



**UNIVERSIDAD
SAN SEBASTIAN**
VOCACIÓN POR LA EXCELENCIA

**UNIVERSIDAD SAN SEBASTIÁN
FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y DISEÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL EN MINAS
SEDE SANTIAGO - BELLAVISTA**

“Efectos de la Sufusión en la Hidrodinámica de Lechos

Porosos en Pilas de Lixiviación: Simulación Experimental y

Análisis de Recuperación de Cobre”

Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil en Minas

**Profesor Guía: Dr. Jorge M. Menacho Llaña
Estudiante: Zenón Francisco Montanares Guzmán**

Santiago, Chile 2025

© Zenón Francisco Montanares Guzmán.

Se autoriza la reproducción parcial o total de esta obra, con fines académicos, por cualquier forma, medio o procedimiento, siempre y cuando se incluya cita bibliográfica del documento.

Santiago, Chile 2025

HOJA DE CALIFICACIÓN PROYECTO DE TÍTULO

Santiago, ____ de Marzo del 2025

Los miembros de la Comisión Evaluadora, detallados al final de la presente página, dejan constancia que el estudiante Zenón Francisco Montanares Guzmán, ha aprobado su proyecto de título: Efectos de la Sufusión en la Hidrodinámica de Lechos Porosos en Pilas de Lixiviación: Simulación Experimental y Análisis de Recuperación de Cobre, para optar al título de Ingeniero Civil en Minas, con nota:

Dr. Jorge M. Menacho Llaña

Profesor Guía

Dr. Andres Soto Bubert

Profesor Revisor

Dr. Roberto Acevedo Llanos

Profesor Revisor

Quisiera agradecer a las personas que han sido parte de este proceso, para poder llegar hasta acá.

Primeramente, a mis padres M. Angelina y Zenón, por su amor incondicional, su apoyo en cada paso de mi vida y por enseñarme el valor del esfuerzo y la perseverancia. Sin su guía y sacrificio, este logro no habría sido posible.

A mis queridas abuelas, por sus palabras de aliento, su cariño infinito y por desear siempre lo mejor para mí. Su apoyo ha sido un pilar fundamental en mi camino. Aunque una de ellas ya no está con nosotros, siento su apoyo en cada momento y sé que, dondequiera que esté, debe estar feliz y orgullosa de este logro.

A toda mi familia, a mis tíos y hermanos, por estar siempre presentes, por su compañía y por ser parte de este proceso con su ánimo y apoyo constante.

También quiero agradecer a mis amigos dentro y fuera de la universidad, con quienes compartí momentos inolvidables.

Y a mí polola, quien estuvo conmigo en las finales, haciéndome más llevadero este último año con su compañía, paciencia y motivación inagotable. Gracias por ser mi refugio en los momentos difíciles y celebrar conmigo cada pequeño avance.

A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento. Este logro también es suyo.

Agradecimientos

Expreso mi gratitud primeramente a mi profesor guía, Dr. Jorge Menacho Llaña, (Gerente General de De Re Metallica Ltda.) por ser quien me presentó el tema de esta memoria y por su disposición y paciencia para orientarme en cada etapa del proceso. Su apoyo fue fundamental para llevar a cabo este trabajo.

También agradezco al profesor Jaime Calderón por ser el contacto con la empresa De Re Metallica Ltda. y facilitar la oportunidad de desarrollar esta memoria en un entorno profesional.

A todo el equipo de De Re Metallica Ingeniería, desde la secretaria ejecutiva Natalia Mujica, la ingeniera Yadranka Zivkovic Domic, Gerente de operaciones de la empresa. Su equipo de ingenieros Wildo Cifuentes, Carlos Martínez, Alvaro Carreño, Francisco Troncoso y Guillermo Vega, quienes aportaron con ideas, información y valiosos consejos que enriquecieron esta memoria.

Finalmente, a todos los docentes y funcionarios de la Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño de la Universidad San Sebastián, sede Bellavista, quienes contribuyeron de manera significativa en mi formación profesional. En especial, mi gratitud a Andrés Soto, Vlamir Muñoz, Roberto Acevedo, Marco Alfaro, Luis De La Torre, por su enseñanza, apoyo y compromiso.

Gracias de corazón a todo los que hicieron posible materializar este paso importante de mi vida.

Resumen

La presente memoria de título analiza los efectos de la sufusión en la hidrodinámica de lechos porosos dentro de pilas de lixiviación, con el objetivo de evaluar su impacto en la recuperación de cobre. La sufusión es un fenómeno geotécnico en el que las partículas finas migran dentro de un medio poroso bajo riego, reduciendo la permeabilidad y generando flujos desuniformes que reducen la eficiencia del proceso hidrometalúrgico. Para abordar este problema, se diseñó y construyó un novedoso equipo de prueba que permitió simular experimentalmente el flujo líquido en condiciones controladas.

Los resultados obtenidos muestran que la ocurrencia de sufusión en las pilas de lixiviación afecta significativamente la distribución del flujo del lixivante, alterando la razón de lixiviación y, por ende, disminuyendo la eficiencia en la extracción de cobre. Se observó que la disminución de la permeabilidad en las zonas afectadas por la sufusión, genera acumulación de solución en ciertos sectores, lo que ocasiona la formación de canales preferenciales de flujo y pérdidas en la recuperación del metal.

Como conclusión, se destaca la necesidad de optimizar el diseño y la operación de los sistemas de lixiviación para minimizar la ocurrencia de la sufusión y mejorar la eficiencia del proceso. Se recomienda la implementación de estrategias de monitoreo y control, así como el uso de modelos matemáticos para predecir el comportamiento hidrodinámico de las pilas y su impacto en la recuperación de cobre. Estos hallazgos proporcionan información clave para el desarrollo de tecnologías que permitan una hidrometalurgia más eficiente y sostenible.

Abstract

This thesis analyzes the effects of suffusion on the hydrodynamics of porous beds in heap leaching, aiming to evaluate its impact on copper recovery. Suffusion is a geotechnical phenomenon in which fine particles migrate within the porous medium under irrigation, reducing permeability and generating non-uniform flow patterns, which reduce the efficiency of the hydrometallurgical process. To address this issue, a novel test setup was designed and built to experimentally simulate fluid flow under controlled conditions.

The results show that the presence of suffusion in heap leaching significantly alters the distribution of the leaching solution, affecting the leaching rate and consequently decreasing copper extraction efficiency. It was observed that the reduction in permeability in suffusion-affected areas causes solution accumulation in certain zones, leading to the formation of preferential flow channels and resulting in metal recovery losses.

In conclusion, this study highlights the need to optimize the design and operation of leaching systems to minimize suffusion and improve process efficiency. The implementation of monitoring and control strategies, as well as the use of mathematical models to predict the hydrodynamic behavior of heaps and its impact on copper recovery, is recommended. These findings provide key insights for the development of more efficient and sustainable hydrometallurgical technologies.

Índice de Contenido

CAPÍTULO I	14
1.1 Introducción	14
1.2 Objetivos generales	14
1.3 Objetivos específicos	14
□ Diseño, construcción y puesta en marcha del equipo de prueba	14
□ Preparación de muestras de prueba	14
□ Ejecución de pruebas experimentales	14
□ Interpretación de los resultados bajo consideraciones teóricas	14
□ Preparación de un informe que dé cuenta de los resultados obtenidos y conclusiones asociadas	14
CAPÍTULO II: ANTECEDENTES	15
2.1 Contexto del trabajo realizado	15
2.1.1 El negocio minero	15
2.1.2 Opciones de procesamiento	15
2.2 La hidrometalurgia del Cobre	16
2.3 Tipos de lixiviación en pilas	17
2.3.1 Lixiviación en pilas de mineral chancado	18
2.3.2 Lixiviación ROM (Run-of-Mine)	18
2.3.3 Lixiviación in situ	19
2.3.4 Lixiviación ácida	19
2.3.5 Lixiviación amoniacal	19
2.3.6 Lixiviación férrico-bacteriana (Bio-lixiviación)	20
2.3.7 Lixiviación férrica electroquímica (Ecowining)	20
2.3.8 Lixiviación clorurada	20
2.3.9 Lixiviación nítrica	20
2.4 Diagramas de flujo frecuentes	21
2.5 Variables químicas del proceso	23
2.5.1 Tasa de adición de Ácido (H_2SO_4)	23
2.5.2 Tasa de adición de Oxígeno (O_2)	24
2.5.2 Concentración de Cu^{2+} (Iones de Cobre)	25
2.5.3 Temperatura	25
2.5.4 Concentración de Impurezas	26
2.5.5 Tiempo de residencia	26

2.5.6	Tiempo de lixiviación	27
2.5.7	Tasa de adición de Cloruros (Cl^-).....	27
2.5.8	Tasa de Riego	28
2.6	Variables físicas de proceso.....	28
2.6.1	Tamaño de partículas.....	29
2.6.2	Altura de la pila	29
2.6.3	Permeabilidad	30
2.6.4	Temperatura.....	30
2.6.5	Razón de lixiviación	30
2.7	Estado del arte y motivación del presente estudio.....	31
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA.....		34
3.1.1	Hidrodinámica de lechos porosos con saturación variable.....	34
3.1.2	Ecuación de Richards	34
3.1.3	Modelo de van Genuchten	35
3.1.4	Modelo DRM-Fractal permeabilidad saturada	36
a)	Estimación de la conductividad hidráulica saturada	37
b)	Optimización de procesos de lixiviación	37
c)	Reducción de costos y tiempo de respuesta	37
3.1.5	Simulación flujo transiente pila lixiviación	38
a)	Ecuación de continuidad:	38
c)	Curva SWCC (van Genuchten, 1980):	39
d)	Curva K, conductividad hidráulica como función de la saturación de poro (van Genuchten, 1980):	40
3.2	Fenómenos geotécnicos de licuefacción estática	41
3.2.1	Consolidación y deformación plástica	42
a)	Consolidación	42
3.2.2	Barreras capilares	43
3.2.3	Decrepitación	43
3.2.4	Sufusión.....	44
3.2.5	Criterios de diseño y aceptación operación industrial.....	45
3.2.6	Ensayos DTR para estimación de patrones flujo	46
a)	Contexto.....	46
b)	Transporte líquido en una pila de lixiviación	47
c)	El modelo DTR de tres pulsos (Menacho, 2008)	49
3.3	Metodología experimental.....	53

3.3.1	Muestras y materiales de prueba.....	53
3.3.2	Diseño, construcción y puesta en marcha del equipo de prueba	53
3.3.3	Preparación del mineral: con/sin sufusión.....	54
3.4	Procedimiento experimental	54
	CAPITULO IV: RESULTADOS	57
4.1	Resultados experimentales.....	57
4.2	Balances de materia	79
4.3	Modelación de patrones de flujo	79
4.3	Impacto en la recuperación de cobre	80
	CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	82
5	Conclusiones y Recomendaciones	82
5.1	Conclusiones generales	82
5.2	Conclusiones específicas	83
5.3	Recomendaciones trabajos futuros.....	83
	CAPITULO VI: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
6	Referencias Bibliográficas	85
	CAPITULO VII: ANEXOS	92
7	ANEXOS	92
7.1	Glosario de términos.....	92
7.2	Anexo 2: Información fotográfica	94
7.3	Anexo 3: Resultados experimentales	96

Índice de Figuras

Figura 1. Diagrama de flujo simplificado Línea Óxidos versus Línea Sulfuros.....	17
Figura 2. Flujo Planta Hidrometalúrgica. Fuente: Apuntes clases procesos Hidrometalúrgicos. profesor Jaime Calderón, (2022). USS.....	23
Figura 3. Ilustración criterio de diseño de la tasa de riego en base a la conductividad hidráulica saturada del mineral (elaboración propia).....	45
Figura 4. Criterio de 75% de saturación de poro como valor crítico sobre el cual el lecho poroso comienza a ser inestable. (modificado de Bernal et al., 2018).....	46
Figura 5. Representación pila lixiviación como sistema hidráulico.	47
Figura 6. Modelo de 3 señales desarrollado para procesos de lixiviación en pilas (Menacho, 2008).....	49
Figura 7. Función $FW(t)$ experimental.....	50
Figura 8. Función $E(t)$ calculada.	51
Figura 9. Recuperación integral perfil 1.....	59
Figura 10. DTR integral del perfil 1.	60
Figura 11 Fotografía Columna regada Carga 1 sin sufusión.	62
Figura 12 Fotografía Columna regada Carga 2 con sufusión.	62
Figura 13. Recuperación integral perfil 2.....	64
Figura 14. DTR integral del perfil 2.	65
Figura 15 Fotografía Columna regada Carga 1 sin sufusión.	67
Figura 16 Fotografía Columna regada Carga 2 con sufusión.	67
Figura 17. Recuperación integral perfil 3.....	69
Figura 18. DTR integral del perfil 3.	70
Figura 19 Fotografía Columna regada Carga 1 sin sufusión.	72
Figura 20 Fotografía Columna regada Carga 2 con sufusión.	73
Figura 21. Recuperación integral perfil 4.....	75
Figura 22. DTR integral del perfil 4.	76
Figura 23 Fotografía Columna regada Carga 1 sin sufusión.	78
Figura 24 Fotografía Columna regada Carga 2 con sufusión.	78
Figura 25 Fotografía de la celda bidimensional cargada con mineral.....	94
Figura 26 Fotografía del mineral usado.....	95
Figura 27 Fotografía de bomba peristáltica utilizada.....	96

Índice de Tablas

Tabla 1. Condiciones para la prueba sin sufusión.....	57
Tabla 2. Condiciones para la prueba con sufusión.....	58
Tabla 3. Tiempo y recuperación de las pruebas con y sin sufusión del perfil 1.	59
Tabla 4. Parámetros utilizados para el caso sin sufusión.....	60
Tabla 5. Parámetros utilizados para el caso con sufusión.....	60
Tabla 6. Tiempo y función de distribución del tiempo de residencia (DTR) para condiciones con y sin sufusión.	61
Tabla 7. Condiciones para la prueba sin sufusión.....	62
Tabla 8. Condiciones para la prueba con sufusión.....	63
Tabla 9. Tiempo y recuperación de las pruebas con y sin sufusión del perfil 2.	64
Tabla 10. Parámetros utilizados para el caso sin sufusión.....	65
Tabla 11. Parámetros utilizados para el caso con sufusión.....	66
Tabla 12. Tiempo y función de distribución del tiempo de residencia (DTR) para condiciones con y sin sufusión.....	66
Tabla 13. Condiciones para la prueba sin sufusión.....	67
Tabla 14. Condiciones para la prueba con sufusión.....	68
Tabla 15. Tiempo y recuperación de las pruebas con y sin sufusión del perfil 3.	70
Tabla 16. Parámetros utilizados para el caso sin sufusión.....	71
Tabla 17. Parámetros utilizados para el caso con sufusión.....	71
Tabla 18. Tiempo y función de distribución del tiempo de residencia (DTR) para condiciones con y sin sufusión.....	71
Tabla 19. Condiciones para la prueba sin sufusión.....	73
Tabla 20. Condiciones para la prueba con sufusión.....	73
Tabla 21. Tiempo y recuperación de las pruebas con y sin sufusión del perfil 4.	75
Tabla 22. Parámetros utilizados para el caso sin sufusión.....	76
Tabla 23. Parámetros utilizados para el caso con sufusión.....	76
Tabla 24. Tiempo y función de distribución del tiempo de residencia (DTR) para condiciones con y sin sufusión.....	77
Tabla 25. Recuperación de cobre en pruebas con y sin Sufusión de todos los perfiles ...	81

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1 Razón de lixiviación.....	30
Ecuación 2 Ecuación de Richards.....	¡Error! Marcador no definido.
Ecuación 3 Ley de Darcy	¡Error! Marcador no definido.
Ecuación 4 Modelo de van Genuchten	¡Error! Marcador no definido.
Ecuación 5 Ecuación de van Genuchten conductividad hidráulica en saturación variable	¡Error! Marcador no definido.
Ecuación 6 Modelo DRM-Fractal permeabilidad saturada ..	¡Error! Marcador no definido.
Ecuación 7 Ecuación de continuidad del líquido	¡Error! Marcador no definido.
Ecuación 8 Ecuación de movimiento del líquido	¡Error! Marcador no definido.
Ecuación 9 Ecuación de de Richards.....	¡Error! Marcador no definido.
Ecuación 10 Condición de borde, humedad volumétrica inicial conocida.	¡Error! Marcador no definido.
Ecuación 11 Condición de borde, vector de riego conocido	¡Error! Marcador no definido.
Ecuación 12 Condición de borde, frontera física de la pila ..	¡Error! Marcador no definido.
Ecuación 13 Curva SWCC van Genuchten.....	¡Error! Marcador no definido.
Ecuación 14 Curva K, conductividad hidráulica como función de la saturación de poro	¡Error! Marcador no definido.
Ecuación 15 Definición de la saturación efectiva de poro ...	¡Error! Marcador no definido.
Ecuación 16 Función dinámica de salida	¡Error! Marcador no definido.
Ecuación 17 Función dinámica integral de salida.....	¡Error! Marcador no definido.
Ecuación 18 Tiempo dinámico medio de residencia.....	¡Error! Marcador no definido.
Ecuación 19 Volumen dinámico de control.....	¡Error! Marcador no definido.
Ecuación 20 Función dinámica integral de salida del líquido	¡Error! Marcador no definido.
Ecuación 21 Expresión alternativa función dinámica integral de salida del líquido....	¡Error! Marcador no definido.
Ecuación 22 Función dinámica de salida del líquido	¡Error! Marcador no definido.
Ecuación 23 Función dinámica de salida del líquido modelo de pulsos ...	¡Error! Marcador no definido.
Ecuación 24 Modelo de N reactores perfectos conectados en serie pulso i.....	¡Error! Marcador no definido.
Ecuación 25 Modelo de N reactores imperfecto conectados en serie pulso i.....	¡Error! Marcador no definido.
Ecuación 26 Función dinámica integral de salida del trazador	¡Error! Marcador no definido.
Ecuación 27 Función dinámica de salida del trazador.....	¡Error! Marcador no definido.

CAPÍTULO I

1.1 Introducción

El presente trabajo de titulación se enmarca dentro del estudio de fenómenos geomecánicos que ocurren en la lixiviación de minerales en pilas, donde las principales respuestas de proceso, esto es, recuperación de cobre y consumo de ácido, son afectadas por la ocurrencia de fenómenos físicos relacionados con el comportamiento mecánico del mineral chancado que conforma la pila. Este es un tema poco estudiado a la fecha, aunque su impacto es creciente en la medida que los yacimientos envejecen y se debe recurrir a minerales de baja calidad física para sustentar el negocio.

1.2 Objetivos generales

Estudiar cómo la estructura (granulometría, forma, compactación, mineralogía, porosidad, etc.) del lecho poroso afecta la hidrodinámica en las pilas de lixiviación, enfocándose en su impacto en la eficiencia del proceso y en el comportamiento del flujo de la solución lixivante.

1.3 Objetivos específicos

- **Diseño, construcción y puesta en marcha del equipo de prueba**
Implementar un dispositivo transparente de geometría paralelepípedo recto, que permita estudiar el flujo en un reactor o columna, esencialmente plana (reactor bidimensional).
- **Preparación de muestras de prueba**
Conseguir las muestras, trazarlas y disponer de los reactivos y soluciones de riego, así como también los elementos para estimar los patrones de flujo y la recuperación.
- **Ejecución de pruebas experimentales**
Llevar a cabo un conjunto de ensayos de lixiviación, que permitan estimar cambios de patrón de flujo y simultáneamente, el impacto en la recuperación del cobre contenido.
- **Interpretación de los resultados bajo consideraciones teóricas**
Analizar los datos obtenidos en función de modelos teóricos existentes o en desarrollo.
- **Preparación de un informe que dé cuenta de los resultados obtenidos y conclusiones asociadas**

CAPÍTULO II: ANTECEDENTES

2.1 Contexto del trabajo realizado

2.1.1 El negocio minero

La minería es un pilar esencial de la economía chilena, representando alrededor del 11% del PIB y más del 50% de las exportaciones nacionales. Chile se mantiene como el mayor productor mundial de cobre, con una producción que alcanzó los 5,24 millones de toneladas métricas en 2023, lo que equivale al 27% de la producción global. Este liderazgo también se extiende a la producción de litio, donde el país representa aproximadamente el 30% del mercado mundial. Además, la industria minera genera más de 200.000 empleos directos en el país, con Codelco y Escondida como los principales actores del sector (Cochilco, 2023).

En términos de producción, la República Democrática del Congo y Chile contribuyen de manera significativa al suministro mundial de cobre. En 2024, la República Democrática del Congo suma 322.000 t a su producción que en total produjo aproximadamente 3,3 millones de toneladas de cobre, mientras que Chile anticipa un aumento del 3%, llegando a 5,41 millones de toneladas métricas. Este crecimiento en la producción viene a aportar a la creciente demanda mundial de cobre, que se proyecta alcance los 25,7 millones de toneladas, un aumento del 2% respecto de 2023. El panorama económico mundial se mantiene estable, con el Fondo Monetario Internacional proyectando una tasa de crecimiento de 3,2% para 2024 y 2025. Se espera que esta estabilidad apoye la demanda de cobre, aunque las posibles fricciones comerciales entre las principales economías podrían plantear riesgos, aunque también oportunidades (Cochilco, 2024).

A nivel global, se espera un crecimiento sostenido de la demanda de minerales, impulsado por la transición energética y el auge de las tecnologías verdes. El cobre será fundamental en la expansión de las energías renovables y la electrificación de los sistemas de transporte. Según estimaciones de Cochilco, la demanda mundial de cobre podría alcanzar los 28 millones de toneladas anuales para 2030, lo que representa un incremento del 25% en comparación con la demanda actual (Cochilco, 2023).

2.1.2 Opciones de procesamiento

La minería del cobre emplea principalmente dos rutas tecnológicas de beneficio: la hidrometalurgia (conminución – aglomeración - lixiviación - extracción por solventes – electro obtención) y la pirometalurgia (conminución - flotación – fundición – electro refinación). Estas tecnologías tienen diferentes aplicaciones según el tipo de mineral procesado y las condiciones económicas. En Chile, aproximadamente el 20-25% de la producción de cobre refinado proviene de procesos hidrometalúrgicos, mientras que el restante 75-80% se genera a través de la pirometalurgia (Cochilco, 2024).

Según Camus (2002) las dos opciones señaladas en el párrafo anterior, tienen aplicaciones complementarias en la minería, y su elección depende de la naturaleza del mineral, la eficiencia energética y las consideraciones medioambientales de cada sitio o proyecto.

Chancado/Molienda/Flotación/Fundición:

Esta técnica es ampliamente utilizada en la minería para la recuperación de sulfuros metálicos como cobre y molibdeno. Este proceso permite separar los minerales de interés de la ganga, mediante el uso de reactivos químicos y aireación. Según Wills y Finch (2016), el mineral tronado se alimenta al chancador primario a una granulometría ROM y desde allí es dirigido a una planta de chancado convencional de dos o tres etapas y se emplean molinos SAG/Bolas en las etapas finales de conminución, aunque también el triturador de rodillos de alta presión, HPGR, es una vía preferida (Napier-Munn et al., 2012). Luego viene la flotación, que es un proceso de separación selectiva, que utiliza burbujas de aire para separar partículas hidrofóbicas de las hidrofílicas. En estudios recientes se ha demostrado que mejoras en el diseño de celdas de flotación, han incrementado la eficiencia de recuperación, por ejemplo, en las celdas de flotación de alta intensidad, junto a sistemas de control y uso de inteligencia artificial, para optimizar los parámetros operativos y la recuperación del cobre desde minerales de baja ley (JXSC Machine, 2023).

Chancado/Lixiviación/SX/EW:

Igual que en el caso de la concentradora, el mineral tronado se alimenta al chancador primario a una granulometría ROM y desde allí es dirigido a una planta de chancado fino con dos o tres estaciones de chancadores y dos de harneado. El producto de la planta de chancado es transportado por correas hasta los tambores rotatorios, donde ocurre el curado con reactivos lixiviantes y la aglomeración de los finos sobre los gruesos. Luego se apila en canchas o sitios específicos acondicionados con piso drenante. La lixiviación en pilas, es una técnica esencial para el procesamiento de minerales de cobre y oro. Este método consiste en aplicar soluciones lixiviantes, como ácido sulfúrico, ion férrico para cobre o cianuro para oro, sobre el mineral para extraer los metales valiosos. Recientes avances en lixiviación clorurada han mostrado ser más eficientes en términos de recuperación de metales y reducción de residuos tóxicos (Foster Ingenieros, 2024). De todas formas, la lixiviación todavía es un tema abierto.

2.2 La hidrometalurgia del Cobre

La hidrometalurgia del cobre estaba inicialmente orientada al procesamiento de óxidos y sales de cobre, que generalmente están en la zona superior del yacimiento, sin embargo, la explotación sostenida, lleva a las zonas inferiores, donde aparecen los mixtos y luego zonas de enriquecimiento secundario, siendo las especies más

comunes la calcosina y covelina y en zonas más profundas, aparecen los sulfuros primarios, bornita y calcopirita. El último nombrado constituye sobre el 70% de las reservas de cobre del mundo y la vía tradicional de recuperación es la flotación. Sin embargo, la disminución sostenida de las leyes de cabeza, hoy en día definen leyes de corte de 0,25% a 0,35% CuT, dejando un amplio espacio a la hidrometalurgia, en cuyo escenario ya empieza a ser competitiva con la flotación. (Figura 1).

A futuro se visualiza el tratamiento de concentrados de cobre como otra vía de desarrollo de la hidrometalurgia, alternativa a la fundición y refinación electrolítica, etapas que constituyen la vía tradicional de obtención del cobre de alta pureza a partir de los concentrados. Esto motivado porque el cobre comercializado como cátodos tiene mayor valor de mercado que como concentrado, además que las capacidades de fundición son limitadas y generalmente se encuentran a grandes distancias del lugar de origen de los concentrados, por lo tanto, desde el punto de vista de los productores primarios, como la situación de Chile, transformar en cátodos una parte de los concentrados producidos localmente, puede ser un caso de negocio atractivo.

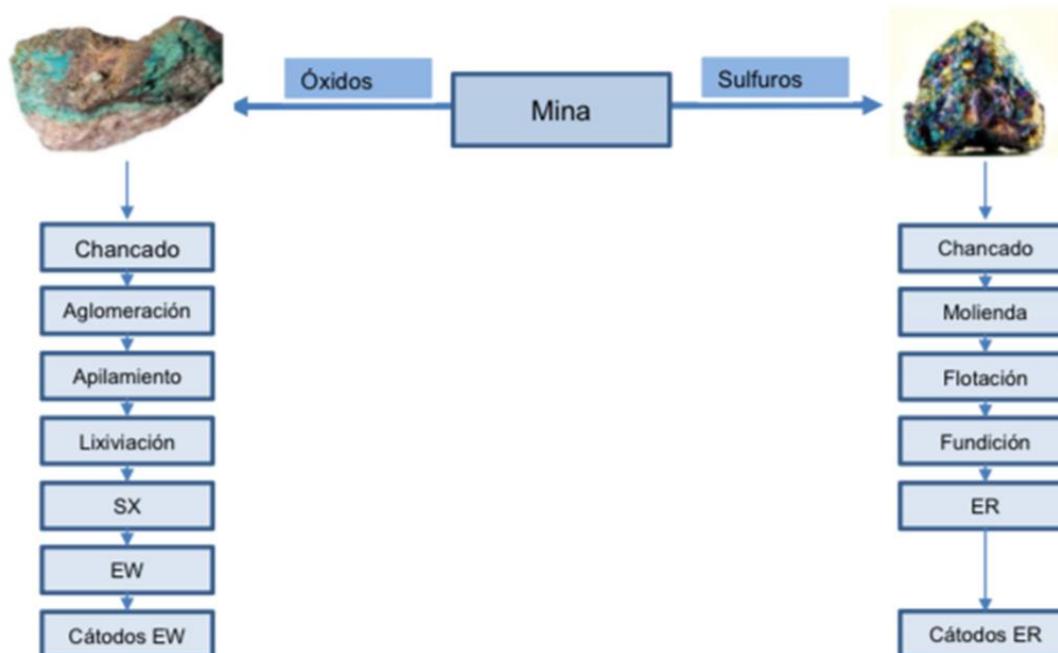


Figura 1. Diagrama de flujo simplificado Línea Óxidos versus Línea Sulfuros. (Elaboración propia, 2024).

2.3 Tipos de lixiviación en pilas

En términos generales existe la lixiviación por agitación, con rápidas cinéticas de disolución del cobre, seguido de separación sólido/líquido y tratamiento de las soluciones por SX – EW u otra vía alternativa, cuya principal aplicación se encuentra en la lixiviación de concentrados, con/sin presión y temperatura. Luego existe la

lixiviación en lecho inundado, llamada lixiviación en bateas, con la que partió Chuquicamata en el año 1915, de poco uso en la actualidad y finalmente está la lixiviación en pilas, que es la más utilizada hoy en día.

Los tipos de lixiviación en pilas se clasifican en función del tipo de solución lixivante y el proceso aplicado.

Según configuración y montaje, se distinguen, al menos, tres tipos de lixiviación en pilas, tal como se comenta a continuación.

2.3.1 Lixiviación en pilas de mineral chancado

La lixiviación en pilas de mineral chancado es el método más utilizado a nivel industrial, especialmente para minerales de baja ley, respecto a minerales alimentados a plantas concentradoras, tales como óxidos y sulfuros secundarios de cobre y oro. Consiste en apilar el mineral triturado y aglomerado formando pilas, sobre las cuales se riega una solución lixivante (como ácido sulfúrico o cianuro). Este método es eficiente en costos y permite un alto grado de automatización. Dreier (2020) destaca que la lixiviación en pilas representa una técnica clave en la hidrometalurgia con las siguientes características:

- **Ventajas:** Bajo costo operativo en comparación con otros métodos, ideal para minerales de baja ley, se adapta a grandes volúmenes de mineral, permite un diseño escalable y automatizado y menor impacto ambiental en términos de generación de residuos sólidos, aunque esto último puede ser cuestionable en varios casos.
- **Desventajas:** Tiempos largos para alcanzar la recuperación completa del metal, requiere terrenos amplios para instalar las pilas y es sensible a problemas de permeabilidad del mineral y flujo preferencial.

2.3.2 Lixiviación ROM (Run-of-Mine)

La lixiviación ROM se aplica directamente a minerales sin trituración. Se utiliza para grandes volúmenes de mineral de baja ley, a menudo bajo la ley de corte, como los sulfuros secundarios de cobre, y suele ser más económico, aunque menos eficiente. Según Watling (2020), la lixiviación ROM es una estrategia común para el procesamiento de sulfuros secundarios y óxidos de baja ley (SBL y OBL, respectivamente), debido a sus bajos costos iniciales.

