram. Allí, la muestra se pesa y se pasa por un cortador de partículas para seleccionar una muestra de 429,04 g. Esta muestra se somete a un proceso de secado en un horno durante una hora. Después de este proceso, la muestra se pesa nuevamente y se observa un peso de 424,46 g.

Para calcular el porcentaje de humedad, se utiliza la siguiente fórmula:

Porcentaje de humedad = $((\text{Peso inicial} - \text{Peso final}) / \text{Peso inicial}) \times 100$

En este caso, el cálculo sería:

Porcentaje de humedad = $((429,04 - 424,46) / 429,04) \times 100$

= $(4,58 / 429,04) \times 100$

= 1,07%

Por lo tanto, la muestra tiene un porcentaje de humedad de 1,07%.

Una vez que la muestra está seca, se procesa en un molino de bolas o pulverizador para obtener una granulometría fina. Esta muestra se homogeneiza y se selecciona una submuestra que se somete a análisis en el laboratorio.



Chancador terciario



Cortador de rifles



Horno



Muestra lista para laboratorio

Se realiza un análisis volumétrico para determinar el porcentaje de cobre soluble y el porcentaje de cobre total. Los resultados de este análisis se presentan a continuación.

INVERSIONES NUTRAM S.P.A.		<u>Laboratorio Químico Nutram.</u>	
25-11-2024			
ANÁLISIS MUESTRA ÓXIDO UNIVERSIDAD	Cu total %	Cu soluble%	Cu Insoluble%
MUESTRA ESPECIAL	6,77	6,5	0,27

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En el capítulo IV se mostrarán los resultados obtenidos de cada proceso relatado previamente en la metodología y a la vez se realizará un breve análisis de lo obtenido.

4.1 OBJETIVO 1: CONFECCIONAR COLUMNAS DE LIXIVIACIÓN A ESCALA DE LABORATORIO.

A continuación se muestran las columnas de lixiviación finalizadas, los soportes, y las columnas en sus soportes y ubicadas en el laboratorio químico metalúrgico



Fig. 3.27 Columnas finalizadas, con su respectivo soporte y en su determinado lugar

Tabla 4.1.Presupuesto columnas de lixiviación

2	Probetas 2000 mL	\$22.000	\$44.000
2	Embudos de decantación	\$15.000	\$30.000
3	Pegamento duroepoxi	\$5.190	\$15.570
4	Sondas para el sistema de goteo	\$990	\$3.960
1	Manguera transparente	\$4.000	\$4.000
4	Anillo de abrazadera de manguera	\$300	\$1.200
2	Soportes para las Columnas	\$15.000	\$30.000
Presupuesto Total de la lixiviación en columna			\$128.730

4.2 OBJETIVO 2: REALIZAR ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO A MINERAL DE ESTUDIO.

En el siguiente recuadro se aprecia los análisis Físicos que se le realizó al mineral/material de estudio, antes de realizar el proceso de lixiviación para cada columna confeccionada.

Tabla 4.2.Resultados de análisis Físicos al mineral de estudio.

GRANULOMETRÍA DESPUES DE CHANCADO	100% -#3/4
DENSIDAD DEL MINERAL	2,8 g/cm³
% DE HUMEDAD DEL AGLOMERADO DEL MATERIAL	2,6%
CONO, ROLEO Y CUARTEO PARA C/U DE LAS COLUMNAS	2.744g

4.3 PRUEBAS DE LIXIVIACIÓN

A continuación, se muestran los resultados comparativos obtenidos de cada columna de vidrio en las cuales se realizó el proceso de lixiviación variando un parámetro a la vez, en este caso sería la concentración del “Ácido Sulfúrico”

Dentro de los 5 días de pruebas estimados del proceso de lixiviación en columna se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 4.3.Resultados de lixiviación en columna con riego de ácido 1N

Día	Número de muestra	Hora de recolección	Volumen PLS (L)	Concentración g/L	Total g Cu
1	1	21:00	0,1	16	1,6
2	2	9:00	0,04	26	1,04
	3	21:00	1,55	29	44,95
3	4	9:00	1,8	29	52,2
	5	21:00	1,8	16	28,8
4	6	9:00	1,1	14	15,4
	7	21:00	1,15	11	12,65
5	8	9:00	0,85	8	6,8
	9	21:00	2,14	5	10,7
Masa total recuperada					174,14
Masa de cobre soluble en los 2.744 g de cobre					178,36
% de recuperación de cobre soluble en 5 días de riego					97,6

