

Desplazamiento de elementos metálicos en el estero El Culebrón, por la presencia de un relave minero abandonado, Coquimbo – Chile

Displacement of metallic elements in the El Culebrón estuary, due to the presence of an abandoned mining tailings, Coquimbo – Chile

Ricardo Zamarreño¹; Ricardo Cabana²; Karen Vergara³; Susana Cortez⁴

¹Lic. en Química, Ph.D. Universidad Pedro de Valdivia, Escuela de Ingeniería, La Serena-Chile; e-mail: rzamarre@userena.cl; <http://orcid.org/0000-0002-7967-6999>

²Lic. en Ciencias de la Ingeniería, Ing. Civil Industrial, M.Sc. Universidad de La Serena, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil Industrial, La Serena-Chile; e-mail: rcabana@userena.cl; <http://orcid.org/0000-0002-9362-9742>

³Químico Laboratorista. Universidad de La Serena. La Serena-Chile.

⁴Escuela de Ingeniería Universidad Pedro de Valdivia, La Serena-Chile.

Cómo citar: Zamarreño, R.; Cabana, R.; Vergara, K.; Cortez, S. 2020. Desplazamiento de elementos metálicos en el estero El Culebrón, por la presencia de un relave minero abandonado, Coquimbo – Chile. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 23(2):e1656. <http://doi.org/10.31910/rudca.v23.n2.2020.1656>

Artículo de acceso abierto publicado por Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, bajo una licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0

Publicación oficial de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Institución de Educación Superior Acreditada de Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional.

Recibido: Julio 28 de 2020 **Aceptado:** Noviembre 24 de 2020 **Editado por:** Ingeborg Zenner de Polanía

RESUMEN

La presencia de residuos mineros en la región de Coquimbo es un serio problema, que impacta al medio ambiente y a la sociedad. Se estudió el impacto que genera la presencia de un relave abandonado, ubicado en el humedal el Culebrón, que es costero y urbano, determinando la cantidad y la movilidad de algunos elementos, que se encuentran presentes en este relave. Se realizaron dos etapas de muestreos del suelo en la zona del humedal y en el relave, que fueron sometidas a digestión ácida y cuantificación, mediante espectrofotometría de absorción atómica. Los metales con mayor concentración fueron el hierro, seguido del aluminio y, en menor cantidad, zinc, arsénico y plomo. El aluminio tuvo un comportamiento distinto a los demás, ya que presentó baja

concentración en el relave y concentraciones equivalentes en las distintas áreas muestreadas, dando la idea que está naturalmente en el humedal. El arsénico presentó una gran movilidad, puesto que su mayor concentración está en el límite del relave y su concentración varió en las distintas zonas del humedal. Del estudio, se concluyó que la distribución de estos elementos en la zona de estudio, se debe a dos factores importantes; el primero, por el proceso geoquímico natural de movilidad de estos componentes y el segundo y más importante es el tsunami que sufrió la comuna de Coquimbo, en 2015.

Palabra clave: Solubilidad de metales; Humedal; Caracterización química; Movilidad de metales.

ABSTRACT

The presence of mining waste in the Coquimbo Region is a serious problem, which impacts the environment and society. The impact generated by the presence of an abandoned tailings located in the El Culebrón wetland, which is coastal and urban, was studied, determining the quantity and mobility of some elements that are present in this tailings. Two stages of soil sampling were carried out in the wetland area and in the tailings, which were subjected to acid digestion and quantification by atomic absorption spectrophotometry. The metals with the highest concentration were iron, followed by aluminum, in less quantity were zinc, arsenic, and lead. Aluminum had a different behavior from the others, since it presented low concentration in the tailings, and equivalent concentrations in the different sampled areas, giving the idea that it is naturally in the wetland. Arsenic was highly mobile, since its highest concentration is at the tailings limit and its concentration varied in the different areas of the wetland. From the study, it was concluded that the distribution of these elements in the study area is due to two important factors, the first due to the natural geochemical process of mobility of these components and the second and most important is the tsunami suffered by the commune of Coquimbo in 2015.

Keywords: Solubility of metals; Wetland; Chemical characterization; Metal mobility.

INTRODUCCIÓN

La minería de sulfuros de cobre extrae grandes cantidades de material del yacimiento que se explota. Un porcentaje menor corresponde al mineral y el resto es material estéril, que se denomina “relave” y se debe depositar de forma segura y ambientalmente responsable (SERNAGEOMIN, 2019).

Los depósitos de relaves son un tema importante a considerar, al momento de evaluar los procesos mineros. La cantidad de residuos que deben ser dispuestos, tanto en tranques como en embalses, poseen altas concentraciones de elementos y de compuestos químicos, que transforman, de manera irreparable, el medio ambiente (Yurisch, 2016).

