

Efectos ambientales del drenaje ácido de mina y su tratamiento

Environmental effects of acid mine drainage and treatment

Romel González-Hernández¹, Verónica Martínez-Miranda^{1,*}, Ivonne Linares-Hernández¹, Raúl Cortés-Martínez², Luis Antonio Castillo-Suárez¹

Recibido: 7 de octubre de 2021 – Aceptado: 14 de marzo de 2022

RESUMEN

La minería es una actividad industrial de gran importancia para el desarrollo científico, tecnológico, arquitectónico, de la salud y las telecomunicaciones. México es caracterizado por su riqueza de especies minerales con

diversidad geológica que promueve gran interés entre compañías mineras nacionales e internacionales (Ramírez Macedonio & García Castro, 2020).

Por otro lado, la minería genera grandes cantidades de desechos que no son tratados y provocan graves problemas ambientales

¹ Universidad Autónoma del Estado de México

² Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

* Autor de correspondencia: mmirandav@uaemex.mx



(Mafra et al., 2020). Uno de ellos es el Drenaje Ácido de Mina (DAM) que es resultado de la oxidación química y bacteriana de minerales sulfurados como la pirita (FeS_2) durante la extracción de minerales metálicos y carbón.

El impacto adverso que causa el DAM sobre la vida acuática y la calidad de los cuerpos de agua es preocupante debido a la movilidad de ácidos, sulfatos y metales (Fe, Al, Mn, Zn, Cu, Pb, Hg, Cd, Ni), metaloides (As) y sólidos en suspensión (Akcil & Koldas, 2006; Alonso et al., 2020; Kefeni et al., 2018; Nqombolo et al., 2019; Rodríguez-Galán et al., 2019). Esta contaminación es un problema global debido a su toxicidad y bioacumulación (Atangana & Oberholster, 2021; Ayala & Fernández, 2019; Pan et al., 2021; Sahoo et al., 2020). El objetivo de esta revisión bibliográfica es investigar los impactos del DAM, además de los avances y propuestas para su manejo, tratamiento y mitigación.

PALABRAS CLAVE: Drenaje ácido de mina; elementos potencialmente tóxicos; tratamiento

ABSTRACT

Mining is an industrial activity of great importance for scientific and technological development, architecture, health, and telecommunications. Mexico is characterized

by its wealth of mineral species and geological diversity that promotes great interest among national and international mining companies (Ramírez Macedonio & García Castro, 2020).

On the other hand, mining generates large amount of waste that is not treated and causes serious environmental problems (Mafra et al., 2020). One of them is Acid Mine Drainage (AMD) which is the result of chemical and bacterial oxidation of sulphide minerals such as pyrite (FeS_2) during the extraction of metallic minerals and coal.

The adverse impact caused by AMD on aquatic life and the quality of water bodies is of concern due to the mobility of acids, sulfates and metals (Fe, Al, Mn, Zn, Cu, Pb, Hg, Cd, Ni), metalloids (As) and suspended solids (Akcil & Koldas, 2006; Alonso et al., 2020; Kefeni et al., 2018; Nqombolo et al., 2019; Rodríguez-Galán et al., 2019); this contamination is a global problem due to its toxicity and bioaccumulation (Atangana & Oberholster, 2021; Ayala & Fernández, 2019; Pan et al., 2021; Sahoo et al., 2020). The objective of this bibliographic revision is to investigate the impacts of AMD, the advances and the proposals for its management, treatment, and mitigation.

KEYWORDS: Acid mine drainage; potentially toxic elements; treatment.

INTRODUCCIÓN

La minería es una actividad económica muy importante como fuente de materias primas. En México está centrada en los metales industriales y preciosos (SGM, 2013), que se lleva a cabo principalmente con labores de aprovechamiento a cielo abierto. Esto produce impactos ambientales como la contaminación del agua mediante DAM, remoción de la cubierta vegetal, generación de grandes volúmenes de escombros, abatimiento de fuentes de agua, emisiones continuas de gases y polvos a la atmósfera durante la extracción y procesamiento (Lutz Ley, 2020), así como enfermedades humanas, afectación a las actividades económicas locales, marginación y pobreza (Moraes, 2000)

La pirita (FeS_2) es el mineral principal causante del DAM (Figura 1), no obstante, existen otros sulfuros metálicos como asphalerita (ZnS), galena (PbS), calcopirita (CuFeS_2), arsenopirita (FeAsS) entre otros, que contienen menores cantidades de Cd, Sn, Ag, Au, Co y Hg.

