

Caracterización física, química y mineralógica de un antiguo relave, en busca de alternativas de reutilización

Physical, chemical and mineralogical characterization of old tailings, in search of alternatives for its reuse

Cintia Gabriela Cordero^{1*}, Natalia Judith Marchevsky², Patricia Alejandra Chiacchiarini¹, María Alejandra Giaveno¹

¹PROBIEN (Conicet-UNCo), Universidad Nacional del Comahue, Neuquén, Argentina.

²Universidad Nacional de San Luis, San Luis, Argentina.

*Autor para la correspondencia: cordero.cintia@gmail.com

Resumen

Los relaves pertenecientes a antiguas explotaciones mineras constituyen riesgos de contaminación ambiental; sin embargo, estos desechos pueden ser útiles para recuperar metales y minerales de interés económico o ser reutilizados con diferentes finalidades. Este trabajo tuvo el objetivo de caracterizar desde el punto de vista físico, químico y mineralógico los relaves almacenados en el antiguo dique de colas de Andacollo (provincia de Neuquén, Argentina) a fin de explorar sus alternativas de reutilización. En muestras compósito de cada talud se determinaron valores de pH, Eh, conductividad, porosidad, densidad real y aparente; composición elemental (ICP-MS) y se practicó análisis por DRX. En principio, los resultados indicaron una baja probabilidad de generación de drenajes ácidos, así como que los contenidos metálicos presentes en el relave son escasos para proponer la recuperación económica de estos elementos de interés. El arsénico (As) resultó el único elemento en concentraciones por encima de los límites permisibles normados, por lo que una posible reutilización agrícola, residencial o industrial de estos tecnosuelos requeriría un proceso de remoción o disminución del contenido de este metaloide. Ante un plan de restauración, los valores encontrados de densidad aparente y porosidad serían favorables para el crecimiento de vegetación.

Palabras clave: relaves; desechos mineros; distrito minero Andacollo; reutilización de colas; riesgo ambiental.

Abstract

Tailings from old mining operations constitute environmental pollution risks; however, these wastes can be useful for recovering minerals and metals of economic interest or use them for different purposes today. The objective of this study is to characterize tailings stored in old tailings dam from Andacollo (Neuquén province, Argentina) from the physical, chemical and mineralogical point of view in order to explore the alternatives for its reuse. Conductivity, porosity, real and apparent density, elemental composition (ICP-MS), pH, and Eh, were determined in study samples and XRD analysis were performed. Results showed a low probability of acid drainage generation, and metallic contents present in the tailings are too low to propose the economic recovery of these elements. Arsenic (As) was the only element in concentrations above the permissible limits, so that a possible agricultural, residential or industrial reuse of these techno soils would require a process for removing or reducing the content of this metalloid. Bulk density and porosity values found, would be favorable for vegetation growth considering a restoration plan.

Keywords: tailings; mining wastes; Andacollo mining district; tailings reuse; environmental risk.

1. INTRODUCCIÓN

La minería es una actividad esencial que provee de minerales y metales a una amplia variedad de industrias y actividades, además de ser imprescindible para la fabricación de numerosos dispositivos tecnológicos que facilitan el estilo de vida de las sociedades modernas (Herrmann y Zappettini 2014). El incremento exponencial que ha demostrado el consumo de metales en el mundo durante el último siglo ha promovido, por un lado, la reducción de las leyes (contenido metálico) de los yacimientos primarios que se explotan, y por el otro, el incremento de los volúmenes de desechos mineros que se generan (Kossoff et al. 2014). Anualmente, millones de toneladas de menas se procesan para producir metales, de las cuales más del 95% son dispuestas en forma de desechos (Falagán, Grail & Johnson 2017). La acumulación de desechos mineros supone riesgos de contaminación ambiental, a partir de la generación de drenajes ácidos, infiltraciones de soluciones hacia el suelo y aguas naturales, transporte eólico de material particulado, entre otros (Tayebi-Khorami et al. 2019; Agboola et al. 2020).