- **Ventajas:** No requiere trituración previa, reduciendo costos iniciales, menor consumo energético durante la preparación del mineral.
- **Desventajas:** Baja eficiencia de extracción debido al difícil acceso por ser partículas muy gruesas y también por la falta de homogeneidad en el riego, largos tiempos de operación y más propenso a problemas de drenaje y estancamiento del lixivante.

2.3.3 Lixiviación in situ

La lixiviación in situ es un método que implica la inyección directa de soluciones lixiviantes en el cuerpo mineralizado, que permanece sin ser extraído del subsuelo. Este proceso es utilizado principalmente para minerales fácilmente solubles, como el uranio y, en algunos casos, el cobre. El lixivante, suministrado desde pozos de inyección, disuelve los elementos valiosos en el propio yacimiento, y la solución cargada con dichos elementos, se transporta lateralmente y se extrae a cierta distancia, mediante pozos de bombeo para su procesamiento.

- **Ventajas:** Eliminación de costos asociados con el transporte y trituración del mineral, menor impacto ambiental al evitar la generación de residuos sólidos significativos y posibilidad de aplicar el proceso directamente en cuerpos minerales inaccesibles o de baja ley.
- **Desventajas:** Difícil control de la solución lixivante en el subsuelo, lo que puede generar contaminación de acuíferos, baja recuperación del mineral en comparación con otros métodos y limitada a condiciones geológicas específicas y a ciertos tipos de depósitos. En general es un proceso cuestionable desde el punto de vista ambiental.

A continuación, se comentan los tipos de lixiviación según el lixivante.

2.3.4 Lixiviación ácida

La lixiviación ácida utiliza soluciones de ácidos fuertes, como el ácido sulfúrico, para disolver metales como cobre, níquel y zinc. Este método es particularmente efectivo en minerales oxidados y se utiliza ampliamente en la minería del cobre. Según Cisternas y Cáceres (2020), la lixiviación ácida es el método predominante para la extracción de cobre debido a su simplicidad y alta eficiencia.

- **Ventajas:** Alta recuperación de cobre en minerales oxidados, en particular óxidos verdes.
- **Desventajas:** No es eficiente para sulfuros secundarios o primarios, ni para óxidos negros.

2.3.5 Lixiviación amoniacal

Se utiliza principalmente para la extracción de metales como níquel y cobalto. En este proceso, el amoníaco actúa como agente lixivante en un medio alcalino, siendo efectivo para minerales refractarios. La lixiviación amoniacal es una alternativa sostenible para minerales ricos en níquel, destacando por su selectividad en comparación con los ácidos fuertes (Stewart et al., 2017).

- **Ventajas:** Baja corrosividad y capacidad para tratar minerales refractarios.

- Desventajas: Emanaciones contaminantes y menor eficiencia en comparación con lixiviantes ácidos para minerales convencionales.

2.3.6 Lixiviación férrico-bacteriana (Bio-lixivación)

Conocida también como “bioleaching”, este método emplea microorganismos para facilitar la oxidación y disolución de minerales sulfurados, como la calcopirita y la pirita, preferentemente a través del ion férrico, producido por oxidación del ion ferroso por parte de los microorganismos. Es una técnica sostenible y de bajo impacto ambiental. Watling (2015) enfatiza el rol de las bacterias en la lixivación de sulfuros refractarios, siendo una alternativa prometedora en la minería verde.

- Ventajas: Método ecológico, menor impacto ambiental, aplicable a minerales muy baja ley.
- Desventajas: Procesos más lentos y delicados en comparación con los métodos químicos.

2.3.7 Lixiviación férrica electroquímica (Ecowining)

El proceso desarrollado por la empresa chilena Protech, consiste en generar ion férrico mediante un proceso de electroobtención en una celda de compartimentos, donde en el cátodo se deposita cobre y en el ánodo, se ha reemplazado la oxidación convencional del agua por la oxidación del ion ferroso a férrico, el cual se emplea para lixiviar minerales sulfurados de cobre de baja ley (Simpson & Pizarro, 2022).

- Ventajas: disponibilidad de ion férrico generado electroquímicamente.
- Desventaja: Tecnología Ecowining aun en maduración, costos de energía relativamente altos.

2.3.8 Lixiviación clorurada

Este proceso utiliza una sal de cloruro o ácido clorhídrico como agente lixiviante, siendo efectivo para minerales sulfurados y en el reciclaje de materiales electrónicos. Se destaca por su alta eficiencia en la disolución de oro y cobre. Según Torres et al. (2019), la lixivación clorurada es una opción eficiente para minerales complejos y materiales secundarios.

- Ventajas: Alta eficiencia en sulfuros secundarios, con avances notables en la lixivación de sulfuros primarios.
- Desventajas: Mayor costo de operación debido al uso de reactivos clorados. En la etapa de curado emite gases de HCl que deben ser capturados.

2.3.9 Lixiviación nítrica

La lixivación con sales de nitrato (caliches) disueltas en ácido sulfúrico es efectiva para disolver minerales sulfurados refractarios como la calcopirita. Sin embargo, su

alto costo y los gases secundarios generados limitan su aplicación a escenarios específicos. Fuentes y Martínez (2021) destacan que la lixiviación nítrica presenta ventajas en términos de velocidad de reacción, aunque requiere sistemas robustos de manejo de los gases NOx que se forman.

- Ventajas: Alta velocidad de reacción para la disolución de sulfuros complejos y buena capacidad para procesar minerales primarios.
- Desventajas: Generación de gases tóxicos como óxidos de nitrógeno (NOx) y requiere sistemas robustos de control de emisiones.

2.4 Diagramas de flujo frecuentes

Para la lixiviación en pilas de minerales chancados, el mineral extraído desde la mina, se transporta en camiones hasta la tolva de alimentación del chancador primario, que puede estar o no, en la propia mina. La descarga del chancador primario se clasifica en harneros secundarios, donde el sobre tamaño alimenta los chancadores secundarios y el bajo tamaño puede ser producto final o bien alimentar a los harneros terciarios. La descarga de los chancadores secundarios alimenta a los harneros terciarios y desde allí, el bajo tamaño es producto final y el sobre tamaño se alimenta a los chancadores terciarios, que generalmente operan en circuito abierto, es decir, su descarga también es parte del producto final de la planta de chancado (Codelco educa, 2018).

Luego que el mineral está chancado, se alimenta mediante correas a tambores rotatorios, donde se agregan reactivos lixiviantes y agua para “curar” dicho mineral y proveerle la humedad necesaria para conseguir un buen aglomerado de los finos sobre los gruesos, de alta permeabilidad (Liceo Industrial Eulogio Moneo, 2021).

A continuación, viene el proceso de lixiviación propiamente tal, que generalmente procede en dos etapas, en la primera se riega con una solución intermedia, ILS o IPLS o PDS y finalmente se completa el ciclo de riego, aplicando solución refino de bajo contenido de cobre proveniente de la planta de extracción por solventes.

Se destaca que la lixiviación es la etapa que controla los ingresos económicos del negocio, pues tales ingresos se definen por el cobre que allí se recupera; esta situación motiva la búsqueda de alternativas más eficientes, entre las cuales está la optimización del riego, orientado a maximizar la tasa de disolución del cobre contenido.

Si se trata de pilas dinámicas, que operan sobre canchas, se remueven los ripios drenados empleando rotopala y luego, por correas o camiones, se transportan hasta el botadero de ripios donde pueden ser sometidos a una lixiviación secundaria, cuya solución se integra al circuito de soluciones de la lixiviación primaria, en donde, generalmente existen tres piscinas, una para la solución rica (PLS) que alimenta a la planta de extracción por solventes (SX), otra para la solución intermedia ILS o

IPLS y la tercera, para almacenar la solución refino, que después de un ajuste, generalmente retorna a la última parte del ciclo de lixiviación primaria.

La solución PLS alimenta a las etapas de extracción de la planta de SX, desde allí se genera un refino que reporta en la respectiva piscina y un orgánico cargado con cobre, que va a la etapa de reextracción o "stripping", previo paso por etapas de lavado para eliminar impurezas que contaminen el electrolito de electro obtención (EW). De la etapa de stripping sale una solución orgánica descargada de cobre, que retorna a la etapa de extracción y un electrolito cargado o rico que va a la nave de EW.

Finalmente, el electrolito cargado alimenta a un estanque de cabeza llamado TK de recirculación, desde donde se alimentan los diferentes circuitos de la nave EW, cuya descarga despojada en cobre, llamada electrolito pobre, recircula en parte al TK de recirculación y otra parte retorna al circuito de stripping para volver a cargarse con cobre en un nuevo ciclo de traspaso del cobre desde el PLS hasta el electrolito y una tercera parte del electrolito pobre, constituye el descarte de electrolito para evitar la acumulación de impurezas. En las celdas de EW se aplica una corriente eléctrica, con densidades de corriente generalmente entre 200 y 400 Ampere/m², para obtener cátodos de alta pureza, que son lavados y enzunchados, listos para su transporte hasta el puerto de embarque. La Figura 2 muestra un esquema con el diagrama comentado (De Re Metallica, 2000).

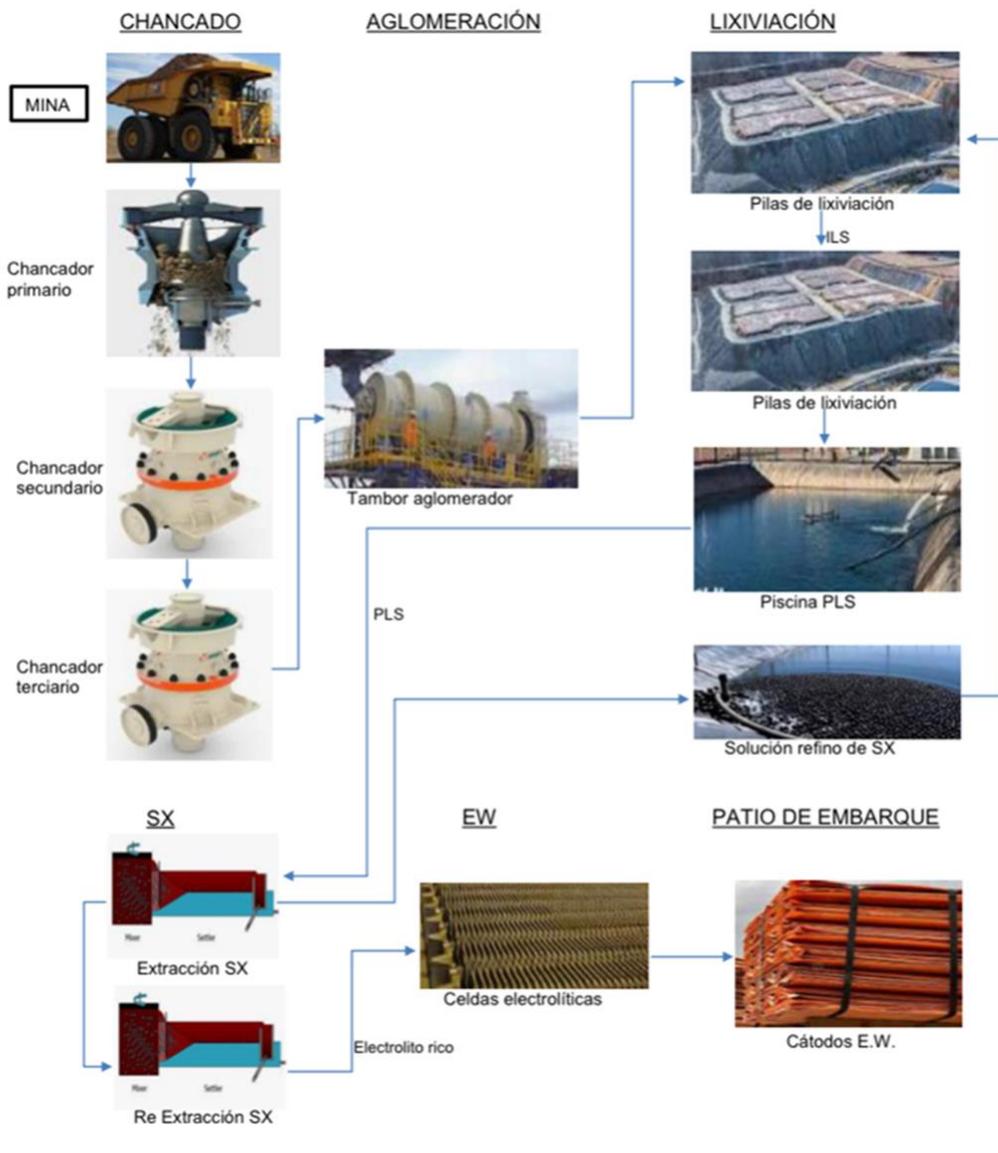


Figura 2. Flujo Planta Hidrometalúrgica. (Elaboración propia, 2024).

2.5 Variables químicas del proceso

La lixiviación de cobre es un proceso que involucra la disolución del cobre presente en el mineral mediante el uso de soluciones lixiviantes, principalmente ácido sulfúrico y de ion férrico en el caso de los sulfuros de cobre. A lo largo de este proceso, diversas variables químicas juegan un papel crucial en la eficiencia de la extracción del metal. A continuación, se describen las principales variables químicas que influyen en la lixiviación de cobre:

2.5.1 Tasa de adición de Ácido (H_2SO_4)

La tasa de adición de ácido es un aspecto fundamental en la lixiviación de cobre, especialmente cuando se trabaja con óxidos y sulfuros. En el caso de los óxidos de

cobre, como la malaquita y la azurita, se requiere una tasa elevada de ácido para neutralizar la ganga alcalina (carbonatos) y así mejorar la eficiencia del proceso. Estos minerales suelen responder positivamente a un aumento en la concentración del lixiviante ácido, lo que favorece la disolución del cobre. En los sulfuros de cobre, como la calcosina y la calcopirita, el ácido por sí solo no es suficiente para romper la estructura cristalina del mineral. En este tipo de minerales, el ácido sulfúrico debe ser combinado con agentes oxidantes, como el ion férrico, el oxígeno o el peróxido de hidrógeno, para facilitar la disolución del cobre (Mishra et al., 2020).

El ácido sulfúrico es el reactivo más comúnmente utilizado en los procesos de lixiviación de cobre. La concentración del ácido debe ser cuidadosamente ajustada, de acuerdo con las características específicas del mineral que se trata, ya que una tasa excesiva de ácido puede generar costos operativos adicionales y aumentar el impacto ambiental debido a la disolución de impurezas no deseadas y también la generación de gases tóxicos. Por otro lado, una tasa insuficiente de ácido puede reducir la eficiencia del proceso, ya que no lograría disolver la cantidad deseada de cobre. Por lo general, las tasas de adición de ácido sulfúrico van de 5 kg/t hasta 60 kg/t, optimizando así la recuperación del metal mientras se minimizan los costos y los efectos adversos sobre el medio ambiente (Huang & Zhang, 2018).

2.5.2 Tasa de adición de Oxígeno (O₂)

El oxígeno desempeña un papel crucial en la oxidación de minerales de cobre, especialmente en aquellos de tipo sulfuros, como la calcopirita y la bornita. Este proceso de oxidación es esencial para liberar el cobre en una forma soluble que pueda ser extraída mediante lixiviación. En sistemas de lixiviación, una concentración adecuada de oxígeno, que puede ser proporcionada por inyección de aire o mediante agitación del sistema, es fundamental para acelerar las reacciones químicas y optimizar la disolución del cobre. La presencia de oxígeno favorece la conversión de los sulfuros en compuestos más solubles, como el sulfato de cobre, lo que mejora significativamente la eficiencia del proceso de extracción (Zhao et al., 2021).

En los procesos de lixiviación de sulfuros, el oxígeno no solo facilita la oxidación de los minerales, sino que también es crucial para mantener una cinética de reacción adecuada. En sistemas agitados o en lixiviación in situ, se recurre a la aireación o a la adición de oxígeno puro para asegurar que la concentración de oxígeno se mantenga en niveles óptimos. Este control es necesario para que las reacciones de oxidación se lleven a cabo de manera eficiente, mejorando la velocidad de disolución del cobre y, en consecuencia, la recuperación del metal. La gestión adecuada del oxígeno en estos sistemas es un factor determinante para la efectividad global del proceso de lixiviación (Zhang & Li, 2020).

En la práctica industrial de la lixiviación de minerales sulfurados de cobre, el oxígeno no oxida directamente a los sulfuros, sino que oxida al hierro férrico, el cual ataca al sulfuro, volviendo a ser hierro ferroso, el cual vuelve a oxidarse a férrico por medio del oxígeno y así sucesivamente. Esta reacción se ve favorecida si la lixiviación se conduce en un medio alto en cloruro, donde el ion cuproso es estable y su oxidación por el aire inyectado, lo oxida a cobre cúprico, el cual, a su vez, oxida al hierro ferroso a férrico, el cual ataca al sulfuro de cobre y él vuelve a ser cobre cuproso y así sucesivamente.

2.5.2 Concentración de Cu^{2+} (Iones de Cobre)

La concentración de iones Cu^{2+} en la solución lixivante es una medida clave del progreso y la eficiencia del proceso de lixiviación de cobre. Este parámetro indica la cantidad de cobre que ha sido extraída del mineral y disuelta en la solución. Es crucial mantener una concentración controlada de iones Cu^{2+} durante el proceso, ya que niveles elevados pueden frenar la cinética de disolución del cobre desde el mineral, lo que reduce la efectividad de la lixiviación y puede generar pérdidas de material valioso (Hussain et al., 2019). Por lo tanto, el monitoreo constante y el control de la concentración de Cu^{2+} son esenciales para optimizar la recuperación de cobre rentable (Pérez et al., 2021).

En el caso de la lixiviación clorurada, la presencia de cobre en solución, en niveles moderados, 1 a 2 g/L, favorece la cinética de disolución del cobre, porque en este caso el cobre es parte de los agentes lixivantes (cupla cuproso/cúprico).

2.5.3 Temperatura

La temperatura del lixivante es un factor crítico que influye directamente en la velocidad de las reacciones químicas durante la lixiviación de cobre. En este proceso, el incremento de la temperatura puede acelerar las reacciones, lo que resulta en una mayor velocidad de disolución del metal. Este efecto es relevante en el caso de los sulfuros, en particular de la calcopirita, cuya alta energía de activación, la hace muy sensible a la temperatura para disolverse eficientemente; en el caso de los óxidos, aumentar la temperatura no ayuda de manera significativa, aunque es mayor en el caso de los óxidos negros en comparación con los óxidos verdes. En los casos donde mejora la eficiencia del proceso, también incrementa el consumo de energía, lo que eleva los costos operativos (Wang & Li, 2019). Además, la elevación de la temperatura puede favorecer la formación de subproductos no deseados, como gases tóxicos o la descomposición de compuestos lixivantes, lo que podría afectar la viabilidad y la sostenibilidad del proceso (Chen et al., 2020). En términos conceptuales, el efecto de la temperatura en la cinética específica de lixiviación, se representa a través de la ecuación de Arrhenius (1884). (Arrhenius, 1884, citado en Batiot et al., 2021).

2.5.4 Concentración de Impurezas

En el proceso de lixiviación de cobre, la presencia de iones metálicos, como Fe^{3+} y Al^{3+} , pueden tener un impacto negativo en la eficiencia del proceso. Estos iones no solo compiten con el cobre por el espacio en las soluciones lixiviantes, sino que también pueden interferir en la disolución del cobre al formar compuestos insolubles. La precipitación de estos iones puede generar sólidos que obstruyen el flujo de la solución, bajando la permeabilidad y, por ende, reduciendo la eficacia de la lixiviación (jarositas, alunitas, crandalitas, arseno crandalitas, entre otras). Esta situación es especialmente relevante en procesos donde el objetivo es obtener una alta pureza de cobre, ya que la acumulación de estas impurezas puede requerir etapas adicionales de purificación, aumentando los costos operativos y prolongando el proceso (Bendall et al., 2018).

Las impurezas metálicas, como el magnesio y el manganeso, pueden interferir en la lixiviación al competir con el cobre por los reactivos o lixiviantes utilizados, como el ácido sulfúrico, o al formar precipitados no deseados que reducen la efectividad del proceso por disminución de la permeabilidad. Es crucial monitorear y controlar su presencia, ya que su acumulación no solo disminuye la recuperación de cobre, sino que también puede alterar las condiciones químicas de la solución lixivante, afectando negativamente las reacciones de disolución. La gestión de estas impurezas es esencial para mantener la eficiencia y la rentabilidad de la operación de lixiviación (Nobrega et al., 2019).

El manganeso en las soluciones suele provenir de la disolución de óxidos negros como el Copper Wad (CuO.MnO_2), especie refractaria a la lixiviación sulfúrica, pero que se disuelve con facilidad en presencia de iones ferroso, luego si en un yacimiento existe copper wad y sulfuros, como por ejemplo calcosina, su tratamiento conjunto genera una sinergia positiva, ya que el hierro ferroso reduce al Mn^{+4} del copper wad y por ende, disuelve al cobre allí contenido y él, a su vez, genera hierro férrico, el cual disuelve a la calcosina, volviendo a su estado de hierro ferroso y así sucesivamente.

2.5.5 Tiempo de residencia

El tiempo de residencia se refiere al período durante el cual el lixivante permanece en contacto con el mineral en una pila de lixiviación (en una pasada), no debe confundirse con el tiempo de riego o tiempo de lixiviación, durante el cual el contacto es mucho mayor que el tiempo por pasada. En sistemas de lixiviación en pilas, por ejemplo, el tiempo de residencia depende del flujo de riego, del volumen de poros por donde circula la solución y de la conectividad de la red de poros, además de la distribución de permeabilidad del mineral a través de la pila. Un tiempo de residencia adecuado permite que el lixivante disuelva una mayor cantidad de cobre, pero un tiempo excesivo puede incrementar los costos operativos sin ofrecer beneficios

adicionales en la recuperación. Por lo tanto, se debe encontrar un equilibrio entre un tiempo de residencia óptimo y la eficiencia del proceso (Zhang et al., 2020).

2.5.6 Tiempo de lixiviación

Como ya se indicó antes, el tiempo de lixiviación se refiere al período total durante el cual el mineral se encuentra expuesto al lixivante, con el fin de permitir la disolución del cobre. Este parámetro es crucial en procesos tanto a gran escala (como en lixiviación en pilas) como en operaciones más controladas (como la lixiviación en columnas). El tiempo de lixiviación debe ser suficientemente largo para permitir la máxima extracción de cobre, pero también debe evitarse que el proceso sea innecesariamente largo, lo que podría incrementar los costos operativos y consumir más recursos. Un tiempo de lixiviación excesivo puede generar un uso ineficiente del lixivante, además de aumentar el riesgo de reacciones secundarias o la acumulación de impurezas en la solución (Sánchez et al., 2019).

En la práctica, la cinética de disolución del cobre obedece a una curva exponencial amortiguada, es decir, crece rápido al comienzo y luego se va aplanando hasta alcanzar un plateau horizontal (generalmente es un proceso lineal y de primer orden). En cada intervalo de tiempo se puede calcular el incremento de recuperación (aporte a los ingresos) y el respectivo incremento de consumo de ácido (costo), que, junto a los costos diferenciales de operación restantes, permite determinar el tiempo en el cual el incremento de recuperación de cobre ya no paga el incremento de costos involucrados y por ende marca el tiempo de lixiviación óptimo. Los tiempos industriales de lixiviación suelen estar entre 45 días y 400 días, aproximadamente.

2.5.7 Tasa de adición de Cloruros (Cl^-)

En algunos procesos de lixiviación, se emplean soluciones lixiviantes cloruradas, como el cloruro de sodio o sal común, especialmente cuando se busca extraer cobre desde minerales sulfurados. El uso de cloruros en la solución lixivante tiene un impacto directo en la solubilidad del cobre, ya que estos compuestos pueden formar complejos más solubles con el metal, lo que mejora la eficiencia en la disolución de minerales sulfurados refractarios. Esta técnica es comúnmente utilizada cuando los métodos tradicionales de lixiviación con ácido sulfúrico no son tan efectivos (Ravanchi et al., 2019).

Los cloruros, al ser utilizados en lixiviación mejoran la cinética del proceso en medios ácidos, estabilizando los complejos metálicos y acelerando la liberación del cobre. Además, es importante tener en cuenta que adiciones muy altas de cloruros están limitadas por el alto costo de la sal y también pueden tener efectos laterales indeseados, como la emanación de gases de ácido clorhídrico. Por esta razón, el control de la adición de cloruros es importante para balancear la mejora en la

eficiencia de lixiviación de los sulfuros de cobre, con los costos y riesgos operativos asociados (Gavriilidis et al., 2018).

2.5.8 Tasa de Riego

La tasa de riego del lixivante a través de la pila de mineral es un parámetro crítico en los procesos de lixiviación, ya que determina la eficiencia con la que el lixivante entra en contacto con las partículas del mineral. Esta variable es especialmente importante en procesos de lixiviación en pilas, donde el lixivante fluye lentamente a través del lecho de mineral. Una tasa de percolación controlada garantiza que el lixivante tenga tiempo suficiente para extraer el cobre de las partículas, maximizando así la disolución del metal. Si la tasa es demasiado alta, el lixivante puede no interactuar completamente con el mineral, además de dañar la estructura de poros, lo que reduce la eficiencia de la extracción. Por el contrario, una tasa demasiado baja puede alargar innecesariamente el proceso, aumentando los costos operativos (Zhang et al., 2020).

En términos de operación, la tasa de percolación se refiere a la velocidad con la que la solución lixivante fluye a través de la pila o columna de lixiviación. Es fundamental que esta tasa sea adecuada para asegurar un contacto uniforme entre el lixivante y el mineral, lo que optimiza la extracción del cobre. Una percolación controlada permite que el lixivante se distribuya de manera eficiente, mejorando la recuperación del metal y reduciendo el riesgo de desperdicio o disolución ineficiente. En este sentido, ajustar la tasa de percolación según las características del mineral y las condiciones operativas es esencial para maximizar la eficiencia del proceso de lixiviación (Matsumoto & Watanabe, 2019).

Lo más importante es que la tasa de riego debe ser compatible con la conductividad hidráulica de la pila. Esta última depende de la humedad del lecho poroso, expresada como fracción o porcentaje de llenado de la porosidad (saturación de poro). En condiciones normales la saturación de poro durante el riego varía entre 40% y 70%, para minerales de buena y mala calidad física, respectivamente. La tasa de riego se debe elegir de manera que la saturación de poro resultante esté en el rango señalado, más abajo no es económico y más arriba, aparecen fenómenos geotécnicos no deseados, calificados como fenómenos de licuefacción estática, que inducen riego desuniforme y por ende, bajan la recuperación del cobre desde la pila. En un caso extremo, se pueden producir deslizamientos masivos de pila con impacto negativo, no sólo en la producción y los costos, sino también en la seguridad de los operadores y personal en general.

2.6 Variables físicas de proceso

La lixiviación depende de una serie de factores físicos que afectan directamente la eficiencia del proceso. Estas incluyen el tamaño de partículas, la altura de la pila, la

tasa de riego, la permeabilidad y la temperatura, los cuales influyen en el flujo de la solución lixivante y la cinética de disolución del metal.

2.6.1 Tamaño de partículas

El tamaño de las partículas es un factor crucial en los procesos de lixiviación, ya que influye directamente en la superficie de contacto entre el mineral y la solución lixivante. Este parámetro es especialmente relevante en procesos como la lixiviación en pilas, donde la velocidad de disolución del cobre depende en gran medida de la exposición del mineral al lixivante. Un tamaño de partícula más pequeño aumenta la superficie específica, lo que facilita una mayor disolución del cobre y mejora la eficiencia del proceso. Sin embargo, si el tamaño de las partículas es demasiado pequeño, puede generar problemas hidrodinámicos (disminución inaceptable de la permeabilidad) y geomecánicos (menor estabilidad del esqueleto de la pila), todo lo cual genera un flujo desuniforme del líquido lixivante con pérdida de eficiencia de la extracción del cobre. Por lo tanto, es esencial encontrar un equilibrio adecuado en el tamaño de las partículas para optimizar la recuperación de cobre y mantener la eficiencia operativa (Jiang et al., 2021).

2.6.2 Altura de la pila

La altura de la pila es un factor determinante en los procesos de lixiviación, especialmente en la lixiviación en pilas, que es comúnmente utilizada para minerales de baja ley. La altura de la pila afecta directamente la presión ejercida sobre las capas inferiores del mineral, lo que influye en la permeabilidad de la pila y, por ende, en la eficiencia del flujo de solución lixivante. A medida que la pila aumenta de altura, la presión sobre las capas inferiores también incrementa, lo que puede reducir la porosidad y afectar negativamente la circulación del lixivante. Si la pila es demasiado alta, se puede generar una compactación excesiva de las partículas de mineral en la base, lo que disminuye la permeabilidad y obstaculiza el flujo eficiente de la solución. Esto a su vez puede reducir la efectividad del riego y ralentizar la velocidad de lixiviación, afectando la recuperación de cobre.

Adicionalmente, si la pila es de mayor altura, aumenta el tiempo de riego para lograr la misma razón de lixiviación, esto es, pasar los mismos m^3/t de mineral en la pila. Un ciclo más largo, aumenta la formación de canales preferenciales de circulación del líquido y a la vez, aumenta el tiempo de contacto del mineral, lo que favorece la decrepitación del mineral o chancado químico, como suele ser llamado este fenómeno indeseado, que contribuye a aumentar la ocurrencia de fenómenos de liquefacción estática mencionados antes. Por lo tanto, es esencial controlar la altura de la pila para optimizar la eficiencia del proceso de lixiviación (Yuan et al., 2020).

2.6.3 Permeabilidad

La permeabilidad es un factor crucial en los procesos de lixiviación, especialmente en lixiviación en pilas, donde el lixivante debe fluir a través de un lecho poroso de mineral. La permeabilidad del lecho afecta directamente la distribución y el flujo de la solución lixivante, determinando su capacidad para alcanzar y disolver el cobre presente en las partículas de mineral. Una permeabilidad adecuada asegura que el lixivante pueda penetrar de manera uniforme y eficiente en la pila o columna, garantizando que todas las partículas de mineral entren en contacto con la solución. Si la permeabilidad es demasiado baja, el lixivante puede no fluir correctamente, lo que genera zonas secas y reduce la eficiencia de la lixiviación. Por otro lado, una permeabilidad excesiva puede generar una distribución no controlada del lixivante, lo que podría resultar en el desperdicio de solución. Por tanto, es esencial mantener una permeabilidad adecuada en el lecho poroso para maximizar la recuperación del cobre (Smith et al., 2020).