En Chile, hasta marzo de 2018, se han catastrado 740 depósitos de relave, distribuidos en 65 de las 246 comunas del país; la mayor parte de los depósitos, se encuentran en las regiones de Atacama y Coquimbo, representando un 21,7 y 52,1% del total, respectivamente (SERNAGEOMIN, 2019).

Entre los principales compuestos que poseen los relaves, se encuentran diversos metales pesados y tóxicos, como arsénico, cadmio, cromo, cobre, mercurio y plomo, entre otros. Su disponibilidad varía dependiendo del tipo de extracción minera y de los años de acumulación. En los depósitos de relaves más antiguos existe una mayor presencia de compuestos contaminantes, como metales pesados y reactivos de los procesos de la flotación, debido a que las técnicas de extracción de metales eran menos eficientes y, por ende, más contaminantes (Romero *et al.* 2008).

El catastro de depósitos de relaves en Chile considera tres tipos de estado: Activos, Inactivos y Abandonados. A la fecha, no se han catastrado Depósitos Cerrados, que conformarían otro estado. De este inventario, se tienen: 101 depósitos activos, 170 depósitos abandonados y 469 depósitos inactivos. La región de Coquimbo tiene la mayor cantidad de depósitos inactivos (250) y abandonados (106); los depósitos activos son 30, igual que la Región de Atacama, aumentando los problemas históricos (SERNAGEOMIN, 2018).

La relación entre humedales y residuos mineros, se presenta en forma común en los países mineros. Baylón *et al.* (2018) determinaron la relación entre la riqueza de especies biológicas presentes en aguas de lagunas, que se encuentran contaminadas con metales provenientes de relaves mineros, observando que la variedad de hábitats presentes en estas lagunas, dependen de los componentes fisicoquímicos, producto de la presencia de metales pesados.

El impacto ambiental por la presencia de los relaves mineros es muy importante; se han investigado distintas formas de inmovilizar estos componentes, a través de plantas, que puedan soportar altas concentraciones de metales. Un estudio demostró que una de las especies más eficientes para fitoestabilizar suelos con presencia de relaves mineros en la región de Coquimbo es *Acacia saligna* (Labill) H. Wendl (Pizarro *et al.* 2016).

En sectores donde existe la presencia de vegetación, se ha determinado que la movilidad de elementos químicos presentes en relaves, se centra en mayor cantidad en las raíces y en las hojas (Jara-Peña *et al.* 2017).

Es importante señalar que, en la región de Coquimbo, existe una gran cantidad de pequeños productores mineros que, a través de pequeñas plantas de procesamiento de minerales, generan microrelaves. Se observa una relación directa entre la cantidad de plantas de procesamiento y la de depósitos de relave, lo cual, explica la gran cantidad de estos en las regiones, cuyo desarrollo económico dependió de la minería, a pequeña escala (Minería Chilena, 2019).

Se ha podido determinar que la movilidad de elementos metálicos en yacimientos y en relaves mineros en el área de Taxco, en México, se produce a través de suelos, en procesos geoquímicos, como son la disolución por agua geotermales y precipitación de estos elementos (Talavera *et al.* 2005).

Cortez *et al.* (2016) demostraron que, al agregar ácidos húmicos a suelos contaminados por metales pesados, éstos disminuyen su movilidad.

Por procesos biológicos, químicos y geológicos en los ecosistemas y a su toxicidad para las formas superiores de vida, los metales pesados, debido a su movilidad, son los contaminantes más importantes, por el alto riesgo que representan para el medio ambiente. Con el objeto de disminuir su concentración en suelos contaminados, Vizcaíno *et al.* (2015) diseñaron un sistema para evaluar su remoción, empleando biomasa de algas rojas, cáscaras de naranja (*Citrus* sp.)

y tuna guajira (*Opuntia* sp.), logrando remover Cd y Pb, en un 95% de estos elementos.

El Estero el Culebrón, se ubica en la ciudad de Coquimbo, en el extremo sur-oeste de la bahía del mismo nombre y formaba parte de un ecosistema húmedo de vegas existente en toda la línea costera de la bahía. Por el progreso de las ciudades de Coquimbo y de La Serena fue desecado durante la década de los cincuenta, con la construcción de obras civiles, que drenaron estas zonas y permitieron poblar y construir en estos lugares (CONAMA, 2009).

El estero corresponde al principal flujo hídrico superficial natural de la microcuenca de Pan de Azúcar y desemboca en el Océano Pacífico, en el sector de Playa Changa. La cuenca es del tipo preandina exorreica, con régimen pluvial (Rivera *et al.* 2009).

El humedal El Culebrón presenta una cantidad importante de diversidad biológica, tanto de especies autóctonas como introducidas (Figuroa *et al.* 2009).