1.1. Desechos mineros

Los principales desechos mineros sólidos son las escombreras (sitios donde se disponen los fragmentos de rocas que se extraen durante la explotación del mineral de interés) y los relaves (presas donde se dispone material constituido por mezclas de minerales molidos y en ocasiones soluciones de procesos, que conforman residuos luego de la extracción económica del metal desde su mena). Desde el punto de vista ambiental, los relaves son considerados más peligrosos; dado que, se caracterizan por contener metales, metaloides y reactivos químicos, los cuales podrían dispersarse por medios eólicos y procesos hídricos hacia sistemas terrestres y acuáticos; y provocar severos daños ambientales (Anawar 2015). La presencia de minerales sulfurados, como pirita, podría dar origen a la generación de drenajes ácidos de mina (DAM). Los DAM son considerados como uno de los mayores problemas que tiene la actividad minera y es por ello que para prevenir su generación siempre es recomendable tomar las previsiones necesarias en la disposición y almacenamiento de minerales de desecho.

1.2. El futuro de los desechos mineros

En los últimos años la conversión de desechos en productos de valor económico ha recibido gran importancia, dado que podría contribuir a conseguir una minería sostenible en términos ambientales, sociales y económicos (Gorman & Dzombak 2018; Singh, Sukla & Goyal 2020). La presencia de un elemento valioso en concentraciones similares o mayores a los que se explotan hoy en día, y un alto precio de mercado de dicho elemento, son factores que podrían facilitar que este tipo de desechos sea utilizado como materia prima de los procesos de metalurgia extractiva para la obtención de metales (Tripodi et al. 2019). Muchos de los trabajos de investigación focalizados en la reutilización de estos desechos se han centrado en la recuperación de metales (Li et al. 2018; Tunsu et al. 2019) y en la incorporación, como materia prima, para la fabricación de hormigones (Pyo et al. 2018). En cualquier caso, lo primero que se requiere para evaluar alternativas de reutilización, es conocer las características físicas y químicas de estos desechos.

1.3. Sitio de estudio

El distrito minero Andacollo se ubica en el Departamento Minas, al noroeste de la provincia del Neuquén, Argentina. Este distrito alberga depósitos hidrotermales de oro, plata y polimetálicos de plomo, zinc y cobre, principalmente en forma de vetas, con desarrollo de brechas y *stockworks* así como también oro diseminado de baja ley en los pórfidos cuaríferos (Rovere

et al. 2004). Si bien son diversos los recursos minerales del lugar, la producción de oro y plata es la principal actividad extractiva metalífera.

A partir del año 1998, CORMINE SEP, se hizo cargo de la explotación sistemática de Andacollo. Inicialmente, el laboreo se focalizó en las vetas Julia y Sofía, estratos ricos en sulfuros (hasta 30% del volumen total de roca) cuyos minerales identificados en orden de abundancia fueron: pirita, marcasita, esfalerita, galena, pirrotina, calcopirita, arsenopirita, oro nativo, argentita, molibdenita, bornita, covellina, digenita y como minerales de ganga: cuarzo, calcita, sericita, clorita, dolomita, ankerita, epidoto, trazas de rutilo, titanita, albita y alúmino-fosfatos de elementos de tierras raras (Pons, Mendieberri y Arce 2019).

El procesamiento de estos minerales permitió obtener un concentrado de oro y relaves que fueron dispuestos directamente sobre el suelo, en depresiones naturales limitadas por tres taludes. Este recinto (dique) no presenta estructura de confinamiento y ocupa un área aproximada de 1,41 ha.

El presente trabajo se ocupó de determinar las características físicas, químicas y mineralógicas que tienen los relaves almacenados en el dique antiguo de Andacollo. La información obtenida intenta contribuir a vislumbrar opciones para la reutilización de estos desechos mineros.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El muestreo se realizó sobre tres taludes (TA, TB y TC) que conforman los relaves antiguos. Inicialmente se definió una malla sobre cada talud y se seleccionaron puntos aleatorios en cada uno de ellos para realizar el muestreo. En total se tomaron muestras de 15 puntos, a razón de cinco muestras por talud. En cada punto se extrajeron, desde la superficie hasta unos 30 cm de profundidad y utilizando herramientas manuales, aproximadamente 2 Kg de muestra. El material obtenido, fue colocado en bolsas de plástico rotuladas, sin agregar aditivos para su conservación.