2.6.4 Temperatura

La temperatura es un factor fundamental en los procesos de lixiviación, especialmente cuando se busca optimizar la disolución del cobre de minerales en condiciones controladas. En estos procesos, un aumento en la temperatura incrementa la velocidad de las reacciones químicas, favoreciendo una mayor solubilidad del cobre en la solución lixivante. Esto es particularmente útil en la lixiviación de minerales más refractarios o cuando se busca acelerar el proceso. Sin embargo, es importante considerar que temperaturas excesivamente altas pueden generar costos operativos adicionales, debido al aumento en el consumo de energía, y también pueden afectar la estabilidad del lixivante, provocando su descomposición o la formación de subproductos indeseados. Además, temperaturas muy elevadas pueden causar reacciones no controladas que afectan la eficiencia del proceso. Por lo tanto, es esencial mantener la temperatura dentro de un rango óptimo que favorezca la disolución del cobre sin incrementar innecesariamente los costos operativos (Chen et al., 2021).

2.6.5 Razón de lixiviación

La razón de lixiviación, RL, medida en m³/t, es un parámetro de diseño de la lixiviación en pilas. Cuando se conducen pruebas de lixiviación en columnas, se suele escalar la RL al mismo valor, pero en otras condiciones. La RL se define como:

Ecuación 1 Razón de lixiviación

$$RL = \frac{qt}{\rho L} \quad (1)$$

Donde:

q: Tasa de riego.

t: Tiempo de riego.

ρ : Densidad aparente de la pila o columna.

L: altura.

Entonces, si la prueba de columna se realiza con $q = 6 \text{ L/h/m}^2$, por 45 días, con una densidad aparente de $1,65 \text{ t/m}^3$ en columnas de 1m, entonces la $RL = 3,93 \text{ m}^3/\text{t}$. Si se desea aplicar este resultado a pilas de 6 m conservando la misma tasa de riego y densidad aparente, entonces el tiempo de lixiviación debe ser de 270 días para que se satisfaga la misma razón de lixiviación. En rigor, este procedimiento es válido para minerales de alta solubilidad y rápida cinética de disolución del cobre, pero su uso se extiende, incorrectamente, más allá de tal condición (Menacho et al., 2019).

2.7 Estado del arte y motivación del presente estudio

La hidrometalurgia ha sido una herramienta clave en la extracción de metales valiosos como el cobre, inicialmente, permitiendo la recuperación de recursos a partir de minerales oxidados de alta ley en Chuquicamata. Sin embargo, la realidad actual de la minería se enfrenta a un panorama cambiante: las capas más superficiales de los yacimientos, que contienen los minerales oxidados, se han agotado o están llegando a su fin, y los mixtos y sulfuros inferiores, bajo la ley de corte en la Concentradora, aparecen como la alimentación preferida a las plantas hidrometalúrgicas. Esta transición implica nuevos desafíos operacionales y una creciente necesidad de optimizar los procesos de lixiviación.

En términos generales, los resultados de la lixiviación dependen, por un lado, de la cinética de disolución de las especies mineralógicas individuales y por otro, del acceso de las soluciones lixiviantes a la masa completa de mineral, ya que, si el riego no es uniforme, existirán porciones de la pila, que no aportarán el cobre que debieran, por el limitado acceso de las soluciones a las diferentes zonas de la pila. Se destaca que la ciencia que estudia los patrones de flujo y la uniformidad de estos al infiltrarse por la pila, se denomina Hidrodinámica de lechos porosos en régimen de saturación variable.

El presente trabajo surge en un contexto en que es crucial comprender y optimizar los procesos hidrodinámicos que ocurren dentro de las pilas de lixiviación. A menudo, se pasa por alto la importancia de este fenómeno en la recuperación de cobre, a pesar de que su influencia es determinante en la eficiencia de la lixiviación, especialmente cuando se trabaja con minerales de baja ley y de baja calidad física. La distribución del fluido, la velocidad de percolación y la interacción entre el lixivante y el mineral son factores fundamentales que afectan directamente la recuperación del metal y, por ende, la rentabilidad del proceso.

Este estudio está orientado a poner en evidencia la relevancia de comprender y controlar la hidrodinámica de las pilas de lixiviación, una disciplina que, aunque poco explorada, es esencial para maximizar la eficiencia de los procesos y asegurar que la minería del cobre siga siendo sostenible, incluso en un escenario de recursos limitados. A través de este análisis, se busca no solo mejorar el rendimiento operativo, sino también contribuir a la toma de decisiones informadas que impulsen la innovación en la hidrometalurgia operacional.

Como ya se mencionó anteriormente, en la vía principal de procesamiento hidrometalúrgico, el mineral extraído desde la mina es sometido a procesos de chancado y clasificación en harneros secos, luego, el producto final de la planta de chancado pasa por tambores rotatorios, donde agentes químicos curan y aglomeran el mineral. Esto último significa que inducen que los finos se adhieran sobre los gruesos y después el mineral aglomerado se traslada hasta las canchas de lixiviación, donde se apila, generalmente con equipo “stacker”, disponiendo el mineral sobre una capa drenante, dispuesta sobre una capa impermeable. Sobre la capa drenante, se disponen tuberías drenaflex, espaciadas a una cierta distancia para facilitar la evacuación de soluciones por la zona inferior de la pila. Encima de las pilas se dispone una malla de goteros o aspersores y se riega, partiendo con bajo flujo, el cual se incrementa hasta la tasa de riego deseada. Los ciclos de riego se extienden por periodos de 45 días hasta 400 días, aproximadamente, regando con una o dos soluciones. Los efluentes generan una solución rica, llamada PLS (Pregnant Leach Solution), la cual alimenta la planta de extracción por solventes, donde el cobre se traslada selectivamente desde la solución de lixiviación de baja concentración y alto nivel de impurezas, hasta un electrolito con bajas impurezas y de alta concentración de cobre, desde donde se obtienen los cátodos por aplicación de una corriente eléctrica.

Durante la lixiviación, la infiltración de soluciones puede ser más o menos uniforme, lo que impacta la recuperación del cobre. Además, ocurren fenómenos de migración de los finos y formación de capas de baja permeabilidad, que aumentan la desuniformidad del escurrimiento y bajan la recuperación del cobre. Este fenómeno se denomina “sufusión” (Petersen et al., 2016) y su estudio es uno de los propósitos centrales del presente trabajo.

A través de esta investigación, se pretende evaluar el impacto de la sufusión en la lixiviación de minerales, analizando el comportamiento del flujo del lixivante bajo diferentes condiciones experimentales de transporte del líquido. Para ello, se han diseñado pruebas específicas utilizando sulfato de cobre pentahidratado como trazador, lo que permite visualizar y cuantificar la distribución del fluido en presencia y ausencia de sufusión. Este análisis contribuye a una mejor comprensión de la hidrodinámica en pilas de lixiviación y proporcionará información clave para el

diseño y optimización de futuras estrategias de riego, con el objetivo de maximizar la recuperación de cobre y mejorar la eficiencia global del proceso hidrometalúrgico.

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

3.1 Revisión Bibliográfica

3.1.1 Hidrodinámica de lechos porosos con saturación variable

La hidrodinámica de lechos porosos con saturación variable es fundamental para comprender y predecir el comportamiento de fluidos en medios donde la porosidad y la saturación de fluidos cambian espacial y temporalmente. Este conocimiento es esencial en aplicaciones como la gestión de recursos hídricos, la ingeniería de yacimientos petrolíferos y la remediación de suelos contaminados.

En medios porosos parcialmente saturados, la permeabilidad efectiva depende de la saturación del fluido, afectando significativamente el flujo. Nguyen et al. (2021) desarrollaron un modelo fractal para predecir la permeabilidad en medios porosos tanto saturados como parcialmente saturados, relacionando propiedades microestructurales del medio con la saturación del agua. Este modelo mostró una buena correlación con datos experimentales, proporcionando una herramienta útil para estimar la permeabilidad en función de la saturación.

Pedersen y Hansen (2022) introdujeron una parametrización del flujo bifásico inmisible en medios porosos, utilizando coordenadas polares para describir la saturación del fluido en infiltración. Esta representación matemática permite una comprensión más profunda de las relaciones entre las variables que gobiernan el flujo en sistemas con saturación variable.

La comprensión de la hidrodinámica en lechos porosos con saturación variable es esencial para optimizar procesos industriales y ambientales, que involucran el flujo de fluidos en medios porosos. La integración de modelos teóricos con datos experimentales permite mejorar la precisión en la predicción del comportamiento de estos sistemas, facilitando el diseño y la implementación de estrategias más eficientes en diversas aplicaciones.

3.1.2 Ecuación de Richards

La ecuación de Richards es una herramienta fundamental en la modelación del movimiento de soluciones en medios porosos no saturados, como las pilas de lixiviación. Formulada por Lorenzo A. Richards en 1931, esta ecuación combina la ley de Darcy para flujo en medios porosos con la ecuación de continuidad, permitiendo describir cómo el contenido de humedad varía en función del tiempo y el espacio en suelos parcialmente saturados.

Matemáticamente, la ecuación de Richards en una dimensión se expresa como:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[k(\theta) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] \quad (2)$$

Donde:

θ : es la humedad volumétrica (función de la saturación).

$k(\theta)$: es la conductividad hidráulica no saturada, dependiente de θ .

h : es la carga de presión (potencial matricial).

z : es la altura gravitacional (potencial gravitacional).

t : es el tiempo.

La ecuación anterior tiene incorporada la Ley de Darcy, la cual establece que el flujo de agua (q) en medios porosos de saturación variable es proporcional al gradiente hidráulico (∇h):

$$q = -k\nabla h \quad (3)$$

Donde:

q : flujo de agua.

k : conductividad hidráulica.

∇h : gradiente hidráulico.

En condiciones de saturación variable, se considera que tanto la conductividad hidráulica (k) como el contenido de líquido (θ) dependen de la presión del agua en el suelo (h), lo que lleva a una relación no lineal.

La Ecuación de Richards se utiliza en múltiples aplicaciones, como la modelación de infiltración de agua en suelos, drenaje en cultivos agrícolas y estudios de remediación de aguas subterráneas. Si bien es una herramienta poderosa, la no linealidad de $k(\theta)$ y las condiciones iniciales y de frontera pueden dificultar su resolución analítica, requiriendo métodos numéricos para su solución (Šimůnek et al., 2008).

3.1.3 Modelo de van Genuchten

El modelo de van Genuchten (1980) es una herramienta ampliamente utilizada para describir la relación entre la presión del agua (h) y la saturación volumétrica (θ) en medios porosos no saturados. Este modelo es fundamental en el análisis hidrodinámico de medios porosos y es una extensión importante en la parametrización de la ecuación de Richards para flujos en condiciones de saturación variable.

La función de retención de agua se expresa como:

$$\theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \frac{e^{\alpha |h|}}{1 + e^{\alpha |h|}} + (\alpha |h|)^n \frac{\theta_s - \theta_r}{1 + e^{\alpha |h|}} \quad (4)$$

Donde:

$\theta(h)$: Contenido volumétrico de agua como función de la presión del agua.

θ_s : Contenido volumétrico de agua en saturación.

θ_r : Contenido volumétrico de agua residual.

h : Presión del agua o potencial matricial.

α, n : Parámetros de ajuste del modelo que dependen del tipo de suelo.

m : $1 - (1/n)$: Relación entre los parámetros.

El modelo de van Genuchten también se extiende a la conductividad hidráulica (K) en suelos no saturados, combinando la función de retención de agua con una relación empírica:

$$K(\theta) = K_s S_e^L \left(\frac{e^{\alpha |h|}}{1 + e^{\alpha |h|}} \right)^m \frac{\theta_s - \theta_r}{1 + e^{\alpha |h|}} \quad (5)$$

Donde:

$K(\theta)$: Conductividad hidráulica como función de la saturación.

K_s : Conductividad hidráulica en saturación.

$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$: Saturación efectiva.

L : Parámetro adimensional relacionado con la estructura del suelo.

El modelo es fundamental en la simulación de procesos de infiltración, drenaje y transporte de solutos en suelos agrícolas y en estudios de remediación de aguas subterráneas. Se utiliza en herramientas como el software HYDRUS para resolver problemas de flujo en medios porosos no saturados (Šimůnek et al., 2008).

3.1.4 Modelo DRM-Fractal permeabilidad saturada

El modelo fractal DRM (De Re Metallica) es un modelo matemático desarrollado para estimar la conductividad hidráulica saturada en procesos de lixiviación en pilas, particularmente en la industria minera. Este modelo fue presentado en la tesis de grado de Michael Rivera Mayta en septiembre de 2009, bajo la supervisión del Dr. Jorge Menacho.

El modelo DRM fractal se basa en principios de la geometría fractal para describir la estructura de los poros en los medios porosos, como los lechos de minerales que se utilizan en la lixiviación en pilas. La geometría fractal es una herramienta matemática que permite describir formas irregulares y complejas, como las que se encuentran en la naturaleza, incluyendo la estructura de los poros en los suelos y minerales.

El modelo DRM fractal tiene varias aplicaciones en la industria minera y en otros campos relacionados con la hidrodinámica de medios porosos. A continuación, se describen sus principales usos.

a) Estimación de la conductividad hidráulica saturada

El modelo DRM fractal se utiliza para predecir la conductividad hidráulica saturada de los lechos porosos en pilas de lixiviación. Esto es crucial para determinar la tasa de riego óptima que debe aplicarse a la pila para maximizar la recuperación de metales como el cobre y el oro.

La conductividad hidráulica saturada es un parámetro fundamental en el diseño de sistemas de riego y drenaje en las pilas de lixiviación.

b) Optimización de procesos de lixiviación

El modelo de permeabilidad saturada, junto a la ecuación de Richards, permite optimizar el proceso de lixiviación al predecir cómo fluye la solución lixivante a través del lecho poroso. Esto ayuda a mejorar la eficiencia del proceso y a reducir los costos operativos.

Además, el modelo DRM fractal puede ser utilizado para estudiar la permeabilidad intrínseca del mineral, lo que es esencial para diseñar pilas de lixiviación más eficientes.

c) Reducción de costos y tiempo de respuesta

Una de las ventajas del modelo DRM fractal es que reduce la necesidad de realizar costosas y laboriosas pruebas de laboratorio para medir la conductividad hidráulica saturada. En su lugar, el modelo permite estimar este parámetro de manera rápida y confiable, lo que es especialmente útil en la industria minera, donde se requieren resultados inmediatos.

d) Aplicaciones en hidrogeología y geotecnia

El modelo DRM fractal, junto a la ecuación de Richards, también puede ser utilizado en estudios hidrogeológicos para analizar el flujo de agua subterránea y el transporte de contaminantes en medios porosos.

En geotecnia, el modelo DRM fractal puede ser aplicado para estudiar la estabilidad de suelos y la infiltración de agua en estructuras como presas y diques.

La ecuación de trabajo publicada por Rivera y Menacho (2009) es la siguiente:

$$K_{LS} = \frac{g\rho}{\mu} \left[m^0 \left(\frac{Sh}{100} \sum_{i=1}^{n_k} \frac{P_i}{d_{im}} \right)^{(2-x)} \right]^{-1} \left(\frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2} (\varepsilon - \varepsilon_p) \right) \quad (6)$$

m^0 : Factor de empaquetamiento del medio poroso, generalmente 5.

Sh: Factor de forma de los granos; (6 para esferas y 7,7 para partículas angulares).

P_i : Porcentaje de material clase i , es decir, entre malla d_i y d_{i+1} .

d_{im} : Diámetro medio del grano clase i , cm.

ε : Porosidad; ε_p es la porosidad Proctor del 95%.

x : Constante fractal de la geometría del poro, generalmente 0,7.

3.1.5 Simulación flujo transiente pila lixiviación

El punto de partida son las ecuaciones de continuidad (balance diferencial de masa) y movimiento (ecuación de Darcy). En una dimensión.

a) Ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial q}{\partial z} \quad (7)$$

Donde:

θ : contenido líquido (humedad volumétrica).

q : velocidad de infiltración del fluido.

t : tiempo.

z : la coordenada vertical.

Esta ecuación tiene 2 incógnitas, θ y q , por lo tanto, se requiere una segunda ecuación para tener definido el problema, tal relación es la ecuación de momentum, en este caso, la ecuación de Darcy.

b) Ecuación de movimiento:

$$q = -K \frac{\partial}{\partial z} (h + z) \quad (8)$$

Donde:

K: conductividad hidráulica no saturada.

h: potencial matricial.

z: potencial de gravedad.

Combinando las ecuaciones anteriores se deriva la ecuación de Richards:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial h}{\partial z} \right) + \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (9)$$

La relación 9 es la ecuación fundamental a resolver. En general no tiene solución analítica conocida y suele ser resuelta en forma numérica.

Para solucionar la ecuación anterior, se deben definir condiciones de borde apropiadas, tal como se describe a continuación.

Se supone conocida la humedad inicial de la pila, expresada como humedad volumétrica:

$$\theta(z, 0) = \theta_{\text{inicial}} \quad (10)$$

Se supone conocido el vector de riego durante todo el ciclo de lixiviación:

$$-K \frac{\partial}{\partial z} (h + z) = q(0, t) \quad (11)$$

Se asume conocida la altura $z = L$ de la pila, invariante durante todo el ciclo de lixiviación:

$$\frac{\partial \theta(L, t)}{\partial z} = 0 \quad t \geq 0 \quad (12)$$

Para completar la descripción del transporte líquido en un medio poroso de saturación variable, se requiere información adicional, ya que en la ecuación de Richards aparecen las funciones K y h, que deben ser relacionadas con el contenido líquido θ o humedad volumétrica.

c) Curva SWCC (van Genuchten, 1980):

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + |\alpha h|^n\right]^m}; \quad m = 1 - 1/n \quad (13)$$

d) Curva K, conductividad hidráulica como función de la saturación de poro (van Genuchten, 1980):

$$K(S) = K_s S_e^{L_e} \left[1 - (1 - S_e^{1/m})^m\right]^2 \quad (14)$$

Donde la saturación efectiva de poro, se define según:

$$S_e = \frac{\theta(h) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (15)$$

Como resultado se obtiene el vector de caudal efluente de la pila y el volumen de líquido en su interior, ambos en función del tiempo.

El uso práctico del modelo descrito demanda medición experimental de la curva SWCC y de la curva K. Hay ensayos geomecánicos que se realizan para este efecto según normas ASTM. Sin embargo, la sintonización final siempre se realiza con data de planta. Ello asegura que el modelo puede simular adecuadamente la realidad industrial.

A comienzos de los 2000, DRM desarrolló una solución cuasi analítica de la ecuación de Richards, la que se ha utilizado para simular exitosamente pilas industriales, columnas y gaviones por más de 20 años. La experiencia indica que estos modelos son capaces de predecir la producción de cobre desde operaciones de lixiviación en pilas, con una precisión de un 5% en base mensual y más precisos aún en base anual. Lo que más llama la atención es la capacidad predictiva, ya que el mismo modelo, con los mismos parámetros por componente, puede ser aplicado por varios años de operación sin cambiar significativamente su capacidad de ajuste (Menacho, 2025, Comunicación personal).

Es importante reconocer que, a pesar de la potencia predictiva de la ecuación de Richards, sigue siendo un modelo idealizado, donde los parámetros hidrodinámicos se consideran invariantes en el tiempo, lo que no necesariamente es cierto, tal como se demuestra en este trabajo.

3.2 Fenómenos geotécnicos de licuefacción estática

La licuefacción estática es un fenómeno geotécnico en el cual un suelo no saturado, generalmente no cohesivo como arenas o limos, experimenta una pérdida abrupta de resistencia al corte bajo condiciones de carga estática monotónica, sin necesidad de un estímulo dinámico como un sismo. Este proceso puede desencadenar deformaciones significativas y fallas estructurales en infraestructuras como presas de relaves y cimentaciones.

A diferencia de la licuefacción inducida por sismos, la licuefacción estática ocurre debido a la aplicación gradual de cargas, como el peso de una estructura o la acumulación de líquido, que incrementan la presión de poros en el lecho poroso hasta un punto crítico donde el lecho pierde su capacidad de soporte y se comporta como un líquido. Este fenómeno es particularmente relevante en depósitos de arenas sueltas y suelos con alta saturación de agua.

Un caso notable de licuefacción estática relacionada con sufusión (migración de finos), ocurrió en la falla de la presa de relaves de Feijão (Brasil, 2019), donde la remoción de partículas finas bajo flujo interno contribuyó al colapso del depósito, liberando millones de toneladas de residuos mineros (Robertson et al., 2019). Este incidente subraya la importancia de monitorear y controlar ambos fenómenos en las operaciones mineras.

Para evaluar el potencial de licuefacción estática, se emplean métodos como el ensayo de penetración de cono (CPTu), que proporciona datos sobre la resistencia del suelo y su susceptibilidad a la licuefacción. Robertson (2010) discute la aplicación del CPTu en la evaluación de la licuefacción, destacando su utilidad en la identificación de suelos potencialmente licuables.

Como ya se ha señalado, la sufusión es un fenómeno de migración de los finos a las capas inferiores del lecho poroso, el cual es posible bajo condiciones geotécnicas específicas. Inicialmente los finos aglomerados están dispuestos por toda la pila, el riego excesivo genera un incremento en la saturación de poros, llegando al límite donde los parámetros cortantes se reducen significativamente, el ángulo de fricción interna baja y la cohesión también baja, entonces las partículas finas pierden su adhesión a los gruesos, se mueven con el flujo de líquido y se desplazan en la porosidad del esqueleto de gruesos, reduciendo la porosidad y por ende, la permeabilidad, situación que distorsiona la red de circulación, aumenta la saturación local, propagando la ocurrencia de nuevas zonas en licuefacción y sucesivas distorsiones del patrón de canales de circulación. El líquido lixivante, ya no pasa por todo el lecho poroso en igual proporción, los metros cúbicos por tonelada (razón de lixiviación), se tornan variables al interior de la pila y por ende, se reduce la cantidad de cobre que se disuelve. Así pues, la implementación de

estrategias de diseño robustas y tecnologías de monitoreo son esenciales para minimizar su ocurrencia y asegurar la producción de cobre, proteger el medio ambiente y garantizar la seguridad operativa del proceso.

La geotecnia clásica se preocupa esencialmente de la ocurrencia de falla desde el punto de vista de seguridad y continuidad operacional, en el presente caso, la preocupación central es la pérdida de recuperación de cobre, inducida por la distorsión del patrón de flujo, el cual es óptimo para la lixiviación, cuando corresponde a un pistón ideal.

3.2.1 Consolidación y deformación plástica

La consolidación y la deformación plástica son fenómenos geotécnicos fundamentales en el comportamiento de rocas y suelos, naturales y artificiales, como son las pilas de lixiviación. Estos procesos afectan directamente la estabilidad de estructuras como presas de relaves, pilas de lixiviación y taludes mineros.

a) Consolidación

La consolidación se refiere al proceso de reducción de volumen de un suelo saturado debido a la expulsión de agua de sus poros bajo una carga sostenida. Este fenómeno es especialmente significativo en suelos cohesivos, como las arcillas, donde la baja permeabilidad retrasa la disipación de presiones de poros. La consolidación puede dividirse en dos etapas:

- Consolidación primaria: Asociada con la disipación de la presión de poros y la reducción de volumen del suelo.
- Consolidación secundaria: Relacionada con la reestructuración interna del suelo y la deformación plástica de las partículas, que ocurre después de que las presiones de poros se han equilibrado (Terzaghi et al., 1996).

Se suele confundir la consolidación con la compactación; esta última consiste en la aplicación de energía al suelo suelto para eliminar espacios vacíos, lo que aumenta su densidad y en consecuencia, su capacidad de soporte y estabilidad. En cambio, la consolidación es un proceso de disminución de volumen, por la expulsión de agua bajo una carga mayor. Este último es el de mayor interés en la operación de pilas bajo riego.

b) Deformación Plástica

La deformación plástica ocurre cuando las tensiones aplicadas sobre el suelo o roca superan su límite elástico, generando deformaciones permanentes que no se recuperan al retirar la carga. En suelos cohesivos, estas deformaciones pueden manifestarse como fluencia, mientras que en suelos granulares inducen fenómenos como compactación o dilatancia (Das & Sobhan, 2017).

3.2.2 Barreras capilares

Las barreras capilares perturban e interrumpen el flujo de humedad a través de los poros del suelo, utilizando las diferencias en las propiedades capilares entre los materiales involucrados. Este fenómeno se utiliza en proyectos geotécnicos y mineros para controlar la migración de humedad y solutos, limitando el transporte de contaminantes y protegiendo estructuras y recursos hídricos.

Las barreras capilares funcionan creando una discontinuidad en el perfil del suelo mediante la introducción de materiales con características capilares específicas, como geocompuestos de drenaje o materiales gruesos que interrumpen el ascenso capilar. Este diseño limita la migración de agua hacia la superficie y restringe el movimiento de contaminantes asociados al flujo de humedad (Carpena & Dorronsoro, 2004).

En minería, las barreras capilares se utilizan para:

- Prevenir la contaminación de acuíferos subyacentes en depósitos de residuos.
- Controlar la humedad en presas de relaves y pilas de lixiviación.
- Mitigar el ascenso de humedad salina en suelos contaminados o áreas cercanas a cuerpos de agua.

El diseño de las barreras capilares implica la selección de materiales que presenten alta resistencia al flujo capilar, como capas de gravas, arenas gruesas, o geocompuestos especializados que interrumpen la continuidad del agua en el suelo (ABG Geosynthetics, 2021).

En el caso de la lixiviación en pilas, la formación de barreras capilares constituye un fenómeno no deseado, que se genera por la heterogeneidad del mineral que se carga en la pila, dejando en contacto minerales finos y arcillosos, con otros, como arenas de baja plasticidad, el flujo se distorsiona y se interrumpe en zonas localizadas, generando desuniformidad espacial del riego y pérdida de recuperación. La ocurrencia de migración de finos o sufusión, contribuye a la formación de barreras capilares no controladas, que dañan la estructura del lecho, con las consecuencias ya mencionadas.

3.2.3 Decrepitación

La decrepitación es un fenómeno que ocurre cuando ciertos minerales o compuestos químicos, al ser sometidos a calentamiento, liberan gases de manera explosiva debido a la expansión de fluidos atrapados en su estructura. Este proceso puede provocar la fractura o ruptura del material, generando sonidos característicos similares a chasquidos o estallidos. Según Klein y Dutrow (2007), este

comportamiento es común en minerales que contienen inclusiones fluidas, como halita o calcita y se intensifica al subir la temperatura.

En el ámbito de la mineralogía, la decrepitación es particularmente relevante en el estudio de las inclusiones fluidas presentes en los minerales. Estas inclusiones son pequeñas cavidades que contienen líquidos y/o gases atrapados durante la formación del mineral. Al aplicar calor, la presión interna dentro de las inclusiones aumenta, lo que puede provocar su ruptura y, en consecuencia, la decrepitación. Este fenómeno es útil para inferir las condiciones de formación de los minerales y los procesos geológicos asociados, proporcionando información valiosa sobre la temperatura y la composición química de los fluidos involucrados (Roedder, 1984).

En el caso de la lixiviación en pilas, se producen finos durante el riego, por un ataque químico del lixivante en el límite de granos de pequeño tamaño. Los metalurgistas suelen llamarlo “chancado químico” y prácticamente siempre ocurre, afectando 3 a 5 pp en el contenido de -100#. Sin embargo, en algunos casos, como son las menas de Sulfatos presentes en Lomas Bayas y en Antucoya, la decrepitación puede alcanzar de 5 a 10 pp en la malla 100#, o incluso más.

Le generación de finos no sólo reduce la permeabilidad de la pila, sino que los finos tienen alta movilidad dentro de la pila, generando un acentuamiento en la pérdida de permeabilidad del medio poroso.

3.2.4 Sufusión

La sufusión es un fenómeno geotécnico que ocurre cuando las partículas finas dentro de un medio granular son desplazadas por el flujo de un fluido, generalmente agua o una solución química. Este proceso puede ocurrir en suelos, sedimentos o materiales granulados usados en procesos industriales, como las pilas de lixiviación.

La sufusión es un fenómeno previo a la falla catastrófica (que puede llegar a ocurrir o no), la cual, no involucra cambio significativo del volumen de la pila, sino reordenamiento de los finos, conservando el esqueleto de gruesos que sustenta la estabilidad geomecánica de la pila.

Huang et al. (2021) definen la sufusión como un proceso de erosión interna en el que las partículas finas son desprendidas y transportadas a través de los poros del esqueleto granular bajo la acción de un flujo hidráulico. Este fenómeno es característico de medios porosos con distribución granulométrica heterogénea, especialmente en suelos no cohesivos o de granulometría muy amplia.

Para modelar este proceso, Huang et al. (2021) propusieron un modelo teórico por capas verticales que predice la evolución de la heterogeneidad inducida por sufusión. Este modelo considera el balance de fuerzas que actúan sobre las partículas móviles bajo un flujo descendente, integrando las propiedades iniciales del medio granular, el gradiente hidráulico, y el transporte de partículas. Los

resultados obtenidos muestran que la sufusión produce una redistribución espacial de partículas finas y un aumento gradual en la heterogeneidad del medio, afectando significativamente la permeabilidad y la estabilidad del lecho (Huang et al., 2021).

3.2.5 Criterios de diseño y aceptación operación industrial

Como criterios de diseño que aseguren una operación estable y eficiente, tanto de las soluciones lixiviantes como del aire que se aplica, en el caso de la lixiviación de minerales sulfurados, se suele considerar las siguientes condiciones, cuya validez debe ponerse a prueba caso a caso:

- Criterio 1: La conductividad hidráulica saturada (CHS) debe ser a lo menos 100 veces superior a la tasa de riego de diseño. Si se considera una tasa de riego de $4,5 \text{ L/h/m}^2$, la conductividad hidráulica saturada debiese ser 450 L/h/m^2 , al pasar a unidades de m/s sería $1,3 \times 10^{-4} \text{ m/s}$. Es decir, para efectos de diseño, la CHS debe ser superior a $1,3 \times 10^{-4} \text{ m/s}$, (Milczarek et al., 2013).

El criterio de que el K_{sat} medido del lecho mineral, sea 100 veces la tasa de riego objetivo, se explica porque la variabilidad del mineral contribuye con una diferencia de 10X, ya que la permeabilidad es una de las propiedades de la naturaleza que más varían, siendo un orden de magnitud, una variabilidad frecuente y además, incorpora un factor de seguridad de 10X, para dar cuenta de variaciones en la tasa de riego, la frecuencia de riego, la eventual precipitación y la variación topográfica en la pila, (Menacho et al., 2008).