Este humedal, se encuentra altamente intervenido, ya que presenta actividades antrópicas, como lugar de almacenamiento de escombros, venta de productos agrícola, a nivel de ferias y la presencia de un relave minero, que se depositó en la década de los 80 (Figuroa *et al.* 2009). Además, el 16 de septiembre del 2015, la desembocadura del humedal sufrió el embate del Tsunami, por consecuencia del terremoto que sufrió la región de Coquimbo (Guzmán, 2015). La magnitud del impacto generado por ese fenómeno, se presenta en la figura 1, donde se muestra hasta dónde ingresó el mar y la profundidad alcanzada ese día, según el área afectada.



Figura 1. Representación del ingreso del mar en las costas de Coquimbo, producto del tsunami, ocurrido en el 2015, incluyendo el humedal el Culebrón. La zona de estudio, se delimita con el trazo celeste (Fuente: Guzmán, 2015).

Según esta figura, el agua cubrió totalmente el humedal, incluyendo el relave presente, generando cambios en la flora, fauna y el relieve del humedal, afectando al relave, porque se produjo un desplazamiento de material por las olas que ingresaron, reduciendo el volumen del relave, por la dispersión del material en el área del humedal (Chávez-Villavicencio *et al.* 2019).

Es necesario recalcar que la presencia de estos pasivos ambientales podría ocasionar problemas ambientales a la población cercana; según Zamarreño *et al.* (2013), estudiaron la emanación de mercurio de relaves mineros presentes en Andacollo y cómo pueden entrar en contacto con la población.

Considerando los antecedentes expuestos anteriores es que se ha propuesto, como objetivo de esta publicación, determinar la concentración de los elementos químicos presentes en el relave, que se ubica en el humedal el Culebrón y si se han desplazado, a través del suelo adyacente del humedal.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para determinar la presencia de los elementos metálicos en el suelo y en el relave del humedal el Culebrón, se realizaron dos campañas de muestreo. La primera, se realizó en la primera semana de marzo del 2019, se tomaron cuatro muestras (Figura 2), donde la muestra M1, corresponde al nivel basal, las M2 y M4 a suelos adyacentes

del relave y M3 a muestra del relave. Esta primera etapa, se pudo determinar la línea base de los distintos elementos presentes.

El segundo periodo de muestras, se tomaron en la segunda semana de abril del mismo año, abarcando una mayor superficie. El punto R es de referencia, R1 a R3, son puntos del relave y R4 a R6 son

puntos limítrofes fuera del relave. Las muestras, se tomaron por triplicado, en una calicata de 20 x 20cm y una profundidad de 40cm. Ambas tomas de muestras se realizaron del mismo modo. Los puntos de toma de muestra, se presentan en la figura 2 y se representan con la letra R.



Figura 2. Lugares de toma de muestras en el estero el Culebrón. La zona marcada de azul indica los límites del relave (Fuente fotografía: Google Earth, 2019).

Todas las muestras, se tamizan a $150\mu\text{m}$, (en un tamiz W.S. Tyler) y se les eliminó la humedad a 120°C , en una estufa, marca Binder, modelo FD 23, fabricación alemana, cuyo rango de temperatura es de temperatura ambiente, a 350°C , con convección natural.

Se pesaron, aproximadamente, 15g de muestras y se transfirieron a un balón de reacción de 250mL, al cual, se le adicionaron 50mL de una mezcla de HCl, HNO_3 y H_2O , en una relación (3:1:1); los ácidos usados son concentrados y todos los reactivos tipo para análisis P.A. marca Merck, procediendo a dejar que se desarrollara la reacción por 24 horas, a temperatura ambiente. Se filtró el líquido sobrenadante por gravedad, con un papel filtro cuantitativo de tamaño de poro de $8\mu\text{m}$ y 150mm de diámetro del filtro. El filtrado, se recogió en un matraz volumétrico de 100mL y el residuo, en el papel de filtro, se lavó con unas gotas de HNO_3 $0,5\text{mol L}^{-1}$ y este filtrado, se recogió en el matraz; finalmente, el matraz se afora con agua destilada. Este extracto, se transfirió a una botella de vidrio y se rotuló para su posterior análisis de metales (Ramírez & Navarro, 2015).

Este procedimiento, se realizó en triplicado, para después cuantificar la concentración de los elementos analizados, utilizando un equipo de espectrofotometría de absorción atómica AA-6880 Shimadzu.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la figura 3, se muestran los elementos encontrados en el muestreo inicial, que se divide en dos: en la figura 3a, se exponen los elementos en mayor concentración y en la 3b, los elementos en bajas concentraciones, observando que los componentes más abundantes son el hierro (entre 2,1 y 43,6%), el silicio (entre 6,3 y 34,0%), le siguen el aluminio (con un rango de 1,3 y 7,3%) y el calcio (con 1,3 y 6,8%). De éstos, al comparar el valor del elemento silicio entre la línea base (M1) y el resto de los valores, se puede decir que está presente naturalmente en este medio. Un comportamiento equivalente presenta el aluminio, con baja concentración en la muestra M3, que es la del relave y en los otros puntos, su concentración es equivalente, lo que indicaría que está presente naturalmente en la zona de estudio.