En el laboratorio, las muestras fueron homogeneizadas mediante cuarteo, y secadas a temperatura ambiente. Posteriormente, se formaron tres compósitos a partir de las muestras individuales, a fin de obtener una muestra representativa por cada talud. Las muestras compuestas fueron tamizadas a un tamaño de partícula inferior a 74 μm utilizando un tamiz malla Nº 200 ASTM. Se realizaron los estudios que se describen a continuación:

- Determinación de pH y Eh en pasta saturada. Una muestra de 10 g se vertió en un vaso de precipitados de 100 ml, luego se añadió agua destilada hasta conseguir una pasta saturada; se selló el vaso y se agitó 30 min. Finalmente,

se registró el pH y la conductividad eléctrica utilizando un medidor de pH marca Orion 420-A equipado con electrodos adecuados.

- Determinación de densidad real, densidad aparente y porosidad, de acuerdo con el protocolo de Richards & Cockroft (1974).

- Análisis por difracción de rayos X (DRX). Una muestra de mineral molido ($<74 \mu\text{m}$) se utilizó para la caracterización que se llevó a cabo en un equipo Rigaku modelo DII-Max, $\text{CuK}\alpha$ filtro de Ni. Para obtener los difractogramas, las muestras fueron corridas desde 10 hasta $70 2\theta$, modo por pasos.

- Análisis químico por espectroscopia de emisión atómica (ICP-MS). La muestra fue sometida inicialmente a un ataque con agua regia; los metales disueltos fueron determinados en el laboratorio privado Alex Stewart de la ciudad de Mendoza, Argentina.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Durante el muestreo, los taludes presentaron una capa superior de aspecto compacto y duro (duripán), de coloración grisácea y amarillenta, cuyos espesores variaron entre 10 cm y 30 cm. Este material actúa como una cubierta que aísla los residuos y los protege del avance rápido de la oxidación (Kirschbaum et al. 2012). En los taludes no se evidenció agua acumulada, posiblemente porque el muestreo fue realizado en verano, estación caracterizada por las bajas o nulas precipitaciones en esta región, y por la pendiente dominante que favorece el escurrimiento superficial y subsuperficial hacia las zonas más bajas de los taludes.

Los valores de pH en pasta resultaron ser levemente mayores a 7, indicando una baja probabilidad de generación inmediata de drenajes ácidos. Los valores de Eh fueron del orden de los 200 mV, los cuales denotan presencia de oxígeno, pero no revelan alta oxidación en las especies presentes en solución.

Los valores de densidad aparente variaron de $1,3 \text{ g.cm}^{-3}$ a $1,5 \text{ g.cm}^{-3}$. Este parámetro depende fundamentalmente de las densidades de las partículas del suelo (arena, arcilla, limo y materia orgánica) y del tipo de empaquetamiento que este presenta; suele utilizarse como indicador de la compactación y de las restricciones al crecimiento de raíces; los valores usuales se encuentran entre $1,0 \text{ g.cm}^{-3}$ y $1,7 \text{ g.cm}^{-3}$. Los suelos compactados, en general, tienen densidades aparentes altas que restringen el crecimiento de las raíces e inhiben el movimiento del aire y el agua a través del suelo (Arshad, Lowery & Grossman 1997). Asimismo, en todas las muestras pudo constatarse porcentajes de porosidad mayores al 50%, valores que admiten la percolación del agua pluvial en los taludes. En consecuencia, estos

tecnosuelos presentan condiciones apropiadas que permitirían el normal desarrollo de raíces de plantas nativas.

Las fases cristalinas identificadas por DRX fueron: cuarzo (Cz), feldespatos alcalinos y plagioclasas (Fd), calcita (Ca), yeso (Ye), galena (Ga), pirita (Py), sulfato de hierro (Su), además de minerales arcillosos como esmectita (Sm), illita (I) y caolinita (Cao) asociados a mica (Figura 1). En general se observó una composición similar entre las muestras compósito, y la intensidad de los picos mostró una mayor proporción de algún componente en particular, siendo en todos los casos el contenido de Cz (cuarzo) el de mayor abundancia.