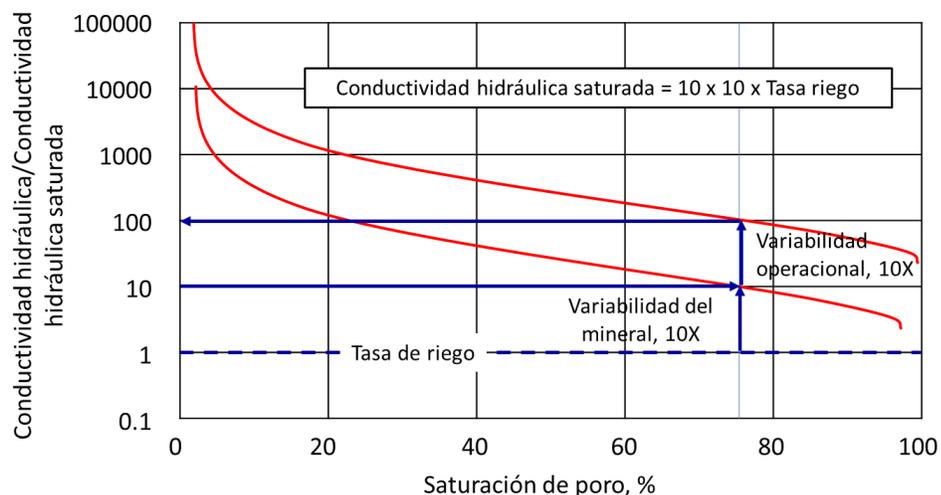


Figura 3. Ilustración criterio de diseño de la tasa de riego en base a la conductividad hidráulica saturada del mineral (elaboración propia).

- Criterio 2: La saturación de poro debe ser inferior a 75% para evitar riesgo geotécnico de liquefacción estática de distinta magnitud, como apozamientos

masivos, desplazamientos localizados de mineral dentro de la pila, escurrimientos desuniformes e incluso, deslizamientos de mineral en la zona de talud (Bernal et al., 2018).

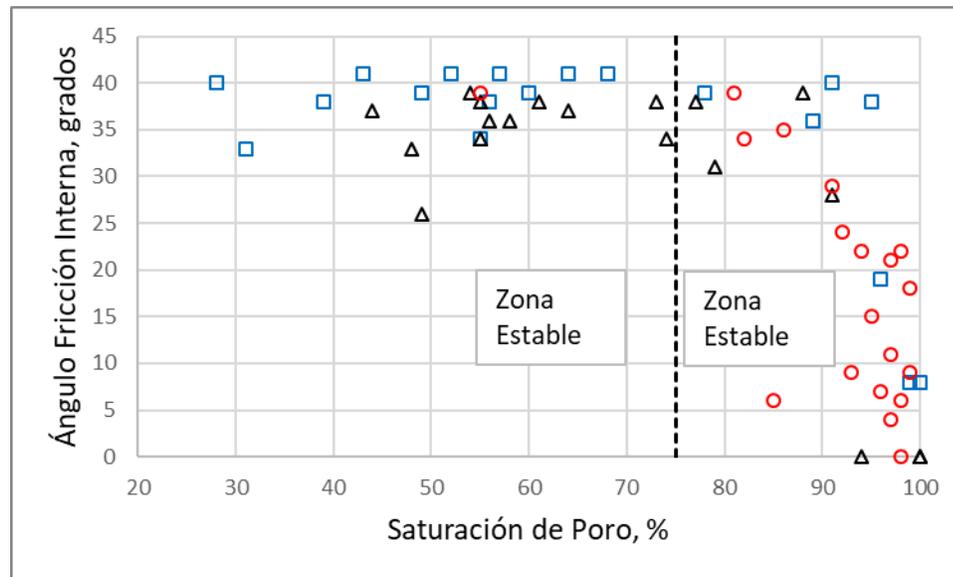


Figura 4. Criterio de 75% como valor crítico sobre el cual el lecho poroso comienza a ser inestable. (modificado de Bernal et al., 2018).

3.2.6 Ensayos DTR para estimación de patrones flujo

a) Contexto

Los ensayos de distribución del tiempo de residencia (DTR) son una herramienta fundamental en la ingeniería de procesos para la caracterización de los patrones de flujo en sistemas donde se busca optimizar la eficiencia de transferencia de masa o calor. Estos ensayos permiten describir el comportamiento del flujo en reactores o sistemas de lixiviación, proporcionando información clave sobre la mezcla, la presencia de volúmenes muertos, retardos y los posibles cortocircuitos que puedan afectar la operación (Levenspiel, 1999).

En el caso específico de la lixiviación de minerales, los ensayos de DTR resultan especialmente útiles para evaluar la eficiencia del riego y determinar el tiempo que las soluciones de lixiviación permanecen en contacto con el mineral. Para realizar estas pruebas, es común el uso de radio trazadores y de trazadores químicos, que sean fácilmente detectables y estables bajo las condiciones del proceso (Fogler, 2016).

La DTR es una técnica experimental que mide el tiempo que tarda un fluido o una partícula sólida en viajar a través de un sistema determinado. La premisa fundamental del método es que los elementos o partículas fluidas individuales pasan diferentes cantidades de tiempo dentro del reactor o sistema. Los fluidos o partículas que pasan a través de un sistema pueden experimentar retardos, mezclas y otros

efectos que pueden identificarse mediante el enfoque DTR. Hay tres curvas fundamentales que se emplean para caracterizar la DTR, según se explica a continuación.

La curva C: $C = f(t)$: La curva C muestra la evolución temporal de la concentración del trazador y proporciona los datos sin procesar para la determinación de la DTR.

La curva E: $E(t)$: Esta función se conoce como “distribución del tiempo de residencia” o “distribución de edades de salida”. La distribución de edades de salida considera que diferentes partículas de fluido pueden experimentar diferentes tiempos de residencia dentro del sistema antes de salir. Es una función del tiempo, donde $E(t)dt$ representa la fracción de elementos del fluido alimentados en el tiempo cero y que salen del sistema entre t y $t + dt$.

La curva F: $F(t)$: La fracción de elementos del fluido con un tiempo de residencia menor que t se define como la función de distribución del tiempo de residencia acumulado $F(t)$. También representa la probabilidad de que un elemento de fluido que entró en $t = 0$ haya salido del sistema en el momento t o antes de ese momento.

b) Transporte líquido en una pila de lixiviación

El proceso de lixiviación en pilas puede considerarse como un sistema abierto/abierto. Después de apilar el mineral en la pila, el riego inicial marca el inicio del proceso de lixiviación. El volumen del inventario líquido aumenta continuamente a lo largo del tiempo. Cuando el llenado de los poros supera la saturación residual, comienza a salir solución por la salida inferior, mientras el inventario continúa creciendo hasta alcanzar una determinada condición de estado estable. El riego se detiene cuando se cumple el tiempo de lixiviación dando origen al proceso inverso, es decir, el drenaje que se inicia un poco después de detener el riego y vacía gradualmente la pila hasta una cierta humedad residual, comenzando de arriba hacia abajo. Se destaca que la humedad residual en riego no tiene por qué ser igual a la humedad residual en drenaje (histéresis).

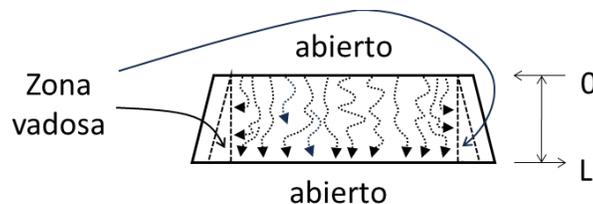


Figura 5. Representación pila lixiviación como sistema hidráulico.

Los textos clásicos de Levenspiel (1999), señalan que el flujo en estado estacionario es la condición más conveniente para estimar inequívocamente el patrón de flujo. Esto implica que el volumen del reactor sea constante, así como el caudal de riego. Así pues, a la entrada de un reactor de flujo continuo, operando en régimen permanente, se introduce un estímulo, que puede ser un impulso o un escalón, y se

mide la concentración del trazador en la salida del reactor en función del tiempo, el experimento procede hasta que ya no se detecta trazador en la salida. Se obtiene un espectro de señales, que se interpreta a través de modelos que aportan información sobre el patrón interno de flujos.

En este estudio se hace una aplicación no tradicional del concepto de DTR, extendiéndolo a sistemas intrínsecamente transitorios, que evolucionan naturalmente en estado no estacionario. En esta visión, que es la que se adopta en este trabajo, tanto el volumen del reactor como el caudal de riego al reactor pueden ser variables en el tiempo. En este enfoque, la DTR no es una foto estática del patrón de flujo, sino que es cambiante según cambien las características del proceso.

Nuevo modelo DTR para estudios de lixiviación

Características del procedimiento propuesto:

- Sistema de estado transitorio: (i) Volumen de control variable y/o (ii) Caudal de riego variable. Se destaca que en el caso convencional de trata de ensayos de estímulo – respuesta, en sistemas de flujo continuo, operando en estado estacionario.
- Experimentos de pulsos de trazador tipo escalón.
- Se considera siembra del trazador antes del riego, en lugar de inyección de trazador durante el riego.
- La solución de riego se utiliza como trazador complementario.
- La respuesta al pulso es una medida de la recuperación de cobre, controlada por mecanismos convectivos ideales (minerales de alta solubilidad y rápida disolución del cobre).
- Esta técnica desarrollada por J Menacho (comunicación personal, 2024) se puede utilizar para estudiar el efecto de cambios del patrón de flujo en la recuperación de cobre en sistemas de lixiviación en pilas.

Las ecuaciones básicas desarrolladas para esta aplicación se muestran a continuación.

Función dinámica de salida:

$$E_{Cu}(t) = \frac{Q(t)Cu^{out}(t)}{\int_0^t Q(\theta)Cu^{out}(\theta)d\theta} = \frac{Q(t)Cu^{out}(t)}{m_{0Cu}} \quad (16)$$

Función de respuesta dinámica integral, note que por la forma en que se conduce este experimento, la función $F_{Cu}(t)$ coincide exactamente con la curva de recuperación de cobre $Rec_{Cu}(t)$:

$$F_{Cu}(t) = \int_0^t E_{Cu}(\theta) d\theta = \text{Rec}_{Cu}(t) \quad (17)$$

Tiempo dinámico medio de residencia:

$$\tau_{Cu}(t) = \int_0^t \theta E_{Cu}(\theta) d\theta; \quad \tau_{Cu} = \int_0^{\infty} \theta E_{Cu}(\theta) d\theta \quad (18)$$

Volumen dinámico de control:

$$V_{Cu}(t) = \frac{\tau_{Cu}(t)}{(t - t_0)} \int_0^t Q_{Cu}(\theta) d\theta \quad (19)$$

c) El modelo DTR de tres pulsos (Menacho, 2008)

Menacho desarrolló un modelo DTR específico para caracterizar el patrón de flujo en operaciones de lixiviación en pilas. Según este modelo, se asume que cualquier patrón de flujo en la lixiviación puede representarse mediante tres señales, una rápida, otra lenta y una señal central o dominante, como se muestra en la Figura 6 a continuación.

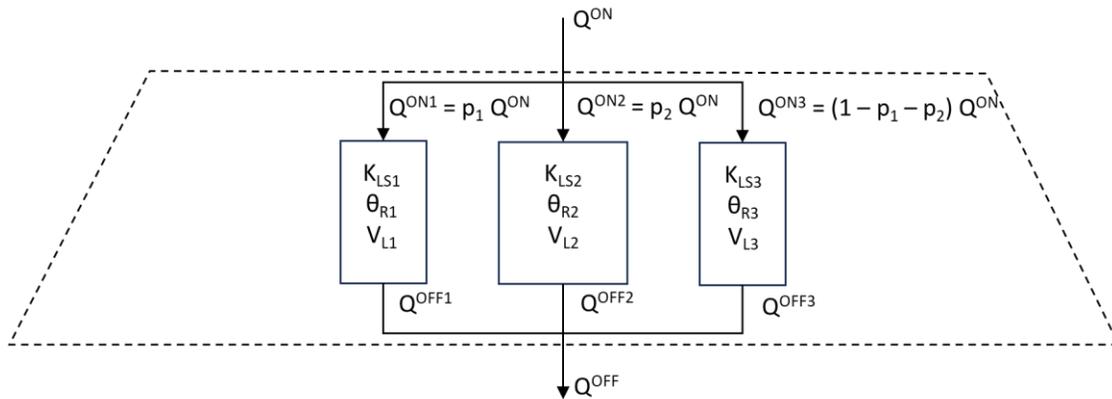


Figura 6. Modelo de 3 señales desarrollado para procesos de lixiviación en pilas (Menacho, 2008).

Donde:

- Q^{ON} Caudal total de Riego.
- Q^{ONi} Dominio de caudal de riego "i".
- Q^{OFF} Caudal total de efluentes.
- Q^{OFFi} Dominio de caudal de efluente "i".
- p_i Fracción de dominio-i.

KLSi	Conductividad hidráulica saturada "i".
θ_{Ri}	Saturación de poro residual "i".
VLi	Volumen de líquido del lecho en el dominio "i".

La deconvolución de la función $E_w(t)$ de las tres señales superpuestas, proporciona la información para estimar los parámetros p_i .

El punto de partida es la función dinámica $F_w(t)$ para el líquido, la cual se mide experimentalmente en la salida del sistema o reactor:

$$F_w(t) = \int_0^t E_w(\theta) d\theta = \text{Rec}_w(t) \quad (20)$$

Note que, al considerar el flujo de líquido, se tiene la siguiente expresión alternativa,

$$F_w(t) = \frac{\int_0^t Q_w^{\text{OUT}}(\theta) d\theta}{\int_0^t Q_w^{\text{in}}(\theta) d\theta} \quad (21)$$

Conocida también como curva de eficiencia hidrodinámica. Ésta se representa gráficamente como:

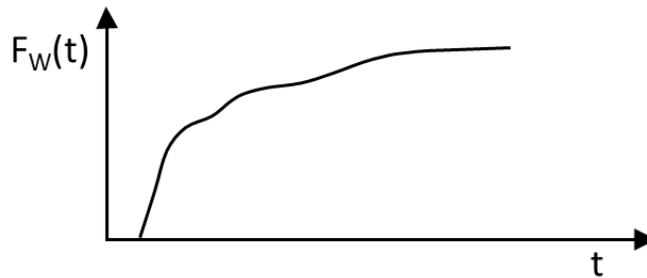


Figura 7. Función $F_w(t)$ experimental.

Si se toma derivada, entonces se calcula la función dinámica de salida, $E_w(t)$ para el líquido:

$$E_w(t) = \frac{dF_w(t)}{dt} \quad (22)$$

Lo que gráficamente conduce a la curva $E_w(t)$:

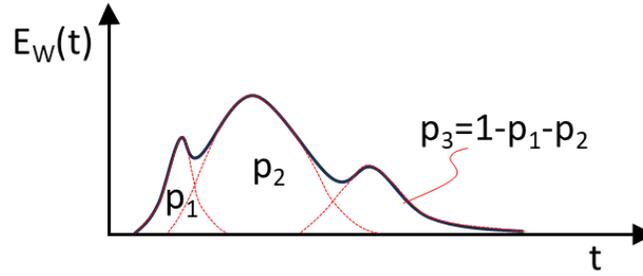


Figura 8. Función $E(t)$ calculada.

Donde:

$$E_w(t) = \sum_{i=1}^3 p_i E_{wi}(t) \quad (23)$$

Cada uno de los pulsos se representa según:

$$E_{wi}(t) = \frac{N_i^{N_i} (t/\tau_i)^{N_i-1} \exp(-N_i t/\tau_i)}{\tau_i (N_i - 1)!} \quad (24)$$

Alternativamente se emplea el modelo de N reactores imperfectos conectados en serie (Menacho, 2008):

$$E_{wi}(t) = \frac{p_i (N_i \eta_i)^{N_i} \left((t - \varepsilon_i) / \tau_i \right)^{N_i-1} \exp(-N_i \eta_i (t - \varepsilon_i) / \tau_i)}{\tau_i (N_i - 1)!} \quad (25)$$

Donde:

η_i : Parámetro de mezcla.

ε_i : Parámetro de retardo.

El resto ya se ha definido antes.

Este último modelo se utiliza para interpretar los resultados de los experimentos llevados a cabo y que se reportan más adelante en este documento.

Note que, para el cobre, las funciones $F_{Cu}(t)$ y $E_{Cu}(t)$ quedan representadas por las ecuaciones 26 y 27, equivalentes a las ecuaciones 20 y 22 del líquido, respectivamente:

$$F_{Cu}(t) = \int_0^t E_{Cu}(\theta) d\theta = Rec_{Cu}(t) \quad (26)$$

$$E_{\text{Cu}}(t) = \frac{dF_{\text{Cu}}(t)}{dt} \quad (27)$$

Note que $F_{\text{Cu}}(t) = \text{Rec}_{\text{Cu}}(t)$ sólo cuando el transporte de soluciones controla la recuperación del cobre en la salida, condición que se cumple en el diseño de la prueba con sulfato de cobre como trazador, sin embargo, en un caso general, donde existe una cinética de disolución del cobre, que compite con el transporte convectivo, entonces $F_{\text{Cu}}(t) \leq \text{Rec}_{\text{Cu}}(t)$.

3.3 Metodología experimental

Los experimentos se realizaron en una celda bidimensional de 25 cm × 30 cm × 3,3 cm (ver anexo 2), diseñada con placas de acrílico transparente, para facilitar la observación del flujo. El medio poroso utilizado consistió en partículas de mineral aglomeradas con una solución de ácido sulfúrico. Como trazador químico se utilizó sulfato de cobre pentahidratado ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), adicionado al aglomerado durante la preparación del lecho, representando condiciones operativas reales.

3.3.1 Muestras y materiales de prueba

Para realizar el programa de pruebas, se emplearon los siguientes materiales y equipos:

- ✓ Muestras de mineral industrial (proveniente de una empresa de la Gran Minería) (ver anexo 2).
- ✓ Sulfato de Cobre pentahidratado (BIOQUIMICA, bioquímica.cl, grado técnico).
- ✓ Sal común, NaCl (Sal Lobos, Sociedad Punta de Lobos).
- ✓ Manto roleador.
- ✓ Bomba peristáltica y mangueras (INTLLAB, BT100J).
- ✓ Solución lixiviante (refino) (proveniente de la empresa de la Gran Minería).
- ✓ Probetas (del laboratorio de la empresa DRM).
- ✓ Vasos o recipientes contenedores.
- ✓ Caolín grado técnico (quimicaindustrial.cl).
- ✓ Balanza analítica (Prochef, China).
- ✓ Regla de medición.

3.3.2 Diseño, construcción y puesta en marcha del equipo de prueba

El sistema experimental está diseñado para evaluar la lixiviación en un medio poroso bajo condiciones controladas. Incluye los siguientes componentes principales:

- ✓ Celda bidimensional: Rectangular, fabricada en acrílico transparente con salida inferior para recolectar el efluente.
- ✓ Bomba peristáltica: Controla el flujo de solución lixiviante (refino).
- ✓ Sistema de riego: Incluye una manguera posicionada para distribuir la solución uniformemente sobre el lecho.
- ✓ Recipiente de alimentación: Contiene el refino utilizado para el riego.
- ✓ Sistema de recolección del efluente: Probetas y recipientes numerados para recolectar el líquido drenado en intervalos de tiempo.
- ✓ Balanza electrónica: Permite registrar la masa inicial y final del sistema.

3.3.3 Preparación del mineral: con/sin sufusión

Para realizar las pruebas experimentales, el mineral fue preparado siguiendo un proceso de clasificación granulométrica mediante tamizaje en seco. Este procedimiento incluyó las siguientes etapas:

3.3.3.1 Separación inicial del mineral total:

El mineral bruto fue dividido en fracciones homogéneas de 200 g, para garantizar una carga uniforme en el equipo de tamizado.

3.3.3.2 Tamizaje por mallas de diferentes aberturas:

Se utilizó un conjunto de tamices estandarizados con aberturas de 10, 20, 30, 50, 100, 200 y -200 mallas. El material fue cargado inicialmente en el tamiz de malla #10 y procesado mediante un equipo Ro-Tap, que permite la separación de las partículas según su tamaño en orden descendente hasta alcanzar los tamices más finos a través de la vibración en el equipo Ro-Tap.

3.3.3.3 Recolección y pesaje de fracciones:

Tras el proceso de tamizaje, las partículas retenidas en cada tamiz fueron recolectadas y pesadas para determinar su distribución granulométrica, obteniendo perfiles precisos tamaño del material.

3.3.3.4 Preparación de perfiles para pruebas:

Los datos obtenidos del tamizaje fueron utilizados para construir perfiles granulométricos representativos de la operación industrial, esenciales para diseñar y realizar las pruebas de sufusión y lixiviación.

Este procedimiento asegura que las muestras utilizadas en los experimentos sean consistentes y representen las características del mineral procesado.

Para estos experimentos se compara la respuesta del mismo perfil en dos pruebas, sin sufusión y con sufusión.

La prueba sin sufusión se realizó con la sustitución total de partículas finas (malla -200#) por caolín de grado técnico. A diferencia de la que contiene la capa de sufusión, las partículas finas (-200#), que también fueron sustituidas por caolín, se apartó un 20% de caolín (según el perfil de la muestra) y se aglomeró por separado para formar una capa destinada a ser instalada en el centro del lecho.

3.4 Procedimiento experimental

Los experimentos se llevaron a cabo en tres etapas principales:

Primera etapa: Aglomeración

En primer lugar, se destaca que las cargas experimentales incluyeron variaciones en la composición del mineral, como la sustitución total de partículas finas (malla - 200#) del propio mineral por caolín. Ello con el propósito de generar distribuciones alternativas de estructura de poros, a través de las cuales posteriormente se miden los patrones de escurrimiento líquido.

El proceso de aglomeración se llevó a cabo utilizando el método de roleo, el cual es esencial para mejorar la cohesión del material granular y garantizar la uniformidad en el lecho poroso. Este método consiste en lo siguiente:

Es una técnica manual para mover y redistribuir el material contenido en un manto o superficie. Se lleva a cabo entre dos operadores.

(A) Preparación inicial del material

- A la mezcla se añade un 2% de cobre como sulfato de cobre ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) sólido finamente dividido y 12 kg/t de sal (NaCl), el primero simula una matriz de un mineral de cobre (ley 2% CuT, valor alto para hacer más nítidos los resultados), distribuido de manera uniforme, donde la recuperación en el riego está controlada sólo por el transporte líquido y por lo tanto, el patrón de salida es una medida directa del patrón de flujo de la solución circulante. La sal proporciona una condición química propia del proceso.
- Luego se humecta el mineral con agua acidulada para alcanzar una humedad óptima del 10% p/p BH, determinada mediante la prueba del guante.

(B) Proceso de roleo

- Los operadores se colocan en extremos opuestos del manto, sujetando las esquinas correspondientes. Una de ellas comienza levantando una de las esquinas del manto, deslizando el mineral hacia el extremo contrario mediante rodadura de la carga. Durante este movimiento, las demás esquinas se mantienen sujetas sin movimiento. El otro operador repite el movimiento con la esquina opuesta, llevando el mineral hacia el extremo contrario, de forma alternada. Posteriormente, se realiza el mismo procedimiento con las otras dos esquinas, siguiendo la misma dinámica (todo esto sin que el manto quede en el aire). Este procedimiento se repite de manera coordinada, evitando la pérdida de muestra, hasta que el material haya sido redistribuido uniformemente lo que simula el movimiento del tambor aglomerador.
- El mineral y los reactivos fueron colocados en el manto roleador, una superficie que permite la formación de aglomerados homogéneos al someter el material a un movimiento de rodadura.

- Durante el roleo, las partículas finas se adhieren a las más grandes, formando aglomerados estables que aumentan la porosidad del lecho y facilitan la penetración del lixivante.

(C) Carga de la celda de prueba

- Una vez obtenida la textura adecuada y la cohesión deseada, el material fue retirado del manto roleador y dispuesto para su depósito en la celda bidimensional.
- El método de roleo es utilizado principalmente para: aumentar la uniformidad del tamaño de partículas en el lecho poroso, garantizar una distribución homogénea del reactivo lixivante, reducir el riesgo de segregación de partículas finas durante el riego, favoreciendo un flujo hidráulico uniforme.
- En la prueba sin sufusión el material aglomerado fue depositado uniformemente en la celda bidimensional.
- En el caso de la prueba con sufusión se depositó la mitad del material, luego se puso una capa de caolín y se rellenó con el resto del material aglomerado, evitando que quedaran huecos entre medio.
- Se registraron parámetros iniciales como la altura del lecho y la masa total.

Este proceso asegura que el mineral esté adecuadamente preparado para maximizar la eficiencia de lixiviación y minimizar las pérdidas por desplazamiento de partículas finas.

Segunda etapa: Aplicación de riego y recolección de efluente

- El riego se aplicó mediante un gotero dispuesto en el punto central de la celda, accionado mediante una bomba peristáltica. Se realizaron controles periódicos por aforo en probeta y cronómetro para regular el caudal de riego.
- Se inició el riego con una tasa de flujo baja entre 2 y 4 L/h/m², y después de 2 horas se incrementó, es decir, entre 4 y 7 L/h/m² dependiendo de cada prueba.
- El efluente recolectado cada cierto tiempo, de acuerdo a la salida del efluente, se almacenó en recipientes cerrados con doble tapa, debidamente identificados para análisis químico.

CAPITULO IV: RESULTADOS

4.1 Resultados experimentales

Evaluación de la recuperación en diferentes perfiles

Se construyeron figuras que reportan los resultados de las mediciones de distribución de tiempos de residencia (DTR) obtenidos para cada perfil evaluado, tanto bajo condiciones "sin sufusión" como "con sufusión". Estos resultados permiten analizar cómo las condiciones de flujo y transporte de solución afectan la eficiencia del proceso de lixiviación en los diferentes perfiles estudiados.

Como ya se indicó antes, para generar las curvas de DTR, se utilizó sulfato de cobre pentahidratado como trazador químico. Este trazador se introdujo en el mineral aglomerado. La elección del sulfato de cobre pentahidratado como trazador se basó en su alta solubilidad y facilidad para ser detectado en soluciones lixiviantes. Lo novedoso es que el trazador se sembró en el mineral durante la etapa de aglomeración, de modo que la condición inicial es una distribución homogénea del trazador y la evolución del riego permite identificar el patrón de flujo según la variación de la concentración de cobre en la salida inferior a través del tiempo de la prueba.

Las pruebas se realizaron bajo condiciones controladas, manteniendo constante el caudal de solución en 2 L/h/m² y 4 L/h/m², el cual luego de 2 horas, se subió entre 4 L/h/m² y 7 L/h/m² dependiendo de la prueba, todos los ensayos se realizaron empleando el mismo formato. Esto aseguró la reproducibilidad de los resultados y la validez de la comparación entre las pruebas "sin sufusión" y "con sufusión".

Condiciones Prueba 1

Tabla 1. Condiciones para la prueba sin sufusión.

Dimensiones de la celda	
Largo, cm	25,00
Ancho, cm	3,30
Alto, cm	30,00
Masa del mineral, g	1620,00
Densidad aparente BS, t/m ³	1,65
Sal adicionada, g	19,70
Sulfato de Cobre adicionado, g	130,02
Ácido agregado, mL	18,60
Agua acidulada, mL	160,00
Densidad agua acidulada, t/m ³	1,00
Masa del mineral aglomerado, g	1930,00

Densidad aparente BH, t/m ³	1,41
Humedad BS, %	9,88
Humedad BH, %	8,99
Altura de la columna, cm	16,50
Concentración de Cu en Refino, g/L	1,59
Tasa de riego 1, L/h/m ²	6,20
Tasa de riego 2, L/h/m ²	5,60
Tiempo de riego 1, h	2,00
Tiempo de riego 2, h	16,00
Razón de lixiviación 1, m ³ /t	0,06
Razón de lixiviación 2, m ³ /t	0,46

Tabla 2. Condiciones para la prueba con sufusión.

Dimensiones de la celda	
Largo, cm	25,00
Ancho, cm	3,30
Alto, cm	30,00
Masa del mineral, g	1570,00
Densidad aparente BS, t/m ³	1,65
Sal adicionada, g	19,70
Sulfato de Cobre adicionado, g	130,02
Ácido agregado, mL	18,60
Agua acidulada, mL	160,00
Densidad agua acidulada, t/m ³	1,00
Masa del mineral aglomerado, g	1920,00
Densidad aparente BH, t/m ³	1,33
Humedad BS, %	10,22
Humedad BH, %	9,27
Altura de la columna, cm	17,50
Concentración de Cu en Refino, g/L	1,59
Tasa de riego 1, L/h/m ²	3,60
Tasa de riego 2, L/h/m ²	7,47
Tiempo de riego 1, h	2,00
Tiempo de riego 2, h	18,00
Razón de lixiviación 1, m ³ /t	0,04
Razón de lixiviación 2, m ³ /t	0,71

Capa sufusión Caolín	
Masa caolín, g	5,00

Densidad caolín, t/m ³	2,60
Agua acidulada, ml	20,00
Humedad BS, %	37,04

Resultados Prueba 1

(A) Cinética de recuperación de cobre

Los resultados de la Prueba 1 se presentan en forma gráfica en la Figura 9 y en forma numérica en la Tabla 3.

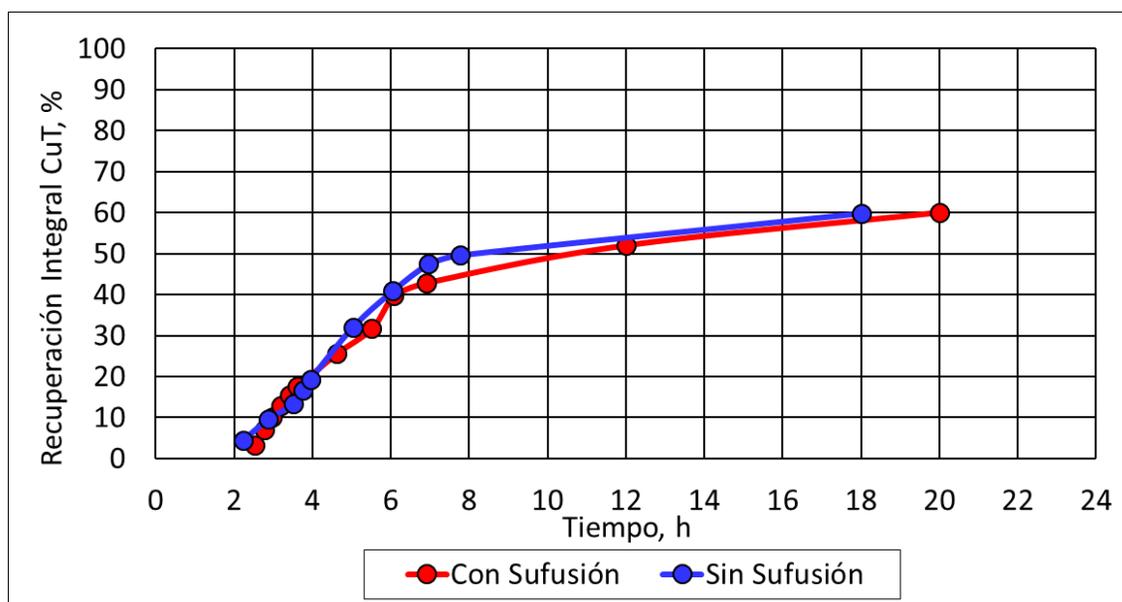


Figura 9. Recuperación integral perfil 1.

