

RECUPERACIÓN DE ALUMINIO DESDE RELAVES MINEROS, APLICANDO PROCESOS QUÍMICOS Y BIOLÓGICOS INNOVADORES

ALUMINUM RECOVERY FROM MINE TAILINGS, APPLYING INNOVATIVE CHEMICAL AND BIOLOGICAL PROCESSES

Ricardo Zamarreño-Bastías^{1,2}, Javiera Espinoza-Barrera¹, Javiera Espinoza-Barrera¹

(1) Universidad de La Serena, Facultad de Ciencias Básicas, Departamento de Química, Colina El Pino s/n,
La Serena - Chile

(2) Universidad del Alba, Facultad de Ingeniería, Avda. Cuatro Esquinas 60, La Serena - Chile
(contacto: rzamarre@userena.cl)

Recibido: 02/01/2023 - Evaluado: 20/02/2023 - Aceptado: 30/03/2023

RESUMEN

Se realizó una investigación, a nivel de laboratorio químico - metalúrgico, evaluando dos métodos en la recuperación de aluminio, presente en un relave minero abandonado, con la finalidad de encontrar una nueva fuente de recuperación de este elemento. El aluminio se encuentra en forma de aluminosilicatos en el relave. Se utilizaron dos métodos, 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 y una base fuerte. De acuerdo con los resultados, 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.

ABSTRACT

An investigation was carried out, at the chemical-metallurgical laboratory level, evaluating two methods in the recovery of aluminum, present in an abandoned mining tailing. In order to find a new source of recovery for this element. Aluminum is found in the form of aluminosilicates in the tailings. Two methods were used, a biological process and a chemical one. In the biological one, bioleaching was carried out with cultivated *Aspergillus niger* fungi, which produces organic acids, which can extract aluminum from the tailings. The chemical method consisted of leaching with two organic acids, citric acid and oxalic acid with the addition of oxidizing agents such as hydrogen peroxide and a strong base. According to the results, the methods that had the highest extraction were chemical, specifically leaching with the mixture of oxalic acid and hydrogen peroxide. In the case of bioleaching, no significant results were obtained in the extraction of aluminum.

Palabras clave: biolixiviación de minerales, lixiviación con ácidos orgánicos, *Aspergillus niger*, relave minero
Keywords: bioleaching of minerals, leaching with organic acids, *Aspergillus niger*, mine tailings

INTRODUCCIÓN

Los relaves mineros, son la principal fuente de residuos que genera la minería moderna. Su composición, es variable, según el tratamiento que se le sometió al mineral, generalmente contienen lodos del proceso de la molienda de rocas, efluentes ácidos, que se generan del procesamiento de minerales, componentes con alto poder contaminante (Valderrama *et al.*, 2019).

El aluminio es un material que es ampliamente aplicado a los procesos industriales y es muy abundante en la corteza terrestre, formando aluminosilicatos.

Es importante mencionar que, pese a que el aluminio es un material tan abundante y presente en la corteza terrestre, este no se encuentra en forma libre, sino que mayoritariamente se encuentra formando compuestos y minerales con otros elementos. Es por ello por lo que una gran parte de la proporción de aluminio que hay en la tierra no puede ser extraído ni mucho menos utilizado en procesos industriales (Urbina *et al.*, 2011).

En la actualidad la producción mundial del aluminio se realiza a través del proceso Bayer, utilizando como materia prima la bauxita. En este proceso la bauxita es lixiviada con una solución alcalina de hidróxido de sodio, NaOH, obteniendo una solución concentrada de aluminato de sodio soluble, NaAlO₂, dejando las impurezas en el residuo insoluble. La solución se descompone produciendo hidróxido de aluminio, Al(OH)₃, el cual se calcina para producir óxido de aluminio, Al₂O₃ (ver en <https://www.911metallurgist.com/metalurgia/proceso-extraccion-aluminio/>).

