

RECUPERACIÓN DE COMPUESTOS DE HIERRO PRESENTES EN EL RELAVE INACTIVO DEL HUMEDAL EL CULEBRÓN, COQUIMBO - CHILE. GENERANDO UNA GANANCIA ECONÓMICA Y AMBIENTAL

RECOVERY OF IRON COMPOUNDS PRESENT IN THE EL CULEBRÓN WETLAND INACTIVE TAIL. GENERATING AN ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL GAIN

Ricardo Zamarreño ^{1,2}, Catalina Godoy ¹, Lucía Ramírez ¹, Alejandra Abarca²

(1) Universidad de La Serena, Facultad de Ciencias, Departamento de Química, Benavente 980, La Serena - Chile

(2) Universidad Pedro de Valdivia, Sede La Serena, Facultad de Ingeniería, Av. Cuatro esquinas 060, La Serena - Chile
(email: rzamarre@userena.cl)

Recibido: 05/11/2019 - Evaluado: 29/11/2019 - Aceptado: 27/12/2019

RESUMEN

Se presentan, los resultados de recuperación de compuestos de hierro en el relave minero, ubicado en un humedal de Coquimbo, Chile. Los principales elementos encontrados son: hierro 16.34%, aluminio 6.91%, calcio 3.41%, magnesio 1.39 y cobalto con 1.40%. 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 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.

ABSTRACT

The results of recovery of iron compounds in the mining tailings, located in a wetland of Coquimbo, Chile, are presented. The main elements found are iron 16.34%, aluminum 6.91%, calcium 3.41%, magnesium 1.39 and cobalt with 1.40%. Three chemical and two physical iron separation processes were carried out, the latter, through magnetic separation, obtaining 67.16% of magnetic components, the chemical processes were treating the tailings with 25% hydrochloric acid, removing 41.59% of the tailings material, obtaining a solution rich in iron and this, was subsequently treated with a solution of sodium hydroxide at pH 12, obtaining ferric hydroxide. In the processes it was not possible to selectively separate the iron, but mixtures were obtained that are economically important such as iron, cobalt, aluminum, which can subsequently be separated by traditional means. In addition, a decrease in tailings volume was achieved

Palabras claves: relaves mineros, recuperación de elementos importantes, sustentabilidad ambiental, minerales de hierro

Keywords: mining tailings, recovery of important elements, environmental sustainability, iron ores

INTRODUCCIÓN

Los relaves consisten en lodos de proceso (roca molida y efluentes) que se generan en una planta de procesamiento de minerales. Los procesos mecánicos y químicos que se utilizan para extraer el mineral, generalmente de cobre, oro, plata y/o molibdeno producen una corriente de desechos conocida como relaves. Este proceso de extracción de productos nunca es 100% eficiente, ni es posible recuperar todos los reactivos y químicos utilizados en el proceso. Por lo tanto, metales, minerales, sustancias químicas, sustancias orgánicas y agua de procesos no recuperables y no rentables, se descargan, normalmente en forma de lodo, a un área de almacenamiento final, comúnmente conocida como depósito o almacenamiento de relaves. No es sorprendente que las características físicas y químicas de los relaves, sus métodos de manejo y el almacenamiento sean de gran preocupación social, lo que constituye para la gestión de la minería sostenible uno de los principales desafíos que debe enfrentar a nivel mundial esta industria, dado los potenciales impactos en la salud de las personas y los ecosistemas (Valderrama *et al.*, 2019).

Las actividades mineras y sus residuos han generado la respuesta de una sociedad que hoy está más comprometida con los procesos sociales y ambientales, está históricamente vinculada a cuestiones relacionadas con la clase trabajadora, implicada en sus condiciones de trabajo, salario, y en algunos contextos, como en los Estados Unidos, el racismo ambiental y una carga desproporcionada de contaminación en las comunidades más vulnerables y los grupos étnicos minoritarios (Martínez, 2001). Según Matos y Fernandes (2019), quienes analizaron conflictos entre la minería y la población, pudieron visibilizar estos problemas, logrando en algunos casos cambiar la legislación en el área de la minería.