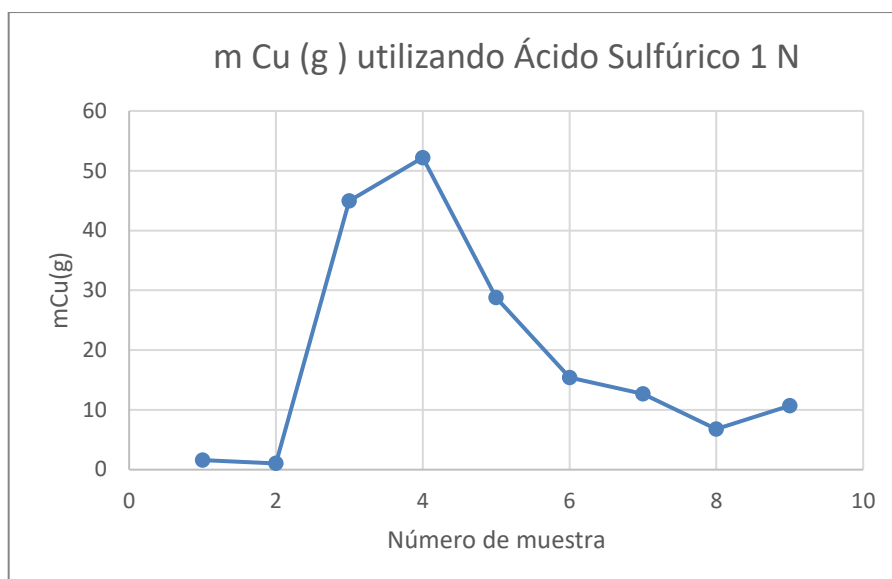


Figura 4.1. Gráfico que representa la cantidad de Cobre obtenida de cada muestra, utilizando ácido sulfúrico 1N

Las principales diferencias entre los volúmenes recolectados se da entre el primer día y los demás, esto porque en un inicio se termina de humedecer bien todo el material que está presente en la columna, a los 5 días se observa que ya el 97,6% de la cantidad de cobre soluble presente en la muestra se ha disuelto y pasado a la solución (PLS).

Tabla 4.Resultados de lixiviación en columna con riego de ácido 2N

Día	Número de muestra	Hora de recolección	Volumen PLS (L)	Concentración g/L	Total g Cu
1	1	21:00	0,1	31	3,1
2	2	9:00	0,45	36	16,2
	3	21:00	1,7	39	66,3
3	4	9:00	2,05	18	36,9
	5	21:00	2,1	14	29
4	6	9:00	1,46	8	11,7
	7	21:00	2,14	7	14,9
5	8	9:00	2,25	0	0
	9	21:00	2,05	0	0
Masa total recuperada					178,1
Masa de cobre soluble en los 2.744 g de cobre					178,36
% de recuperación de cobre soluble en 4 días de riego					100

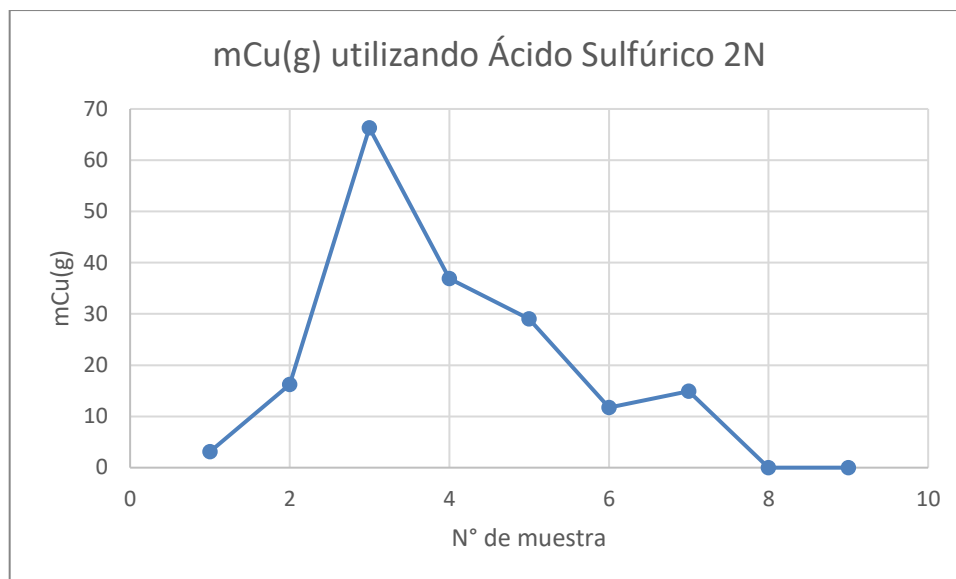


Figura 4.2. Gráfico que representa la cantidad de Cobre obtenida de cada muestra, utilizando ácido sulfúrico 2N