Se han utilizados métodos no tradicionales en la recuperación del aluminio desde la bauxita, por ejemplo, la biolixiviación de este mineral con hongos como el *Aspergillus niger* (Yang *et al.*, 2009), consiguió extraer el 90% del aluminio que estaba presente en un mineral de bauxita. 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 (ver en <https://mundolatas.com/unesp-desarrolla-con-exito-un-novedoso-metodo-para-la-extraccion-de-aluminio-procedente-de-la-bauxita-en-brasil/>).

En la actualidad, los procesos de extracción de los minerales de interés, no tienen una eficiencia del 100%, “no pueden recuperar los reactivos empleados en los procesos mineros metalúrgicos, generando que los residuos sean una mezcla compleja de metales, minerales, sustancias químicas y agua que no se pueden separar, ni recuperar y se desechan en forma de lodo, en el área de almacenamiento de este residuo, que deben de cumplir con una serie de especificaciones técnicas, que se denomina depósito o almacenamiento de relaves” (Zamarreño *et al.*, 2020a).

Los relaves producen una serie de problemas en el medio ambiente, en los habitantes y en los procesos económicos en los lugares donde están insertos. En nuestro continente americano, tenemos importantes ejemplos en diversos países y ciudades. Por mencionar algunos de ellos. “*En la ciudad de Potosí, en Bogotá, se cuantifico la relación entre los conflictos ambientales, sociales y de salud, que se producen con el sistema industrial que están presente en esta ciudad, donde los residuos mineros y relaves, son causantes de la generación de estos problemas*” (Rotta & Torres, 2017).

En la ciudad de Andacollo, región de Coquimbo, en Chile, que es un centro minero, en las que se encuentran una cantidad importante de pequeñas y medianas industrias mineras de oro y cobre. “Esto ha generado que en esta localidad se emplacen distintos relaves mineros, con alto contenido de mercurio, pudiéndose desplazar por procesos geoquímicos y ambientales, pudiendo llegar a la población, provocando problemas en la salud” (Zamarreño *et al.*, 2013).

Los problemas que genera estos residuos mineros, relaves, se pueden disminuir haciendo un cambio de conducta desde una perspectiva de extracción lineal a una circular, cuyo objetivo es producir cero residuos.

Se han realizado varias propuestas de tratar los relaves mineros que contienen altos porcentajes de elementos importantes, por ejemplo, se analizaron las alternativas de tratamiento de muestras de relaves, con altos contenidos de Pb-Ag-Zn, mediante lixiviación cianurante directa por agitación, utilizando un pretratamiento en medio ácido y en presencia de peróxido de hidrógeno, H_2O_2 , obteniendo una recuperación de plata (Ag), de un 74% (Zamora *et al.*, 2019).

La ciudad de Ouro Preto, ha sufrido una serie de adaptaciones a lo largo de la historia, ya que es un importante centro minero de la minería del oro, que al aplicar la perspectiva del concepto de economía circular, la ciudad ha sido capaz de enfrentar las dificultades al ir reinventándose, preservando su patrimonio arquitectónico, y describe las formas recientes de hacer una exploración turística de los yacimientos mineros abandonadas, reforzando el principio que guía la economía circular (Miranda *et al.*, 2020).

El grupo de trabajo de esta investigación tiene experiencias en recuperación de elementos importantes en relaves mineros, por mencionar algunos; "la recuperación de soluciones de hierro de un relave urbano, para ello se realizaron tres procesos de separación del hierro dos químicos y uno físico, este último, a través de separación magnética, obteniendo un 67.16% de componentes magnéticos, los procesos químicos, fueron tratar el relave con ácido clorhídrico al 25%, removiendo un 41.59% del material del relave, obteniendo una solución rica en hierro y esta, posteriormente fue tratada con una solución de hidróxido de sodio a pH 12, obteniendo hidróxido férrico". En los procesos no se logró separar selectivamente el hierro, pero se obtuvieron mezclas que son importantes económicamente como el hierro, cobalto, aluminio, que posteriormente se pueden separar por medios tradicionales. Además, se logró una disminución del volumen del relave (Zamarreño *et al.*, 2020a).