El DAM daña los ecosistemas y los cultivos alimentarios representando una amenaza a la flora, fauna y seres humanos (Pan et al., 2021). Algunos efectos a la salud por la ingesta de agua contaminada son deformaciones congénitas, mortalidad, intoxicaciones, lesiones diversas en los epitelios, trastornos durante el crecimiento y bajas tasas de reproducción, asociados a la acumulación de metales pesados y As que además causan daños hepáticos y renales (Gaikwad & Gupta, 2008).



FIGURA 1.

DESCARGA DE DAM EN UN ARROYO EN MICHOACÁN

Fuente: Elaboración propia

RESIDUOS MINEROS Y SUS IMPACTOS AMBIENTALES

Durante todo el proceso de aprovechamiento de los minerales se producen desechos como relaves, lodos y aguas residuales. Durante la extracción de las rocas que contienen los minerales, el tratamiento para extraerlos y la metalurgia, se demanda un gran volumen de agua que es utilizada para reducir la generación de polvo, lavar el carbón, triturar rocas, separar floculantes, además de la extracción hidrometalúrgica. En pocas ocasiones el agua se reusa, ya que, al contaminarse, carece de valor en la operación. Su descarga, flujo, drenaje y filtración incontrolados desde el sitio minero están asociados a altas temperaturas, sólidos suspendidos, bases, ácidos, sólidos disueltos; esto incluyendo químicos del procesamiento, metales, metaloides, sustancias radiactivas y/o sales (COCHILCO, 2020).

El Servicio Forestal de EU estimó que entre 8,000 y 16,000 km de los ríos de EUA son objeto de DAM. La Agencia de Protección Ambiental (EPA) estableció que la minería ha contaminado el 40 % de las cuencas hidrográficas de los estados del Este. En el 2011 y 2012 se reportó que la industria de las minas de metales fue la más contaminante, con el 46 % de los desechos totales. Si se suman los desechos arrojados por la industria que funde y refina, el porcentaje se eleva hasta el 55%. Sólo el 0.7 % (859,194.6 toneladas) de los desechos mineros se trataron antes de su deposición final (EPA, 2012).

En México, los periodistas reportan múltiples casos de accidentes por derrames, fractura de diques de presas de jales, volcaduras de camiones que mueven contenedores con sustancias altamente peligrosas y la contaminación de ríos, lagos y mantos freáticos por efecto de minas abandonadas. El derrame de jales de Buenavista del Cobre al Río Sonora en 2014 identificado como el de mayor impacto negativo (Cisneros, 2014), es un buen ejemplo de esto. La Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) informó que durante 2013-2015 se atendieron 44 emergencias mineras.

DISTRIBUCIÓN AMBIENTAL DE METALES Y METALOIDES DE LOS DESECHOS MINEROS

Las principales vías de transporte o vectores de los contaminantes en el ambiente son: suelo, aire, agua y biota.

Suelo

Aunque la mayoría de los procesos de transporte en el suelo son inherentemente lentos y limitados en extensión espacial (Gutiérrez-Ruiz y Moreno, 1995), en periodos largos, los contaminantes pueden ser transportados por el suelo en grandes cantidades, dando lugar a elevados riesgos para la salud humana y el ambiente local (Csavina et al., 2012).

En 1997, México identificó 59 sitios abandonados y contaminados con residuos peligrosos; para 1999 ya eran 105 sitios creciendo significativamente en tan sólo 2 años. De acuerdo con datos de PROFEPA, en el 2015 se sumaron 61 sitios, siendo más frecuentes los metales pesados en los que predominó principalmente el Pb. Los metales pesados se agrupan

en una categoría que se les denomina elementos potencialmente tóxicos (EPT) y se encuentran en residuos de jales y escorias de fundición, cuyo volumen supera las 80,000 toneladas. Los EPT más comunes son Pb, Cd, Zn, As, Se y Hg (Gutiérrez-Ruiz y Moreno, 1995; Volke et al., 2005).