La muestra correspondiente al talud TA presentó una mayor cantidad de pirita. La exposición de pirita a condiciones atmosféricas genera drenajes ácidos; estos drenajes se caracterizan por tener bajos valores de pH y al entrar en contacto con otros minerales sulfurados, óxidos, silicatos y carbonatos pueden liberar y disolver metales como el Cu, Zn, Pb, Ni, Cd, Co, Hg, Al, Mn y U, además de metaloides como el As, Sb, Se (Jamieson, Walker & Parsons 2015). La presencia de sulfato de hierro, asociada a minerales secundarios, sugiere que podría haber ocurrido la oxidación de pirita y/o movilización del hierro desde algún mineral primario. El hallazgo de calcita en los relaves demuestra que existen minerales con capacidad de neutralizar la eventual ocurrencia de drenajes ácidos. También, la disolución de otros minerales, como los silicatos primarios y aluminosilicatos (cuarzo y feldespatos), podrían favorecer la neutralización de las aguas ácidas, aunque generalmente su aporte está limitado por las bajas velocidades de reacción (Jamieson, Walker & Parsons 2015).

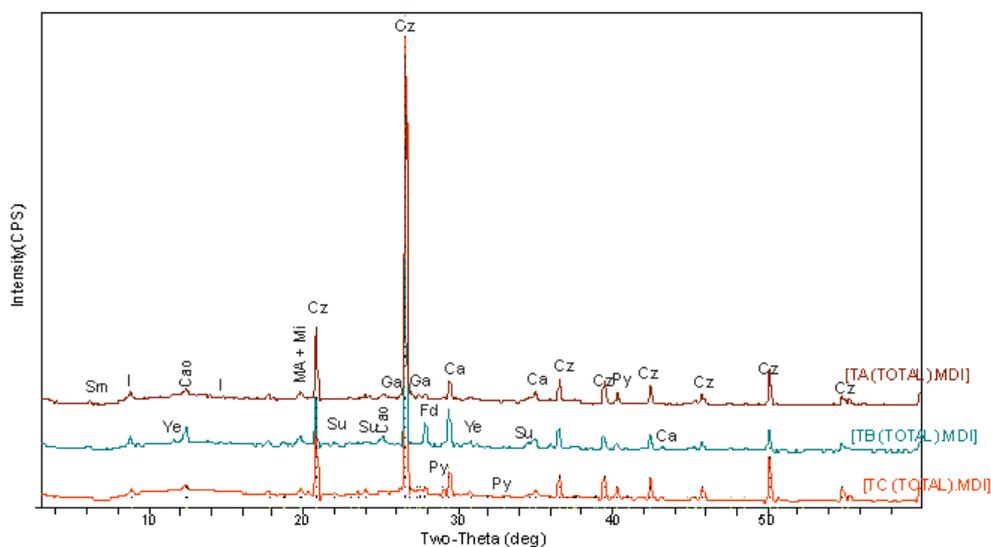


Figura 1. Difractogramas correspondientes a las muestras compósito de los taludes TA, TB y TC de los relaves antiguos de Andacollo.

La Tabla 1 muestra los resultados del análisis químico elemental realizado mediante ICP-MS. Los datos informados corresponden a valores promedios obtenidos para los tres taludes (TA, TB y TC). En la tabla se han incorporado valores de referencia para diversos metales y su permisibilidad en base al uso del suelo, establecidos en la Ley Nacional N° 24.051 de residuos peligrosos y su decreto reglamentario 831/98.

Tabla 1. Concentraciones promedio de elementos químicos peligrosos en muestras de taludes del antiguo relave de Andacollo y valores permisibles de referencia para metales y metaloides en base al uso del suelo, según legislación nacional.

Constituyente peligroso	Concentración de elementos químicos (mg.Kg ⁻¹)			Valores permisibles según Ley 24.051 - Dto 831/98		
	TA	TB	TC	Uso agrícola	Uso residencial	Uso industrial
As	66	114	100	20	30	50
Ba	85	96	59	750	500	2000
Cd	4	3	6	3	5	20
Zn	766	505	828	600	500	1500
Co	6	13	8	40	50	300
Cu	65	66	92	150	100	500
Cr	39	23	19	750	250	800
Mo	6	4	4	5	10	40
Ni	23	20	12	150	100	500
Ag	35,7	7,1	115,9	20	20	40
Pb	762	519	765	375	500	1000
V	29	48	26	200	200	(---)

Al analizar los resultados se observa que la mayoría de los elementos (Ba, Co, Cu, Cr, Mo, Ni y V) tiene una concentración inferior a los valores permisibles para los diferentes usos del suelo. Otros elementos (Cd, Zn, Ag y Pb) presentan concentraciones superiores o inferiores a los valores de referencia, para algún uso específico del suelo.