Un segundo trabajo de recuperación de elementos importantes, realizado es la obtención de soluciones de hierro y cobalto de un relave abandonado, utilizando un proceso de bajo costo, no tradicional y ambientalmente sustentable. "El hierro se extrae con ácido clorhídrico al 20%, recuperando el hierro como cloruro férrico, $FeCl_3$ en solución o como hidróxido férrico sólido, $Fe(OH)_3$ ambos compuestos muy utilizados a nivel industrial. El cobalto se recupera del relave usando una solución que contiene ácido tartárico, $C_4H_6O_6$, y peróxido de hidrógeno, H_2O_2 , logrando extraer un promedio de cobalto del 97.66% a nivel de laboratorio pre metalúrgico y con una cinética de orden cero" (Zamarreño & Mera, 2022).

El relave que se seleccionó, para realizar la extracción del aluminio, es el que se encuentra en el humedal el Culebrón, ubicado en la ciudad de Coquimbo, en Chile en el extremo suroeste de la bahía del mismo nombre y formaba parte del ecosistema de vegas existente en toda la línea costera de la bahía. Por el aumento del crecimiento poblacional entre las ciudades de Coquimbo y de La Serena este sector sufrió una importante transformación, desecándolo durante la década de los cincuenta, para construir obras viales y viviendas en este sector del humedal (CONAMA, 2009).

El humedal y su cuerpo de agua forman parte de la microcuenca de Pan de Azúcar y desemboca en el Océano Pacífico, esta cuenca es del tipo pre andina exorreica, con régimen pluvial (Zamarreño *et al.*, 2020b).

El humedal presenta un alto grado de acciones de tipo antrópicas, ya que tiene la presencia de residuos de construcción, una feria de frutas y verduras y se localiza el relave minero abandonado Dina, como se aprecia en la Figura 1. Es importante mencionar que la zona del humedal en septiembre del año 2015 fue azotada por un tsunami, por efecto de un terremoto que sufrió la Región de Coquimbo.

La caracterización química del relave Dina, se ha podido realizar a través de varios estudios hechos, esta se presenta en la Tabla 1, donde se observa que los componentes mayoritarios son el Fe con un 5,28 +/- 4,16 % y el Al con un 7,32 +/- 0.62 %. Es importante señalar que el aluminio se asocia a los aluminosilicatos.



Fig. 1: Humedal el culebrón con las actividades entrópicas presentes y la presencia del relave minero dina (Fuente: Google Earth, 2023, <https://www.google.com/earth/about/versions/#earth-pro>).

Tabla 1: Composición química del relave dina, ubicado en el humedal el culebrón (fuente: Zamarreño & Mera, 2022)

Nº	% Cu	% Fe	% Ca	% Mg	% Al
R	0,002	2,05	1,27	0,72	7,32
R1	1,1	4,48	3,07	0,99	8,22
R2	0,13	15,3	3,26	1,67	6,47
R3	0,06	12,56	3,9	1,52	6,04
R4	0	2,9	2,45	0,7	7,08
R5	0,17	4,15	2,31	0,72	8,18
R6	0	3,16	2,44	0,79	7,49
R7	0	3,32	2,57	0,8	7,33
R8	0,04	3,76	3,12	1,45	7,22
R9	0	3,05	2,71	1,05	7,26
R10	0	2,53	2,32	0,72	7,63
R11	0	2,86	2,43	0,74	7,61
X	0,14	5,28	2,78	1,01	7,32
Desv. Prom	0,31	4,16	0,48	0,35	0,62

Como se mencionó anteriormente, la presencia de los relaves genera una serie de problemas ambientales, sociales y económicos, pero a la vez presenta la gran oportunidad de tratar estos pasivos ambientales, como activos ambientales. Además, permiten probar la aplicación de tecnologías novedosas y procesos tecnológicos innovadores, que son más amigables con el medio ambiente, en ese marco la aplicación de la biolixiviación y el uso de soluciones de lixiviación con ácidos orgánicos, mezclado con una solución oxidante como el peróxido de

hidrógeno, plantea un novedoso paradigma a la nueva ingeniería en minas y la hidrometalurgia, ya que permite ser más sustentables en los procesos mineros y metalúrgicos, como lo señalan en investigaciones realizadas en los últimos años (Mahdi *et al.*, 2020; Maltrana & Morales, 2023), donde el uso de estas alternativas tecnológicas, se están probando cada vez más en los distintos procesos de extracción de elementos importantes, desde distintos minerales y en los últimos años en los relaves mineros.

