

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

OBTENCIÓN DE SOLUCIONES DE HIERRO Y COBRE A TRAVÉS DE LIXIVIACIÓN DE RELAVES MINEROS CON AGUA DE MAR Y ÁCIDOS ORGÁNICOS

* Ricardo Zamarreño Bastías¹

OBTAINING IRON AND COPPER SOLUTIONS THROUGH LEACHING OF MINE TAILINGS WITH SEAWATER AND ORGANIC ACIDS

Recibido el 24 de diciembre de 2024. Aceptado el 22 de abril de 2025

Abstract

The results are presented when treating a mine tailings with high iron content and a lower percentage of Cu, with different non-traditional leaching techniques, using organic acids (citric acid and acetic acid), with concentrations of 0.5 M, as well as seawater, untreated, to prepare the leaching solutions. The acid that had the highest efficiency in extracting the Fe present in the tailings was citric acid. Copper extraction using the acids mentioned above had an equivalent yield. The leaching technique that was most efficient to extract the Fe was agitation, followed by column in reverse phase and leaching in raft. The solutions resulting from Fe can be used directly in industrial processes, without having a subsequent treatment process. This achieves sustainability and the application of the circular economy to metal mining, in a complex waste such as mine tailings.

Keywords: pan leaching, reverse phase column leaching, agitation leaching, organic acids, seawater.

¹ Escuela de Ingeniería, Universidad del Alba. Programa de Investigadores Asociados, Universidad de La Serena, Chile.

Autor correspondiente: Escuela de Ingeniería, Universidad del Alba. Programa de Investigadores Asociados, Universidad de La Serena. Av. Cuatro esquinas 060, ciudad de La Serena, Región de Coquimbo. Chile. Email: rzamarreno@udalba.cl

Resumen

Se presentan los resultados al tratar un relave minero con alto contenido de hierro y un porcentaje menor de Cu, con distintas técnicas de lixiviación no tradicionales, usando ácidos orgánicos, (ácido cítrico y ácido acético), con concentraciones de 0,5 M, además agua de mar, sin tratar, para preparar las soluciones de lixiviación. El ácido que tuvo una mayor eficiencia de extracción del Fe presente en el relave, fue el ácido cítrico. La extracción de cobre usando los ácidos mencionados anteriormente, tuvo un rendimiento equivalente. La técnica de lixiviación que resultó más eficiente para extraer el Fe, fue de agitación, seguida por columna en fase inversa y lixiviación en batea. Las soluciones resultantes de Fe, pueden ser usadas directamente en procesos industriales, sin tener un proceso posterior de tratamiento. Con esto se logra la sustentabilidad y la aplicación de la economía circular a la minería metálica, en un residuo complejo como los relaves mineros.

Palabras clave: lixiviación en batea, lixiviación columna fase inversa, lixiviación por agitación, ácidos orgánicos, agua de mar.

Introducción

En la actualidad Chile es considerado un país predominantemente minero, posee las reservas de cobre más importantes a nivel mundial, con una industria dinámica que lidera la extracción de este mineral. Sin embargo, genera grandes cantidades de residuos, denominados relaves, según el catastro del Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile, (Servicio Nacional de Geología y Minería, 2018), hay presentes 740 relaves mineros. De los cuales 170 relaves, están abandonados, 101 activos y 469 inactivos. Los mayores porcentajes de relaves inactivos y abandonados se distribuye entre las regiones de Atacama (131) y Coquimbo (356), equivalente al 65,8% del total actual presentes en Chile.

La minería en Chile, se ha desarrollado desde los tiempos prehispánicos, ejemplo de esto es el gran centro de explotación prehispánica descubierto en Collahuasi, (Figueroa *et al.*, 2018), ubicado al sur de la provincia de Tarapacá, en el altiplano chileno.

Históricamente la minería en Chile, se ha desarrollado desde una economía eminentemente extractivista y de tipo lineal, que produjo un período acelerado de crecimiento económico, pero a la vez ha generado profundas transformaciones sobre todo en los territorios rurales, donde ha aumentado la cantidad de conflictos ambientales y sociales que, en su mayoría, están relacionados con la minería del cobre, (Castillo y Álvarez, 2022).

Los principales procesos mineros metalúrgicos, que se utilizan en la gran minería del cobre son la lixiviación, para mineral oxidado de cobre y la flotación, para los minerales sulfurados de cobre, estos procesos necesitan cantidades importantes de agua, pero la disponibilidad de agua en la zona norte de Chile ha disminuido significativamente, por la presencia del cambio climático y la sequía que sufre, (Lima. M, 2021).