Vale destacar que la concentración de As en las muestras excedió los valores permisibles en los tres taludes y para los usos analizados. La concentración promedio de este elemento, estimada en 15 muestras del relave, fue de 93 mg.kg-1. Este valor es cuatro veces superior a las concentraciones permisibles para suelos de uso agrícola, tres veces mayor

para uso residencial y más del doble para uso industrial, de acuerdo con la legislación vigente antes mencionada.

Muchos países, incluido Argentina, carecen de legislación específica en cuanto a los valores permisibles de contaminantes en suelos y sedimentos (Vareda, Valente & Durães 2019). Por ello, en ocasiones es útil recurrir a herramientas que permitan determinar la calidad de suelos desde otra perspectiva. Müller (1986) propuso el índice de geoacumulación para evaluar la movilidad de elementos traza en suelos y sedimentos. Este índice ha sido aplicado en diferentes estudios (Bergues-Garrido 2011; Sulaiman, Salawu & Barambu 2019) de sitios mineros.

El índice de geoacumulación (Igeo) se define como:

$$I_{geo} = \left[\log_2 \left(\frac{C_n}{1,5 \cdot B_n} \right) \right] \quad (1)$$

Donde:

C_n: concentración del metal en la muestra de suelo.

B_n: concentración de fondo del elemento o valor de referencia geoquímico.

Factor 1,5: se introduce para minimizar el efecto de posibles variaciones en el valor de fondo del suelo.

En función del valor de Igeo la contaminación del suelo se clasifica de la siguiente manera: Igeo < 0 corresponde a suelo no contaminado; 0 ≤ Igeo < 1 de no contaminado a poco contaminado; 1 ≤ Igeo < 2 medianamente contaminado; 2 ≤ Igeo < 3 entre medianamente y fuertemente contaminado; 3 ≤ Igeo < 4 fuertemente contaminado; 4 ≤ Igeo < 5 muy fuertemente contaminado; Igeo > 5 extraordinariamente contaminado. (Bergues-Garrido 2011).

En este estudio se aplicó el índice de geocontaminación para evaluar el comportamiento del As al revelarse para este elemento, en los tres taludes, concentraciones superiores a los valores de referencia estipulados para diferentes usos. El valor de concentración de fondo que se tomó para efectuar el cálculo fue 4,7 mg.kg⁻¹, que es la concentración promedio mundial de As en suelo (Huang et al. 2009).

Los valores de Igeo obtenidos fueron: 3,23; 4,01 y 3,83 para los taludes TA, TB y TC, respectivamente. De acuerdo con la clasificación propuesta por Müller, estos suelos presentan un fuerte grado de contaminación por As. En general, los valores de Igeo reportados en la literatura consultada presentan una importante dispersión para el As; un ejemplo es la mina de antimonio

más grande del mundo, ubicada en China, que registró para este elemento valores de Igeo entre 1,07 y 7,03 (Long et al. 2018). El hallazgo de valores acotados de Igeo para el As en los relaves de Andacollo resulta beneficioso para plantear estrategias de remoción que permitan eliminar este contaminante utilizando un esquema de tratamiento relativamente sencillo.

En principio, los metales contenidos en las muestras analizadas del relave antiguo no presentan concentraciones suficientes para proponer la recuperación económica de los mismos. No obstante, esta posibilidad podría quedar supeditada a las condiciones de mercado venideras con respecto a los elementos presentes, como también a estudios futuros más detallados que permitan incrementar la información y el conocimiento que se tiene hasta el momento de estos residuos.

4. CONCLUSIONES

- Las características físicas y químicas de las muestras de los taludes en los antiguos relaves de Andacollo indican baja probabilidad de generación de drenajes ácidos (pH pasta ligeramente superior a 7 y Eh cercano a 200 mV). No obstante, el hallazgo de pirita a través de DRX, hace recomendable que se realicen ensayos específicos de movilidad de metales para determinar si estos desechos constituyen fuentes potenciales de contaminación ambiental.
- No existen en los antiguos relaves de Andacollo cantidades significativas de minerales metalíferos que justifiquen su recuperación con fines económicos.
- Los valores de densidad aparente y porosidad señalan que es propicio el crecimiento normal de raíces de plantas y que el agua pluvial puede percolar a través de las partículas presentes en los taludes de estos depósitos; estos resultados son favorables para desarrollar a futuro un plan de restauración de estos pasivos ambientales mineros.
- El hallazgo en estos tecnosuelos de contenidos de As en concentraciones superiores a los límites normados por la legislación argentina (Decreto 831/98), para cualquier tipo de reutilización (agrícola, residencial o industrial), indica que cualquier proyecto con alguno de estos propósitos deberá contemplar un proceso previo de remoción para disminuir el contenido del metaloide hasta valores permisibles.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la valiosa ayuda en DRX proporcionada por la Dra. Gisela Pettinari del PROBIEN-UNComa, y a CORMINE SEP por facilitar las muestras de estudio.