Considerando lo anteriormente descrito, el objetivo del presente estudio es recuperar el aluminio del relave Dina, a través de métodos no tradicionales, tales como: uso de la biolixiviación con el hongo *Aspergillus Niger* y el proceso de lixiviación con ácidos orgánicos, que son menos dañinos para el medio. Al utilizar esta metodología, se aplica el concepto de la economía circular en el relave minero, ya que se logra disminuir el volumen del relave presente en el humedal y se obtiene una ganancia económica, ya que se conseguirán soluciones ricas en aluminio.

MÉTODOS Y MATERIALES

Toma de muestras del relave Dina

Se tomaron muestras sólidas en distintos lugares del relave, como se muestra en la Figura 2, con herramientas metálicas, recubiertas con polietileno, para evitar que las muestras se puedan contaminar. Posteriormente son depositadas en un contenedor de polietileno, homogenizando las muestras tomadas y posteriormente se tamizaron, bajo la malla de 150 μm (tamiz W.S. Tyler).

La humedad presente en las muestras homogenizadas fue eliminada a 120°C, en una estufa (marca Binder, modelo FD 23, de fabricación alemana), cuyo rango de temperatura es de temperatura ambiente a 350°C, con convección natural.



Fig. 2: Humedal el Culebrón, demarcado con línea amarilla el sector donde se localiza el relave Dina y los puntos de color dorado indican los lugares donde se tomaron las muestras (Fuente: Google Earth, 2023, <https://www.google.com/earth/about/versions/#earth-pro>).

Proceso de biolixiviación

Siembra Aspergillus niger

Se preparó el medio de cultivo, formado por agar de Sabouraud, utilizando 20 g de glucosa, peptonas y agar. El agar fue sometido al proceso esterilización, a través de un autoclave. Posterior a esto se realizó la siembra de los hongos que estaban en diversas frutas y verduras que se recolectó, entre ellas frutilla, morrón, zanahoria y naranja. Se tomó una muestra de frutilla, una de naranja, dos de zanahoria y dos de morrón.

Frotis Bacteriano

Pasados 48 horas, se realizó un frotis a las muestras de zanahoria, ya que a simple vista el hongo aislado parecía ser un *Aspergillus Niger*. Una vez finalizado el frotis se realizó la tinción, donde se utilizó el colorante violeta cristal por 1 min, para así observar la estructura del hongo en el microscopio y confirmar la presencia de una cepa nativa de *Aspergillus Niger*. Este se presenta en la Figura 3.



Fig. 3: Estructura Hongo Aspergillus Niger, obtenidos en el proceso de siembra (Fuente: elaboración propia).

Re siembra

Una vez confirmada la presencia de *Aspergillus Niger*, este se resembró en cinco placas para que creciera sin contaminantes, finalmente se esperó 5 días a que la biomasa del hongo aumentara, para utilizarlo en el proceso de biolixiviación.

Preparación del medio de cultivo

Se preparó una solución de 800g/L de azúcar, esta solución fue sometida a altas temperatura y presión, para eliminar la presencia de algún contaminante biológico, en un autoclave y posteriormente se dividió la solución en dos de 400 mL y depositados en dos matraces. Posterior a esto se tomó un inóculo del hongo de las placas y se depositaron en los matraces con la solución de azúcar y se puso en aireación por una semana para el desarrollo y aumento de la biomasa del hongo y la producción de ácidos. Midiendo el pH, en esta etapa de cada solución.

Biolixiviación

Se pesaron 300 g de relave y se adicionaron en los matraces, donde se encontraba el hongo, controlando el pH cada 48 horas y el frotis bacteriano en un periodo de 30 días, para asegurarnos de la presencia del hongo en la solución biolixivante durante este tiempo.

Lixiviación química

Lixiviación con ácido cítrico 0,5 M, (M1).