Al utilizar un ácido que se encuentra dos veces más concentrado que en la primera columna, se puede apreciar que al cuarto día se ha obtenido el 100% de la cantidad de cobre soluble presente en la muestra y que el quinto día ya no existe cobre en la solución. Si bien es cierto que se lixivía más rápido con la solución 2N, no se justifica gastar el doble del reactivo para ahorrar un día de riego, si a eso le sumamos que en la lixiviación en pilas la recuperación va de un 50% a un 75%, nos encontramos que en este caso en ambas columnas, con ácido 1N y con ácido 2N, se llega a recuperaciones óptimas. Lo destacable es que en 5 días se puede realizar una prueba comparativa que nos permite sacar conclusiones y conocer el proceso de lixiviación en forma práctica, por lo que es factible realizar esta prueba dentro de la asignatura de hidrometalurgia, en talleres o para experimentación y optimización de parámetros en la asignatura de proyecto de titulación o simplemente para que los investigadores tengan un sistema de lixiviación que les permita ir tomando muestras y realizar análisis permanentemente.

CONCLUSIÓN

Se implementaron 2 columnas de vidrio a escala de laboratorio, con un volumen de 2651 cc aproximadamente. Se les realizaron pruebas de caracterización al mineral de estudio, el cual tiene una granulometría de -#3/4' o 19.05mm aproximadamente, con una densidad del mineral de 2,8 g/cm³.

Utilizando ambas columnas de vidrio se pudo realizar un análisis comparativo, lixiviando en una de ellas con ácido sulfúrico 1N, la cual a los 5 días alcanzó un 97,6 % de recuperación metalúrgica y, en la segunda columna se lixivia con ácido sulfúrico 2N, recuperando el 100% de cobre soluble presente en la muestra en tan solo 4 días. Por lo tanto las columnas implementadas en el laboratorio de metalurgia de la Universidad de Atacama, sede costanera, Vallenar, permiten en pocos días o perfectamente en un laboratorio, u dentro de un semestre o una asignatura como, por ejemplo, hidrometalurgia, además permite comparar bajo las mismas condiciones y modificando un parámetro a la vez. Se cuantificó el cobre presente en las muestras por el método volumétrico, específicamente Yodimetría que es un método indirecto.

BIBLIOGRAFÍA

- Donoso, H. H. (20 de diciembre de 2013). *PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO* . Recuperado el 21 de 01 de 2025, de PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO : http://opac.pucv.cl/pucv_txt/txt-8500/UCF8900_01.pdf
- Educa, C. (2019). *Lixiviación: Medios Técnicos*. Recuperado el 2024
- González, A. (2015). *Técnicas avanzadas de muestreo en minería*. Lima, Perú: Minería Editores.
- González, A. (2015). Técnicas de muestreo sistemático. *Revista de Exploración Minera*, 45-58.
- Johana Mariela Coyago Ortega, L. A. (2021). *Librari*. Obtenido de <https://1library.co/document/zlg05xdg-universidad-del-azuay-facultad-de-ciencia-y-tecnología.html>
- López P, P. L. (2017). *Análisis granulométrico con técnicas de tamices Rotap*. Buenos Aires, Argentina: Geología Aplicada.
- López, P. (2017). Estrategias de muestreo dirigido en exploración minera. *Acta Geológica*, 29, 112-119.
- Martínez, J. (2010). *Métodos de muestreo en minería*. Santiago, Chile: Editorial Minera.
- Martínez, J. (2010). *Métodos de muestreo en minería*. Santiago, Chile: Editorial Minera.
- Ramon Frederick Gonzales, F. G. (Octubre de 2008). Obtenido de https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/103126/retamal_nc.pdf?sequence=3
- Rodríguez, M. &. (2018). *Muestreo estratificado en depósitos minerales*. Universidad de Geología Aplicada.
- Sánchez, R. (2012). Aplicación de muestreo en red. *Boletín Técnico de Minería*, 5, 23-34.
- Smith, J. (2012). *Técnicas de muestreo en minería*. Madrid, España: Minera Editorial.
- Universidad Arturo Prat Iquique - Chile. (s.f). *Fundamentos de Lixiviación* . (D. J. Tapia, Editor) Recuperado el Noviembre de 2024, de Hidrometalurgia I: file:///C:/Users/jessi/OneDrive/Escritorio/jeremi%20uni/Fundamentos_de_Lixiviacion.pdf