Por la limitada cantidad de agua presente en las zonas mineras del norte de Chile, se han desarrollado distintos estudios en reemplazar el agua continental, por agua de mar, entre los que podemos mencionar; Zamarreño *et al.*, 2016, realizaron el proceso de flotación de minerales sulfurados de cobre, usando distintas mezclas de agua dulce y de mar, obteniendo resultados equivalentes en los porcentajes de recuperación de cobre con 100% de agua dulce y una mezcla al 50% de agua dulce y salada. Castellón. C, (2016), indica que la alta cantidad del ion cloruro presente en el agua de mar (~ 19 g/L), genera una gran ventaja en los sistemas de lixiviación sobre los sistemas de sulfato (SO_4^{2-}). Entre estos beneficios podemos mencionar los siguientes: se incrementa las solubilidades del hierro y de otros metales, las propiedades Redox mejoran debido a la estabilización de los iones cúpricos y cuprosos mediante la formación de cloro-complejos, existe una mayor cinética de lixiviación comparada con los sistemas de sulfato. Otros investigadores, (Navarro y Mansor, 2017), indican que; “La presencia de iones cloruros tiene un efecto positivo sobre la lixiviación de la calcopirita con iones férricos. La concentración de ion cloruro está relacionado con la disolución de cobre”.

Debido a que los métodos tradicionales metalúrgicos causan importantes impactos ambientales, se han probados nuevos procesos para disminuir su impacto. En la recuperación del metal aluminio se han realizado pruebas en el mineral la bauxita, utilizando un método de biolixiviación, con hongos de *Aspergillus niger*, (Yang *et al*, 2009), logrando extraer el 90% del aluminio presente en el mineral tratado. Generando un proceso novedoso y pionero para la extracción de aluminio de minerales de la Bauxita, teniendo la particularidad de ser un método más económico y menos agresivo con el ambiente.

Mahdi y colaboradores, (2020), realizaron un proceso de lixiviación con soluciones de tiosulfato de sodio, recuperando cobalto y manganeso en los residuos sólidos de la minería del zinc, recuperando el 90.7% de cobalto y 87.6% de manganeso.

Se realizaron experiencias de la recuperación de aluminio en relaves mineros, aplicando dos técnicas novedosas, un proceso biológico y otro químico. En el biológico se realizó una biolixiviación con hongos cultivados de *Aspergillus niger*, que produce ácidos orgánicos, que pueden extraer el aluminio del relave. El método químico consistió en realizar lixiviaciones con dos ácidos orgánicos, ácido cítrico y ácido oxálico con la adición de agentes oxidantes como el peróxido de hidrogeno. De acuerdo con los resultados obtenidos, los métodos que tuvieron una mayor extracción fueron los químicos, específicamente la lixiviación con la mezcla de ácido oxálico y peróxido de hidrogeno, en el caso de la biolixiviación no se obtuvo resultados significativos en la extracción del aluminio, (Zamarreño y Espinoza, 2023).

Otra alternativa tecnológica, para la obtención de metales a partir de sus minerales, fue desarrollado por Zamora *et al*, (2023), al tratar relaves mineros con distintos contenidos de

sulfuros, y con altos contenidos de plata, las cuales se le sometió a un proceso de cianuración por agitación, obteniéndose extracciones que variaron entre un 74 % a 31 %.

Según los antecedentes presentados, los residuos mineros, como los relaves se pueden transformar en activos al aplicar la economía circular y recuperar componentes económicamente importantes y reducir el volumen del relave. Teniendo presente estos antecedentes, el objetivo de la siguiente investigación es; “Aplicar un proceso novedoso minero metalúrgico, con un mínimo impacto al usar agua de mar y ácidos orgánicos para la lixiviación del material presente en el relave minero Carlos Gregorio Araya Campana”, presente en la cuenca del río Elqui, región de Coquimbo.

La minería es una importante actividad económica aportando un gran porcentaje en el Producto Bruto del Perú. Sin embargo, los procesos minero metalúrgicos generan importantes problemas socio-ambientales, además de los residuos mineros, expresados como relaves mineros provenientes de los diversos procesos es una amenaza latente que afecta el desarrollo sostenible, (Torres y Gonzales, 2024).