Se preparó 1 L de una solución de ácido cítrico 0.5 M, se pesó 300 g de relave y se adiciono a un vaso precipitado de 2L, el relave y la solución de ácido cítrico, esta solución fue llevada a un agitador mecánico donde se agito por 3 hrs y se dejó lixiviado por 20 días.

Lixiviación con hidróxido de sodio al 30%, (M2).

Se preparó 1 L de una solución de NaOH al 30%, se pesó 300 g de relave y se adiciono a un vaso precipitado de 2L, el relave y la solución de NaOH, esta solución fue agitada y se dejó lixiviando por 20 días.

Lixiviación con ácido oxálico 0,5 M y peróxido de hidrógeno 4 M, (M3).

Se preparó 1 L de una solución de ácido oxálico 0.5 M y 4 M de peróxido de hidrógeno, luego se pesaron 300 g del relave y se mezclaron en un contenedor, la mezcla resultante, fue agitada por 3 horas y se dejó lixiviando por 20 días.

Lixiviación con ácido cítrico 1,0 M e hidróxido de sodio 0,1 M, (M4).

Se preparó 1 L de una solución, formada por ácido cítrico 1 M e hidróxido de sodio 0.1 M, en un vaso de 2 L luego se agregó 300 g de relave, esta solución fue agitada y se dejó lixiviando por 20 días.

Lixiviación con ácido cítrico 0,5 M y hidróxido de sodio 0,1 M, (M5).

Se preparó 1 L de una solución compuesta de ácido cítrico 0,5 M e hidróxido de sodio 0.1 M, en un vaso de 2 L, luego se le adiciono 300 g de relave. La mezcla resultante fue agitada y se dejó lixiviando por 20 días.

Lixiviación con solución de hidróxido de sodio al 30% y sulfato de sodio 0,035 M, (M6).

Se preparó 1 L de una solución de NaOH al 30%, se agregaron 5 g de sulfato de sodio, Na_2SO_4 , y se puso en contacto con 300 g de relave.

La mezcla se agitó durante 3 horas y se dejó lixiviando por 20 días. En la figura 4, se muestra el proceso de lixiviación química, con el proceso de agitación.



Fig. 4: Lixiviación química del relave mineral, es importante mencionar, que esta se realiza en una celda de lixiviación, diseñada para laboratorio metalúrgico (Fuente: Elaboración propia).

Es importante mencionar que todos los ensayos de biolixiviación y de lixiviación química, se realizaron en triplicado, para después determinar la concentración del aluminio utilizando un equipo de espectrofotometría de absorción atómica marca AA-6880 Shimadzu.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados se dividen en el proceso de biolixiviación y de la lixiviación química.

Biolixiviación

Variación del pH

Se midió el pH de la solución biolixivante, que contiene la biomasa del hongo *Aspergillus Niger* y el azúcar, antes que se ponga en contacto con el material de relave, para la biolixiviación, obteniendo un pH promedio de las soluciones de 4,8. Durante el periodo de biolixiviación, se evaluaba el comportamiento del pH, en la Figura 5, se presenta la variación de una de las muestras.

Según la literatura (Yang *et al.*, 2009), el valor de pH óptimo para la biolixiviación del *Aspergillus Niger* es de 5,0, este factor es importante de mencionar, ya que el pH promedio de la solución biolixivante fue de 6,3.

Este comportamiento del pH se puede explicar debido a la naturaleza alcalina del relave y del humedal costero donde se ubica, ya que el hongo al verse en un medio básico estaría produciendo una mayor cantidad de ácido para neutralizar la basicidad en el cual esta inserto.