En el continente sudamericano se ha instalado un sistema de crecimiento económico extractivista, que por lo general no respetaba a las comunidades y el medio donde se desarrollaba la actividad industrial minera, generando problemas de contaminación en los distintos medios ambientales; agua, suelo y atmósfera (López-Sánchez *et al.*, 2017).

Estos problemas ambientales, sociales y de salud, que generan las actividades mineras, están ampliamente documentados en el continente americano. La Rotta & Torres (2017), describen los problemas producidos en la localidad de Potosí en Bogotá, encontraron una relación entre los problemas ambientales, sociales y de salud, que se generan con el actual sistema de producción industrial existente, considerando que una importante fuente de la generación de estos problemas son la actividad minera y sus residuos generados.

En la ciudad de Andacollo, región de Coquimbo-Chile, existe una importante actividad minera de metales de oro y cobre. En esta ciudad existen varios relaves mineros derivados de estos procesos, en donde el contenido de mercurio es significativo, el cual que puede entrar en contacto con la población, provocando problemas de salud (Zamarreño *et al.*, 2013).

Al norte de la ciudad de La Serena, Chile, se encuentra ubicada una importante industria de la minería del hierro, con sus respectivos relaves. Zamarreño y Díaz (2010), midieron la cantidad de material particulado respirable (P.M. 2.5) y su composición química, en la atmósfera de esta ciudad, encontrándose que la concentración promedio anual de P.M. 2.5 es de 38,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y que la mayor cantidad de componentes era del tipo metálico, con mayor presencia del hierro, considerando la ubicación del yacimiento y la dirección del viento predominante, concluyeron que parte del material del relave era arrastrado por el viento y llevado hacia la ciudad.

El impacto de los relaves mineros se ha tratado de minimizar, usando especies vegetales, como arbustos nativos e introducidos. Según Pizarro *et al.* (2016), la especie *A. saligna* es la mejor para actividades de fitoestabilización en relaves mineros de la Región de Coquimbo.

Los problemas ambientales de la minería y sus desechos no solamente afectan al medio de grandes ciudades, también afectan a los glaciares rocosos. Estudios han demostrado que en Chile, Argentina y Perú existen 26 faenas mineras que están afectando la estabilidad de estos glaciares y de su recurso hídrico (Brenning & Azócar, 2010).

Estos relaves mineros provocan amplios problemas ambientales y sociales, pero es importante reconocer que también tienen elementos que son de interés económico. Zamarreño *et al.* (2019), encontraron importantes concentraciones de Fe y Al, además de otros elementos en pequeñas cantidades. En esta línea Chile es un país que posee una importante cantidad de relaves mineros, lo que hace necesario una nueva mirada de este pasivo ambiental. CORFO (Corporación de Fomento de la Producción), que es un organismo del estado de Chile ha desarrollado programas de recuperación de elementos importantes económicamente como las tierras raras, hierro y otros elementos que pueden estar presentes en los relaves mineros. Si bien el gran volumen de material de los relaves está constituido por no metálicos de bajo valor, el mayor potencial económico está dado por constituyentes como cobalto, hierro, cobre, molibdeno, oro y plata. Si se logra hacer un buen balance técnico-económico, la recuperación de los materiales más valiosos podría pagar un proceso que tendría un efecto ambiental muy positivo (Ulloa *et al.*, 2009).

En la ciudad de Bogotá, existe una importante industria minera de la construcción, que ha generado numerosos pasivos ambientales, constituidos por las instalaciones mineras abandonadas o inactivas, áreas expuestas a remociones en masa que en la actualidad generan impactos negativos severos que afectan a la población y los ecosistemas. Se han propuesto metodologías de evaluación del impacto ambiental, que permita analizar los pasivos ambientales presentes en esta ciudad y así, determinar las posibles obras de mitigación que permitan darle un nuevo uso a esta zona, como pueden ser zonas verdes y/o áreas de recreación (García *et al.*, 2014).