Tabla 3. Tiempo y recuperación de las pruebas con y sin sufusión del perfil 1.

Sin Sufusión			Con Sufusión		
Tiempo, h	Rec/h	Rec	Tiempo, h	Rec/h	Rec
2,23	2,00	4,47	2,52	1,34	3,38
2,87	8,03	9,55	2,77	14,56	7,02
3,52	5,82	13,34	2,98	14,06	10,06
3,75	14,71	16,77	3,20	13,28	12,94
3,95	12,99	19,37	3,42	11,96	15,53
5,03	11,74	32,09	3,62	10,22	17,57
6,05	8,67	40,91	4,62	8,04	25,61
6,97	7,15	47,46	5,52	6,80	31,73
7,77	2,73	49,65	6,08	14,11	39,73
18,00	1,00	59,88	6,92	3,75	42,85
-	-	-	12,00	1,80	52,00
-	-	-	20,00	1,00	60,00

(B) Distribución de Tiempos de Residencia (DTR)

Se aplicó el modelo de tres pulsos, descrito en la sección 3.2.6 Ensayos DTR para estimación de patrones flujo (c). Los resultados se presentan en forma gráfica en la Figura 10 y en forma numérica en la Tabla 6.

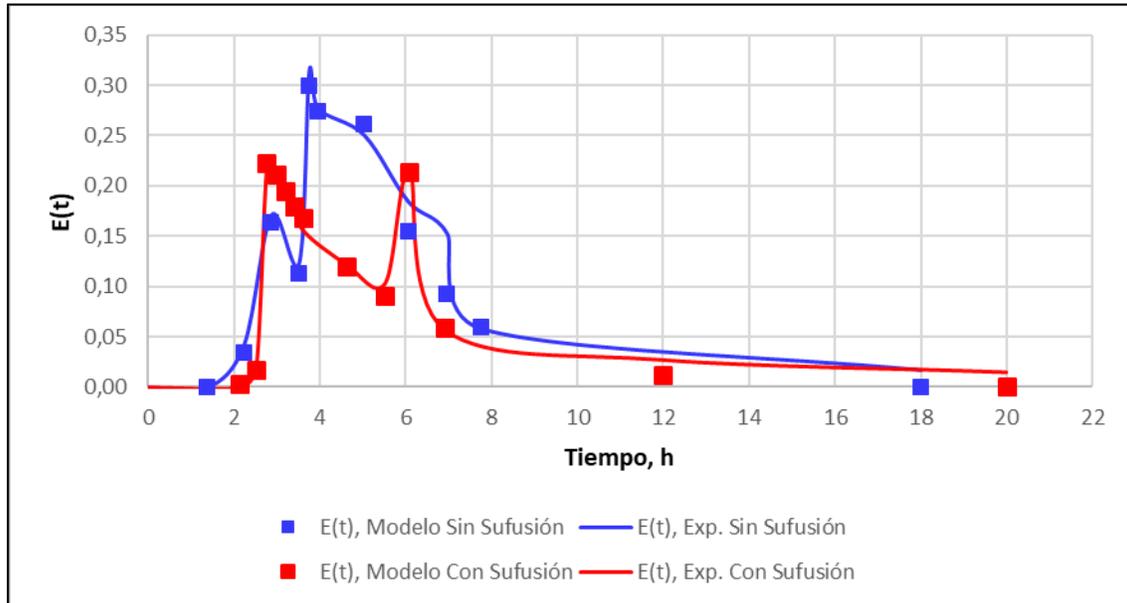


Figura 10. DTR integral del perfil 1.

Para el caso sin sufusión se utilizaron los parámetros que indican en la Tabla 4.

Tabla 4. Parámetros utilizados para el caso sin sufusión.

PARÁMETROS				
Concepto	Símbolo	PULSO 1	PULSO 2	PULSO 3
Mezcla de flujo	\square	1,49	1,75	4,46
Fracción del flujo	p	0,26	0,45	0,29
Retardo de la señal	ϵ	2,10	3,53	5,03
Tiempo medio de residencia	τ	1,86	2,98	8,88
Número de reactores	N	2,65	1,16	1,01
Función Gamma	$\square\square\square\square\square\square$	5,00		

Y para el caso con sufusión se utilizaron los parámetros de la Tabla 5.

Tabla 5. Parámetros utilizados para el caso con sufusión.

PARÁMETROS				
Concepto	Símbolo	PULSO 1	PULSO 2	PULSO 3
Mezcla de flujo	\square	13,35	1,08	50,96

Fracción del flujo	p	0,35	0,35	0,30
Retardo de la señal	ϵ	2,77	2,03	6,08
Tiempo medio de residencia	τ	22,99	5,53	0,05
Número de reactores	N	1,00	2,17	1,00
Función Gamma	$\square\square\square\square\square\square$	1,00		

Tabla 6. Tiempo y función de distribución del tiempo de residencia (DTR) para condiciones con y sin sufusión.

Sin Sufusión			Con Sufusión		
Tiempo, h	E(t), Modelo Sin Sufusión	E(t), Exp. Sin Sufusión	Tiempo, h	E(t), Modelo Con Sufusión	E(t), Exp. Con Sufusión
0,00	0,0000	0,0000	0,00	0,0000	0,0000
1,38	0,0000	0,0000	2,13	0,0034	0,0000
2,23	0,0337	0,0427	2,52	0,0175	0,0204
2,87	0,1632	0,1712	2,77	0,2224	0,2211
3,52	0,1133	0,1242	2,98	0,2106	0,2135
3,75	0,2990	0,3138	3,20	0,1946	0,2016
3,95	0,2734	0,2771	3,42	0,1801	0,1816
5,03	0,2611	0,2504	3,62	0,1679	0,1552
6,05	0,1552	0,1850	4,62	0,1202	0,1221
6,97	0,0925	0,1525	5,52	0,0904	0,1032
7,77	0,0591	0,0583	6,08	0,2143	0,2143
18,00	0,0002	0,0175	6,92	0,0587	0,0570
-	-	-	12,00	0,0118	0,0273
-	-	-	20,00	0,0007	0,0152

Las Fotografías 1 y 2 muestran registros visuales de la Prueba 1 con y sin sufusión. Allí se destaca el volumen de control, por donde circuló preferencialmente la solución de riego en cada caso. En la prueba con sufusión se distingue la capa de caolín en la zona inferior.



Figura 11 Fotografía Columna regada Carga 1 sin sufusión.

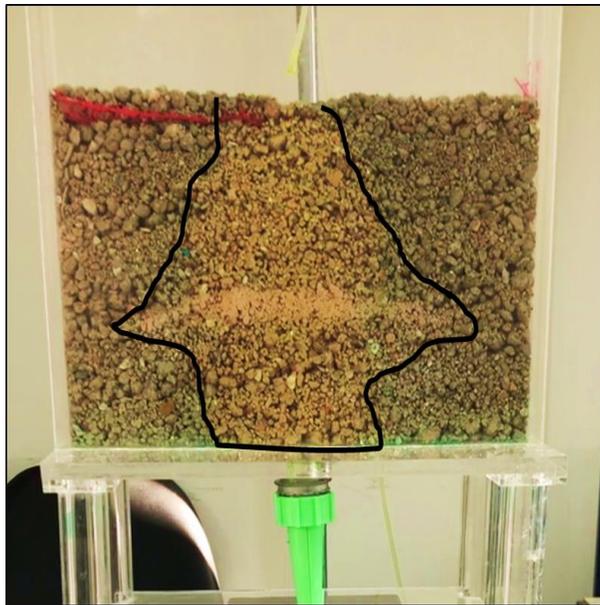


Figura 12 Fotografía Columna regada Carga 2 con sufusión.

Condiciones Prueba 2

Tabla 7. Condiciones para la prueba sin sufusión.

Dimensiones de la celda	
Largo, cm	25,00
Ancho, cm	3,30
Alto, cm	30,00
Masa del mineral, g	1720,00

Densidad aparente BS, t/m ³	1,65
Sal adicionada, g	20,80
Sulfato de Cobre adicionado, g	137,60
Ácido agregado, mL	19,70
Agua acidulada, mL	160,00
Densidad agua acidulada, t/m ³	1,00
Masa del mineral aglomerado, g	2040,00
Densidad aparente BH, t/m ³	1,45
Humedad BS, %	9,30
Humedad BH, %	8,51
Altura de la columna, cm	17,00
Concentración de Cu en Refino, g/L	1,59
Tasa de riego 1, L/h/m ²	2,10
Tasa de riego 2, L/h/m ²	4,80
Tiempo de riego 1, h	2,00
Tiempo de riego 2, h	18,00
Razón de lixiviación 1, m ³ /t	0,02
Razón de lixiviación 2, m ³ /t	0,41

Tabla 8. Condiciones para la prueba con sufusión.

Dimensiones de la celda	
Largo, cm	25,00
Ancho, cm	3,30
Alto, cm	30,00
Masa del mineral, g	1660,00
Densidad aparente BS, t/m ³	1,65
Sal adicionada, g	20,80
Sulfato de Cobre adicionado, g	137,60
Ácido agregado, mL	19,70
Agua acidulada, mL	160,00
Densidad agua acidulada, t/m ³	1,00
Masa del mineral aglomerado, g	2190,00
Densidad aparente BH, t/m ³	1,51
Humedad BS, %	9,63
Humedad BH, %	8,79
Altura de la columna, cm	17,50
Concentración de Cu en Refino, g/L	1,59
Tasa de riego 1, L/h/m ²	2,60
Tasa de riego 2, L/h/m ²	4,90

Tiempo de riego 1, h	2,00
Tiempo de riego 2, h	20,00
Razón de lixiviación 1, m ³ /t	0,02
Razón de lixiviación final 2, m ³ /t	0,48

Capa sufusión Caolín	
Masa caolín, g	6,00
Densidad caolín, t/m ³	2,60
Agua acidulada, ml	40,00
Humedad BS, %	67,80

Resultados Prueba 2

(A) Cinética de recuperación de cobre

Los resultados de la Prueba 2 se presentan en forma gráfica en la Figura 11 y en forma numérica en la Tabla 9.

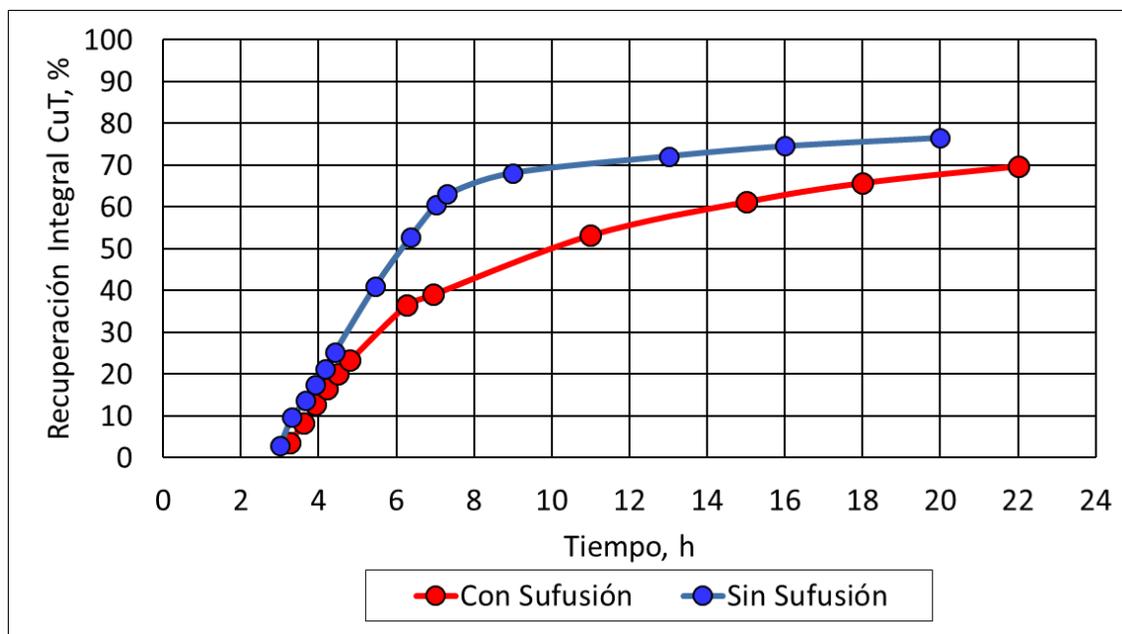


Figura 13. Recuperación integral perfil 2.

Tabla 9. Tiempo y recuperación de las pruebas con y sin sufusión del perfil 2.

Sin Sufusión			Con Sufusión		
Tiempo, h	Rec/h	Rec, %	Tiempo, h	Rec/h	Rec, %
3,00	0,96	2,88	3,25	1,15	3,73
3,32	21,33	9,64	3,60	13,24	8,37
3,67	11,97	13,83	3,92	13,86	12,76

3,92	15,03	17,58	4,22	12,61	16,54
4,17	15,09	21,35	4,50	12,56	20,10
4,42	15,87	25,32	4,80	10,77	23,33
5,45	15,20	41,03	6,27	9,06	36,61
6,37	12,97	52,92	6,93	3,72	39,09
7,02	11,79	60,58	11,00	3,50	53,33
7,30	8,88	63,09	15,00	2,00	61,33
9,00	3,00	68,19	18,00	1,50	65,83
13,00	1,00	72,19	22,00	1,00	69,83
16,00	0,80	74,59	-	-	-
20,00	0,50	76,59	-	-	-

(B) Distribución del Tiempo de Residencia (DTR)

Se aplicó el modelo de tres pulsos, descrito en la sección 3.2.6 Ensayos DTR para estimación de patrones flujo (c). Los resultados se presentan en forma gráfica en la Figura 12 y en forma numérica en la Tabla 12.

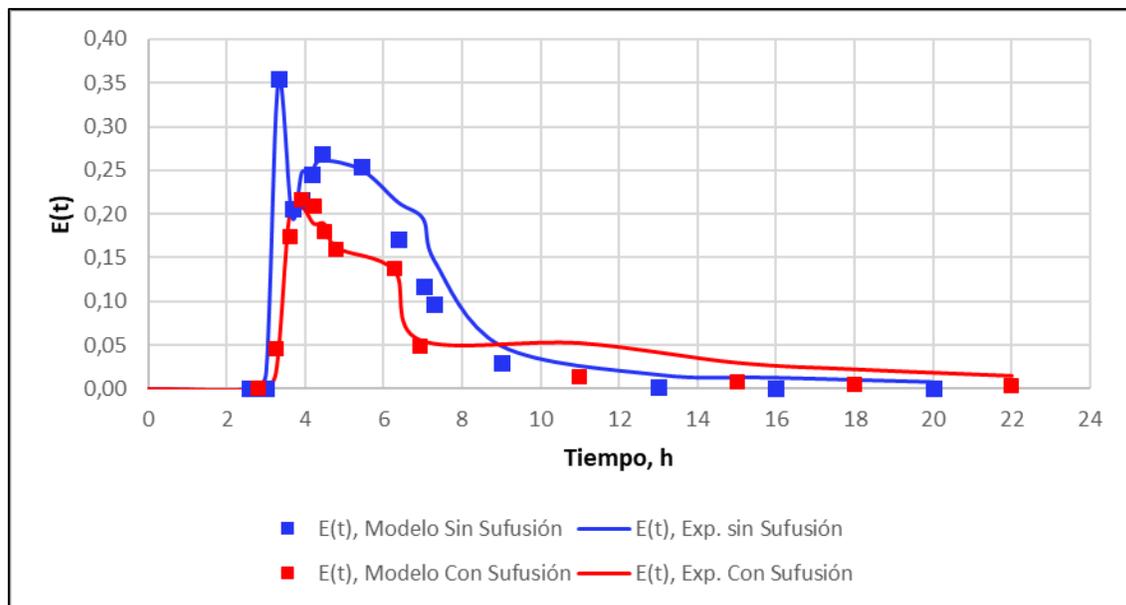


Figura 14. DTR integral del perfil 2.

Para el caso sin sufusión se utilizaron los parámetros que indican en la Tabla 10.

Tabla 10. Parámetros utilizados para el caso sin sufusión.

PARÁMETROS				
Concepto	Símbolo	PULSO 1	PULSO 2	PULSO 3
Mezcla de flujo	\square	1,10	3,60	6,00
Fracción del flujo	p	0,05	0,55	0,40

Retardo de la señal	ϵ	3,28	3,50	3,50
Tiempo medio residencia	τ	0,11	7,00	16,00
Número de reactores	N	1,10	1,30	3,80
Función Gamma	$\square\square\square\square\square\square$	1,00		

Y para el caso con sufusión se utilizaron los parámetros de la Tabla 11.

Tabla 11. Parámetros utilizados para el caso con sufusión.

PARÁMETROS				
Concepto	Símbolo	PULSO 1	PULSO 2	PULSO 3
Mezcla de flujo	\square	2,52	1,81	0,92
Fracción del flujo	p	0,40	0,38	0,22
Retardo de la señal	ϵ	3,10	4,75	4,85
Tiempo medio residencia	τ	3,61	1,51	7,00
Número de reactores	N	2,63	3,02	1,00
Función Gamma	$\square\square\square\square\square\square$	5,00		

Tabla 12. Tiempo y función de distribución del tiempo de residencia (DTR) para condiciones con y sin sufusión.

Sin Sufusión			Con Sufusión		
Tiempo, h	E(t), Modelo Sin Sufusión	E(t), Exp. sin Sufusión	Tiempo, h	E(t), Modelo Con Sufusión	E(t), Exp. Con Sufusión
0,0	0,00000	0,00000	0,0	0,00000	0,00000
2,6	0,00000	0,00000	2,8	0,00000	0,00000
3,0	0,00000	0,01585	3,3	0,04533	0,01724
3,3	0,35500	0,35177	3,6	0,17331	0,19881
3,7	0,20500	0,19744	3,9	0,21659	0,20809
3,9	0,21669	0,24793	4,2	0,20842	0,18930
4,2	0,24548	0,24885	4,5	0,17937	0,18852
4,4	0,26888	0,26186	4,8	0,16006	0,16168
5,5	0,25476	0,25067	6,3	0,13810	0,13596
6,4	0,17141	0,21395	6,9	0,04911	0,05591
7,0	0,11699	0,19443	11,0	0,01289	0,05254
7,3	0,09742	0,14647	15,0	0,00763	0,03002
9,0	0,02898	0,04949	18,0	0,00515	0,02252
13,0	0,00169	0,01650	22,0	0,00305	0,01501
16,0	0,00028	0,01320	-	-	-
20,0	0,00003	0,00825	-	-	-

Las Fotografías 3 y 4 muestran registros visuales de la Prueba 2 con y sin sufusión. Allí se destaca el volumen de control, por donde circuló preferencialmente la solución de riego en cada caso. En la prueba con sufusión se distingue la capa de caolín en la zona inferior.



Figura 15 Fotografía Columna regada Carga 1 sin sufusión.



Figura 16 Fotografía Columna regada Carga 2 con sufusión.

Condiciones Prueba 3

Tabla 13. Condiciones para la prueba sin sufusión.

Dimensiones de la celda	
Largo, cm	25,00

Ancho, cm	3,30
Alto, cm	30,00
Masa del mineral, g	1710,00
Densidad aparente BS, t/m ³	1,65
Sal adicionada, g	20,70
Sulfato de Cobre adicionado, g	136,90
Ácido agregado, mL	18,60
Agua acidulada, mL	160,00
Densidad agua acidulada, t/m ³	1,00
Masa del mineral aglomerado, g	2040,00
Densidad aparente BH, t/m ³	1,42
Humedad BS, %	9,36
Humedad BH, %	8,56
Altura de la columna, cm	17,40
Concentración de Cu en Refino, g/L	1,59
Tasa de riego 1, L/h/m ²	4,20
Tasa de riego 2, L/h/m ²	7,10
Tiempo de riego 1, h	2,00
Tiempo de riego 2, h	15,00
Razón de lixiviación 1, m ³ /t	0,04
Razón de lixiviación 2, m ³ /t	0,51

Tabla 14. Condiciones para la prueba con sufusión.

Dimensiones de la celda	
Largo, cm	25,00
Ancho, cm	3,30
Alto, cm	30,00
Masa del mineral, g	1640,00
Densidad aparente BS, t/m ³	1,65
Sal adicionada, g	20,70
Sulfato de Cobre adicionado, g	136,90
Ácido agregado, mL	19,60
Agua acidulada, mL	160,00
Densidad agua acidulada, t/m ³	1,00
Masa del mineral aglomerado, g	2050,00
Densidad aparente BH, t/m ³	1,38
Humedad BS, %	9,77
Humedad BH, %	8,90
Altura de la columna, cm	18,00

Concentración de Cu en Refino, g/L	1,59
Tasa de riego 1, L/h/m ²	3,70
Tasa de riego 2, L/h/m ²	6,70
Tiempo de riego 1, h	2,00
Tiempo de riego 2, h	17,00
Razón de lixiviación 1, m ³ /t	0,4
Razón de lixiviación 2, m ³ /t	0,57

Capa sufusión Caolín	
Masa caolín, g	7,00
Densidad caolín, t/m ³	2,60
Agua acidulada, ml	40,00
Humedad BS, %	54,79

Resultados Prueba 3

(A) Cinética de recuperación de cobre

Los resultados de la Prueba 3 se presentan en forma gráfica en la Figura 13 y en forma numérica en la Tabla 15.

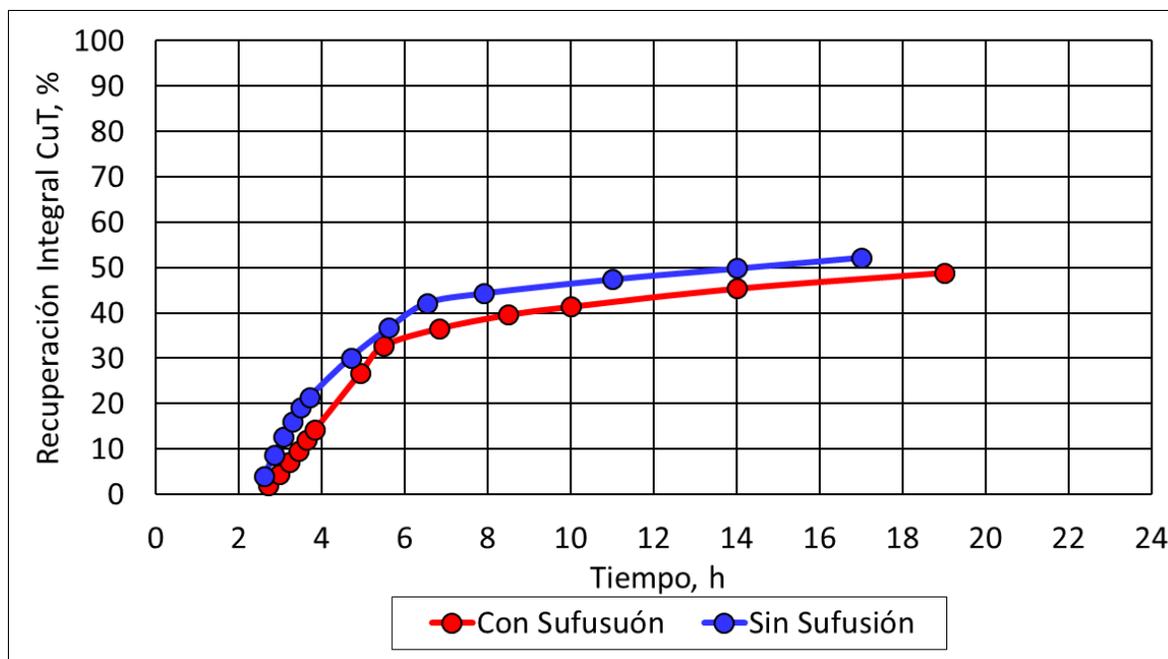


Figura 17. Recuperación integral perfil 3.

Tabla 15. Tiempo y recuperación de las pruebas con y sin sufusión del perfil 3.

Sin Sufusión			Con Sufusión		
Tiempo, h	Rec/h	Rec, %	Tiempo, h	Rec/h	Rec, %
2,62	1,50	3,92	2,70	0,72	1,95
2,85	20,23	8,64	2,97	9,48	4,48
3,08	17,05	12,61	3,22	10,95	7,22
3,28	17,06	16,03	3,43	11,30	9,66
3,50	14,10	19,08	3,63	11,54	11,97
3,70	11,54	21,39	3,83	11,49	14,27
4,70	8,80	30,19	4,92	11,52	26,75
5,62	7,11	36,71	5,50	10,38	32,80
6,53	6,01	42,22	6,83	2,87	36,63
7,90	1,55	44,34	8,50	1,80	39,63
11,00	1,00	47,44	10,00	1,20	41,43
14,00	0,80	49,84	14,00	1,00	45,43
17,00	0,80	52,24	19,00	0,70	48,93

(B) Distribución del Tiempo de Residencia (DTR)

Se aplicó el modelo de tres pulsos, descrito en la sección 3.2.6 Ensayos DTR para estimación de patrones flujo (c). Los resultados se presentan en forma gráfica en la Figura 14 y en forma numérica en la Tabla 18.

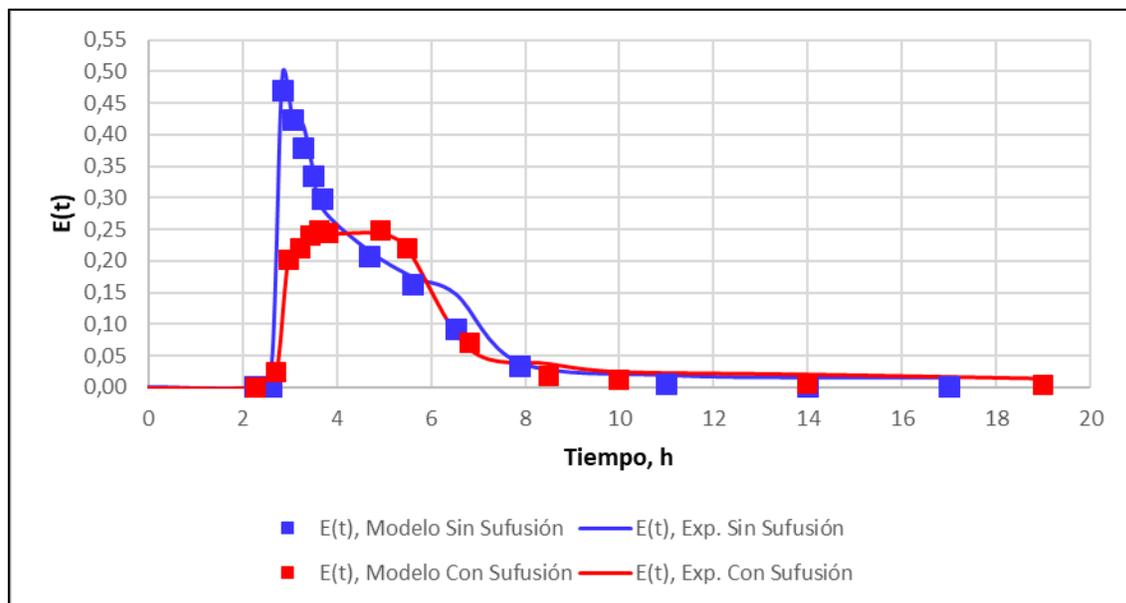


Figura 18. DTR integral del perfil 3.

Para el caso sin sufusión se utilizaron los parámetros que indican en la tabla 16.

Tabla 16. Parámetros utilizados para el caso sin sufusión.

PARÁMETROS				
Concepto	Símbolo	PULSO 1	PULSO 2	PULSO 3
Mezcla de flujo	\square	2,18	10,26	0,46
Fracción del flujo	p	0,85	0,15	0,00
Retardo de la señal	ε	2,80	4,50	0,17
Tiempo medio residencia	τ	3,67	15,00	218,07
Número de reactores	N	1,02	2,00	88,00
Función Gamma	$\square\square\square\square\square\square$	1,00		

Y para el caso con sufusión se utilizaron los parámetros de la tabla 17.

Tabla 17. Parámetros utilizados para el caso con sufusión.

PARÁMETROS				
Concepto	Símbolo	PULSO 1	PULSO 2	PULSO 3
Mezcla de flujo	\square	1,00	1,00	1,00
Fracción del flujo	p	0,34	0,34	0,32
Retardo de la señal	ε	2,27	2,91	2,85
Tiempo medio residencia	τ	1,76	2,68	5,96
Número de reactores	N	5,14	9,90	1,00
Función Gamma	$\square\square\square\square\square\square$	1147,00		

Tabla 18. Tiempo y función de distribución del tiempo de residencia (DTR) para condiciones con y sin sufusión.

Tiempo, h	Sin Sufusión		Tiempo, h	Con Sufusión	
	E(t), Modelo Sin Sufusión	E(t), Exp. Sin Sufusión		E(t), Modelo Con Sufusión	E(t), Exp. Con Sufusión
0,0	0,0000	0,0000	0,00	0,0000	0,0000
2,3	0,0000	0,0000	2,28	0,0000	0,0000
2,6	0,0000	0,0366	2,70	0,0251	0,0153
2,9	0,4705	0,4947	2,97	0,2023	0,2005
3,1	0,4238	0,4169	3,22	0,2195	0,2316
3,3	0,3795	0,4172	3,43	0,2404	0,2390
3,5	0,3347	0,3448	3,63	0,2477	0,2441
3,7	0,2981	0,2823	3,83	0,2448	0,2430
4,7	0,2079	0,2151	4,92	0,2478	0,2437
5,6	0,1634	0,1740	5,50	0,2196	0,2195
6,5	0,0908	0,1471	6,83	0,0714	0,0607
7,9	0,0334	0,0380	8,50	0,0183	0,0381
11,0	0,0040	0,0186	10,00	0,0125	0,0254

14,0	0,0006	0,0149	14,00	0,0069	0,0212
17,0	0,0001	0,0149	19,00	0,0035	0,0148

Las Fotografías 5 y 6 muestran registros visuales de la Prueba 3 con y sin sufusión. Allí se destaca el volumen de control, por donde circuló preferencialmente la solución de riego en cada caso. En la prueba con sufusión se distingue la capa de caolín en la zona inferior.