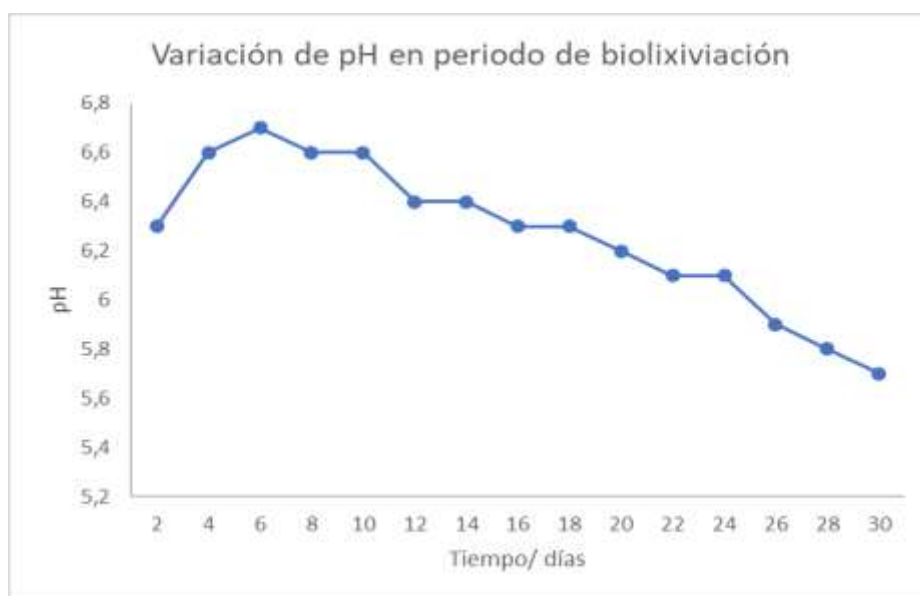


Fig. 5: Variación del pH, durante el proceso de biolixiviación del material proveniente del relave Dina. (Fuente: Elaboración propia).

Concentración de aluminio extraído en la biolixiviación

En la tabla 2, se presentan los resultados de la biolixiviación para extraer el aluminio del relave Dina.

Tabla 2: Cantidad promedio de aluminio extraído a través del proceso de biolixiviación (Fuente: Elaboración propia).

Muestra	mg Al/L
1	6
2	6
3	N.D.
4	4
5	N.D.
6	5

Al analizar los resultados entregados en la tabla 2, podemos observar que el proceso de biolixiviación, usando el hongo *Aspergillus Niger*, sobre un relave minero, para extraer aluminio, no dio los resultados esperados, incluso algunas muestras estuvieron bajo el límite de detección, esto puede deberse a varios factores que es necesario mencionar y seguir estudiando.

El proceso de biolixiviación con el hongo *Aspergillus Niger*, puede ser no efectivo para extraer el aluminio de los aluminosilicatos, ya que pruebas realizadas en Brasil (ver en <https://www.911metallurgist.com/metalurgia/proceso-extraccion-aluminio/>), demostró su efectividad en la mineral bauxita. A diferencia de las muestras provenientes del relave, que contienen aluminosilicatos, ya que su estructura y su comportamiento químico es muy distinta a la bauxita.

Otros factores importantes que evaluar es la cantidad de nutrientes de crecimiento, el pH, la temperatura y el suministro de oxígeno, O₂ y dióxido de carbono, CO₂ son factores que afectan directamente la eficiencia de la biolixiviación. En nuestro caso el pH es un elemento limitante, ya que el promedio de esta variable fue de 6,3, este factor influyó en la eficiencia del proceso de biolixiviación, probablemente por falta de una mayor concentración de alimento para el hongo, en el medio de cultivo para obtener así una mayor producción de ácido cítrico por parte del hongo y por la naturaleza alcalina del relave, que puede neutralizar la producción del ácido por parte de este organismo e incentivarlo a que produzca una mayor cantidad de ácido para neutralizar la alcalinidad del relave.

Lixiviación química

Lixiviación

Los resultados promedios de los distintos métodos de lixiviación química se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3: Cantidad promedio extracción de aluminio, según lixiviación química (Fuente: Elaboración propia)

Muestras	Concentración promedio de extracción de Al mg Al/L
M1) (C ₆ H ₈ O ₇ 0,5 M)	3
M2) (NaOH 30%)	45
M3) (C ₂ H ₂ O ₄ 0,5 M + H ₂ O ₂ 4M)	1983
M4) (C ₆ H ₈ O ₇ 1M + NaOH 30%)	1621
M5) (C ₆ H ₈ O ₇ 0,5 M + NaOH 0,1 M)	1295
M6) (NaOH 30% + Na ₂ SO ₄)	42

En la Tabla 3, observamos que la mezcla que extrajo una mayor cantidad de aluminio del material de relave fue la M3, correspondiente el ácido oxálico, $C_2H_2O_4$ 0,5M y peróxido de hidrógeno, H_2O_2 , 4M, si bien el ácido oxálico no presenta un gran poder lixivante, pero al mezclarse junto a un agente reductor como el peróxido, hace que el aluminio se pueda reducir, pasando a la solución de lixiviación.