- Universidad de Santiago de Chile. (s.f.). *Departamento de Ingeniería Metalúrgica Apuntes*. Recuperado el noviembre de 2024, de Introducción a la Metalurgia: <https://metalurgia.usach.cl/apuntes-0>
- Universidad Politecnica de Valencia. (s.f). *Extracción de metales por Hidrometalurgia*. Recuperado el Noviembre de 2024, de <https://m.riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/68321/Mu%C3%B1oz%20-%20Extracci%C3%B3n%20de%20metales%20por%20hidrometalurgia%3A%20Procesamiento%20de%20cobre%20y%20cinc.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Vicente, A. (20 de Octubre de 2021). *Empírica* . Obtenido de <https://empiricaconsultores.cl/curado-y-aglomeracion-pretratamiento-en-la-lixiviacion/>
- Donoso, H. H. (20 de diciembre de 2013). *PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO* . Recuperado el 21 de 01 de 2025, de PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO : http://opac.pucv.cl/pucv_txt/txt-8500/UCF8900_01.pdf
- Educa, C. (2019). *Lixiviación: Medios Técnicos*. Recuperado el 2024
- González, A. (2015). *Técnicas avanzadas de muestreo en minería*. Lima, Perú: Minería Editores.
- González, A. (2015). Técnicas de muestreo sistemático. *Revista de Exploración Minera*, 45-58.
- Johana Mariela Coyago Ortega, L. A. (2021). *Librari*. Obtenido de <https://1library.co/document/zlg05xdg-universidad-del-azuy-facultad-de-ciencia-y-tecnologia.html>
- López P, P. L. (2017). *Análisis granulométrico con técnicas de tamices Rotap*. Buenos Aires, Argentina: Geología Aplicada.
- López, P. (2017). Estrategias de muestreo dirigido en exploración minera. *Acta Geológica*, 29, 112-119.
- Martínez, J. (2010). *Métodos de muestreo en minería*. Santiago, Chile: Editorial Minera.
- Martínez, J. (2010). *Métodos de muestreo en minería*. Santiago, Chile: Editorial Minera.

- Ramon Frederick Gonzales, F. G. (Octubre de 2008). Obtenido de https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/103126/retamal_nc.pdf?sequence=3
- Rodríguez, M. &. (2018). *Muestreo estratificado en depósitos minerales*. Universidad de Geología Aplicada.
- Sánchez, R. (2012). Aplicación de muestreo en red. *Boletín Técnico de Minería*, 5, 23-34.
- Smith, J. (2012). *Técnicas de muestreo en minería*. Madrid, España: Minera Editorial.
- Universidad Arturo Prat Iquique - Chile. (s.f). *Fundamentos de Lixiviación* . (D. J. Tapia, Editor) Recuperado el Noviembre de 2024, de Hidrometalurgia I: file:///C:/Users/jessi/OneDrive/Escritorio/jeremi%20uni/Fundamentos_de_Lixiviacion.pdf
- Universidad de Santiago de Chile. (s.f.). *Departamento de Ingeniería Metalúrgica Apuntes*. Recuperado el noviembre de 2024, de Introducción a la Metalurgia: <https://metalurgia.usach.cl/apuntes-0>
- Universidad Politecnica de Valencia. (s.f). *Extracción de metales por Hidrometalurgia*. Recuperado el Noviembre de 2024, de <https://m.riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/68321/Mu%C3%B1oz%20-%20Extracci%C3%B3n%20de%20metales%20por%20hidrometalurgia%3A%20Procesamiento%20de%20cobre%20y%20cinc.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Vicente, A. (20 de Octubre de 2021). *Empírica* . Obtenido de <https://empiricaconsultores.cl/curado-y-aglomeracion-pretratamiento-en-la-lixiviacion/>