Según la composición química del relave minero Carlos Gregorio, contiene un importante porcentaje de óxido férrico, 47.59%, (Servicio Nacional de Geología y Minería, 2019), como lo muestra la Tabla 1.

Tabla 1. Composición del Relave Carlos Gregorio Araya Campaña.

Especie mineral %	Composición química	Concentración %
Cuarzo	SiO ₂	23.37
Óxido de aluminio	Al ₂ O ₃	5.14
Óxido de titanio	TiO ₂	0.36
Óxido férrico	Fe ₂ O ₃	47.59
Óxido de calcio	CaO	11.09
Óxido de magnesio	MgO	5.09
Óxido de manganeso	MnO	0.12
Óxido de sodio	Na ₂ O	1.07
Óxido de potasio	K ₂ O	0.16
Óxido de fosforo	P ₂ O ₅	5.41
Óxido de azufre	SO ₃	0.28
PPC	PPC	<0.01
Total	Total	99.63

Fuente: Servicio Nacional de Geología y Minería, 2019

Metodología

La metodología que se aplicó, se puede dividir en las siguientes etapas:

Materiales y Reactivos.

Reactivos químicos usados (todos con grado P.A.): ácido acético, ácido cítrico, agua de mar, celda de lixiviación, agitador de hélice, material usual de laboratorio.

Recolección de muestras de relave.

Para la toma de muestras del relave, se tomaron ocho muestras, para ello se realizaron calicatas de 40x40x80 cm, tomando las muestras de abajo hacia arriba, con palas de polietileno. En el laboratorio químico, las muestras sólidas se secaron a 130 °C por 24 horas y se procedieron a tamizar bajo la malla 100 (W.S. Tyler), (Zamarreño y Díaz, 2021). Posteriormente las muestras, se mezclaron y se homogenizaron, para tomar muestras representativas y poder desarrollar los distintos ensayos. El relave y los puntos de recolección, se presentan en la Figura 1.



Figura 1. Las zonas de recolección de las muestras del relave, se muestran con los puntos de color rojo. Las coordenadas de la ubicación del relave son: 30° 12' 03" S y 71° 16' 30" W. Fuente: Google Earth, 2023

Recolección agua de mar.

El agua de mar utilizada en las distintas etapas de la investigación, se recolectó de las costas de la ciudad de La Serena, Región de Coquimbo, Chile. El punto de recolección, se presenta en la Figura 2. Recogiendo 10 litros de agua, cuantificando su salinidad, temperatura y pH. La salinidad del agua de mar se midió con el equipo de Tester Impermeable de Salinidad Marina - HI98319, el pH y la temperatura se determinó en terreno, utilizando el equipo Medidor de pH / Temperatura Impermeable pHep®5 - HI98128.



Figura 2. Punto de recolección del agua de mar, coordenadas 29° 54' 20" S y 71° 16' 30" W. Fuente: Google Earth, 2023.

Lixiviación por inmersión

Se tomaron ocho muestras de aproximadamente 500 g del relave previamente homogenizados. Estas se dividen en dos grupos de cuatro componentes y se ponen en contacto, el primer grupo, cada muestra con 1 L de solución de ácido acético con una concentración de 0.5 M y un pH de 2.5. El segundo grupo, se realiza el mismo procedimiento, pero se utiliza 1 L de ácido cítrico de concentración 0.5 M y un pH de 2.6.

La concentración de los ácidos y el pH de las soluciones, se seleccionaron por estudios realizados anteriormente por el autor del documento, (Zamarreño y Díaz, 2021) y (Zamarreño y Espinoza, 2023), utilizando su metodología.

Las soluciones de los ácidos orgánicos se prepararon con ácidos el tipo P.A. y el solvente usado fue agua de mar, sin un tratamiento previo.

Durante el proceso de lixiviación, se tomaron muestras de 30 mL a las 24, 48 y 72 horas, para ello se filtró la muestra y se guardó en envases herméticos, para su posterior análisis.

Lixiviación en Batea.

Con los resultados obtenidos en las pruebas de lixiviación por inmersión, se procedió a realizar una lixiviación en Batea con ácido cítrico pero esta vez a mayor escala, tomando 2 L de solución del ácido 0.5 M que actuó sobre una muestra de relave de 1000 g aproximadamente. Se tomaron muestras a las 72, 96 y 168 horas, realizando el mismo procedimiento que en la lixiviación por inmersión. En la Figura 3, se muestra la experiencia de lixiviación en batea.