Las concentraciones del hierro tienen un comportamiento muy distinto a los anteriores elementos, ya que tiene un alto valor en la muestra M3, correspondiente a la zona del relave, con 43,7% y en las otras áreas muestreadas presenta valores menores, indicándonos que su principal concentración está en el relave, que se asocia a la minería del cobre sulfurado, que presenta importantes concentraciones de hierro (Zamarreño *et al.* 2015).

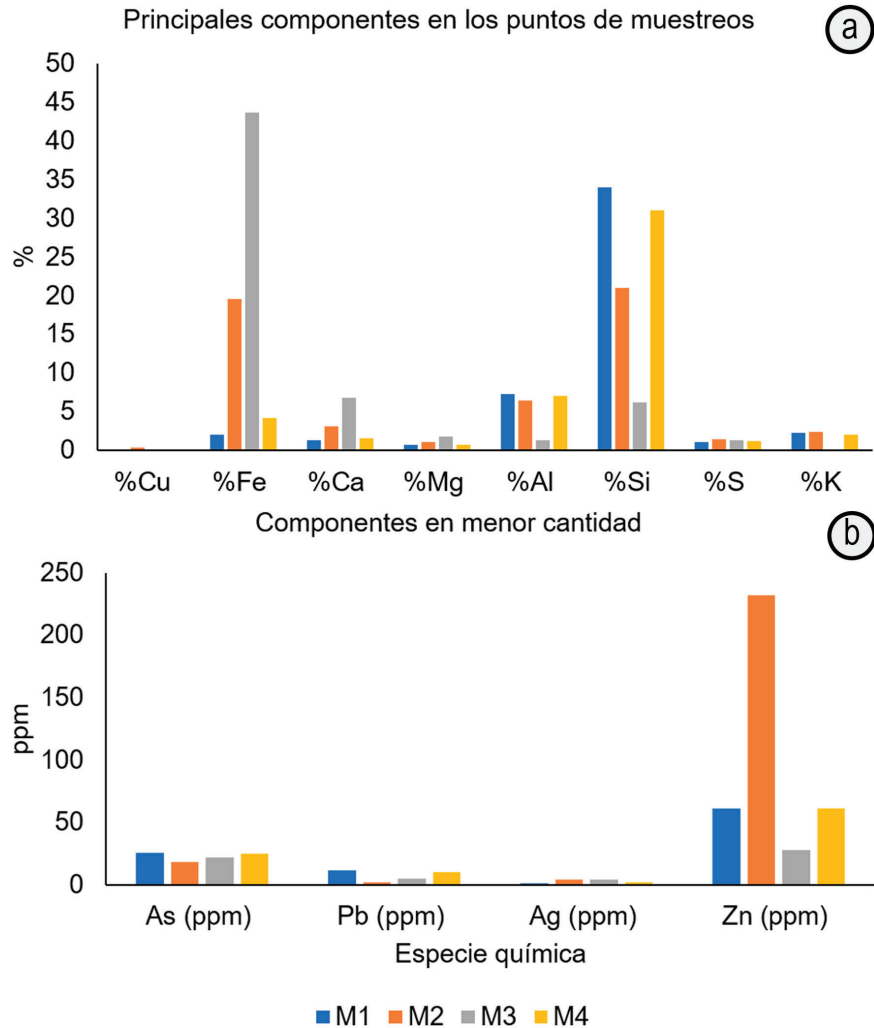


Figura 3. Concentración promedio de elementos metálicos encontrados en el primer muestreo. a. En mayor concentración; b. En menor concentración, presentes en suelos del humedal el Culebrón.

Los componentes que están en menor cantidad, en los suelos del humedal el Culebrón y el relave, sobresale el zinc (con un rango de 62 a 232ppm), teniendo un comportamiento similar al aluminio, le sigue el arsénico (entre 18 a 26ppm) y en menor cantidad, el plomo, con un rango de 2 a 12ppm.

A partir de estos resultados, se realizaron mediciones de los elementos presentes dándole énfasis a los que presentan mayores concentraciones y aquellos que muestran un mayor riesgo para el ambiente, por su toxicidad, como el arsénico y el zinc (Olmos *et al.* 2018).

En la tabla 1, se incluyen los resultados promedio de la segunda cuantificación de los distintos componentes presentes a distintas distancias del relave minero, presente en el humedal.