La valorización económica y ambiental de los relaves es un proceso relativamente nuevo en nuestro país, ya que existen pocas experiencias que hemos podido encontrar, entre ellas, se encuentra la realizada en la compañía Los Colorados en la Región de Atacama en Chile, donde recuperan parte del mineral que se encuentra en los relaves, a través de un proceso magnético y lo mezclan con mineral concentrado, obteniendo una mejor ley de su producto, (Martínez & Merino, 2019).

Existen programas iniciales en el que se pretende recuperar elementos de las tierras raras que pueden estar presentes en los relaves de la minería del hierro en Chile (Revista Minería Chilena, 2018).

Estrada (2012), analizó la factibilidad técnica y económica de recuperar oro y plata desde el depósito de relaves de Minas de la región de Valparaíso, determinando que el procedimiento adecuado para procesar el mineral del depósito de relaves consiste en una remolienda del mineral hasta 100% bajo 75 μm y posterior lixiviación con NaCN. El proceso productivo es el mismo con que se realiza, desde el mineral nuevo procedente de la mina, con la diferencia que este nuevo proceso comienza en la etapa de remolienda del mineral eliminando la etapa de chancado y sustituyendo la de molienda. Romero *et al.* (2009), llevaron a cabo experiencias similares, en donde recuperaron oro y plata a partir de relaves mineros usando procesos minero-metalúrgicos tradicionales.

Tomando en consideración estos argumentos expuestos, el objetivo de este trabajo es proponer una nueva visión de tratar los relaves como un pasivo ambiental que, con el uso de las técnicas químicas y físicas, se pueden recuperar elementos valiosos económicamente y a la vez reducir o eliminar completamente del ambiente los relaves mineros.

MÉTODOS Y MATERIALES

La metodología se puede dividir en tres etapas. La primera es determinar la cantidad de elementos presentes en el relave del humedal. Para ello se tomaron tres muestras de material del relave que se encuentran en el humedal, estas se presentan en la figura 1 (simbolizados como R1, R2 y R3).

Se realizaron calicatas de 40x40x40 cm y las muestras se tomaron de abajo hacia arriba, con palas de polietileno. Posteriormente en el laboratorio, el material extraído se secó a 130 °C por 24 horas, se tamizaron bajo la malla 100 (W.S. Tyler), procediendo con un ataque ácido el cual está conformado con ácido hipocloroso, ácido nítrico y ácido clorhídrico, (todos los reactivos tipo para análisis P.A. marca Merck), en una relación 1:3:5, posteriormente se lleva

a sequedad y se afora a 100 mL midiendo la concentración de los metales a través del método de espectroscopia de absorción atómica (Workman *et al.*, 2003), para lo cual se utiliza un equipo de Shimadzu modelo AA-6880.

En la segunda etapa, se determinó la cantidad promedio del principal elemento de la primera etapa, que es el hierro. Para posteriormente proponer algunas técnicas de extracción considerando las posibles ganancias económicas que se podrían obtener y ambientales.

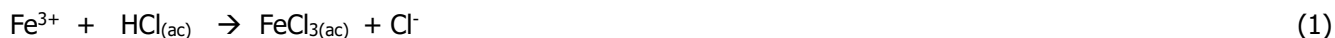
Se recogieron muestras en los mismos puntos, pero las calicatas aumentaron su profundidad hasta en 80 cm y se tomaron dos muestras, las primeras de 80 a 40 cm y las segundas de los 40 a los 0 cm, se secaron a 130 °C por 24 horas en una estufa marca Binder cuyo rango de temperatura es de temperatura ambiente a 350 °C, con convección natural, se tamizaron bajo la malla 100. Posteriormente se determinó la concentración de hierro por la metodología descrita anteriormente.



Fig 1: Muestra la ubicación del relave minero presente en el humedal y los puntos de muestreo, simbolizados con R1, R2 y R3 (Fuente: Google Earth, 2019)

En la tercera etapa, se tomaron 500 g de cada punto de muestreo y se combinaron hasta lograr obtener una mezcla uniforme, y posteriormente se realizaron las siguientes etapas:

- Separación magnética: se toman aproximadamente 11 g de la mezcla y se pone en contacto con un imán, separando los componentes magnéticos presentes en la muestra.
- Lixiviación con ácido clorhídrico al 25%: se toman aproximadamente 20 g de muestra y se ponen en contacto con 200 mL de ácido clorhídrico al 25%, durante 48 horas, disolviendo los compuestos de hierro a través de la siguiente reacción:



Determinando la concentración de hierro en la solución formada a través del método de espectroscopia de absorción atómica (Workman *et al.*, 2003).