Figura 3. Lixiviación en Batea a escala laboratorio de metalurgia.

Lixiviación columna por fase inversa

En la actualidad la mayoría de los procesos de lixiviación se llevan a cabo en pilas ya sean dinámicas o estáticas, teniendo esto presente se realizó un experimento de lixiviación en columnas para determinar la eficacia de la solución lixivante de ácido cítrico de concentración de 0.5 M, con agua de mar en las muestras de relave. para esto se utilizaron muestras de 174.5 g de relave y un volumen de 1000 mL de solución lixivante.

Se realizó la toma de muestra, por cada vez que la solución lixivante completo un ciclo de circulación. El ciclo tiene una duración aproximada de 4 horas, tomando 4 muestras en total, de forma similar a los anteriores experimentos, (Zamarreño *et al.*, 2019). En la Figura 4, se muestra la columna usada.



Figura 4. Sistema de lixiviación en columna de fase inversa.

Lixiviación por agitación.

La última experiencia que se realizó, fue lixiviación agitada, para ello se tomaron aproximadamente 2000 g del relave y se mezcló con 3 litros de solución lixivante compuesta por agua de mar y ácido cítrico en concentración 0.5 M, con una velocidad de agitación de 600 RPM, como se muestra en la Figura 5.

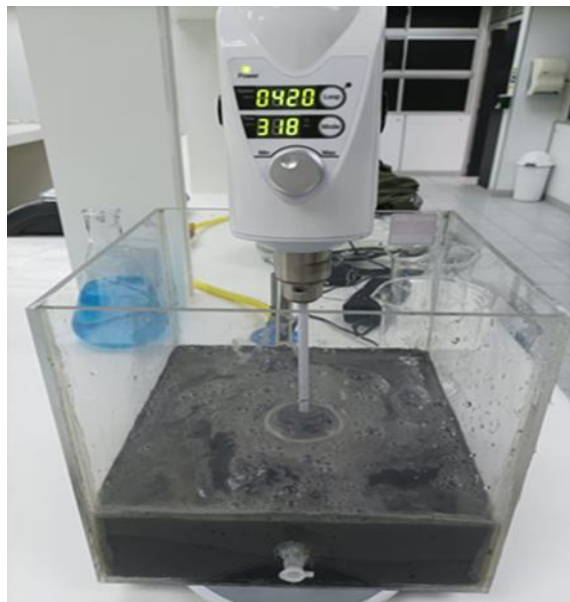


Figura 5. Lixiviación por agitación.

Medición de la concentración de hierro y cobre en solución.

Para determinar la concentración de hierro y de cobre en las soluciones resultantes, se usa la técnica de espectroscopia de absorción atómica, según lo diseñado por Workman *et ál.*, (2003).

Resultados y discusión

La caracterización química del agua de mar usada se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2. Características químicas del agua de mar usadas. (Fuente: Elaboración propia)

Concentración de cloruros g Cl/L	pH	Temperatura (°C)
37.5	8.5	15.5

Los resultados obtenidos, son equivalentes con estudios realizados en distintos sectores costeros y oceánicos a nivel nacional e internacional, (Leal y Prol, 2016) y (Guzmán y Silva, 2002).

Lixiviación por inmersión.

Los resultados de la lixiviación por inmersión, al extraer el Fe se presentan en la Tabla 3 y en la Tabla 4, se muestran los resultados de la extracción de cobre a las 72 horas de lixiviación.

Al observar la Tabla 3, podemos verificar que el ácido que tiene una mayor eficiencia para extraer el hierro, unido al agua de mar es el ácido cítrico de concentración 0.5M, ya que, al cabo de 72 horas de lixiviación, extrajo 4250 mg/L, en comparación al ácido acético que solo pudo extraer 130 mg/L.

Tabla 3. Resultados promedio de la extracción de Fe de las muestras de relaves, usando ácido acético 0.5M y ácido cítrico 0.5 M.

Tiempo/Horas	mg Fe/L con ácido cítrico 0.5M	mg Fe/L con ácido acético 0.5M
24	196	11
48	384	38
72	4250	130

Tabla 4. Concentración promedio de Cobre extraído por Lixiviación de Inmersión a las 72 horas.