En esta tabla, nuevamente, se observa que el elemento que está en mayor cantidad es el hierro, pero su concentración varía en la zona de estudio, logrando valores que van desde 2,1 a 15,3%; al graficar

la concentración de este elemento, en los puntos muestreados, se aprecia en la figura 4a. Se percibe, claramente, tres grupos de puntos de concentración del hierro. El primero, en las que se encuentran las mayores concentraciones, en los puntos del relave (R2 y R3); un segundo grupo es el punto R1, que tiene una concentración significativamente menor que al grupo anterior, lo que indica, que la distribución del hierro en el relave no es uniforme. Un tercer grupo más numeroso, que van del R4 al R11, la concentración de este elemento es equivalente, pero levemente superior a la concentración del punto basal R.

Según estos resultados, la movilidad del hierro es limitada y la mayor cantidad, se ubica en la zona del relave. Esto se puede explicar, porque el pH del suelo de la zona de estudio es básico, por tratarse de un humedal costero, provocando que el hierro precipite, como hidróxido férrico o hidróxido ferroso, principalmente, en los límites del relave. Esto se confirma, porque a medida que nos alejamos del relave, hacia el cuerpo de agua, la cantidad disminuye.

Tabla 1. Concentración promedio de los principales elementos químicos presentes en suelos del humedal El Culebrón, a distintas distancias del relave minero y en el relave.

Muestra N°	% Cu	% Fe	% Ca	% Mg	% Al	% Si	As ppm	Pb ppm	Ag ppm	Zn ppm
R	0,002	2,1	1,3	0,7	7,3	34,0	26	12	1	61
R1	1,1	4,5	3,1	1,0	8,2	26,4	30	2	14	65
R2	0,13	15,3	3,3	1,7	6,5	20,9	49	53	3	95
R3	0,06	12,6	3,9	1,5	6,0	23,5	32	124	7	210
R4	0	2,9	2,5	0,7	7,1	30,3	30	7	1	43
R5	0,17	4,2	2,3	0,7	8,2	27,4	24	2	4	60
R6	0	3,2	2,4	0,8	7,5	30,1	32	9	1	58
R7	0	3,3	2,6	0,8	7,3	30,0	23	8	1	52
R8	0,04	3,8	3,1	1,5	7,2	27,6	31	8	2	68
R9	0	3,1	2,7	1,1	7,3	29,4	23	20	1	56
R10	0	2,5	2,3	0,7	7,6	30,1	24	11	1	52
R11	0	2,9	2,4	0,7	7,6	30,8	30	8	1	48

El segundo elemento con la mayor concentración es el aluminio, con valores extremos, de 6,1 a 8,2%, con una distribución en la zona de estudio, que se puede apreciar en la figura 4a, notando que el comportamiento del aluminio es inversamente proporcional al comportamiento del hierro. Dividiendo su presencia en tres zonas: la primera abarca los puntos R2 al R4, con valores equivalente, mostrándonos la movilidad del aluminio entre esos puntos. El segundo grupo, lo conforman los puntos R1 y R5; nuevamente, este grupo es interesante de analizar, ya que el R1 corresponde al relave y el R5 es un punto límite del relave y sus concentraciones son equivalentes, sugiriendo, de nuevo, la capacidad de movilidad de este elemento. Además, al comparar los puntos R1 y R3 muestra que la concentración del aluminio no es equivalente en todo el relave. El tercer grupo de puntos lo componen del R6 al R11, donde los valores son equivalentes a los de la línea base (R).

Este comportamiento del aluminio, se podría explicar bajo dos consideraciones; la primera es que la solubilidad de los compuestos de aluminio es alta y con el ingreso de la ola en el tsunami del año 2015, solubilizó estos compuestos del relave y los distribuyó, a través de toda la zona de estudio, lo que explicaría los valores equivalentes de las concentraciones de este elemento en la zona de estudio. La segunda explicación es que naturalmente existe la presencia del aluminio en la zona del humedal el Culebrón, por esta razón, se tendrían los valores equivalentes a la línea base.

Por los antecedentes encontrados, creemos que la primera consideración sería la acertada, ya que el aluminio está asociada a la minería del cobre y del hierro, encontrándose este elemento en relaves mineros, asociado a esta minería (SERNAGEOMIN, 2018).

Por la distribución que presenta el aluminio en el área alejada del relave, teniendo las menores concentraciones en el relave, indicarían

que existe la posibilidad de una mayor capacidad de desplazamiento de este elemento. Esto se podría explicar, debido a la solubilidad que tienen las sales de aluminio en agua a pH básico, formando iones de hidróxido de aluminio, que precipitan, a medida que se evapora el agua (Housecroft *et al.* 2006).

La tabla 1 muestra que la variación de los elementos Calcio y Silicio son equivalentes al punto basal R, indicando que su presencia es natural en la zona de estudio.

Las concentraciones de los elementos que están en menor cantidad predominan ampliamente el zinc, le sigue el arsénico y en menor cantidad, el plomo. Analizando estos tres elementos, con especial énfasis en el As y Pb, por los problemas de contaminación, que podrían producir en el medio ambiente del humedal y los problemas de salud a la población, que visita el humedal.