- Precipitación del hidróxido férrico: Para ello se tomaron 4 grupos de solución inicial y la reacción se realizó en triplicado por grupo. Se toman 20 mL de la solución de lixiviación y se le agregan 30 mL de una solución de hidróxido de sodio pH 12, precipitando el hierro como hidróxido férrico $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Posteriormente se filtra, se seca a 120 °C, se pesa y se calcula la masa de hierro precipitada.

Todos los reactivos empleados tienen la categoría para análisis (P.A.), de la marca Merck.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La concentración de los elementos presentes en el relave del humedal el Culebrón, de la primera etapa del programa se presenta en la tabla 1 y en las figuras 2 y 3.

Tabla 1: Elementos presentes en el relave minero del humedal el Culebrón.

Muestra N°	% Cu	% Fe	% Ca	% Mg	% Al	% Si	As ppm	Pb ppm	Ag ppm	Zn ppm	Co ppm
R1	1,1	4,48	3,07	0,99	8,22	26,41	30	2	14	65	1452
R2	0,13	15,3	3,26	1,67	6,47	20,89	49	53	3	95	1517
R3	0,06	12,56	3,9	1,52	6,04	23,52	32	124	7	210	1244
Promedio	0,43	10,78	3,41	1,39	6,91	23,61	37,00	59,67	8,00	123,33	1404,33
Desv. Promed	0,45	4,20	0,33	0,27	0,87	1,87	8,00	42,89	4,00	57,78	116,44

De la tabla 1 y la figura 2, se observa que las mayores concentraciones de elementos metálicos son el hierro con 10.78%, le sigue aluminio con 6.91%, el calcio y el magnesio. Según la figura 3, los elementos que están en menor cantidad, el principal es el cobalto con 1404 ppm, le sigue el zinc con 123,33 ppm, el plomo con 59,67 ppm.

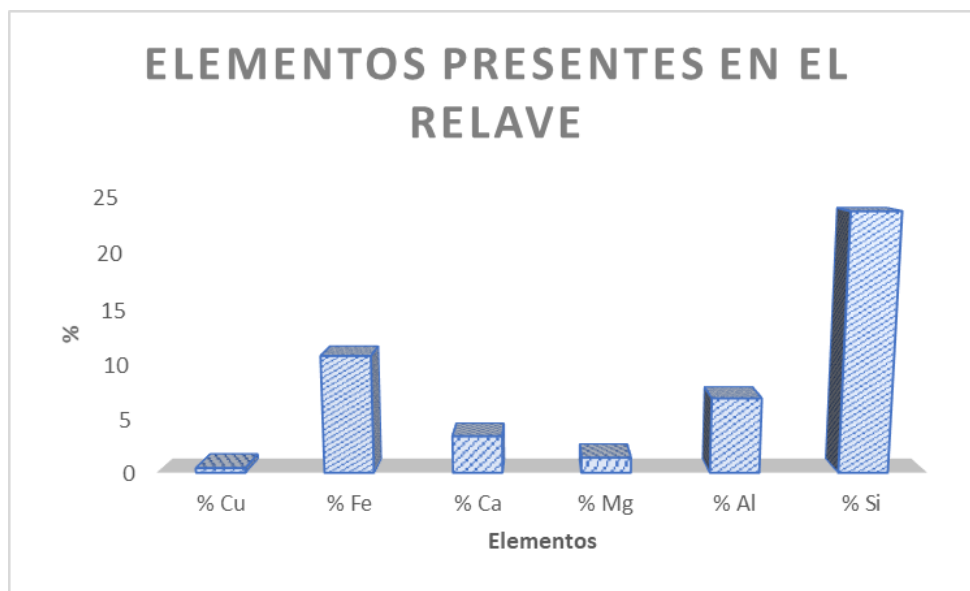


Fig. 2: Contenido de elementos en mayor porcentaje presente en el relave.