Muestras	mg Cu/L	Promedio mg Cu/L
Ácido cítrico		
Relave 1	0.78	
Relave 2	0.66	
Relave 3	0.80	
Relave 4	0.57	0.70
Ácido acético		
Relave 1	0.56	
Relave 2	0.62	
Relave 3	0.60	
Relave 4	0.55	0.58

Al analizar los resultados de la extracción del cobre usando los ácidos anteriormente mencionados, se observa que no existe una gran variación entre ambos ácidos, ya que al usar ácido cítrico el valor promedio de extracción fue de 0.70 mg/L y con ácido acético es de 0.58 mg/L. Según los resultados de las tablas anteriormente mencionadas, se tomó la decisión de realizar las experiencias siguientes usando solamente ácido cítrico, 0.5M con agua de mar.

Lixiviación en Batea

En la Tabla 5 y Figura 6, se muestran los resultados de la experiencia de lixiviación en batea, de las muestras de relave.

Tabla 5. Periodo de lixiviación usando la técnica de Batea. (Fuente: Elaboración propia).

Tiempo Lixiviado/ Hrs	mg Fe/L	mg Cu/L
72	868.75	372
96	1375	390
168	1500	418

En la Tabla 5 y Figura 6, vemos que la extracción de Fe, es eficiente, ya que, al cabo de 168 horas, (7 días), la concentración de Fe es de 1500 mg/L, equivalentes a 1.5 g Fe por litro de solución.

La variación de la concentración Cu, al usar esta técnica, es baja, ya que al observar la Figura 4, es prácticamente constante la concentración en el tiempo, indicando que la extracción se realiza en un periodo de tiempo más corto.

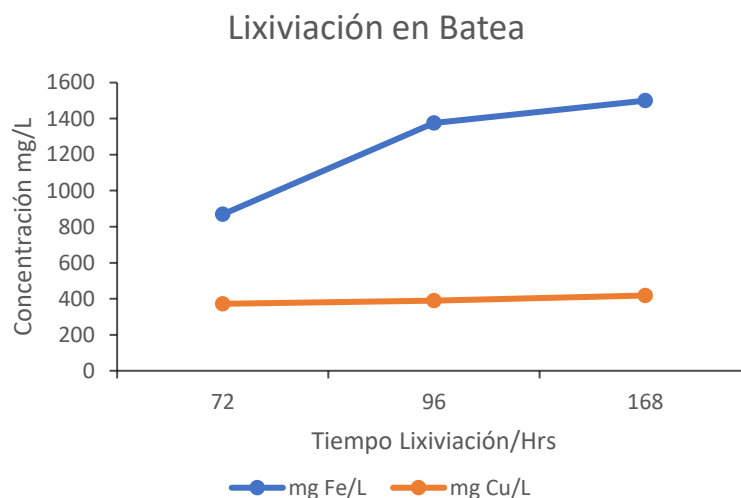


Figura 6. Variación de la concentración de Fe y Cu, en la técnica de lixiviación en batea, durante el tiempo.

Lixiviación en Columna por fase inversa

En la Tabla 6 y Figura 7, se muestran los resultados obtenidos en la lixiviación del relave usando el sistema de columna en fase inversa.

Tabla 6. Concentración de Fe y Cu en solución, usando agua de mar y ácido cítrico 0.5 M.

Lixiviación en columna por Fase Inversa			
Número de veces que circulo la solución Lixivante	Tiempo/Hrs	mg Fe/L	mg Cu/L
1	3	330	20
2	6	482.5	25
3	9	682.5	46
4	12	935	61
5	15	1030	71

Esta técnica de lixiviación en columna fase inversa, es más eficiente que la lixiviación en Batea, ya que se logra una mayor extracción del Fe en un menor tiempo de lixiviación. Al analizar la Tabla 5, la concentración de Fe es de 1500 mg/L, al cabo de 168 horas. Al compararla con la Tabla 6 y Figura 7, vemos que al cabo de 15 horas podemos recuperar 1030 mg Fe/L, generando un importante ahorro de tiempo.

En cuanto a la extracción del Cu, esta técnica no es muy efectiva, bajo estas condiciones de ácido cítrico y agua de mar. Al comparar las mismas tablas anteriores vemos que es más eficiente la lixiviación en batea que en columna en fase inversa para extraer el Cu.