En la figura 4b, se muestra la distribución que presenta el zinc, observando que las mayores concentraciones se encuentran en los puntos del relave, del R1 al R3. En este último punto, la concentración del zinc, se dispara, siendo la más alta. En los puntos del R4 al R11, la concentración del Zn disminuye drásticamente, alcanzando valores equivalentes al punto control R, lo que podría indicar que la movilidad del Zn es limitada, ya que su solubilidad en soluciones acuosas es en medio fuertemente alcalinas, con pH superior a 10 (Housecroft *et al.* 2006).

En la figura 4b, también se presenta cómo el arsénico se distribuye en el área de estudio, destacando dos zonas de concentración, que se diferencian entre ellas. La primera, en el área del relave (R1 a R3), en la que hay una concentración máxima de arsénico de 49ppm; la segunda zona, desde los puntos R3 a R11, donde tenemos una concentración que varía alternadamente entre un valor alto y otro

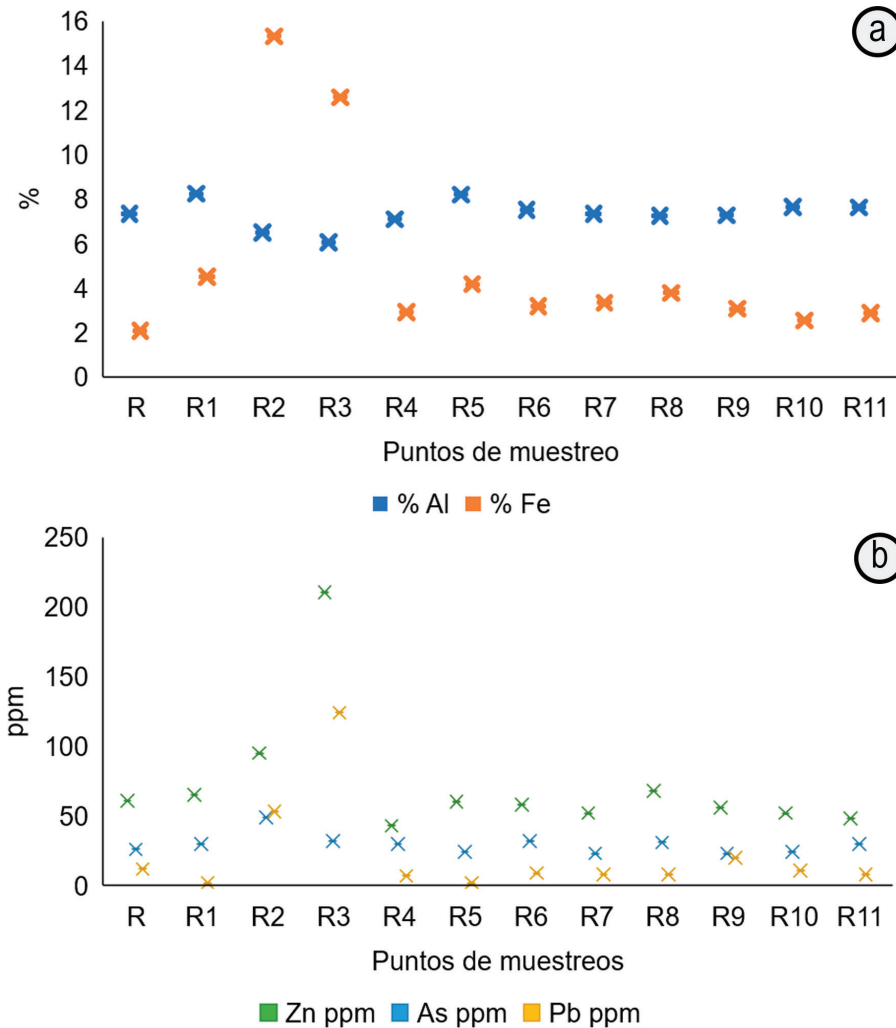


Figura 4. Variación de la concentración promedio de los metales encontrados en el área de estudio. a. Fe y Al en porcentaje, por estar en mayor cantidad; b. Zn, As y Pb en ppm, porque su concentración es menor.

de menor concentración, variando entre los 32 y 24ppm; estas concentraciones, se distribuyen en las áreas más alejadas del relave y más cercana al cuerpo de agua del humedal.

La forma de distribución de este elemento es similar a las que dejan las olas del mar en la arena, haciendo pensar que esta última se debe a la ola del tsunami, que afectó al humedal, en el 2015 y parte del arsénico, que estaba en el relave, se distribuyó por la superficie del humedal.

Este comportamiento que presenta el arsénico en el medio del humedal el Culebrón, se puede deber a las características propias de él y su capacidad para reaccionar y trasladarse de un medio a otro, además de las características físicas, químicas y biológicas que presenta el humedal, indicando que se tienen o se formaron distintos compuestos de arsénico en la zona de estudio, demostrando la facilidad de desplazamiento, en los distintos medios (Rangel *et al.* 2015).