Considerando que el hierro es el elemento en mayor cantidad, se determinó con mayor detalle la concentración de este elemento. Esto se muestra en la tabla 2.

La tendencia de los valores a nivel mundial de los minerales de hierro se muestra en la figura 4, observando una tendencia variable entre aumento y disminución del valor de estos minerales desde el año 2014 hasta la fecha. Un elemento importante que muestra esta figura es que el valor actual es superior al mínimo que se produjo en diciembre del 2015.

Por las concentraciones de este elemento encontrados (ver tabla 2), y los valores observados de la figura 4, se puede inferir que la recuperación de este elemento del relave generara una ganancia económica y ambiental.

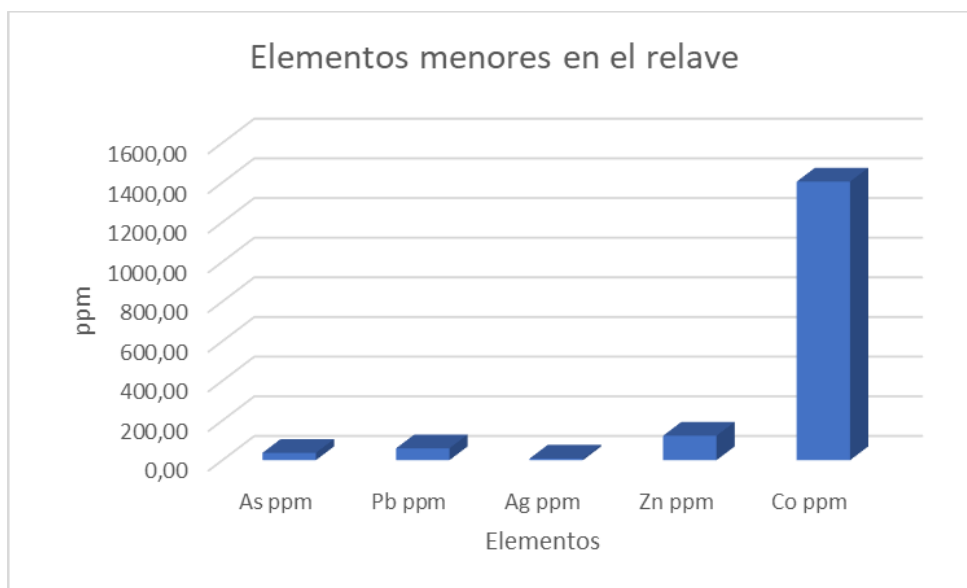


Fig. 3: Contenido de elementos en menor cantidad presente en el relave.

Tabla 2: Concentración de hierro en el relave.

Muestra	(1) % Fe	(2) % Fe	Promedio % Fe
R1	7,88	7,56	7,72
R1.2	7,1	6,57	6,83
R2	25,03	20,97	23
R2.2	24,09	22,21	23,15
R3	22,55	19,41	20,98
Promedio general			16,34
Desv. Prom			7,25