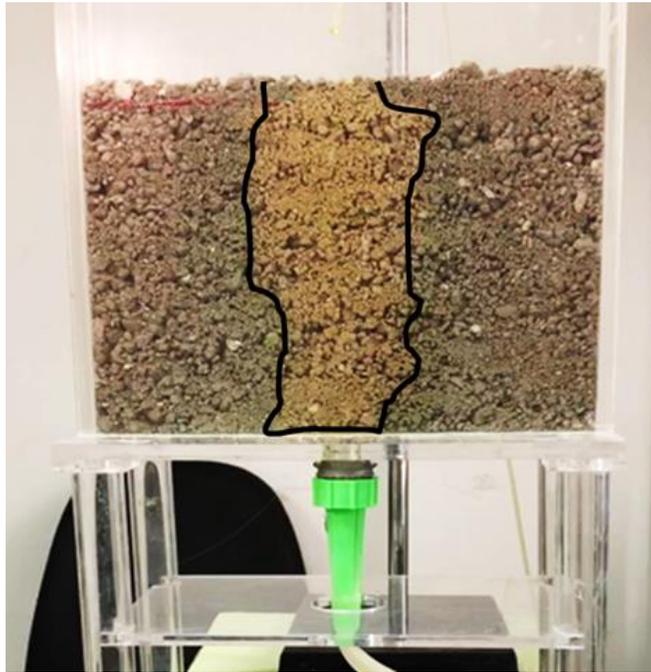


Figura 19 Fotografía Columna regada Carga 1 sin sufusión.

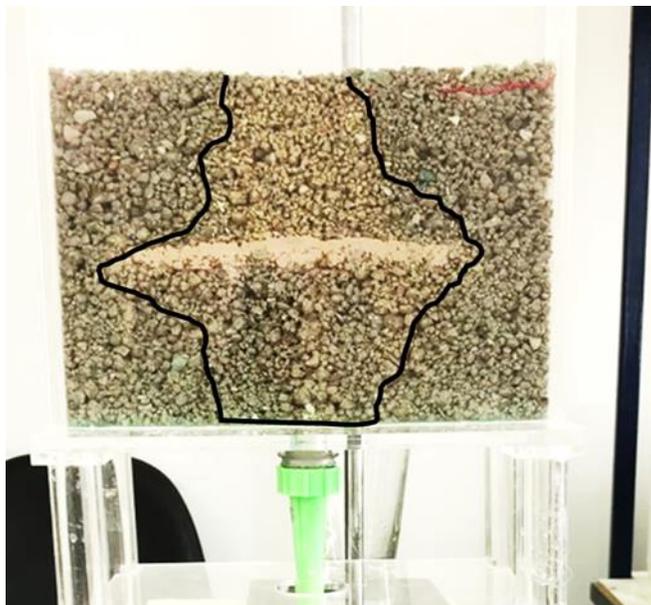


Figura 20 Fotografía Columna regada Carga 2 con sufusión.

Condiciones Prueba 4

Tabla 19. Condiciones para la prueba sin sufusión.

Dimensiones de la celda	
Largo, cm	25,00
Ancho, cm	3,30
Alto, cm	30,00
Masa del mineral, g	1720,00
Densidad aparente BS, t/m ³	1,65
Sal adicionada, g	20,80
Sulfato de Cobre adicionado, g	137,60
Ácido agregado, mL	19,70
Agua acidulada, mL	160,00
Densidad agua acidulada, t/m ³	1,00
Masa del mineral aglomerado, g	2050,00
Densidad aparente BH, t/m ³	1,38
Humedad BS, %	9,30
Humedad BH, %	8,51
Altura de la columna, cm	18,00
Concentración de Cu en Refino, g/L	1,59
Tasa de riego 1, L/h/m ²	3,80
Tasa de riego 2, L/h/m ²	6,90
Tiempo de riego 1, h	2,00
Tiempo de riego 2, h	17,00
Razón de lixiviación 1, m ³ /t	0,03
Razón de lixiviación 2, m ³ /t	0,56

Tabla 20. Condiciones para la prueba con sufusión.

Dimensiones de la celda	
Largo, cm	25,00
Ancho, cm	3,30
Alto, cm	30,00
Masa del mineral, g	1640,00
Densidad aparente BS, t/m ³	1,65
Sal adicionada, g	20,80
Sulfato de Cobre adicionado, g	137,60
Ácido agregado, mL	19,70
Agua acidulada, mL	160,00

Densidad agua acidulada, t/m ³	1,00
Masa del mineral aglomerado, g	2060,00
Densidad aparente BH, t/m ³	1,37
Humedad BS, %	9,73
Humedad BH, %	8,87
Altura de la columna, cm	18,20
Concentración de Cu en Refino, g/L	1,59
Tasa de riego 1, L/h/m ²	3,60
Tasa de riego 2, L/h/m ²	6,90
Tiempo de riego 1, h	2,00
Tiempo de riego 2, h	18,00
Razón de lixiviación 1, m ³ /t	0,04
Razón de lixiviación 2, m ³ /t	0,63

Capa sufusión Caolín	
Masa caolín, g	8,00
Densidad caolín, t/m ³	2,60
Agua acidulada, ml	40,00
Humedad BS, %	52,63

Resultados Prueba 4

(A) Cinética de recuperación de cobre

Los resultados de la Prueba 4 se presentan en forma gráfica en la Figura 15 y en forma numérica en la Tabla 21.

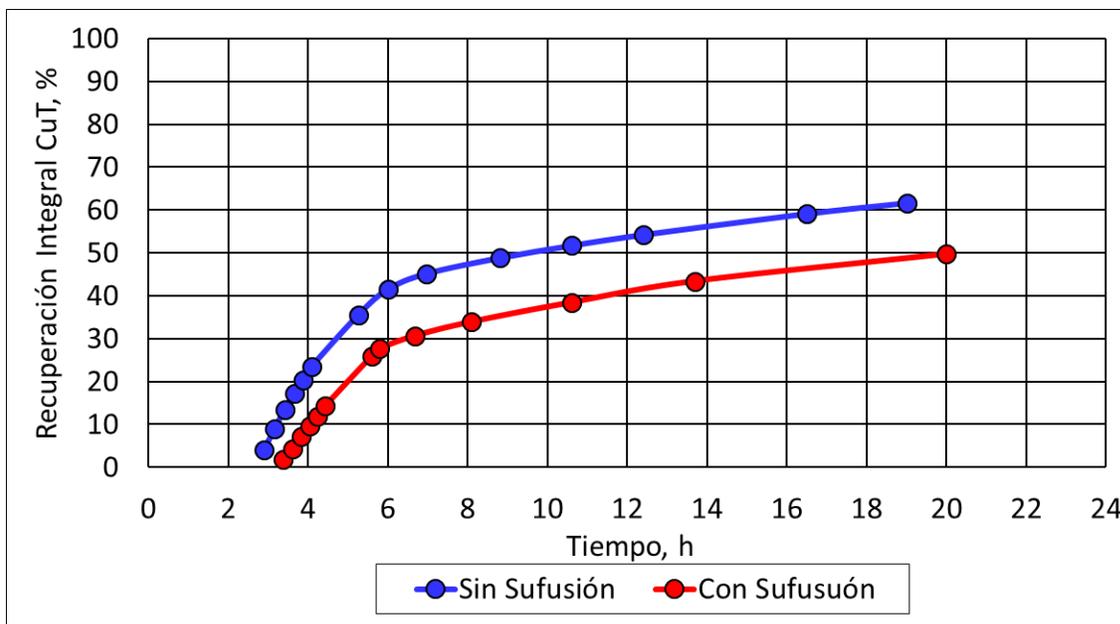


Figura 21. Recuperación integral perfil 4.

Tabla 21. Tiempo y recuperación de las pruebas con y sin sufusión del perfil 4.

Sin Sufusión			Con Sufusión		
Tiempo, h	Rec/h	Rec, %	Tiempo, h	Rec/h	Rec, %
2,90	1,40	4,06	3,38	0,57	1,93
3,17	18,55	9,01	3,62	10,61	4,40
3,42	17,91	13,49	3,83	12,50	7,11
3,65	16,32	17,29	4,03	12,19	9,55
3,87	14,52	20,44	4,23	12,06	11,96
4,08	13,82	23,44	4,43	11,89	14,34
5,27	10,30	35,62	5,60	9,94	25,94
6,00	8,09	41,55	5,80	8,68	27,67
6,97	3,76	45,19	6,67	3,41	30,63
8,80	2,00	48,85	8,10	2,30	33,93
10,60	1,60	51,73	10,60	1,80	38,43
12,40	1,40	54,25	13,70	1,60	43,39
16,50	1,20	59,17	20,00	1,00	49,69
19,00	1,00	61,67	-	-	-

(B) Distribución del Tiempo de Residencia (DTR)

Se aplicó el modelo de tres pulsos, descrito en la sección 3.2.6 Ensayos DTR para estimación de patrones flujo (c). Los resultados se presentan en forma gráfica en la Figura 16 y en forma numérica en la Tabla 24.

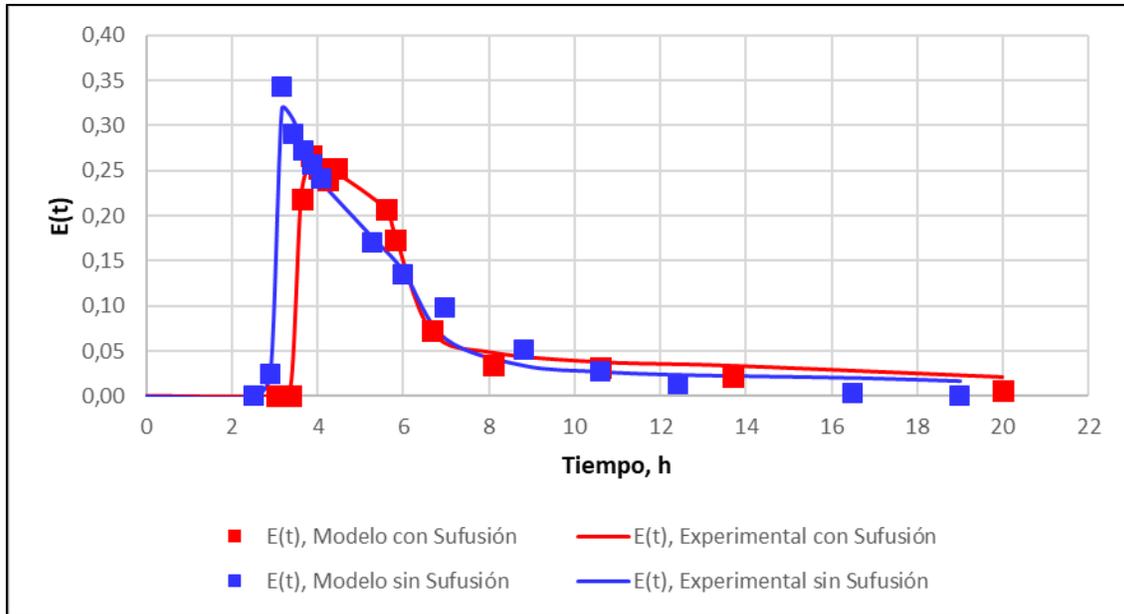


Figura 22. DTR integral del perfil 4.

Para el caso sin sufusión se utilizaron los parámetros que indican en la tabla 22.

Tabla 22. Parámetros utilizados para el caso sin sufusión.

PARÁMETROS				
Concepto	Símbolo	PULSO 1	PULSO 2	PULSO 3
Mezcla de flujo	\square	1,06	9,59	0,40
Fracción del flujo	p	0,50	0,50	0,00
Retardo de la señal	ϵ	3,17	2,68	0,25
Tiempo medio residencia	τ	2,04	40,86	1,00
Número de reactores	N	1,00	1,93	92,87
Función Gamma	$\square\square\square\square\square\square$	1,00		

Y para el caso con sufusión se utilizaron los parámetros de la tabla 23.

Tabla 23. Parámetros utilizados para el caso con sufusión.

PARÁMETROS				
Concepto	Símbolo	PULSO 1	PULSO 2	PULSO 3
Mezcla de flujo	\square	4,60	4,72	2,38
Fracción del flujo	p	0,40	0,30	0,30
Retardo de la señal	ϵ	3,53	3,97	5,71
Tiempo medio residencia	τ	5,09	7,36	16,69
Número de reactores	N	1,38	4,21	2,42
Función Gamma	$\square\square\square\square\square\square$	1,00		

Tabla 24. Tiempo y función de distribución del tiempo de residencia (DTR) para condiciones con y sin sufusión.

Sin Sufusión			Con Sufusión		
Tiempo, h	E(t), Modelo sin Sufusión	E(t), Experimental sin Sufusión	Tiempo, h	E(t), Modelo con Sufusión	E(t), Experimental con Sufusión
0,0	0,000	0,000	0,00	0,000	0,000
2,5	0,000	0,000	3,03	0,000	0,000
2,9	0,024	0,024	3,38	0,000	0,012
3,2	0,343	0,319	3,62	0,218	0,221
3,4	0,290	0,308	3,83	0,266	0,260
3,7	0,272	0,281	4,03	0,252	0,254
3,9	0,256	0,250	4,23	0,240	0,251
4,1	0,242	0,238	4,43	0,252	0,248
5,3	0,170	0,177	5,60	0,208	0,207
6,0	0,135	0,139	5,80	0,174	0,181
7,0	0,098	0,065	6,67	0,072	0,071
8,8	0,052	0,034	8,10	0,035	0,048
10,6	0,027	0,027	10,60	0,032	0,038
12,4	0,014	0,024	13,70	0,022	0,033
16,5	0,003	0,021	20,00	0,006	0,021
19,0	0,001	0,017	-	-	-

Las Fotografías 7 y 8 muestran registros visuales de la Prueba 4 con y sin sufusión. Allí se destaca el volumen de control, por donde circuló preferencialmente la solución de riego en cada caso. En la prueba con sufusión se distingue la capa de caolín en la zona inferior.

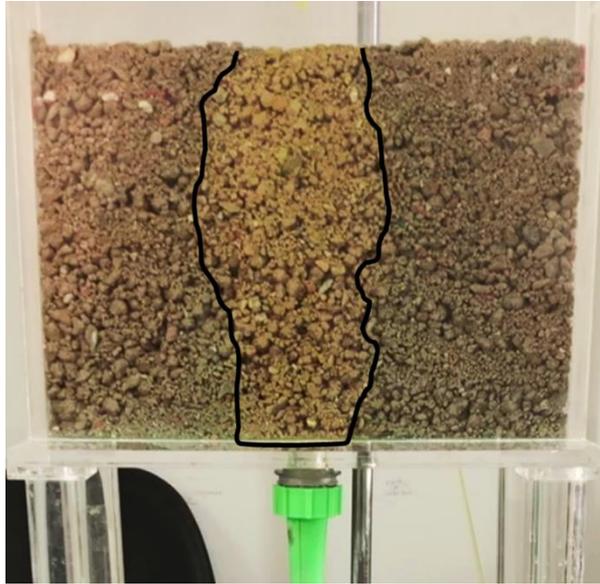


Figura 23 Fotografía Columna regada Carga 1 sin sufusión.

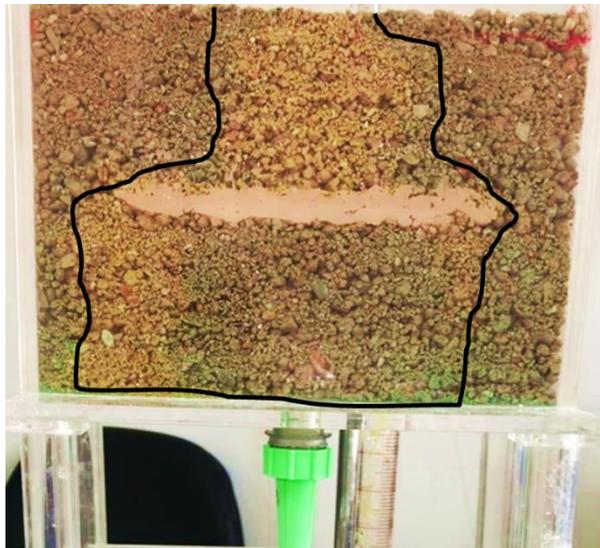


Figura 24 Fotografía Columna regada Carga 2 con sufusión.

Los resultados muestran que la presencia de sufusión afecta significativamente el patrón de flujo y la recuperación del cobre. En particular, se observó que la recuperación en los perfiles "con sufusión" es inferior en comparación con los perfiles "sin sufusión". Esto se debe a que la sufusión provoca cambios en la permeabilidad del medio, afectando la distribución del flujo y, por ende, la capacidad de disolución de los minerales presentes.

Los gráficos integrados permiten comparar directamente los efectos de la sufusión en la DTR de cada perfil. Se observa cómo la sufusión altera la forma de la curva de distribución, afectando parámetros como el tiempo medio de residencia y el

grado de dispersión. Por ejemplo, en las pruebas "sin sufusión", las curvas presentan un comportamiento más uniforme, mientras que en las pruebas "con sufusión", se observan picos pronunciados y un mayor ensanchamiento de la curva, indicando un flujo menos homogéneo y mayor dispersión.

4.2 Balances de materia

Balance de solución para la Prueba 1 con y sin Sufusión

Se evaluó el balance de solución y recuperación de cobre en dos condiciones: con y sin sufusión. Se aplicaron 304,7 mL de solución lixivante en la condición sin sufusión y 310,6 mL en la condición con sufusión. Los volúmenes recolectados fueron 242,2 mL y 222,3 mL, respectivamente. La recuperación de cobre fue del 25,8% sin sufusión y del 25,04% con sufusión, con una diferencia de 0,76 puntos porcentuales entre ambas condiciones. *(Para más detalles, ver Anexo 3 Prueba 1).*

Balance de solución para la Prueba 2 con y sin Sufusión

En esta prueba se regaron 236,32 mL de solución en la condición sin sufusión y 212,69 mL en la condición con sufusión. La recuperación de cobre fue del 33,04% sin sufusión y del 25,8% con sufusión, con una diferencia de 7,24 puntos porcentuales entre ambas condiciones. La eficiencia de drenaje fue del 91,7% en la primera condición y del 74% en la segunda condición, con una reducción de 17,7 puntos porcentuales. *(Para más detalles, ver Anexo 3 Prueba 2).*

Balance de solución para la Prueba 3 con y sin Sufusión

Se aplicaron 338,5 mL de solución sin sufusión y 266,52 mL con sufusión. El volumen recolectado fue de 283,3 mL y 226,4 mL, respectivamente, con un aumento de 7,2 puntos porcentuales en la segunda condición. La recuperación de cobre alcanzó el 20,04% sin sufusión y el 29,20% con sufusión, con un incremento de 9,16 puntos porcentuales. *(Para más detalles, ver Anexo 3 Prueba 3).*

Balance de solución para la Prueba 4 con y sin Sufusión

El volumen de solución lixivante aplicada fue de 300,28 mL sin sufusión y 277,35 mL con sufusión. La eficiencia de drenaje fue del 78,8% y 86%, respectivamente. La recuperación de cobre fue del 20,25% sin sufusión y 32,61% con sufusión, con una diferencia de 12,36 puntos porcentuales. *(Para más detalles, ver Anexo 3 Prueba 4).*

4.3 Modelación de patrones de flujo

La modelación de patrones de flujo en pilas de lixiviación es una herramienta esencial para comprender cómo se distribuye la solución lixivante a través del lecho poroso. Este análisis permite identificar zonas de flujo preferencial, áreas con baja permeabilidad y otros fenómenos que afectan la eficiencia del proceso. En este estudio, se utilizaron herramientas de simulación numérica para modelar el flujo de

la solución lixivante en condiciones con y sin sufusión, con el objetivo de evaluar su impacto en la recuperación de cobre.

En este trabajo se empleó un novedoso enfoque para medir e interpretar resultados de experimentos de flujo y recuperación de cobre. Se extendió la teoría de distribución de tiempos de residencia desarrollada para describir sistemas de caudal y volumen constantes, a sistemas transitorios, con una interpretación particular de los resultados, donde se definen funciones similares a las de la teoría convencional, pero considerando magnitudes integrales de límite superior variable, según el progreso del experimento. Para ello se emplea el modelo de N reactores imperfectos conectados en serie, y más particularmente, el modelo de 3 reactores imperfectos, desarrollado anteriormente para describir sistemas de lixiviación en pilas, donde los modelos ideales clásicos no son capaces de dar cuenta de los resultados experimentales.

Los resultados de la modelación mostraron que la sufusión tiene un impacto significativo en los patrones de flujo. En las pruebas sin sufusión, el flujo de la solución lixivante fue relativamente uniforme, con una distribución homogénea a través del lecho poroso. Sin embargo, en presencia de sufusión, se observó la formación de zonas de flujo preferencial (canales) y áreas con baja permeabilidad, lo que generó una distribución desuniforme del flujo.

En las Fotos de la 1 a la 8 se presentan los mapas de distribución de la solución lixivante para ambos casos (con y sin sufusión). En las pruebas con sufusión, se identificaron áreas donde la solución no logró penetrar de manera efectiva, lo que explica la menor recuperación de cobre observada en los resultados experimentales.

4.3 Impacto en la recuperación de cobre

La recuperación de cobre es el indicador clave de la eficiencia del proceso de lixiviación en pilas. Considerando la información conocida, se deduce que esta es la primera vez, que se reportan datos que demuestran la magnitud del impacto de la distribución del flujo de la solución lixivante a través del lecho poroso en la recuperación de cobre. Un flujo uniforme maximiza el contacto entre la solución y el mineral, mientras que un flujo desuniforme genera zonas de bajo y alto riego, que reducen la eficiencia del proceso. En este estudio, se analizó el impacto de la sufusión en la recuperación de cobre, comparando los resultados obtenidos en pruebas experimentales con y sin sufusión.

La sufusión, tiene un efecto significativo en la permeabilidad del mineral. Este fenómeno genera heterogeneidades en el lecho, creando zonas de flujo preferencial (canales) y áreas con baja permeabilidad. Como resultado, grandes volúmenes de

mineral no están expuestos de manera efectiva a la solución lixivante, lo que reduce la recuperación de cobre.

En las pruebas experimentales realizadas, se observó que la ocurrencia de sufusión disminuyó la recuperación de cobre en comparación con las pruebas sin sufusión. Por ejemplo, en el Perfil 1, la recuperación acumulada alcanzó un 59,88% en ausencia de sufusión, mientras que, en presencia de sufusión, la recuperación fue de solo 52,00%. Esta diferencia se debe a la formación de capas de baja permeabilidad que limitan el flujo uniforme de la solución.

Los resultados de las pruebas experimentales se resumen en la siguiente Tabla, donde se comparan las recuperaciones de cobre para los diferentes perfiles estudiados, tanto en condiciones de sufusión como sin sufusión. Adicionalmente, en las Figura 7-9-11-13, ya presentadas, se presentan las curvas de recuperación acumulada en función del tiempo, destacando las diferencias entre ambos casos.

Tabla 25. Recuperación de cobre en pruebas con y sin Sufusión de todos los perfiles.

Pruebas	Recuperación sin sufusión (%)	Recuperación con sufusión (%)	Diferencia (%)
1	59,88	52,00	7,88
2	76,59	69,83	6,76
3	52,24	48,93	3,31
4	61,67	49,69	11,98

Como se observa en la Tabla 25, la sufusión redujo la recuperación de cobre en todos los perfiles estudiados, con diferencias que variaron entre 3,31 y 11,98 puntos porcentuales de recuperación. Estas diferencias se explican por la formación de zonas de flujo preferencial y áreas con baja permeabilidad, que limitan el contacto efectivo entre la solución lixivante y el mineral.

En la práctica industrial se conoce el fenómeno de migración de finos, pero se desconocen estudios específicos tendientes a cuantificar este efecto, existen antecedentes de bajas recuperaciones en ciertas zonas de los ripios de lixiviación sobre la base de muestreos estratificados de cada una de las pilas lixiviadas en el proyecto doña Inés de Collahuasi lo que llevó, incluso, a tomar medidas operacionales en cuanto a la tasa de riego para lograr una mayor estabilidad de las pilas y una mejor recuperación.

No obstante, los resultados de este trabajo, son los primeros reportados con una cuantificación del impacto del régimen de flujo en la respuesta metalúrgica.

CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5 Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones generales

Uno de los paradigmas de la lixiviación de especies valiosas desde minerales, es que principalmente se consideran variables geológicas, químicas y metalúrgicas, asumiendo que la recuperación es un fenómeno controlado exclusivamente por las reacciones químicas que ocurren sobre la superficie de las partículas. Si bien es cierto que en los casos que la calidad física de los minerales es alta o media, este enfoque explica el grueso de los resultados, en otros casos, cuando el transporte de soluto disuelto desde la superficie del mineral hasta los puntos de colección, es el fenómeno que controla la cantidad de cobre que se recupera en la salida de la pila, la recuperación puede ser mucho menor que la esperada desde consideraciones químicas solamente.

Lo anterior ha motivado a estudiar de manera sistemática el impacto de la calidad física de los minerales en la recuperación del cobre contenido, en este caso particular, el fenómeno de migración de finos (sufusión) y su impacto en la recuperación, cuando el control es exclusivamente por el transporte convectivo de soluciones. En este aspecto, la distribución granulométrica del mineral a lixiviar puede jugar un rol importante en el sentido que la variación del porcentaje de finos, esto es bajo la malla 200, para un mismo valor de P80 podría incidir en la recuperación, propiamente tal, del mineral útil.

Es así como los resultados señalan de manera inequívoca, que la recuperación puede disminuir desde un par de puntos porcentuales, hasta diez o más puntos de recuperación.

La migración de partículas finas dentro del lecho poroso genera un aumento de la permeabilidad del lecho, generando heterogeneidades en la distribución del flujo. En este sentido la sufusión es un fenómeno crítico que afecta negativamente la eficiencia del proceso de lixiviación. Esto se traduce en una menor recuperación de cobre, ya que por donde la solución lixivante circula preferencialmente, recupera una mayor cantidad de cobre con respecto a otras zonas, por donde circula un menor volumen de solución lixivante y dado el carácter no lineal del proceso de lixiviación, hace que lo que se gana por exceso de riego es siempre menor a lo que se pierde por defecto, con un balance negativo, siendo mayor la pérdida a medida que aumenta la heterogeneidad del riego.

Además, la sufusión puede fomentar la ocurrencia transiente de fenómenos geomecánicos de liquefacción estática, donde el lecho pierde estabilidad debido a la saturación excesiva. Esto no solo reduce la recuperación de cobre, sino que también puede comprometer la integridad estructural de la pila de lixiviación.

5.2 Conclusiones específicas

La nueva técnica experimental ensayada en este estudio, no reportada anteriormente en la literatura especializada, permite relacionar cambios de patrones de flujo y recuperaciones metalúrgicas.

Se utiliza en este estudio un modelo para la interpretación de los fenómenos hidrodinámicos, adaptado de la teoría de distribución de tiempos de residencia, el cual permite aplicar experimentos estímulo–respuesta en sistemas no necesariamente continuos ni permanentes.

Se obtuvo un conjunto de resultados experimentales que validan la hipótesis fundamental de que un flujo segregado se traduce en una pérdida efectiva de recuperación de cobre en procesos de lixiviación en pilas.

Finalmente, se presenta una revisión de diversos fenómenos geomecánicos que ocurren durante el riego de las pilas, demostrando que la acumulación crítica de humedad genera una labilidad en la estructura de poros. Este fenómeno provoca la contracción del lecho según su plasticidad y la redistribución de partículas finas, lo que reduce la permeabilidad y genera flujo heterogéneo y canalizaciones con pérdida de recuperación.

5.3 Recomendaciones trabajos futuros

En primer lugar, se debe tener claro, que este trabajo, pionero en este tema, es un aporte limitado y por tanto, se requiere realizar más estudios en esta área. Algunos temas de interés son:

- Ensayos hidrodinámicos en celda plana de mayor envergadura, por ejemplo, 1m x 1m x 0,20m.
- Ensayos con minerales de escala creciente de plasticidad.
- Ensayos con minerales de escala creciente de contenido de finos.
- Ensayos con mezclas de materiales de diferente calidad física.
- Desarrollo de modelos fenomenológicos transientes para representar condiciones críticas.

Por otra parte, el aprovechamiento a nivel industrial de los fenómenos estudiados, origina las siguientes líneas de trabajo y estrategias para mitigar los efectos negativos:

- Optimización de la granulometría del mineral: Reducir la proporción de partículas finas en el lecho poroso, trabajar con mezclas que contengan un máximo de mineral de baja calidad física, ya sea provenientes de frentes de mina o de stock.

- Uso de aglomerantes: Mejorar la cohesión del mineral y reducir la migración de partículas finas. Este es un camino que ha sido abordado por diferentes empresas e investigadores, pero no ha sido claro su beneficio. Es probable que se relacione con la existencia de micro y macro canales, los primeros relacionados con la naturaleza propia del mineral, muy finos, de naturaleza plástica, no muy influenciados por la presencia de aglomerantes y los macro canales, muy sensibles al aglomerante, que permiten subir el caudal de riego en forma segura, pero de bajo impacto en la recuperación del cobre, que se encuentra masivamente en los micro canales. Este es un tema aun abierto a la investigación.
- Control de la tasa de riego: Ajustar en cada aplicación, la tasa de riego para evitar la saturación excesiva del lecho. Esta es la vía preferente de control, la cual se inicia en las rampas de humectación, que suelen extenderse por 2 hasta 10 días antes de llegar a la tasa nominal de riego. El empleo de sensores para anticipar humedad excesiva y un modelo hidrodinámico predictor que ayude a tomar decisiones in situ y en tiempo real, son formas de abordar este importante tema. No debe olvidarse que la pérdida de estructura de la pila de lixiviación es irreversible y ya no hay vuelta atrás de manera simple.