Luego tenemos la mezcla M4 con 1621 ppm de aluminio, correspondiente al relave más el ácido cítrico, $C_6H_8O_7$, 1M y el hidróxido de sodio, NaOH, al 30%, esta muestra también presenta una alta concentración de aluminio extraído del relave. Esto se puede explicar, ya que el hidróxido de sodio es utilizado en el proceso Bayer (método tradicional para la extracción de aluminio) (Campos-Fachadas, 2023), pero en distintas condiciones de temperatura y presión, por lo que los resultados obtenidos podrían ser debido a que la mezcla ácido cítrico e hidróxido de sodio, puede actuar como un agente quelante, facilitando la entrada del aluminio a la solución lixivante.

Esto se comprueba, con la muestra M2, donde se utilizó solo NaOH al 30%, obteniendo una concentración de aluminio de 45 ppm y con la muestra M1 en la que se utilizó solamente ácido cítrico, se obtuvo una concentración de 3 ppm de Al, la más baja de todos los métodos químicos.

La muestra M5 correspondiente al relave, con una mezcla de ácido cítrico 0.5 M e hidróxido de sodio 0,1 M, logró tener una concentración de aluminio de 1295 ppm, con la tercera mayor concentración de Aluminio, pero es más baja que la muestra M4, posiblemente debido a que la concentración de ácido cítrico utilizada fue menor.

La lixiviación correspondiente al relave con la solución compuesta con hidróxido de sodio al 30% y sulfato de sodio, solamente logró extraer 42 ppm de aluminio, demostrando su baja eficiencia.

CONCLUSIONES

Es importante destacar, que este es uno de los pocos estudios encontrados, que realiza la extracción de aluminio a partir de relaves mineros, que contienen importantes cantidades de aluminosilicatos.

El hongo *Aspergillus niger* puede crecer en medios de altas concentraciones de metales y bajas condiciones de humedad, además de baja cantidad de carbono orgánico pudiéndose emplear microorganismos inactivos, como principal fuente de carbono para requerimientos metabólicos del hongo, para el crecimiento del microorganismo el pH óptimo es de 4 a 6,5.

Los factores que se tienen que estudiar, para mejorar el proceso de biolixiviación, con este hongo aplicado a los relaves mineros que tienen importantes cantidades de aluminosilicatos son; la disponibilidad de nutrientes en el medio de cultivo, la variación del pH, la temperatura y la producción de los ácidos orgánicos, para facilitar el paso del aluminio hacia la solución.

La biolixiviación de fermentación sólida, bajo las condiciones estudiadas, fue la menos efectiva en la recuperación del aluminio.

Se aprecia que la producción de ácidos orgánicos desde el *Aspergillus niger*, no es suficiente para extraer el aluminio del relave, ya que se necesitaría agregar otro componente como el peróxido de hidrógeno o el hidróxido de sodio, ya que estas mezclas tienen una mayor eficiencia en la extracción del aluminio. La pregunta, es ¿el hongo sobreviviría bajo estas condiciones?

En el método químico la mezcla más exitosa en extraer el aluminio fue el ácido oxálico con peróxido de hidrógeno, seguido de la mezcla ácido cítrico 1 M con hidróxido de sodio al 30% y por último esta mezcla, pero la concentración del ácido es 0,5 M.

El uso de los ácidos orgánicos como el oxálico y el cítrico, tienen la ventaja de ser menos contaminantes para el medio, son de bajo costo, generando que la minería pueda ir cambiando de procesos altamente contaminantes a procesos más amigables con el medio.