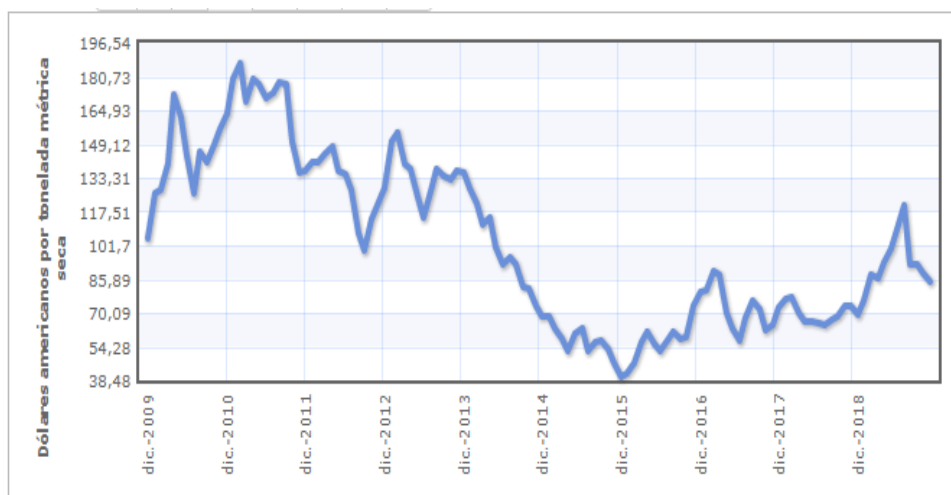


Fig. 4: Variación histórica de minerales de hierro. (Fuente: <https://www.indexmundi.com>).

Separación magnética

Los resultados de la separación magnética de los minerales de hierro, se presente en la tabla 3.

Al observar la tabla 3, se puede ver que la cantidad de material separado es de un $67.16\% \pm 2.74\%$, indicando que no solamente está separando compuestos de hierro, además puede separar otros componentes magnéticos como el cobalto (López *et al.*, 2010), que está presente en el relave.

Tabla 3: Cantidad de minerales de hierro separados por magnetismo.

Muestra (g)	Masa separada (g)	% de separación
12,38	8,78	70,92
10,192	6,772	66,44
11,642	7,263	62,39
12,583	8,666	68,87
Promedio		67,16
Desv. Prom		2,74

La presencia del cobalto en los componentes magnéticos le entrega un valor agregado a la mezcla, ya que este elemento es codiciado para darle firmeza a aleaciones de oro y últimamente en el concepto de la electromovilidad, (Restrepo-Arcila *et al.*, 2018).

Estos resultados están en concordancia con los obtenidos por Martínez & Merino (2019), en la recuperación de mineral de hierro extraído del relave y mezclarlo con mineral fresco, indicando que es factible usar este método de recuperación y obtener una retribución económica y ambiental.

Lixiviación con ácido clorhídrico al 25%

Los resultados de la lixiviación de las muestras de relave con ácido clorhídrico se muestran en la tabla 4.

Tabla 4: Extracción de hierro del relave con lixiviación de una solución de ácido clorhídrico al 25%

Muestra relave seco (g).	Vol HCl (mL)	% remanente de relave	% de extracción de Fe.
20,096	200	61.58	98,50
20,005	200	50.94	95,00
20,001	200	58.20	96,36
20,005	200	62.89	89,80
Promedio		58.42	94,92
Desv. Prom		4.64	2,56

Se puede observar que el porcentaje de extracción del hierro, mediante la lixiviación con ácido clorhídrico al 25%, fue efectiva, ya que se obtiene en solución un 94,92% del hierro que estaba en el relave.

Al observar el remanente del relave que queda después de la lixiviación, se observa nuevamente que hay otros elementos que se extrajeron, entre ellos se puede suponer que los óxidos de aluminio que estaban presentes en el relave también pasaron a solución. Esta mezcla es importante desde el punto de vista económico, ya que la

mezcla cloruro férrico/cloruro de aluminio, se emplean como trampas para sedimentos en piscinas, con un valor entre los U\$ 200 – 300 la tonelada (fuente: <https://spanish.alibaba.com/g/ferric-chloride-price.html>. 2019).

Este proceso es novedoso, ya que no se ha encontrada información, que se obtiene un producto de uso industrial a partir de un tratamiento químico de un relave minero. Con esto se elimina una serie de etapas intermedias para obtener el cloruro férrico. La solución de cloruro férrico al 40%, se comercializa a un valor aproximado de U\$ 32 el contenedor de 25 L (<https://www.vadequimica.com/cloruro-ferrico-liquido-40-25litros.html>), que puede ser empleado como coagulante/floculante para tratamiento de aguas y efluentes. Obteniendo nuevamente una ganancia económica para este producto.

Precipitación del hidróxido férrico

Los resultados para transformación del cloruro férrico en hidróxido férrico se presentan en la tabla 5.

Tabla 5: Cantidad de hidróxido de sodio obtenido a partir de las soluciones de lixiviado.