CAPITULO VI: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

6 Referencias Bibliográficas

- ABG Geosynthetics. (2021). *Barrera de sal ABG | Geocompuesto de drenaje de rotura capilar*. Consultado el 16 de Diciembre de 2024, de <https://abg-geosynthetics.com/es/products/geocomposite-drainage/salt-break/>
- Batiot, B., Rogaume, T., Richard, F., Luche, J., Collin, A., Guillaume, E. & Torero, J.L. (2021). Origin and justification of the use of the Arrhenius relation to represent the reaction rate of the thermal decomposition of a solid. *Applied Sciences*, 11(9), 4075. <https://doi.org/10.3390/app11094075>
- Bendall, S., Fox, J., & Zhang, X. (2018). Impact of impurities in copper ore on the efficiency of leaching processes. *Minerals Engineering*, 115, 57-65. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.11.002>
- Bernal, M., Hernández, V., Flores, O., Hernández, S., Guzmán, A. & Candelaria, J. (2018). Determinación del ángulo de fricción interna por medio de pruebas triviales tipo UU y CU en jales. *En XXIX Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica*, 22-24. https://www.researchgate.net/publication/351354539_Determinacion_del_angulo_de_friccion_interna_por_medio_de_pruebas_triviales_tipo_UU_y_CU_en_jales
- Carpena, R. M., & Dorronsoro, C. (2004). Posibilidades de las barreras capilares para reducir el riesgo de contaminación de suelos. *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo*, 7, 3–8. https://abe.ufl.edu/faculty/carpena/files/pdf/zona_no_saturada/estudios_de_la_zona_v7/c003-008.pdf
- Chen, X., Zhang, Q., & Wang, Z. (2020). *Effect of temperature on the copper leaching process and optimization strategies*. *Hydrometallurgy*, 191, 105137. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105137>
- Cisternas, L. A., & Cáceres, G. (2020). Advances in heap leaching technology for copper extraction. *Minerals Engineering*, 145, 106098. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106098>
- Cochilco. (2022). Informe del Mercado del Cobre. Comisión Chilena del Cobre. Recuperado de <https://www.cochilco.cl/>
- Cochilco. (2023). *Informe del Mercado del Cobre*. Recuperado de <https://www.cochilco.cl>

- Codelco educa. (2018). *Chancado*. https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109004934/chancado_media_tecnico_060119.pdf
- De Re Metallica Ingeniería SpA. (2000). Proceso de Lixiviación, Extracción por Solventes y Electroobtención del Cobre
- Dreier, M. (2020). *Leaching techniques in copper extraction*. Journal of Mining Science, 55(2), 120-134. <https://doi.org/10.1134/S1062739120020031>
- Dutrizac, J. E. (1990). The dissolution of chalcopyrite in ferric sulfate and ferric chloride media. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 21(4), 847-859. <https://doi.org/10.1007/BF02653736>
- Elaboración propia. (2024). *Diagrama de flujo simplificado Línea Óxidos versus Línea Sulfuros* [imagen].
- Elaboración propia. (2024). Flujo Planta Hidrometalúrgica. [imagen].
- Estudios Geotécnicos. (2013). *Deformación y asentos de los suelos (2): elasticidad y plasticidad*. Recuperado de <https://estudiosgeotecnicos.info/index.php/deformacion-y-asientos-de-los-suelos-1-elasticidad-y-plasticidad/>
- Fogler, H. S (2016). *Elements of Chemical Reaction Engineering* (5th ed.). Pearson. <https://www.pearson.com>
- Foster Ingenieros. (2024, 23 de julio). *Avances y perspectivas: La lixiviación clorurada en la extracción de cobre*. <https://fosteringenieros.com/2024/07/23/avances-y-perspectivas-la-lixivacion-clorurada-en-la-extraccion-de-cobre/>
- Fredlund, D. G., & Xing, A. (1994). Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(4), 521–532. <https://doi.org/10.1139/t94-061>
- Fuentes, J., & Martínez, L. (2021). *Innovaciones en la hidrometalurgia: Lixiviación nítrica para minerales sulfurados*. Revista de Minería Sostenible, 18(3), 45-57. <https://www.miningscience.org>
- Gavriilidis, A., Matis, K., & Zouboulis, A. (2018). *The role of chloride ions in the leaching of copper from sulfide ores: A review*. *Hydrometallurgy*, 178, 49-56. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2018.04.010>
- Huang, H., & Zhang, S. (2018). *Optimization of sulfuric acid concentration in copper heap leaching*. *Journal of Mining and Metallurgy*, 54(4), 781-790. <https://doi.org/10.1016/j.jmm.2018.03.005>

- Huang, C., Zhang, L., & Zhang, L. (2021). A vertical layered theoretical model to predict the suffusion-induced heterogeneity of cohesionless soil. *Journal of Hydrology*, 126476. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126476>
- Huang, C., Zhang, L., & Zhang, L. (2021). A theoretical model to predict suffusion-induced particle movement in cohesionless soil under seepage flow. *European Journal of Soil Science*, 72(6), 2240-2255. <https://doi.org/10.1111/ejss.13062>
- Hussain, S., Ahmad, S., & Khan, M. (2019). *The impact of copper ion concentration on leaching efficiency in copper sulfide ores*. *Journal of Hydrometallurgy*, 185, 105083. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2018.12.002>
- Jiang, T., Zhao, S., & Wu, Q. (2021). *Effect of particle size on copper extraction in heap leaching processes*. *Minerals Engineering*, 157, 106521. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106521>
- JXSC Machine. (2023). *Proceso de flotación de minerales sulfurados*. <https://www.jxscmachine.com/es/proceso-de-flotacion-de-minerales-sulfurosos/>
- Klein, C., & Dutrow, B. L. (2007). *Manual of Mineral Science* (23rd ed.). Wiley. <https://www.wiley.com/en-us/Manual+of+Mineral+Science%2C+23rd+Edition-p-9780471721574>
- Levenspiel, O. (1999). *Chemical Reaction Engineering* (3rd ed.). Wiley. <https://www.wiley.com>
- Liceo Industrial Eulogio Gordo Moneo. (2021). *Guía de aprendizaje N°2: Aglomerado y curado*. Recuperado de <https://www.liceoindustrialegm.cl/wp-content/uploads/2021/04/Gu%C3%ADa-de-aprendizaje-N%C2%B02-Modulo-N%C2%B07-Especialidad-Metalurgia-Ectractiva-4f.pdf>
- Matsumoto, H., & Watanabe, K. (2019). *Effect of percolation rate on the copper extraction from low-grade ores in heap leaching processes*. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 7(6), 125-136. <https://doi.org/10.4236/jmmce.2019.76009>
- Marsden, J., & House, C. (2006). *The Chemistry of Gold Extraction*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration. <http://dx.doi.org/10.1007/BF03215543>
- Menacho, G., & Díaz Vargas, F. (2008). *Use of radiotracer in copper hydrometallurgical operations*. Presentación en la 5ª Conferencia Internacional sobre Trazadores y Métodos de Trazado, Tiradentes, MG, Brasil.

- Milczarek, M., Yao, T., Banerjee, M., & Keller, J. (2013). *Ore permeability methods of evaluation and application to heap leach optimization*. En *GeoSystems, Heap Leach Solutions*. Vancouver, Canada.
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2015). *Guía sobre control geotécnico en minería subterránea I*. Recuperado de <https://www.miteco.gob.es/content/dam/mitesco/es/energia/files-1/mineria/Seguridad/Guias/Gu%C3%ADas/Guia-control-geotecnico-mineria-subterranea.pdf>
- Mishra, R., Pradhan, N., & Dey, S. (2020). *A review on the extraction of copper from sulphide ores*. *Minerals Engineering*, 147, 106119. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.106119>
- Nguyen, V. N. A., Jougnot, D., Luong, T., Phan, V. D., Tran, T., Dang, H., & Nguyen, H. (2021). Predicting water flow in fully and partially saturated porous media: A new fractal-based permeability model. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2106.01670>
- Nobrega, R., Oliveira, D., & Silva, P. (2019). *Effect of metal impurities on copper recovery in hydrometallurgical processes*. *Hydrometallurgy*, 189, 105109. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2019.05.001>
- Pedersen, H., & Hansen, A. (2022). Parameterizations of immiscible two-phase flow in porous media. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2212.07285>
- Pérez, C., Vega, P., & Díaz, P. (2021). *Effect of copper ion concentration on the efficiency of copper leaching*. *Minerals*, 11(6), 684. <https://doi.org/10.3390/min11060684>
- Petersen, J., & Dixon, D. G. (2007). Modeling and optimization of heap bioleaching. *Hydrometallurgy*, 88(1-4), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2007.03.013>
- Petersen, J. (2016). Heap leaching as a key technology for recovery of values from low-grade ores – A brief overview. *Hydrometallurgy*, 165, 206-212. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2016.01.015>
- Ravanchi, M. T., Mohammad, A. A., & Ghaffari, M. (2019). *Use of chloride-based leaching systems for copper extraction: A review*. *Minerals Engineering*, 136, 108-114. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.01.004>
- Rivera, M., & Menacho, J. (2009). *Un nuevo modelo para estimar la conductividad hidráulica saturada en lixiviación en pilas*. En III Congreso Latinoamericano de Metalurgia, Cusco, Perú

- Richards, L. A. (1931). Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*, 1(5), 318–333. <https://doi.org/10.1063/1.1745010>
- Robertson, P. K. (2010). *CPTu, penetraci3n est1tica y licuefacci3n*. Recuperado de <https://geotecnia.info/index.php/cptu-penetracion-estatica-y-licuefaccion-peter-k-robertson/>
- Robertson, P. K., de Melo, L., Williams, D. J., & Gr1be, P. J. (2019). Report of the expert panel on the technical causes of the failure of Feij1o Dam I. Vale S.A. <https://www.vale.com/hotsite/es/Paginas/Reporte-de-la-comision.aspx>
- Roedder, E. (1984). *Fluid inclusions*. Mineralogical Society of America. <https://doi.org/10.1515/9781501508960>
- Rui, Z., Liu, Y., & Wang, L. (2021). Optimization of irrigation rate in heap leaching of copper ores: Effects on solution flow and lixiviant distribution. *Hydrometallurgy*, 200, 105419. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2021.105419>
- S1nchez, M., D1az, P., & P1rez, C. (2019). Optimization of leaching time for copper extraction from low-grade ores. *Minerals Engineering*, 128, 118-126. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.11.009>
- Schneider Electric. (2024, octubre 6). *Miner1a Verde: Un camino hacia la sostenibilidad*. Schneider Electric. <https://blogespanol.se.com/industria/mineria-metales-y-minerales/2024/10/06/caminos-hacia-la-sostenibilidad-en-el-procesamiento-de-minerales-adopcion-de-una-mineria-ecologica/>
- Šim1nek, J., van Genuchten, M. T., & Šejna, M. (2008). Development and applications of the HYDRUS and STANMOD software packages and related codes. *Vadose Zone Journal*, 7(2), 587–600. <https://doi.org/10.2136/vzj2007.0077>
- Simpson, J., & Pizarro, M. (2022, agosto). *Proceso de Ecowinning: Tecnología sustentable para la producci3n de cobre*. Presentado en el S1ptimo Congreso Internacional de Miner1a de Tarapac1 (CIMIT 2022), Iquique, Chile.
- Smith, M., Jones, L., & Taylor, R. (2020). The use of chemical tracers in mineral heap leaching. *Minerals Engineering*, 155, 106-116. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106116>
- Smith, J., Wang, F., & Liu, H. (2020). Impact of bed permeability on lixiviant distribution and copper recovery in heap leaching. *Minerals Engineering*, 151, 106313. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106313>

- Sottile, M. G., Cueto, I. A., & Sfriso, A. O. (2020). *A simplified procedure to numerically evaluate triggering of static liquefaction in upstream-raised tailings storage facilities*. Recuperado de <https://arxiv.org/abs/2010.11705>
- Stewart, D., et al. (2017). *Ammoniacal leaching of nickel laterite ores*. *Hydrometallurgy*, 169, 119-127. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2017.01.007>
- Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). *Soil mechanics in engineering practice* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- Torres, M., et al. (2019). *Chloride leaching of gold-bearing concentrates*. *Journal of Cleaner Production*, 236, 117583. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117583>
- Universidad Nacional de Colombia. (2016). *Capítulo 9: Consolidación de suelos*. Recuperado de https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/57121/consolidacionde_suelos.pdf
- Universidad Politécnica de Cataluña. (2011). *Tema 5. Consolidación de suelos saturados*. Recuperado de https://portal.camins.upc.edu/materials_guia/250230/2012/tema_5_consolidacion.pdf
- Universidad Politécnica de Madrid. (2017). *Consolidación secundaria – Disfrutando con la geotecnia*. Recuperado de <https://blogs.upm.es/disfrutandogeotecnia/2017/10/20/consolidacion-secundaria/>
- Van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), 892–898. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>
- Wang, H., & Li, Z. (2019). *Influence of temperature on the lixiviation of copper ores and associated environmental impacts*. *Minerals Engineering*, 135, 101-108. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.01.003>
- Watling, H. (2015). *Microbial life in extremely acidic environments: Implications for bioleaching of base metal sulfides*. *Hydrometallurgy*, 157, 3-11. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.07.005>
- Watling, H. (2020). *Bioleaching of nickel and cobalt from lateritic ores: A review*. *Hydrometallurgy*, 195, 105360. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105360>

- Wills, B. A., & Finch, J. A. (2016). *Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery* (8th ed., p. 270-275). Butterworth-Heinemann.
- Yuan, L., Li, C., & Zhang, Y. (2020). *Influence of heap height on the efficiency of heap leaching: Effects on permeability and lixiviant flow*. *Journal of Hydrometallurgy*, 198, 105479. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105479>
- Zhang, J., Liu, S., & Zhang, X. (2020). *Impact of residence time on copper extraction in heap leaching*. *Hydrometallurgy*, 194, 105305. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105305>
- Zhang, J., Liu, S., & Zhang, X. (2020). *Optimization of percolation rate for heap leaching of copper ores*. *Minerals Engineering*, 151, 106314. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106314>
- Zhang, L., & Li, X. (2020). *The role of oxygen in enhancing copper sulfide oxidation during leaching*. *Hydrometallurgy*, 196, 105441. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105441>
- Zhao, X., Li, Z., & Yang, H. (2021). *Oxygen-based processes in the extraction of copper from sulfide ores: A review*. *Minerals Engineering*, 154, 106486. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106486>

CAPITULO VII: ANEXOS

7 ANEXOS

7.1 Glosario de términos

- Ácido sulfúrico (H_2SO_4): Reactivo comúnmente utilizado en la lixiviación de cobre (Cu).
- Barreras capilares: Estructuras diseñadas para interrumpir el flujo ascendente de humedad en suelos.
- Bio-lixiviación: Proceso de lixiviación que utiliza microorganismos para oxidar y disolver minerales.
- Conductividad hidráulica: Medida de la facilidad con la que un fluido puede moverse a través de un medio poroso.
- Consolidación: Proceso de reducción de volumen de un suelo saturado debido a la expulsión de agua, es lento y natural en comparación a la compactación.
- Decrepitación: Liberación explosiva de gases de minerales al ser calentados.
- Deformación plástica: Deformación permanente de un material bajo carga.
- Distribución del Tiempo de Residencia (DTR): Técnica para caracterizar el flujo de fluidos en sistemas de lixiviación.
- Ecuación de Richards: Ecuación que describe el movimiento del agua en suelos no saturados.
- Hidrometalurgia: Proceso de extracción de metales mediante el uso de soluciones acuosas.
- Ion férrico (Fe^{3+}): Agente oxidante utilizado en la lixiviación de sulfuros de cobre.
- Licuefacción estática: Pérdida de resistencia de un suelo no saturado bajo carga estática.
- Lixiviación: Proceso de extracción de metales de un mineral mediante el uso de soluciones químicas.
- Lixiviación agitada: Proceso de lixiviación en el que el mineral se mezcla intensamente con la solución lixivante en tanques.
- Lixiviación amoniacal (NH_3): Proceso de lixiviación que utiliza amoníaco para extraer metales como níquel y cobalto.
- Lixiviación clorurada: Proceso de lixiviación que utiliza cloruros para extraer metales.
- Lixiviación férrico-bacteriana: Proceso de lixiviación que utiliza bacterias y hierro férrico para oxidar minerales sulfurados.
- Lixiviación in situ: Método de lixiviación en el que la solución lixivante se inyecta directamente en el yacimiento mineral.

- Lixiviación nítrica (HNO_3): Proceso de lixiviación que utiliza ácido nítrico para disolver minerales sulfurados.
- Modelo de van Genuchten: Modelo matemático para describir la relación entre la presión del agua y la saturación en suelos no saturados.
- Óxidos de cobre: Compuestos de cobre que contienen oxígeno, como la malaquita ($\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$) y la azurita ($\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$).
- Permeabilidad: Capacidad de un material para permitir el flujo de fluidos a través de él.
- Pilas de lixiviación: Método de lixiviación en el que el mineral se apila y se riega con una solución lixivante.
- Recuperación de cobre: Porcentaje de cobre extraído del mineral durante el proceso de lixiviación.
- Saturación de poro: Porcentaje de los poros de un material que están llenos de líquido.
- Sulfuros de cobre: Compuestos de cobre que contienen azufre, como la calcopirita (CuFeS_2) y la bornita (Cu_5FeS_4).
- Sufusión: Fenómeno geotécnico donde las partículas finas de un conjunto de partículas de diferentes granulometrías son desplazadas por el flujo de un fluido que se mueve a través de la porosidad del conjunto de partículas.
- Tasa de riego: Cantidad de solución lixivante aplicada por unidad de tiempo.
- Tiempo de residencia: Tiempo que una partícula de fluido permanece en un sistema.

7.2 Anexo 2: Información fotográfica

Mineral de uso para las pruebas.

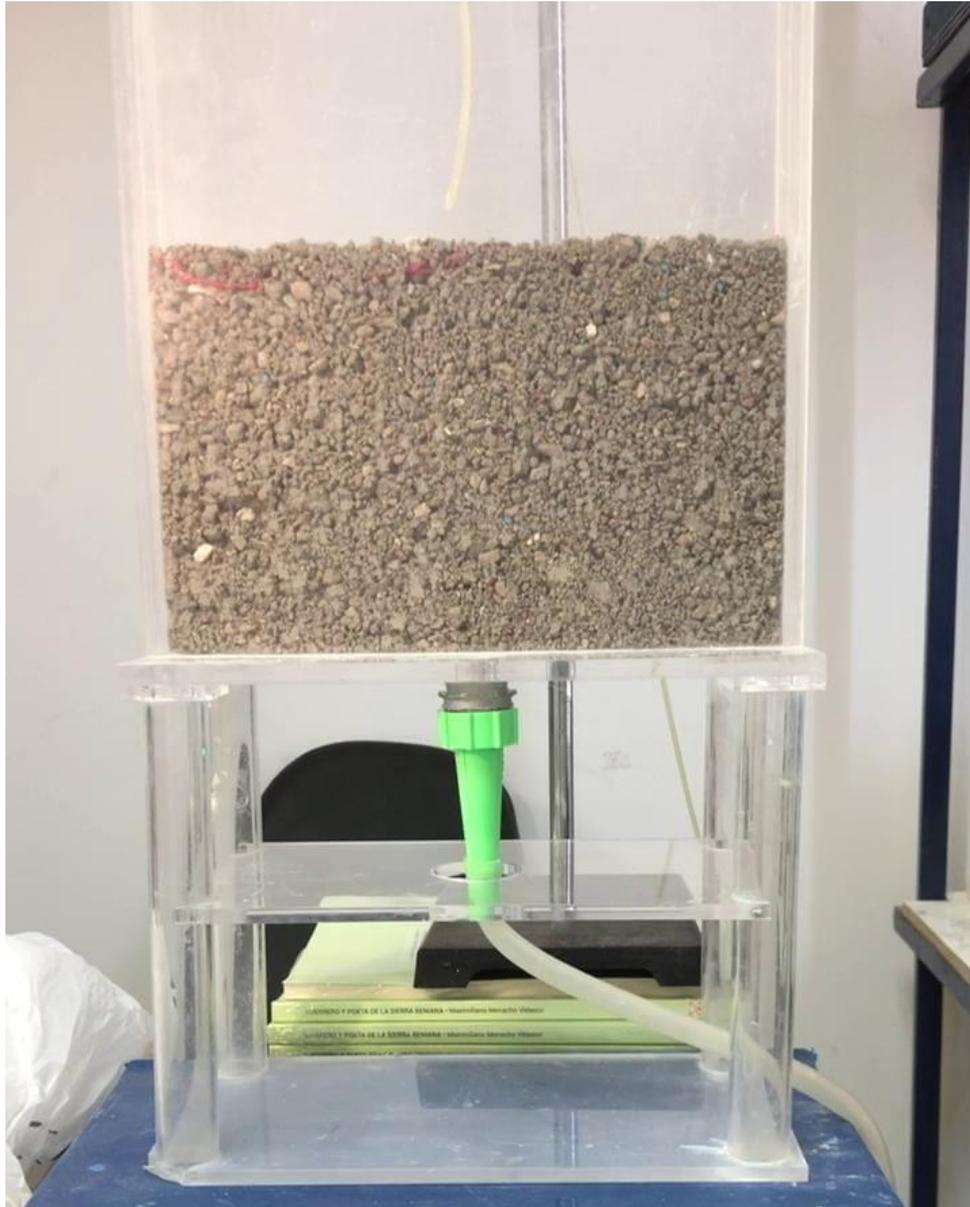


Figura 25 Fotografía de la celda bidimensional cargada con mineral.

Foto celda bidimensional cargada con mineral.



Figura 26 Fotografía del mineral usado.

Bomba peristáltica utilizada

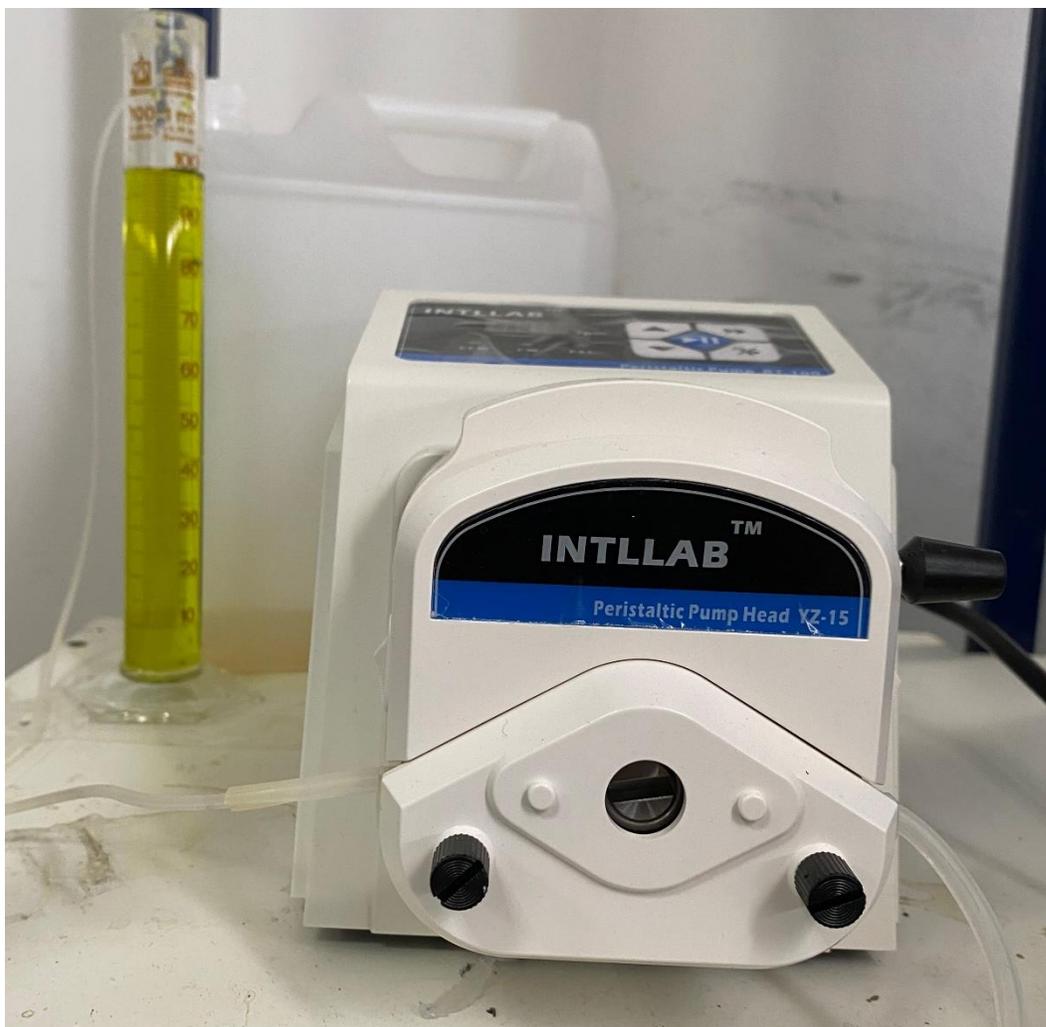


Figura 27 Fotografía de bomba peristáltica utilizada.

7.3 Anexo 3: Resultados experimentales

Prueba 1: Balance de solución con y sin Sufusión

Tabla 17: Registro de Flujo y Concentración de Cobre para el caso Sin Sufusión

Vol. On, mL	Cu On, g/L	Vol. Out, mL	Cu Out, g/L	Cu, g
83,66	1,59	10	76,86	0,77
18,56	1,59	9,9	76,03	0,75
14,55	1,59	10	59,32	0,59
13,12	1,59	9,6	53,05	0,51
11,27	1,59	8	48,46	0,39
60,03	1,59	48	39,68	1,90
55,85	1,59	48	27,99	1,34
47,66	1,59	44,7	22,56	1,01
0,00	0,00	13,3	23,39	0,31

	0,00	0,00	40,70	26,50	1,08
TOTAL	304,70		242,20		8,66

Cobre en el lecho poroso: $Cu_{inicial} = 33,09$ g.

Concentración del lixiviante (refino Cu On): $C_{lixiviante} = 1,585$ g/L.

Volumen total de solución lixiviante aplicada: $V_{lixiviante} = 304,7$ mL.

Cálculo del Balance de Solución Líquida

El volumen total de solución regada durante el experimento fue de 304,7 mL, mientras que el volumen total recolectado en la solución final fue de 242,2 mL.

Para determinar la salida total se utiliza la ecuación 20 de la sección 3.2.6 de este informe.

$$F_w(t) = \frac{\int_0^t Q_w^{OUT}(\theta) d\theta}{\int_0^t Q_w^{in}(\theta) d\theta} \quad (20)$$

Cálculo de la salida total:

Al descomponer la ecuación anterior nos queda:

$$\int_0^t Q_w^{OUT}(\theta) d\theta$$

Sumando la columna "Vol. Out, mL" para obtener el volumen total de salida en mililitros (mL).

Luego, se convierte este volumen a litros (L) para que coincida con las unidades de la entrada.

Datos de salida:

Vol. Out = $10 + 9,9 + 10 + 9,6 + 8 + 48 + 48 + 44,7 + 13,3 + 40,7 = 242,2$ mL

Vol. Out en L = $242,2 \text{ mL} / 1000 = 0,2422$ L

Cálculo de la entrada total:

$$\int_0^t Q_w^{in}(\theta) d\theta$$

Sumando la columna "Vol. On, mL" para obtener el volumen total de entrada en mililitros (mL).

Luego, se convierte este volumen a litros (L).

Datos de entrada:

Vol. On = $83,66 + 18,56 + 14,55 + 13,12 + 11,27 + 60,03 + 55,85 + 47,66 = 304,7$ mL

Vol. On en L = $304,7 \text{ mL} \times 1000 = 0,3047$ L

Cálculo de la eficiencia:

$$F_w(t) = \frac{0,2422}{0,3047} 100\% = 79,4\%$$

Líquido retenido = Entrada - Salida

$$\text{Líquido retenido} = 304,7 - 242,2 = 62,5 \text{ mL}$$

Esto significa que el 79% del volumen de entrada ha salido del sistema.

Este resultado indica que 62,5 mL de solución fueron retenidos en el material sólido o perdidos durante el proceso, lo cual es un parámetro relevante para evaluar la eficiencia de lixiviación y la interacción entre el material y la solución lixivante.

Balance de la recuperación de Cobre

$$Cu_{\text{drenado}} = \sum_{i=1}^n C_i \times V_i$$

Donde:

C_i : Concentración de cobre en cada muestra (g/L) (en la tabla Cu Off)

V_i : Volumen recolectado en cada muestra (L) (en la tabla Vol. Off)

Entrada de cobre:

Dado que la concentración de cobre en la solución regada es 1,59 g/L, convertimos el volumen de entrada a litros:

$$\text{Masa}_{CuOn} = ((0,3047L)(1,59g/L)) = 0,4844g \rightarrow Cu$$

Además, el Cu dentro del mineral 33,09 g serían 33,5744 g de Cu de entrada.

Salida de cobre:

$$Cu_{\text{drenado}} = 0,77 + 0,75 + 0,59 + 0,39 + 1,9 + 1,34 + 1,01 + 0,31 + 1,08 = 8,66 \text{ g}$$

Balance de cobre:

Cu retenido = Entrada - Salida

$$Cu_{\text{retenido}} = 0,4844g + 33,09g - 8,66g = 24,9144g \rightarrow Cu$$

$$R_{Cu} = \frac{Cu_{\text{drenado}}}{Cu_{\text{inicial}}} 100\%$$

$$R_{Cu} = \frac{8,66g}{33,5744g} 100\% = 25,79\%$$

Esto significa que el porcentaje de recuperación de Cobre en este caso es del 25,8%

Tabla 18: Registro de Flujo y Concentración de Cobre para el caso con Sufusión.

	Vol. On, mL	Cu On, g/L	Vol. Out, mL	Cu Out, g/L	Cu, g
	89,44	1,59	9,50	75,61	0,72
	17,84	1,59	9,60	67,67	0,65
	13,77	1,59	9,40	57,65	0,54
	13,67	1,59	9,90	51,80	0,51
	13,67	1,59	10,10	45,95	0,46
	12,62	1,59	9,50	38,85	0,37
	61,90	1,59	50,30	29,24	1,47
	55,46	1,59	48,40	23,39	1,13
	32,23	1,59	31,40	45,12	1,42
	0,00	0,00	14,20	37,60	0,53
	0,00	0,00	10,00	32,00	0,32
	0,00	0,00	10,00	28,00	0,28
Total	310,60		222,30		8,41

Cobre en el lecho poroso: $C_{u\text{inicial}} = 33,09 \text{ g}$

Concentración del lixiviante (refino Cu On): $C_{\text{lixiviante}} = 1,585 \text{ g/L}$

Volumen total de solución lixiviante aplicada: $V_{\text{lixiviante}} = 310,6 \text{ mL}$

Cálculo del Balance de Solución Líquida

El volumen total de solución regada durante el experimento fue de 310,6 mL, mientras que el volumen total recolectado en la solución final fue de 222,3 mL.

Para determinar la salida total se utiliza la ecuación 20 de la sección 3.2.6 de este informe.

$$F_w(t) = \frac{\int_0^t Q_w^{\text{OUT}}(\theta) d\theta}{\int_0^t Q_w^{\text{IN}}(\theta) d\theta} \quad (20)$$

Cálculo de la salida total:

Al descomponer la ecuación anterior queda:

$$\int_0^t Q_w^{\text{OUT}}(\theta) d\theta$$

Se suma la columna "Vol. Out, mL" para obtener el volumen total de salida en mililitros (mL).

Luego, se convierte este volumen a litros (L) para que coincida con las unidades de la entrada.