6. REFERENCIAS

- Agboola, O.; Babatunde, D. E.; Fayomi, O. S. I.; Sadiku, E. R.; Popoola, P.; Moropeng, L.; Yahaya, A. & Mamudu, O. A. 2020: A review on the impact of mining operation: Monitoring, assessment and management. Results in Engineering 8:100181. Consulta: 06/01/2022. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S259012302030089X>
- Anawar, H. M. 2015: Sustainable rehabilitation of mining waste and acid mine drainage using geochemistry, mine type, mineralogy, texture, ore extraction and climate knowledge. *Journal of environmental management*, 158: 111-121.. Consulta: 06/01/2022. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479715300499>.
- Arshad, M. A.; Lowery, B. & Grossman, B. 1997: *Physical tests for monitoring soil quality*. En: Doran, J. & Jones, A. (editors). Methods for assessing soil quality. Soil Science Society of America (SSA) Special Publications Number 49, Madison, 123-141.
- Bergues-Garrido, P. S. 2011: Evaluación de metales pesados en los suelos del coto minero manganesífero Cristo-Barrancas. *Minería y Geología*, 27(3): 43-57.. Consulta: 07/01/2022. Disponible en: <http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/view/272>
- Falagán, C.; Grail, B. M. & Johnson, D. B. 2017: New approaches for extracting and recovering metals from mine tailings. *Minerals Engineering* 106: 71-78.. Consulta: 07/01/2022. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0892687516303454>
- Gorman, M. R. & Dzombak, D. A. 2018: A review of sustainable mining and resource management: Transitioning from the life cycle of the mine to the life cycle of the mineral. *Resources, Conservation and Recycling*, 137: 281-291. Consulta: 07/01/2022. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344918302076>
- Herrmann, C. y Zappettini, E. O. 2014: Recursos minerales, minería y medio ambiente. Serie publicaciones N° 173. Instituto de Geología y Recursos Minerales, SEGEMAR, Buenos Aires, 68 p.
- Huang, S.; Tu, J.; Liu, H.; Hua, M.; Liao, Q.; Feng, J.; Weng, Z. & Huang, G. 2009: Multivariate analysis of trace element concentrations in atmospheric deposition in the Yangtze River Delta, East China. *Atmospheric Environment*, 43(36): 5781-5790. Consulta: 07/01/2022.

- Disponible en:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231009006761>
- Jamieson, H. E.; Walker, S. R. & Parsons, M. B. 2015: Mineralogical characterization of mine waste. *Applied Geochemistry*, 57: 85-105. Consulta: 07/01/2022. Disponible en:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0883292714003278>
- Kirschbaum, A.; Murray, J.; Arnosio, M.; Tonda, R. y Cacciabue, L. 2012: Pasivos ambientales mineros en el noroeste de Argentina: aspectos mineralógicos, geoquímicos y consecuencias ambientales. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 29(1): 248-264.. Consulta: 07/01/2022. Disponible en:
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1026-87742012000100017&script=sci_abstract&tlng=pt
- Kossoff, D.; Dubbin, W. E.; Alfredsson, M.; Edwards, S. J.; Macklin, M. G. & Hudson-Edwards, K. A. 2014: Mine tailings dams: characteristics, failure, environmental impacts, and remediation. *Applied Geochemistry*, 51: 229-245. Consulta: 07/01/2022. Disponible en:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0883292714002212>
- Li, H.; Ma, A.; Srinivasakannan, C.; Zhang, L.; Li, S. & Yin, S. 2018: Investigation on the recovery of gold and silver from cyanide tailings using chlorination roasting process. *Journal of Alloys and Compounds*, 763: 241-249.. Consulta: 07/01/2022. Disponible en:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838818320334>
- Long, J.; Tan, D.; Deng, S. & Lei, M. 2018: Pollution and ecological risk assessment of antimony and other heavy metals in soils from the world's largest antimony mine area, China. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 24(3): 679-690.
- Müller, G. 1986: Schadstoffe in sedimenten-sedimente als schadstoffe. *Mitt. Österreichische Geologische Gesellschaft*, 79: 107-126.
- Pons, M. J.; Mendiebarri, J. & Arce, M. 2019: Alteración hidrotermal y mineralogía de las vetas Sofía-Julia-Valencia, Andacollo, Neuquén. En: XIII Congreso de mineralogía, petrología ígnea y metamórfica, y metalogénesis (XIII MINMET y IV PIMMA). Acta de resúmenes. Ciudad de Córdoba, Argentina, 7-9 agosto, 340-341.
- Pyo, S.; Tafesse, M.; Kim, B. J. & Kim, H. K. 2018: Effects of quartz-based mine tailings on characteristics and leaching behavior of ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 166: 110-117.. Consulta: 07/01/2022. Disponible en:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061818300953>