Volumen muestra (mL)	Volumen de NaOH 0,01 M (mL)	Precipitado formado (g)
20	30	1,18
20	30	1,59
20	30	1,97
20	30	1,81
Promedio		1,64
Desv. Prom		0,25

Nuevamente se puede apreciar que la cantidad de hidróxido férrico formado es mayor que el calculado estequiométricamente, evidenciando que existe una coprecipitación, que puede ser de hidróxido de aluminio y de cobalto, dándole un valor agregado a la mezcla formada.

Al analizar los valores del hidróxido de hierro III, este varía entre U\$ 830 – 900 la tonelada al 95% de pureza, (fuente: <https://spanish.alibaba.com/g/iron-hydroxide.html>), empleándose en la fabricación de pinturas, la elaboración de medicamentos y también pueden ser utilizados para antídoto del arsénico ([https://www.ecured.cu/Hidr%C3%B3xido de hierro III](https://www.ecured.cu/Hidr%C3%B3xido%20de%20hierro%20III)).

Todos los productos de hierro obtenidos, provenientes del tratamiento del relave, con un proceso físico y dos químicos, generan una ganancia económica y estos productos son ampliamente usados en actividades industriales. Además, los requisitos técnicos necesarios para obtener estos compuestos no son complejos, ya que son ampliamente usados en faenas minero metalúrgicos.

Desde la mirada ambiental, también se genera una ganancia, ya que se reduce el volumen del relave entre un 32,84 a 58,40%.

CONCLUSIONES

Con los resultados obtenidos podemos concluir lo siguiente:

Los relaves mineros, pueden ser tratados desde una nueva perspectiva, no como un desecho minero industrial, por lo contrario, como un pasivo ambiental que puede generar ganancias económicas a sus propietarios y a la vez una ganancia ambiental, ya que disminuimos su presencia en el ambiente.

EL hierro al ser el elemento mayoritario, presente en el relave minero puede ser extraído, usando técnicas minero-metalúrgicas sencillas y de amplio uso.

Se puede aprovechar la característica magnética que poseen algunos compuestos del hierro, para ser separado del material estéril, logrando una recuperación del 67.16%, del mineral de hierro. Además de extraer otros minerales que poseen esta característica, como los minerales de cobalto.

Al hacer reaccionar el relave con la solución de ácido clorhídrico al 25%, se obtiene una solución de cloruro férrico mezclado con cloruro de aluminio, ampliamente usado en la mantención de las piscinas.

El otro uso de esta solución es en los procesos de coagulación y floculación en los tratamientos de agua. En ambos casos estos productos son ampliamente usados en estas actividades y generan una ganancia económica.

El tercer producto que se obtiene es el hidróxido férrico, que también es muy usado en actividades industriales y genera también ganancias económicas.

Otro factor importante que los relaves no necesitan procesos de conminución, para producir los procesos de separación o transformación de los minerales de hierro. Generando un importante ahorro.

Es necesario poder continuar con estos estudios, ya que hay otros elementos importantes económicamente presentes en los relaves, como el cobalto, que es ampliamente usado en la industria de la electromovilidad. Las tierras raras, que se han encontrado en relaves mineros en cantidades interesantes económicamente.

Desde el punto de vista ambiental se está reduciendo el volumen o eliminando del medio la presencia de estos pasivos ambientales, convirtiendo una actividad económica, muy criticada por ser contaminante en una industria sustentable.