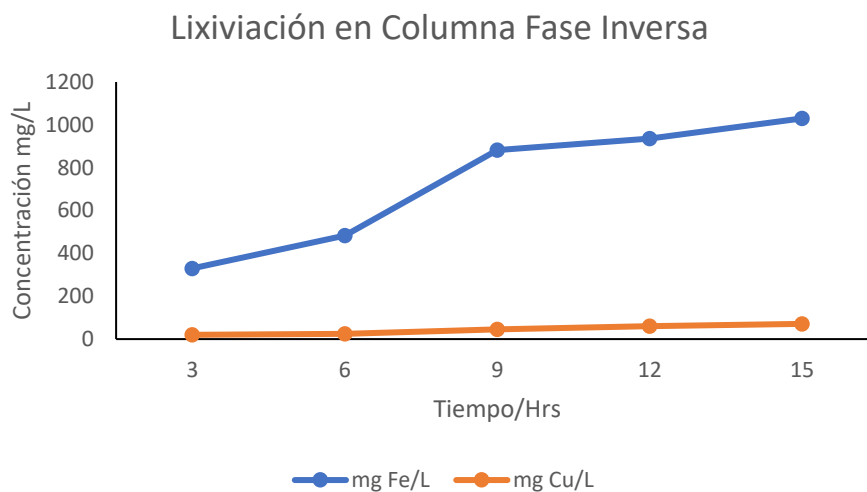


Figura 7. Variación de la concentración de Fe y Cu en solución, usando agua de mar y ácido cítrico 0.5 M, empleando el sistema de columna en fase inversa.

Lixiviación por agitación

La última experiencia desarrollada es la lixiviación por agitación. Los resultados de la extracción de Fe y Cu, se presentan en la Tabla 7 y Figura 8.

Tabla 7. Resultados de la extracción de Fe y Cu en Lixiviación por agitación. (Fuente: Elaboración propia).

Tiempo/Horas	mg Fe/L	mg Cu/L
1	240	17.5
1.5	280	15.59
2	325	17.47
2.5	400	16.93

Observamos en la Tabla 7 y la Figura 8, que la extracción del Fe usando esta técnica, es prácticamente lineal, ya que, al calcular el coeficiente de correlación, (R^2) da un valor de 0.98, muy cercano al valor 1, indicando que los puntos siguen una recta. Al extrapolar estos resultados

la máxima extracción que se logra en la lixiviación por inmersión es de 4250 mg Fe/L en 72 horas, usando la lixiviación por agitación, esta se logra en 26.5 horas, en menos de la mitad del tiempo. Si bien el tiempo en extracción del elemento Fe, se ve disminuido fuertemente, existe el factor de uso de energía, lo que podría generar un mayor costo asociado al usar esta técnica, por lo que habría que realizar un estudio energético y económico.

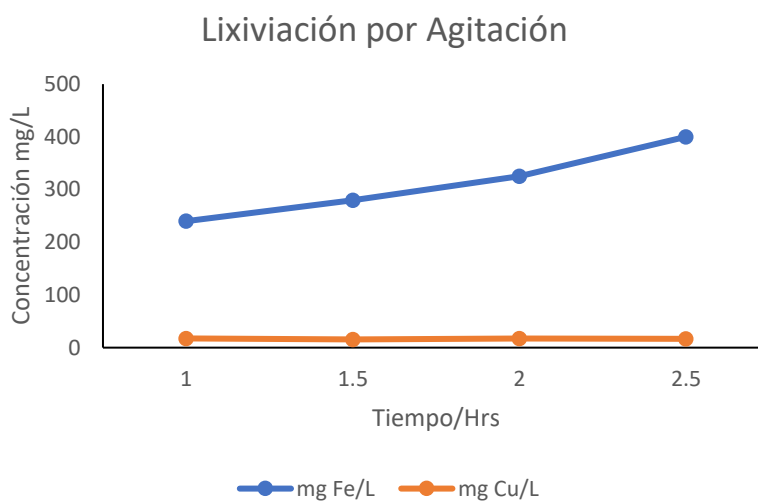


Figura 8. Variación de la concentración de Fe y Cu en el tiempo, usando la técnica de lixiviación por agitación.

Al observar la Figura 8, podemos inferir que la extracción del cobre es prácticamente constante durante todo el periodo de lixiviación y la concentración es baja comparada con la del elemento hierro.

Las soluciones obtenidas en esta investigación, pueden tener un importante uso industrial y un valor económico, lo que implicaría usar el concepto de economía circular a la minería de nuestro país.

La solución resultante de los procesos estudiados, contiene hierro en forma de citrato de hierro el cual puede precipitarse utilizando hidróxido de amonio obteniendo Citrato Férrico Amoniacal con impurezas de cobre.