Esta investigación entrega los primeros resultados de la extracción de aluminio de un residuo ambiental, por lo tanto, estos resultados deben ser validados con estudios de mayor profundidad, considerando el trabajo realizado en esta publicación. Estos resultados corresponden al primer paso para extraer este elemento tan importante para la sociedad actual.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad de La Serena, por el apoyo económico a través del proyecto CIP222153 y a la Universidad del Alba, por facilitar las dependencias y los equipos del laboratorio de metalurgia.

REFERENCIAS

CONAMA. 2009. "Propuesta de Plan Integral de Restauración del Humedal El Culebrón, Región de Coquimbo". Informe final. Disponible desde Internet en: http://bdrnap.mma.gob.cl/recursos/SINIA/Biblio%20SP-64/070316BIBLIORNAP_049.pdf#, (con acceso 07/04/2019).

La Rotta, A.M. & Torres, M.H. (2017). Explotación minera y sus impactos ambientales y en salud. El caso de Potosí en Bogotá. *Saúde em Debate*, 41 (112), 77-91. <https://dx.doi.org/10.1590/0103-110420171120>

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>

Maltrana, V. & Morales, J. (2023). The Use of Acid Leaching to Recover Metals from Tailings: A Review. *Metals* 13, 1862. <https://doi.org/10.3390/met13111862>

Miranda, J., Mota de Lima, H., Borges, B., Da Silva, B. & Spinelli, M. (2020). La importancia de la minería para nuestro preto, bajo la vista de la economía circular. *Revista de Medio Ambiente y Minería*, 5(2), 28-36. Recuperado en 25 de julio de 2023, de http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2519-53522020000200004&lng=es&tlng=p

Urbina, S.E., Baca, G., Núñez, R., Colinas, M., Tijerina, L. & Tirado, J. (2011). Zeolita como sustrato en el cultivo hidropónico de gerbera. *Terra Latinoamericana*, 29 (4), 387-394. Recuperado en 24 de julio de 2023, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792011000400387&lng=es&tlng=es.

Valderrama, J.O., Campusano, R. & Espíndola, C. (2019). Minería Chilena: Captura, Transporte, y Almacenamiento de Dióxido de Carbono en Relaves mediante Líquidos Iónicos y Carbonatación Mineral. *Información tecnológica*, 30 (5), 357-372. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642019000500357>

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. & Mera, A. (2022). Recuperación de compuestos de hierro y soluciones de cobalto de relaves mineros. REVISIÓN TECHNO. *Revista Internacional de Tecnología, Ciencia y Sociedad*, 12 (4), 1-12. <https://doi.org/10.37467/revtechno.v11.4492>

Zamarreño, R., Godoy, C., Ramírez, L. & Abarca, A. (2020a). Recuperación de compuestos de hierro presentes en el relave inactivo del humedal el culebrón. generando una ganancia económica y ambiental. *Avances en Ciencias*

e Ingeniería, 11 (1), 31-40. <https://www.executivebs.org/publishing.cl/avances-en-ciencias-e-ingenieria-vol-11-nro-1-ano-2020-articulo-4/>

Zamarreño, R., Cabana, R., Vergara, K & Cortez, S. (2020b). Desplazamiento de elementos metálicos en el estero El Culebrón, por la presencia de un relave minero abandonado, Coquimbo – Chile. *Revista u.d.c.a Actualidad & Divulgación Científica*, 23 (2). <http://doi.org/10.31910/rudca.v23.n2.2020.1656>

Zamarreño, R., Gonzalez, P., Hanshing, E., Amar, A. & Pizarro, C. (2013). Evaluación del riesgo ambiental por la presencia de mercurio en relaves mineros dentro de la ciudad de Andacollo, Chile. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 4 (4), 75-83. <https://www.executivebs.org/publishing.cl/avances-en-ciencias-e-ingenieria-vol-4-nro-4-ano-2013-articulo-6/>

Zamora, G., Blanco, W. & Hinojosa, O. (2019). Economía circular en minería: procesamiento de desmontes como alternativa de remediación ambiental. *Revista de Medio Ambiente y Minería*, 4 (2), 3-18. Recuperado en 25 de julio de 2023, de http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2519-53522019000200001&lng=es&tlng=es