Datos de salida:

Vol. Out = $9,5 + 9,6 + 9,4 + 9,9 + 10,1 + 9,5 + 50,3 + 48,4 + 31,4 + 14,20 + 10 + 10 = 222,3 \text{ mL}$

Vol. Out en L = $222,3 \text{ mL} / 1000 = 0,2223 \text{ L}$

Cálculo de la entrada total:

$$\int_0^t Q_w^{in}(\theta) d\theta$$

Se suma la columna "Vol. On, mL" para obtener el volumen total de entrada en mililitros (mL).

Luego, se convierte este volumen a litros (L).

Datos de entrada:

Vol. On= 89,44+17,84+13,77+13,67+13,67+12,62+61,9+55,46+32,23=310,6 mL

Vol. On en L=310,6 L×1000= 0,3106 L

Cálculo de la eficiencia:

$$F_w(t) = \frac{0,2223}{0,3106} 100\% = 71,5\%$$

Líquido retenido = Entrada - Salida

Líquido retenido = 310,6 - 222,3 = 88,3 mL

Esto significa que el 72% del volumen de entrada ha salido del sistema.

Este resultado indica que 88,3 mL de solución fueron retenidos en el material sólido o perdidos durante el proceso, lo cual es un parámetro relevante para evaluar la eficiencia de lixiviación y la interacción entre el material y la solución lixivante.

Balance de la recuperación de Cobre:

$$Cu_{drenado} = \sum_{i=1}^n C_i \times V_i$$

Donde:

C_i: Concentración de cobre en cada muestra (g/L) (en la tabla Cu Off)

V_i: Volumen recolectado en cada muestra (L) (en la tabla Vol. Off)

Entrada de cobre:

Dado que la concentración de cobre en la solución regada es 1,59 g/L, convertimos el volumen de entrada a litros:

Masa_{CuOn} = ((0,3106L)(1,59g/L)) = 0,493g → Cu

Además, el Cu dentro del mineral 33,09 g serían 33,58 g de Cu de entrada.

Salida de cobre:

Cu_{drenado} = 0,72+0,65+0,54+0,51+0,46+0,37+1,47+1,13+1,42+0,53+0,32+0,28 = 8,41g

Balance de cobre:

Cu retenido = Entrada - Salida

Cu retenido = 0,493g + 33,09g - 8,41g = 25,17g → Cu

$$R_{Cu} = \frac{Cu_{drenado}}{Cu_{inicial}} 100\%$$

$$R_{Cu} = \frac{8,41g}{33,58g} 100\% = 25,04\%$$

Esto significa que el porcentaje de recuperación de Cobre en este caso es del 25,04%

Prueba 2: Balance de solución con y sin Sufusión

Tabla 19: Registro de Flujo y Concentración de Cobre para el caso Sin Sufusión.

	Vol. On, mL	Cu On, g/L	Vol. Out, mL	Cu. Out, g/L	Cu, g
	73,54	1,58	7,90	73,52	0,58
	12,12	1,58	13,80	80,21	1,11
	13,39	1,58	8,50	81,88	0,70
	9,57	1,58	7,50	82,71	0,62
	9,57	1,58	8,10	76,86	0,62
	9,57	1,58	8,90	73,52	0,65
	40,13	1,58	43,10	60,15	2,59
	40,49	1,58	42,30	46,79	1,98
	27,97	1,58	30,00	42,61	1,28
	0,00	0,00	9,70	41,77	0,41
	0,00	0,00	10,00	35,00	0,35
	0,00	0,00	12,00	32,00	0,38
	0,00	0,00	10,00	29,00	0,29
	0,00	0,00	5,00	25,00	0,13
Total	236,32		216,80		11,69

Cobre en el lecho poroso: $Cu_{inicial} = 35,01$ g

Concentración del lixiviante (refino Cu On): $C_{lixiviante} = 1,585$ g/L

Volumen total de solución lixiviante aplicada: $V_{lixiviante} = 236,32$ mL

Cálculo del Balance de Solución Líquida

El volumen total de solución regada durante el experimento fue de 236,32 mL, mientras que el volumen total recolectado en la solución final fue de 216,8 mL.

Para determinar la salida total se utiliza la ecuación 20 de la sección 3.2.6 de este informe.

$$F_w(t) = \frac{\int_0^t Q_w^{OUT}(\theta) d\theta}{\int_0^t Q_w^{in}(\theta) d\theta} \quad (20)$$

Cálculo de la salida total:

Al descomponer la ecuación anterior nos queda:

$$\int_0^t Q_w^{OUT}(\theta) d\theta$$

Se suma la columna "Vol. Out, mL" para obtener el volumen total de salida en mililitros (mL).

Luego, se convierte este volumen a litros (L) para que coincida con las unidades de la entrada.

Datos de salida:

Vol. Out= 7,9+13,8+8,5+7,5+8,1+8,9+43,1+42,3+30+9,7+10+12+10+5= 216,8 mL

Vol. Out en L=216,8 mL /1000= 0,2168 L

Cálculo de la entrada total:

$$\int_0^t Q_w^{in}(\theta) d\theta$$

Se suma la columna "Vol. On, mL" para obtener el volumen total de entrada en mililitros (mL).

Luego, se convierte este volumen a litros (L).

Datos de entrada:

Vol. On= 73,54+12,12+13,39+9,57+9,57+9,57+40,13+40,49+27,97=236,32 mL

Vol. On en L=236,3 L×1000= 0,2363 L

Cálculo de la eficiencia:

$$F_w(t) = \frac{0,2168}{0,2363} 100\% = 91,7\%$$

Líquido retenido = Entrada - Salida

Líquido retenido = 236,32 - 216,8 = 19,52 mL

Esto significa que el 91,7% del volumen de entrada ha salido del sistema.

Este resultado indica que 19,52 mL de solución fueron retenidos en el material sólido o perdidos durante el proceso, lo cual es un parámetro relevante para evaluar la eficiencia de lixiviación y la interacción entre el material y la solución lixivante.

Balance de la recuperación de Cobre

$$Cu_{\text{drenado}} = \sum_{i=1}^n C_i \times V_i$$

Donde:

C_i : Concentración de cobre en cada muestra (g/L) (en la tabla Cu Off)

V_i : Volumen recolectado en cada muestra (L) (en la tabla Vol. Off)

Entrada de cobre:

Dado que la concentración de cobre en la solución regada es 1,59 g/L, convertimos el volumen de entrada a litros:

$$Masa_{CuOn} = ((0,2363L)(1,59g/L)) = 0,375g \rightarrow Cu$$

Además, el Cu dentro del mineral 35,01 g serían 35,38 g de Cu de entrada.

Salida de cobre:

$$Cu_{\text{drenado}} = 0,58 + 1,11 + 0,70 + 0,62 + 0,62 + 0,65 + 2,59 + 1,98 + 1,28 + 0,41 + 0,35 + 0,38 + 0,29 + 0,13 = 11,69g$$

Balance de cobre:

$$Cu_{\text{retenido}} = \text{Entrada} - \text{Salida}$$

$$Cu_{\text{retenido}} = 35,38g - 11,69g = 23,69g \rightarrow Cu$$

$$R_{Cu} = \frac{Cu_{\text{drenado}}}{Cu_{\text{inicial}}} \times 100\%$$

$$R_{Cu} = \frac{11,69g}{35,38g} \times 100\% = 33,04\%$$

Esto significa que el porcentaje de recuperación de Cobre en este caso es del 33,04%

Tabla 20: Registro de Flujo y Concentración de Cobre para el caso con Sufusión

Vol. On, mL	Cu On, g/L	Vol. Out, mL	Cu. Out, g/L	Cu, g
87,23	1,58	9,70	73,52	0,71
15,04	1,58	9,60	76,86	0,74
13,61	1,58	9,60	72,69	0,70
12,89	1,58	9,50	63,50	0,60
12,10	1,58	9,70	58,48	0,57
12,77	1,58	10,00	51,80	0,52
59,05	1,58	52,70	40,60	2,14
0,00	0,00	10,90	35,09	0,38
0,00	0,00	20,00	35,00	0,70
0,00	0,00	8,00	33,50	0,27

	0,00	0,00	5,00	31,70	0,16
	0,00	0,00	3,00	25,00	0,08
Total	212,69		157,70		7,56

Cobre en el lecho poroso: $C_{u_{inicial}} = 35,01 \text{ g}$

Concentración del lixiviante (refino Cu On): $C_{lixiviante} = 1,585 \text{ g/L}$

Volumen total de solución lixiviante aplicada: $V_{lixiviante} = 212,69 \text{ mL}$

Cálculo del Balance de Solución Líquida

El volumen total de solución regada durante el experimento fue de 212,69 mL, mientras que el volumen total recolectado en la solución final fue de 157,7 mL.

Para determinar la salida total se utiliza la ecuación 20 de la sección 3.2.6 de este informe.

$$F_w(t) = \frac{\int_0^t Q_w^{OUT}(\theta) d\theta}{\int_0^t Q_w^{in}(\theta) d\theta} \quad (20)$$

Cálculo de la salida total:

Al descomponer la ecuación anterior nos queda:

$$\int_0^t Q_w^{OUT}(\theta) d\theta$$

Se suma la columna "Vol. Out, mL" para obtener el volumen total de salida en mililitros (mL).

Luego, se convierte este volumen a litros (L) para que coincida con las unidades de la entrada.

Datos de salida:

Vol. Out = $9,7 + 9,6 + 9,6 + 9,5 + 9,7 + 10 + 52,7 + 10,9 + 20 + 8 + 5 + 3 = 157,7 \text{ mL}$

Vol. Out en L = $157,7 \text{ mL} / 1000 = 0,1577 \text{ L}$

Cálculo de la entrada total:

$$\int_0^t Q_w^{in}(\theta) d\theta$$

Se suma la columna "Vol. On, mL" para obtener el volumen total de entrada en mililitros (mL).

Luego, se convierte este volumen a litros (L).

Datos de entrada:

Vol. On = $87,23 + 15,04 + 13,61 + 12,89 + 12,10 + 12,77 + 59,05 = 212,69 \text{ mL}$

Vol. On en L = $212,69 \text{ mL} \times 1000 = 0,21269 \text{ L}$

Cálculo de la eficiencia:

$$F_w(t) = \frac{0,1577}{0,21269} 100\% = 74,1\%$$

Líquido retenido = Entrada - Salida

$$\text{Líquido retenido} = 212,69 - 157,7 = 54,99 \text{ mL}$$

Esto significa que el 74% del volumen de entrada ha salido del sistema.

Este resultado indica que 54,99 mL de solución fueron retenidos en el material sólido o perdidos durante el proceso, lo cual es un parámetro relevante para evaluar la eficiencia de lixiviación y la interacción entre el material y la solución lixivante.

Balance de la recuperación de Cobre

$$Cu_{\text{drenado}} = \sum_{i=1}^n C_i \times V_i$$

Donde:

C_i: Concentración de cobre en cada muestra (g/L) (en la tabla Cu Off)

V_i: Volumen recolectado en cada muestra (L) (en la tabla Vol. Off)

Entrada de cobre:

Dado que la concentración de cobre en la solución regada es 1,59 g/L, convertimos el volumen de entrada a litros:

$$\text{Masa}_{CuOn} = ((0,21269 \text{ L})(1,59 \text{ g/L})) = 0,338 \text{ g} \rightarrow \text{Cu}$$

Además, el Cu dentro del mineral 35,01 g serían 35,348 g de Cu de entrada.

Salida de cobre:

$$Cu_{\text{drenado}} = 0,71 + 0,74 + 0,7 + 0,6 + 0,57 + 0,52 + 2,14 + 0,38 + 0,7 + 0,27 + 0,16 + 0,08 = 7,56 \text{ g}$$

Balance de cobre:

Cu retenido = Entrada - Salida

$$\text{Cu retenido} = 35,34 \text{ g} - 7,56 \text{ g} = 27,78 \text{ g} \rightarrow \text{Cu}$$

$$R_{Cu} = \frac{Cu_{\text{drenado}}}{Cu_{\text{inicial}}} 100\%$$

$$R_{Cu} = \frac{7,56 \text{ g}}{35,35 \text{ g}} 100\% = 21,39\%$$

Esto significa que el porcentaje de recuperación de Cobre en este caso es del 25,8%

Prueba 3: Balance de solución con y sin Sufusión

Tabla 21: Registro de Flujo y Concentración de Cobre para el caso Sin Sufusión

Vol. On, mL	Cu On, g/L	Vol. Out, mL	Cu. Out, g/L	Cu, g
102,79	1,58	9,10	73,40	0,67
13,75	1,58	9,50	66,35	0,63
14,00	1,58	9,50	56,33	0,54
12,00	1,58	9,60	47,80	0,46
13,00	1,58	10,00	41,45	0,41
11,91	1,58	9,00	35,18	0,32
59,56	1,58	49,00	25,08	1,23
56,84	1,58	49,90	18,65	0,93
54,65	1,58	51,20	15,57	0,80
0,00	0,00	16,50	16,58	0,27
0,00	0,00	22,00	15,20	0,33
0,00	0,00	18,00	14,00	0,25
0,00	0,00	12,00	12,50	0,15
0,00	0,00	8,00	12,23	0,10
Total	338,50	283,30		7,09

Cobre en el lecho poroso: $Cu_{inicial} = 34,85$ g

Concentración del lixiviante (refino Cu On): $C_{lixiviante} = 1,585$ g/L

Volumen total de solución lixiviante aplicada: $V_{lixiviante} = 338,5$ mL

Cálculo del Balance de Solución Líquida

El volumen total de solución regada durante el experimento fue de 338,5 mL, mientras que el volumen total recolectado en la solución final fue de 283,3 mL.

Para determinar la salida total se utiliza la ecuación 20 de la sección 3.2.6 de este informe.

$$F_w(t) = \frac{\int_0^t Q_w^{OUT}(\theta) d\theta}{\int_0^t Q_w^{IN}(\theta) d\theta} \quad (20)$$

Cálculo de la salida total:

Al descomponer la ecuación anterior nos queda:

$$\int_0^t Q_w^{OUT}(\theta) d\theta$$

Se suma la columna "Vol. Out, mL" para obtener el volumen total de salida en mililitros (mL).

Luego, se convierte este volumen a litros (L) para que coincida con las unidades de la entrada.

Datos de salida:

Vol. Out= 9,1+9,5+9,5+9,6+10+9+49+49,9+51,2+16,5+22+18+12+8= 283,3 mL

Vol. Out en L=283,3 mL /1000= 0,2833 L

Cálculo de la entrada total:

$$\int_0^t Q_w^{in}(\theta) d\theta$$

Se suma la columna "Vol. On, mL" para obtener el volumen total de entrada en mililitros (mL).

Luego, se convierte este volumen a litros (L).

Datos de entrada:

Vol. On= 102,79+13,75+14+12+13+11,91+59,56+56,84+54,65=338,5 mL

Vol. On en L=338,5 L×1000= 0,3385 L

Cálculo de la eficiencia:

$$F_w(t) = \frac{0,2833}{0,3385} 100\% = 83,6\%$$

Líquido retenido = Entrada – Salida

Líquido retenido = 338,5 – 283,3 = 55,2 mL

Esto significa que el 83,6% del volumen de entrada ha salido del sistema.

Este resultado indica que 55,2 mL de solución fueron retenidos en el material sólido o perdidos durante el proceso, lo cual es un parámetro relevante para evaluar la eficiencia de lixiviación y la interacción entre el material y la solución lixivante.

Balance de la recuperación de Cobre

$$Cu_{drenado} = \sum_{i=1}^n C_i \times V_i$$

Donde:

C_i: Concentración de cobre en cada muestra (g/L) (en la tabla Cu Off)

V_i: Volumen recolectado en cada muestra (L) (en la tabla Vol. Off)

Entrada de cobre:

Dado que la concentración de cobre en la solución regada es 1,59 g/L, convertimos el volumen de entrada a litros:

$$\text{Masa}_{\text{CuOn}} = ((0,3385\text{L})(1,59\text{g/L})) = 0,53\text{g} \rightarrow \text{Cu}$$

Además, el Cu dentro del mineral 34,85 g serían 35,38 g de Cu de entrada.

Salida de cobre:

$$\text{Cu}_{\text{drenado}} = 0,67 + 0,63 + 0,54 + 0,46 + 0,41 + 0,32 + 1,23 + 0,93 + 0,8 + 0,27 + 0,33 + 0,25 + 0,15 + 0,1 = 7,09\text{g}$$

Balance de cobre:

$$\text{Cu retenido} = \text{Entrada} - \text{Salida}$$

$$\text{Cu retenido} = 35,38\text{g} - 7,09\text{g} = 28,3\text{g} \rightarrow \text{Cu}$$

$$R_{\text{Cu}} = \frac{\text{Cu}_{\text{drenado}}}{\text{Cu}_{\text{inicial}}} 100\%$$

$$R_{\text{Cu}} = \frac{7,09\text{g}}{35,38\text{g}} 100\% = 20,04\%$$

Esto significa que el porcentaje de recuperación de Cobre en este caso es del 20,04%

Tabla 22: Registro de Flujo y Concentración de Cobre para el caso con Sufusión

	Vol. On, mL	Cu On, g/L	Vol. Out, mL	Cu. Out, g/L	Cu, g
	99,70	1,58	9,50	66,75	0,63
	14,43	1,58	9,30	68,75	0,64
	14,10	1,58	9,80	70,40	0,69
	12,22	1,58	9,60	64,23	0,62
	11,28	1,58	9,40	61,80	0,58
	11,27	1,58	9,50	60,88	0,58
	72,04	1,58	55,90	56,50	3,16
	31,48	1,58	31,20	48,93	1,53
	0,00	0,00	18,20	51,25	0,93
	0,00	0,00	20,00	16,58	0,33
	0,00	0,00	19,00	15,00	0,29
	0,00	0,00	15,00	13,00	0,20
	0,00	0,00	10,00	12,70	0,13
Total	266,52		226,40		10,30

Cobre en el lecho poroso: $\text{Cu}_{\text{inicial}} = 34,85\text{g}$

Concentración del lixiviante (refino Cu On): $\text{C}_{\text{lixiviante}} = 1,585\text{g/L}$

Volumen total de solución lixiviante aplicada: $\text{V}_{\text{lixiviante}} = 266,52\text{mL}$

Cálculo del Balance de Solución Líquida

El volumen total de solución regada durante el experimento fue de 266,52 mL, mientras que el volumen total recolectado en la solución final fue de 226,4 mL.

Para determinar la salida total se utiliza la ecuación 20 de la sección 3.2.6 de este informe.

$$F_w(t) = \frac{\int_0^t Q_w^{OUT}(\theta) d\theta}{\int_0^t Q_w^{in}(\theta) d\theta} \quad (20)$$

Cálculo de la salida total:

Al descomponer la ecuación anterior nos queda:

$$\int_0^t Q_w^{OUT}(\theta) d\theta$$

Se suma la columna "Vol. Out, mL" para obtener el volumen total de salida en mililitros (mL).

Luego, se convierte este volumen a litros (L) para que coincida con las unidades de la entrada.

Datos de salida:

Vol. Out= 9,5+9,3+9,8+9,6+9,4+9,5+55,9+31,2+18,2+20+19+15+10= 226,4 mL

Vol. Out en L=226,4 mL /1000= 0,2264 L

Cálculo de la entrada total:

$$\int_0^t Q_w^{in}(\theta) d\theta$$

Se suma la columna "Vol. On, mL" para obtener el volumen total de entrada en mililitros (mL).

Luego, se convierte este volumen a litros (L).

Datos de entrada:

Vol. On= 99,7+14,43+14,10+12,22+11,28+11,27+72,04+31,48=266,52 mL

Vol. On en L=266,52 L×1000= 0,2665 L

Cálculo de la eficiencia:

$$F_w(t) = \frac{0,2264}{0,2665} 100\% = 84,9\%$$

Líquido retenido = Entrada - Salida

Líquido retenido = 266,52 - 226,4 = 40,12 mL

Esto significa que el 85% del volumen de entrada ha salido del sistema.

Este resultado indica que 40,12 mL de solución fueron retenidos en el material sólido o perdidos durante el proceso, lo cual es un parámetro relevante para evaluar la eficiencia de lixiviación y la interacción entre el material y la solución lixivante.

Balance de la recuperación de Cobre

$$Cu_{drenado} = \sum_{i=1}^n C_i \times V_i$$

Donde:

C_i: Concentración de cobre en cada muestra (g/L) (en la tabla Cu Off)

V_i: Volumen recolectado en cada muestra (L) (en la tabla Vol. Off)

Entrada de cobre:

Dado que la concentración de cobre en la solución regada es 1,59 g/L, convertimos el volumen de entrada a litros:

$$Masa_{CuOn} = ((0,2665L)(1,59g/L)) = 0,42g \rightarrow Cu$$

Además, el Cu dentro del mineral 34,85 g serían 35,27 g de Cu de entrada.

Salida de cobre:

$$Cu_{drenado} = 0,63 + 0,64 + 0,69 + 0,62 + 0,58 + 0,58 + 3,16 + 1,53 + 0,93 + 0,33 + 0,29 + 0,2 + 0,13 = 10,30g$$

Balance de cobre:

$$Cu_{retenido} = Entrada - Salida$$

$$Cu_{retenido} = 35,27g - 10,30g = 24,97g \rightarrow Cu$$

$$R_{Cu} = \frac{Cu_{drenado}}{Cu_{inicial}} \times 100\%$$

$$R_{Cu} = \frac{10,3g}{35,27g} \times 100\% = 29,20\%$$

Esto significa que el porcentaje de recuperación de Cobre en este caso es del 29,20%

Prueba 4: Balance de solución con y sin Sufusión

Tabla 23: Registro de Flujo y Concentración de Cobre para el caso Sin Sufusión

Vol. On, mL	Cu On, g/L	Vol. Out, mL	Cu. Out, g/L	Cu, g
111,29	1,58	9,40	71,73	0,67
15,69	1,58	9,20	68,63	0,63
14,71	1,58	9,70	58,98	0,57

	13,73	1,58	9,70	50,38	0,49
	12,90	1,58	9,40	43,20	0,41
	13,00	1,58	10,00	38,78	0,39
	71,00	1,58	57,00	28,18	1,61
	42,24	1,58	38,10	20,84	0,79
	5,71	1,58	20,10	22,63	0,45
	0,00	0,00	17,00	22,00	0,37
	0,00	0,00	16,00	19,00	0,30
	0,00	0,00	13,00	17,00	0,22
	0,00	0,00	10,00	15,50	0,16
	0,00	0,00	8,00	15,00	0,12
Total	300,28		236,60		7,19

Cobre en el lecho poroso: $Cu_{inicial} = 35,02 \text{ g}$

Concentración del lixiviante (refino Cu On): $C_{lixiviante} = 1,585 \text{ g/L}$

Volumen total de solución lixiviante aplicada: $V_{lixiviante} = 300,28 \text{ mL}$

Cálculo del Balance de Solución Líquida

El volumen total de solución regada durante el experimento fue de 300,28 mL, mientras que el volumen total recolectado en la solución final fue de 236,6 mL.

Para determinar la salida total se utiliza la ecuación 20 de la sección 3.2.6 de este informe.

$$F_w(t) = \frac{\int_0^t Q_w^{OUT}(\theta) d\theta}{\int_0^t Q_w^{IN}(\theta) d\theta} \quad (20)$$

Cálculo de la salida total:

Al descomponer la ecuación anterior nos queda:

$$\int_0^t Q_w^{OUT}(\theta) d\theta$$

Se suma la columna "Vol. Out, mL" para obtener el volumen total de salida en mililitros (mL).

Luego, se convierte este volumen a litros (L) para que coincida con las unidades de la entrada.

Datos de salida:

Vol. Out = $9,4 + 9,2 + 9,7 + 9,7 + 9,4 + 10 + 57 + 38,1 + 20,1 + 17,0 + 16 + 13 + 10 + 8 = 236,6 \text{ mL}$

Vol. Out en L = $236,6 \text{ mL} / 1000 = 0,2366 \text{ L}$

Cálculo de la entrada total:

$$\int_0^t Q_w^{in}(\theta) d\theta$$

Si se suma la columna "Vol. On, mL" para obtener el volumen total de entrada en mililitros (mL).

Luego, se convierte este volumen a litros (L).

Datos de entrada:

Vol. On= 111,29+15,69+14,71+13,73+12,9+13+71+42,24+5,71=300,28 mL

Vol. On en L=300,28 L×1000= 0,30028 L

Cálculo de la eficiencia:

$$F_w(t) = \frac{0,2366}{0,30028} 100\% = 78,8\%$$

Líquido retenido = Entrada - Salida

Líquido retenido = 300,28 - 236,6 = 63,68 mL

Esto significa que el 78,8% del volumen de entrada ha salido del sistema.

Este resultado indica que 63,68 mL de solución fueron retenidos en el material sólido o perdidos durante el proceso, lo cual es un parámetro relevante para evaluar la eficiencia de lixiviación y la interacción entre el material y la solución lixivante.

Balance de la recuperación de Cobre

$$Cu_{drenado} = \sum_{i=1}^n C_i \times V_i$$

Donde:

C_i: Concentración de cobre en cada muestra (g/L) (en la tabla Cu Off)

V_i: Volumen recolectado en cada muestra (L) (en la tabla Vol. Off)

Entrada de cobre:

Dado que la concentración de cobre en la solución regada es 1,59 g/L, convertimos el volumen de entrada a litros:

Masa_{CuOn} = ((0,30028L)(1,59g/L)) = 0,47g → Cu

Además, el Cu dentro del mineral 35,02 g serían 35,50 g de Cu de entrada.

Salida de cobre:

Cu_{drenado} = 0,67+0,63+0,57+0,49+0,41+0,39+1,61+0,79+0,45+0,37+0,30+0,22+0,16+0,12 = 7,09g

Balance de cobre:

Cu retenido = Entrada - Salida

Cu retenido = 35,50g - 7,19g = 28,31g → Cu

$$R_{Cu} = \frac{Cu_{drenado}}{Cu_{inicial}} 100\%$$

$$R_{Cu} = \frac{7,19g}{35,50g} 100\% = 20,25\%$$

Esto significa que el porcentaje de recuperación de Cobre en este caso es del 20,25%

Tabla 24: Registro de Flujo y Concentración de Cobre para el caso con Sufusión

	Vol. On, mL	Cu On, g/L	Vol. Out, mL	Cu. Out, g/L	Cu, g
	138,74	1,58	9,70	71,40	0,69
	13,68	1,58	9,10	69,08	0,63
	12,77	1,58	9,40	72,78	0,68
	11,80	1,58	9,30	66,30	0,62
	11,80	1,58	9,40	64,88	0,61
	11,80	1,58	10,00	60,15	0,60
	66,43	1,58	59,30	49,73	2,95
	10,35	1,58	10,40	42,50	0,44
	0,00	1,58	17,10	42,38	0,72
	0,00	0,00	31,00	40,00	1,24
	0,00	0,00	34,00	39,00	1,33
	0,00	0,00	20,00	36,00	0,72
	0,00	0,00	10,00	33,00	0,33
Total	277,35		238,70		11,56

Cobre en el lecho poroso: $Cu_{inicial} = 35,02 \text{ g}$

Concentración del lixiviante (refino Cu On): $C_{lixiviante} = 1,585 \text{ g/L}$

Volumen total de solución lixiviante aplicada: $V_{lixiviante} = 277,35 \text{ mL}$

Cálculo del Balance de Solución Líquida

El volumen total de solución regada durante el experimento fue de 277,35 mL, mientras que el volumen total recolectado en la solución final fue de 238,7 mL.

Para determinar la salida total se utiliza la ecuación 20 de la sección 3.2.6 de este informe.

$$F_w(t) = \frac{\int_0^t Q_w^{OUT}(\theta) d\theta}{\int_0^t Q_w^{in}(\theta) d\theta} \quad (20)$$

Cálculo de la salida total:

Al descomponer la ecuación anterior nos queda:

$$\int_0^t Q_w^{OUT}(\theta) d\theta$$

Sumamos la columna "Vol. Out, mL" para obtener el volumen total de salida en mililitros (mL).

Luego, convertimos este volumen a litros (L) para que coincida con las unidades de la entrada.

Datos de salida:

Vol. Out= 9,7+9,1+9,4+9,3+9,4+10+59,3+10,4+17,10+31+34+20+10= 238,7 mL

Vol. Out en L=238,7 mL /1000= 0,2387 L

Cálculo de la entrada total:

$$\int_0^t Q_w^{in}(\theta) d\theta$$

Se suma la columna "Vol. On, mL" para obtener el volumen total de entrada en mililitros (mL).

Luego, se convierte este volumen a litros (L).

Datos de entrada:

Vol. On= 128,74+13,68+12,77+11,8+11,8+11,8+66,43+10,35=277,35 mL

Vol. On en L=277,35 L×1000= 0,27735 L

Cálculo de la eficiencia:

$$F_w(t) = \frac{0,2387}{0,27735} 100\% = 86,06\%$$

Líquido retenido = Entrada - Salida

Líquido retenido = 277,35 - 238,7 = 38,65 mL

Esto significa que el 86% del volumen de entrada ha salido del sistema.

Este resultado indica que 38,65 mL de solución fueron retenidos en el material sólido o perdidos durante el proceso, lo cual es un parámetro relevante para evaluar la eficiencia de lixiviación y la interacción entre el material y la solución lixivante.

Balance de la recuperación de Cobre

$$Cu_{drenado} = \sum_{i=1}^n C_i \times V_i$$

Donde:

Ci: Concentración de cobre en cada muestra (g/L) (en la tabla Cu Off)

Vi: Volumen recolectado en cada muestra (L) (en la tabla Vol. Off)

Entrada de cobre:

Dado que la concentración de cobre en la solución regada es 1,59 g/L, convertimos el volumen de entrada a litros:

$$\text{Masa}_{\text{CuOn}} = ((0,27735\text{L})(1,59\text{g/L})) = 0,438\text{g} \rightarrow \text{Cu}$$

Además, el Cu dentro del mineral 35,02 g serían 35,46 g de Cu de entrada.

Salida de cobre:

$\text{Cu}_{\text{drenado}} =$

$$0,69+0,63+0,68+0,62+0,61+0,6+2,95+0,44+0,72+1,24+1,33+0,72+0,33= 11,56\text{g}$$

Balance de cobre:

$\text{Cu}_{\text{retenido}} = \text{Entrada} - \text{Salida}$

$$\text{Cu}_{\text{retenido}} = 35,46\text{g} - 11,56\text{g} = 23,9\text{g} \rightarrow \text{Cu}$$

$$R_{\text{Cu}} = \frac{\text{Cu}_{\text{drenado}}}{\text{Cu}_{\text{inicial}}} 100\%$$

$$R_{\text{Cu}} = \frac{11,56\text{g}}{35,46\text{g}} 100\% = 32,61\%$$

Esto significa que el porcentaje de recuperación de Cobre en este caso es del 32,61%