En su forma pura el Citrato Férrico Amoniacal tiene aplicaciones en la industria alimenticia se usa en las fórmulas de suplementos nutricionales (fortalecedor hierro). Es uno de los químicos que se usan en la cianotipia, el cual es un procedimiento fotográfico que consigue una copia negativa del

original en color azul Prusia, de esta manera se usa en la reproducción fotográfica y de planos. Asimismo, es usado en la industria farmacéutica y en el tratamiento de aguas especiales. Su valor en el mercado chileno es de aproximadamente \$144000 (ciento cuarenta y cuatro mil pesos chilenos), equivalente a U\$152.54, (ciento cincuenta y dos dólares norteamericanos), el kilogramo, (Productos Químicos online 24/7, 2024).

Conclusiones

Según los resultados obtenidos, podemos concluir lo siguiente:

Es posible obtener soluciones de Fe, al usar tratamientos hidrometalúrgicos con agua de mar y un ácido orgánico como el ácido cítrico, en minerales proveniente del relave.

La eficiencia del ácido acético, para extraer el Fe de las muestras de relaves, es menor, en comparación con el ácido cítrico.

La eficiencia de extracción del cobre utilizando las distintas técnicas descritas en el presente documento, es baja, obteniendo soluciones diluidas de cobre.

Los mejores resultados son los que provienen del tratamiento hidrometalúrgico por lixiviación agitada. Por aproximaciones realizadas por el método estadístico de regresión lineal, se estima que se lograría una solución de concentración de 31% de Fe en un plazo de 30 horas aproximadamente.

Además, realizando un escalamiento del procedimiento para el tratamiento de una tonelada de relave, se requeriría de 1500 litros de la solución del ácido cítrico al 0.5 mol/L con agua de mar, recuperando 475.9 kg de Fe.

La técnica de lixiviación en columna fase inversa, demostró ser eficiente en la extracción del elemento Fe, en comparación con la lixiviación en batea. Pero es menos eficiente que la lixiviación por agitación, en cuanto al tiempo de contacto entre el material lixivante y la solución lixivante. Es importante realizar un estudio económico y energético entre la lixiviación en columna fase inversa y de agitación, para determinar cómo afectan estas dos variables en los procesos mineros metalúrgicos.

Por otra parte, la Lixiviación en Batea fue la que tuvo un menor rendimiento de extracción del Fe. Esto se puede deber al bajo contacto entre la solución lixivante y el mineral de relave que debido a su densidad precipito rápidamente al fondo de la batea seguido de un material blanco que asumimos actuó como capa pasivante durante el proceso.

Según estos resultados, es posible utilizar un ácido orgánico y agua de mar para recuperar Fe de relaves mineros, generando una ganancia económica y ambiental, ya que se reduce el volumen de estos desechos y los ácidos aplicados, no generan un daño importante al medio.

Las soluciones obtenidas, pueden ser comercializadas en forma directa, sin realizar un tratamiento previo, generando la sustentabilidad y la aplicación de la economía circular al rubro de la minería metálica.