- Richards, D. & Cockroft, B. 1974: Soil physical properties and root concentrations in an irrigated peach orchard. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 14(66): 103-107.
- Rovere, E. I.; Caselli, A. T.; Tourn, S.; Leanza, H. A.; Hugo, C. A.; Folguera, A. & Danieli, J. C. 2004. Hoja Geológica 3772-IV, Andacollo, Provincia del Neuquén. Instituto de Geología y Recursos Minerales, SEGEMAR, 112 p. Consulta: 07/01/2022. Disponible en: <https://repositorio.segemar.gov.ar/bitstream/handle/308849217/96/Andacollo.pdf?s>
- Singh, S.; Sukla, L. B. & Goyal, S. K. 2020: Mine waste & circular economy. *Materials Today: Proceedings* 30: 332-339.. Consulta: 07/01/2022. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320308191>
- Sulaiman, M. B.; Salawu, K. & Barambu, A. U. 2019: Assessment of concentrations and ecological risk of heavy metals at resident and remediated soils of uncontrolled mining site at Dareta Village, Zamfara, Nigeria. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 23(1): 187-193. Consulta: 07/01/2022. Disponible en: <https://www.ajol.info/index.php/jasem/article/view/183517>
- Tayebi-Khorami, M.; Edraki, M.; Corder, G. & Golev, A. 2019: Re-thinking mining waste through an integrative approach led by circular economy aspirations. *Minerals*, 9(5): 286.. Consulta: 07/01/2022. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2075-163X/9/5/286>
- Tripodi, E. E. M.; Rueda, J. A. G.; Céspedes, C. A.; Vega, J. D. & Gómez, C. C. 2019: Characterization and geostatistical modelling of contaminants and added value metals from an abandoned Cu-Au tailing dam in Taltal (Chile). *Journal of South American Earth Sciences*, 93: 183-202. Consulta: 07/01/2022. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0895981119300045>
- Tunsu, C.; Menard, Y.; Eriksen, D. Ø.; Ekberg, C. & Petranikova, M. 2019: Recovery of critical materials from mine tailings: a comparative study of the solvent extraction of rare earths using acidic, solvating and mixed extractant systems. *Journal of Cleaner Production*, 218: 425-437.. Consulta: 07/01/2022. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619303397>
- Vareda, J. P.; Valente, A. J. & Durães, L. 2019: Assessment of heavy metal pollution from anthropogenic activities and remediation strategies: A review. *Journal of environmental management*, 246: 101-118.. Consulta: 07/01/2022. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479719307546>

Información adicional

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses

Contribución de los autores

CGC: Experimentación, análisis de resultados, redacción del manuscrito y revisión y aprobación final de la versión final. NJM: Análisis de resultados, redacción y revisión del manuscrito. PAC: Experimentación, revisión y aprobación del manuscrito. MAG: análisis de resultados, revisión y aprobación del manuscrito.

ORCID

CGC: <https://orcid.org/0000-0003-4092-653X>

NJM: <https://orcid.org/0000-0002-6457-8704>

PAC: <https://orcid.org/0000-0001-7217-6046>

MAG: <https://orcid.org/0000-0003-1219-823X>

Recibido: 05/01/2022

Aceptado: 02/02/2022