En esta figura, se presenta la variación del plomo, que es equivalente al elemento Zn.

El plomo, se encuentra, principalmente, en el área del relave y su concentración va disminuyendo, a medida que nos alejamos, acercándonos al cuerpo de agua, alcanzando valores equivalentes al punto control R, lo que indica que la movilidad del Pb es limitada, concordando con los resultados que mostro Rúa Cardona *et al.* (2013), al estudiar la movilidad de este elemento, junto a otros, en sedimentos de humedales de Ayapel, que estaba impactado por la minería del oro en Colombia.

Al analizar los resultados obtenidos, específicamente, en los puntos de muestreos R1 y R5, se observa que las concentraciones del Fe, Al, Si, Zn y Pb son equivalentes. Al analizar el comportamiento de estos elementos, nos damos cuenta que el Fe, Zn y Pb tienen un comportamiento similar, alta concentración en el relave y baja concentración alejado de este, pero el Al, se comporta de manera opuesta; además, el punto R5 está en los

límites donde se ubicaba la parte del relave, que fue desplazado por las olas del tsunami, del 2015 (Figura 2).

Se puede concluir, que la movilidad de los metales de transición, como el hierro y el zinc, son menores comparados con los otros elementos analizados, que no pertenecen a este grupo. El arsénico presenta una distribución equivalente en el relave, pero en la zona del humedal, su comportamiento es irregular, con aumento y disminución de su concentración, mostrando la capacidad de este elemento de poder desplazarse, a una mayor distancia del relave.

Además, que existe una movilidad de los elementos que se encuentran presentes en el relave ubicado en la desembocadura del estero el Culebrón, que se debe a procesos geológicos, químicos, físicos, biológicos naturales, pero, principalmente, a la acción del agua por el tsunami que afectó al estero, en el 2015.

Se hace necesario poder retirar este relave del estero el Culebrón, pero desde una perspectiva moderna, considerando este pasivo ambiental, como un activo ambiental, extrayendo los elementos con valor económico, con tecnología existente, logrando una ganancia económica, ambiental y social. Esto generará una externalidad positiva, en la medida que se logre equilibrar la conservación del humedal con el desarrollo de un turismo sustentable, que es consecuencia de aumentar el valor de este ecosistema biológico.

La próxima etapa de este proyecto es determinar la forma de eliminar el relave extrayendo los componentes con un valor económico, usando tecnología simple, económica, de fácil aplicación y sustentable ambientalmente.

Conflicto de intereses: El manuscrito fue preparado y revisado con la participación de todos los autores, quienes declaramos que no existe ningún conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados.

REFERENCIAS

- BAYLÓN, M.; ROA, K.; LIBIO, T.; TAPIA, L.; JARA, E.; MACEDO, D.; SALVATIERRA, A.; DEXTRE, A. 2018. Evaluación de la diversidad de algas fitoplanctónicas como indicadores de la calidad del agua en lagunas altoandinas del departamento de Pasco (Perú). *Ecología Aplicada*. 17(1):119-132. <https://dx.doi.org/10.21704/rea.v17i1.1180>
- CHÁVEZ-VILLAVICENCIO, C.; TABILO-VALDIVIESO, E.; JOFRÉ-PÉREZ, C. 2019. Tsunami effects on Coquimbo Bay wetland water-bird species composition, associated with the 2015 Mw8.4 Illapel earthquake (northern Chile). *Latin American J. Aquatic Res.* 47(5):845-852. <https://dx.doi.org/10.3856/vol47-issue5-fulltext-14>
- 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)
- CORTES, L.; BRAVO, I.; MARTIN, J.; MENJIVAR, J. 2016. Extracción secuencial de metales pesados en dos suelos contaminados (Andisol y Vertisol) enmendados con ácidos húmicos. *Acta Agronómica*. 65(3):232-238. <https://dx.doi.org/10.15446/acag.v65n3.44485>
- FIGUEROA, R.; SUAREZ, M.L.; ANDREU, A.; RUIZ, V.H.; VIDAL-ABARCA, M.R. 2009. Caracterización ecológica de humedales de la zona semiárida en Chile central. *Gayana*. 73(1):76-94. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-65382009000100011>
- GUZMÁN, N. 2015. Tsunami en Coquimbo. *Revista de Marina*. 6:64-67.
- HOUSECROFT, C.; SHARPE, A. 2006. *Química Inorgánica*. Editorial Pearson Prentice Hall, Segunda edición. Madrid. 35p.
- JARA-PEÑA, E.; GÓMEZ, J.; MONTOYA, H.; SÁNCHEZ, T.; TAPIA, L.; CANO, N.; DEXTRE, A. 2017. Acumulación de metales pesados en *Calamagrostis rigida* (Kunth) Trin. ex Steud. (Poaceae) y *Myriophyllum quitense* Kunth (Haloragaceae) evaluadas en cuatro humedales altoandinos del Perú. *Arnaldoa*. 24(2):583-598. <http://doi.org/10.22497/arnaldoa.242.24210>
- MINERÍA CHILENA. 2019. Sernageomin publica catastro geoquímico de depósitos de relaves. Disponible desde internet en: <http://www.mch.cl/2017/12/12/sernageomin-publica-catastro-geoquimico-de-depositos-de-relaves/#> (con acceso 10/12/2019)
- OLMOS, V.; RIDOLFI, A. 2018. Hidroarsenicismo: mecanismos de acción asociados a la toxicidad del arsénico. *Acta Toxicológica Argentina*. 26(1):32-44.
- PIZARRO, R.; FLORES, J.; TAPIA, J.; VALDÉS, R.; GONZÁLEZ, D.; MORALES, C.; SANGÜESA, C.; BALOCCHI, F.; LEÓN, L. 2016. Forest species in the recovery of soils contaminated with copper due to mining activities. *Rev. Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*. 22(1):29-43. <https://dx.doi.org/10.5154/r.rchscfa.2014.06.026>
- RAMÍREZ, M.; NAVARRO, N. 2015. Análisis de metales pesados en suelos irrigados con agua del río Guatiquía. *Ciencia en Desarrollo*. 6(2):167-175.
- RANGEL, E.; MONTAÑEZ, L.; LUÉVANOS, M.; BALAGURUSAMY, N. 2015. Impacto del arsénico en el