REFERENCIAS

- Brenning, A. & Azócar, G.F. (2010). Minería y glaciares rocosos: impactos ambientales, antecedentes políticos y legales, y perspectivas futuras. *Revista de geografía Norte Grande*, 47, 143-158. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022010000300008>
- Estrada, J. (2012). *Diseño de procesos para recuperar oro y plata desde el depósito de relaves de minera Meridian*. Proyecto para optar al título de Ingeniero Civil en Metalurgia Extractiva. Universidad Católica de Valparaíso. http://opac.pucv.cl/pucv_txt/txt-4500/UCF4959_01.pdf. (visto diciembre 2019)
- García, C.A., García, M.C. & Agudelo, C.F. (2014). Evaluación y diagnóstico de pasivos ambientales mineros en la Cantera Villa Gloria en la localidad de Ciudad Bolívar, Bogotá D.C. *Tecnura*, 18 (42), 90-102. Retrieved January 14, 2020, from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-921X2014000400008&lng=en&tling=es
- 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/10.1590/0103-1104201711207>
- López, M., Ortiz, V., Gómez, M.E., Reyes, D., Mangalaraja, R., Prieto, P., *et al.* (2010). Caracterización microestructural de las aleaciones base cobre Cu95Co5 y Cu90Co5Ni5 obtenidas por aleado mecánico y sinterización. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 30 (2), 141-148. Recuperado en 17 de enero de 2020, de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0255-69522010000200006&lng=es&tling=es

López-Sánchez, L.M., López-Sánchez, M.L. & Medina-Salazar, G. (2017). La prevención y mitigación de los riesgos de los pasivos ambientales mineros (PAM) en Colombia: una propuesta metodológica. *Entramado*, 13 (1), 78-91. <https://dx.doi.org/10.18041/entramado.2017v13n1.25138>

Martínez, C. & Merino, A. (2019). *Factibilidad técnica y económica del proceso de concentración de hierro de baja ley en planta de rechazo de mina los colorados*. Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil en minas y el Grado de Licenciado en Ciencias de la Ingeniería. Universidad Pedro de Valdivia. La Serena, Chile.

Matos, A.R & Fernandes, L. (2019). Quando nem a palavra é de prata, nem o silêncio é de ouro: Análise de conflitos sobre mineração em Portugal. *Sociologia*, 37, 11-30. <https://dx.doi.org/10.21747/08723419/soc37a1>

Martínez, J. (2001). Conflictos mineros, justicia ambiental y valoración. *Journal of Hazardous Materials*, 86, 153-170.

Pizarro, R., Flores, J.P., Tapia, J., Valdés-Pineda, R., González, D., Morales, C., *et al.* (2016). Forest species in the recovery of soils contaminated with copper due to mining activities. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 22 (1), 29-43. <https://dx.doi.org/10.5154/r.rchscfa.2014.06.026>

Restrepo-Arcila, S.M., Echavarría-Velásquez, A.I., Sánchez-Londoño, H.D. & Giraldo-Cadavid, M.A. (2018). Study of the influence of cobalt in the high formability of the Au-Fe system. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 89, 9-15. <https://dx.doi.org/10.17533/udea.redin.n89a02>

Revista Minería Chilena (2018). "Programa Corfo: Recuperación de valor desde relaves cada vez mas cerca", https://issuu.com/revistamch/docs/mch_447/80 (Visto diciembre 2019)

Romero, A., Silvana, B. & Chávez, F. (2009). Obtención de metales preciosos a partir de residuos sólidos mineros o relave. *Revista de la Facultad de Ingeniería Industrial*, 12 (1), 41-46. <https://www.redalyc.org/pdf/816/81620149007.pdf>. (Visto diciembre 2019)

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>

Ulloa, A., Parada, F., Carrasco, J.C. & Sánchez, M. (2009). Valorización de Pasivos Mineros: Caso relaves. *Revista Nueva Minería y Energía*, 7, 78-79 http://www.nuevamineria.com/numero7/medio_ambiente.php (visto diciembre 2019)

Workman, J., Koch, M. & Veltkamp, J. (2003). Process analytical Chemistry. *Analytical Chemistry*, 75(12), 2859-2876.

Zamarreño, R., Cortes, S. & Vergara, K. (2019). *Desplazamiento geoquímico de elementos metálicos presentes en el relave minero inserto en la desembocadura del estero el Culebrón, en la ciudad de Coquimbo, Chile*. Actas III Congreso Binacional de Investigación Científica. San Juan, Argentina (octubre 2019).

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.

Zamarreño, R. & Diaz, C. (2010). Cuantificación de Elementos Metálicos Presentes en el Material Particulado PM 2,5 en la Atmósfera de la Ciudad de La Serena. Chile. *Avances en Ciencia e Ingeniería*, 1 (1), 27-33.