Referencias bibliográficas

- Castillo, M., Alvarez, L. (2022) Ordenamiento territorial y conflictos socioambientales vinculados a la minería: provincias de Huasco y Chubut en defensa del territorio. *Perspectiva Geográfica*, **26**(1), 63-86. <https://doi.org/10.19053/01233769.11108>
- Castellón, C. (2016) Lixiviación de minerales de cobre con agua de mar. *Geominet*, **XLIII**, (324), 21 – 26.
- Figueroa, V., Mille, V., Salazar, D., Berenguer, J., Sapiains, P., Cifuentes, A., Delphine, J. (2018) A major prehispanic copper production center identified at collahuasi, southern tarapacá altiplano (chile) *Chungará (Arica)*, **50**(4), 557-575. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-735620180050010012018>
- Guzmán, D., Silva, N. (2002) Caracterización física y química y masas de agua en los canales australes de Chile entre boca del guafo y golfo elefantes. *Revista Ciencia y Tecnología del Mar*. **25**(2), 45-76. http://www.aysen.udec.cl/wp-content/uploads/Guzman_Silva_2002.pdf
- Leal, M., Prol, R. (2016) Caracterización geoquímica de las manifestaciones termales intermareales de Bahía Concepción en la Península de Baja California. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, **68**(3), 395-407. Recuperado en 26 de marzo de 2025, de: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-3222016000300395&lng=es&tlng=es
- Lima, M. (2021) La minería y el problema de agua. *Revista minería chilena*, <https://www.mch.cl/columnas/la-mineria-y-el-problema-del-agua>
- Mahdi, M., Fereshteh, B., Ghaderb, S., Abkhosh, E. (2020) An improved process methodology for extracting cobalt from zinc plant residues. *Hydrometallurgy*, **191**, 1-53. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2019.105163>
- Navarro, P., Mansor, R. (2017) Lixiviación de un concentrado calcopirítico de cobre en medio ácido con presencia de iones cloruro. *Revista REMETALLICA*, **33**(21), 25-30
- Productos Químicos online 24/7 (s.f) Acceso el 16 de marzo de 2024. Disponible en: <https://productosquimicos.cl/producto/citrato-ferrico-amoniaco-marron-1-kg>
- SERNAGEOMIN, Servicio Nacional de Geología y Minería (2018) Geoquímica de Superficie de Depósitos de Relaves de Chile. https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2018/06/P%c3%9aBLICA_Geoquimica-de-Depositos-de-Relaves-de-Chile25062018.pdf
- SERNAGEOMIN, Servicio Nacional de Geología y Minería (2019) Datos de Geoquímica de Depósitos de Relave en Chile. Consultado en marzo 2024. Disponible en: <https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2020/01/Geoquim.xlsx>
- Torres, Y., Gonzales, Y., Cotera, I., Arana-Ruedas, D. (2024) Valorización de Residuos Mineros como Áridos para la Construcción de Carreteras: Economía Circular en la Región Andina del Perú. *Revista de investigaciones Altoandinas*, **26**(2), 71-78. Acceso el 20 de octubre de 2024. Disponible en: http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2313-29572024000200071&lng=es. <http://dx.doi.org/10.18271/ria.2024.605>
- Workman, J., Koch, M., Veltkamp, J. (2003) Process analytical Chemistry. *Analytical Chemistry*, **75**(12), 2859-2876.

- Yang, J., Wang, Q., Luo, Q., Wang, Q., Wu, T. (2009) Biosorption behavior of heavy metals in bioleaching process of MSWI fly ash by *Aspergillus niger*. *Biochemical Engineering Journal*, **46**(3), 294-299.
- Zamarreño, R., Aguilera, L., Cataldo, C. (2019) Biolixiviación de minerales sulfurados de cobre, utilizando agua de mar, aplicando el sistema de columna inversa, orientado hacia la pequeña y mediana minería chilena. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, **10**(1), 1-12. Acceso el 20 de octubre de 2024. Disponible en: <https://www.executivebs.org/publishing.cl/avances-en-ciencias-e-ingenieria-vol-10-nro-1-ano-2019-articulo-1>
- Zamarreño, R., Díaz, F. (2021) Recuperación de metales económicamente importantes desde relaves mineros abandonados, usando biolixiviación en columnas de fase inversa, de bajo costo y ambientalmente sostenible. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, **12**(4), 31 – 42. Acceso el 20 de octubre de 2024. Disponible en: <https://www.executivebs.org/publishing.cl/avances-en-ciencias-e-ingenieria-vol-12-nro-4-ano-2021-articulo-4/>
- Zamarreño, R., Espinoza, J. (2023) Recuperación de aluminio desde relaves mineros, aplicando procesos químicos y biológicos innovadores. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, **14**(2), 23-34. Acceso el 20 de octubre de 2024. Disponible en: [Avances en Ciencias e Ingeniería Vol. 14 nro 2 año 2023 Artículo 3 – publishing.cl \(executivebs.org\)](https://www.executivebs.org/publishing.cl/avances-en-ciencias-e-ingenieria-vol-14-nro-2-ano-2023-articulo-3/)
- Zamarreño, R., Espinoza, G., Esquivel, I. (2016) Factibilidad técnica y económica de utilizar agua de mar en el proceso de flotación en la minería del cobre. Seminario de Título para obtener el Título de Ingeniería Civil en Minas. Facultad de Ingeniería, Universidad Pedro de Valdivia. (Chile)
- Zamora, G., Blanco, W., Hinojosa, O. (2023) Economía circular en minería: procesamiento de desmontes como alternativa de remediación ambiental. *Revista de Medio Ambiente y Minería*, **4**(2), 3-18. Acceso el 15 de septiembre de 2024. Disponible en: http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2519-53522019000200001&lng=es&tlng=es