- ambiente y su transformación por microorganismos. *Terra Latinoamericana*. 33(2):103-118.
14. RIVERA, L.; QUIROZ, V.; ARANCIBIA, J. 2009. Consultoría Técnica Propuesta de Plan Integral de Restauración del Humedal El Culebrón, Región de Coquimbo". Informe Final, Licitación ID N° 1854-16-L109. Preparado para: Comisión Nacional del Medio Ambiente Región de Coquimbo. Disponible desde internet en: http://bdrnap.mma.gob.cl/recursos/SINIA/Biblio%20SP-64/070316BIBLIORNAP_049.pdf (con acceso 15/08/2019).
 15. ROMERO, A.; FLORES, S.; MEDINA, R. 2008. Estudio de los metales pesados en el relave abandonado de Ticapampa. *Rev. Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica*. 11(22):13-16.
 16. RÚA CARDONA, A.F.; FLÓREZ MOLINA, M.T.; PALACIO BAENA, J. 2013. Variación espacial y temporal en los contenidos de mercurio, plomo, cromo y materia orgánica en sedimento del complejo de humedales de Ayapel, Córdoba, noroccidente colombiano. *Rev. Fac. Ingeniería Universidad de Antioquia*. 69:244-255.
 17. SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGÍA Y MINERÍA. SERNAGEOMIN. 2018. Geoquímica de Superficie de Depósitos de Relaves de Chile. Disponible desde internet en: https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2018/06/P%c3%9aBLICA_Geoquimica-de-Depositos-de-Relaves-de-Chile25062018.pdf (con acceso el 01/12/2019).
 18. SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGÍA Y MINERÍA. SERNAGEOMIN. 2019. "Depósito de relaves. Preguntas frecuentes sobre relaves". Disponible desde internet en: <https://www.sernageomin.cl/preguntas-frecuentes-sobre-relaves/> (con acceso el 20/08/2019).
 19. TALAVERA, O.; MORENO, Y.; DÓTOR, R.; AZUCENA, M.; GUTIÉRREZ, C. 2005. Mineralogy and geochemistry of sulfide-bearing tailings from silver mines in the Taxco, Mexico area to evaluate their potential environmental impact. *Geofísica internacional*. 44(1):49-64.
 20. VIZCAÍNO, L.; FUENTES, L. 2015. Biosorción de cd, pb y zn por biomasa pretratada de algas rojas, cáscara de naranja y tuna. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*. 25(1):43-60.
 21. YURISCH, T. 2016. "Situación de los pasivos ambientales mineros en Chile. El caso de los depósitos de relaves". Publicaciones Fundación TERRAM. APP N°61. Disponible desde internet en: https://www.terram.cl/descargar/ambiente/contaminacion/app_-_analisis_de_politicas_publicas/APP-61-Situacion-de-los-Pasivos-Ambientales-Mineros-en-Chile-El-caso-de-los-depositos-de-relaves.pdf (con acceso el 08/08/2019).
 22. 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.
 23. ZAMARREÑO, R.; TAPIA, J.; PIZARRO, C. 2015. Cuantificación, caracterización y composición del material particulado 2,5, procedente del uso de la Combarbalita. *Avances en Ciencias e Ingeniería*. 6(4):1-9.