Aire

La minería produce emisiones atmosféricas compuestas por polvos gruesos generados a partir de la trituración y erosión de jales, y emisión de polvos finos por fundición de vertederos de escorias. Estos polvos atmosféricos (texturas $<60\mu\text{m}$) incluyen aerosoles y en conjunto juegan un papel importante en el transporte de contaminantes de baja volatilidad, escasa solubilidad acuosa y fácil adherencia al suelo (Csavina et al., 2012).

Por otra parte, los contaminantes comúnmente asociados a polvos emitidos son As, Cd y Pb, están concentrados en la fracción de textura más fina ($<2\mu\text{m}$ y $<1\mu\text{m}$) que viajan a mayor distancia y presentan más riesgo para la salud humana que polvos gruesos (Corriveau et al., 2011; Csavina et al., 2011; Ravi et al., 2011). Los polvos finos son inhalados y depositados directamente en los pulmones a través de la boca y la nariz y pueden ser transportados a través de la sangre absorbiéndose por el sistema digestivo.

Agua

El transporte de contaminantes de las minas a través del agua ocurre en varios procesos: desde el transporte en sedimentos hasta la percolación de elementos y compuestos solubles, trasladándose desde los límites de las cuencas hidrográficas hasta las zonas más bajas, siendo de mayor riesgo por acumulación las zonas ribereñas, sistemas acuáticos endorreicos y aguas subterráneas poco profundas (Csavina et al., 2012).

Un ejemplo es la mina de cobre localizada al oeste de Montana, la cual, después de 125 años de funcionamiento, es considerada uno de los sitios altamente contaminados (*Superfund*), ya que 1,600 km de ríos de la cuenca del *Clark Fork* se contaminaron por desechos que se transportaron y redistribuyeron a 400 km de distancia del origen, según lo reportado por Moore & Luoma (1990).

ALTERNATIVAS PARA EL TRATAMIENTO DE DAM

Existen varios intentos de tratamientos para eliminar contaminantes de DAM: procesos biológicos (Magowo et al., 2020; Sahoo et al., 2020), adsorción (Ryu et al., 2020), flotación por aire (Bai et al., 2021), intercambio iónico (Park et al., 2019), ósmosis inversa (Ambiado et al., 2017), nanofiltración (Siew et al., 2020), precipitación (Menzel et al., 2021), electrocoagulación (Foudhaili et al., 2020), humedales (Zhao et al., 2020), bacterias anaeróbicas y algas (Carneiro Brandão Pereira et al., 2020). Estos tratamientos, en conjunto, retienen metales pesados y oxidan compuestos de azufre móviles (Bwapwa et al., 2017; Kaur et al., 2018; Martínez-Macias et al., 2019; Méndez-García et al., 2015; Pat-Espadas et al., 2018).

Las propuestas convencionales se centran en la neutralización del DAM mediante la adición de compuestos alcalinos como rocas calizas, cal, hidróxido de sodio, carbonato de sodio, alúmina, carbonatos de magnesio. No obstante, estos tratamientos conllevan a inversiones considerables, así como costos adicionales para reactivos y el problema que representa la eliminación de los lodos residuales (Sandlin et al., 2021).

Los tratamientos electroquímicos presentan avances prometedores; se clasifican en dos tipos: electrolíticos que requieren de una fuente externa de energía eléctrica y promueven reacciones químicas no espontáneas, y los galvánicos o voltaicos que no requieren inducción de corriente, al producir energía eléctrica a partir de las reacciones químicas espontáneas.

Actualmente los tratamientos de DAM mediante estos procesos han sido de gran utilidad debido a la posibilidad de recuperar metales disueltos. La desventaja de estos son los altos costos en el consumo de electricidad que se aplica a las celdas electrolíticas. Así, los tratamientos galvánicos podrían ser una gran opción para el tratamiento de DAM porque no requieren energía, ya que funcionan a través de procesos espontáneos. Por lo tanto, un sistema galvánico es eficiente, económico, ecológico, autónomo y portátil para operar en ubicaciones remotas (Alcalá-Delgado et al., 2018; Castillo-Suárez et al., 2019)

CONCLUSIONES

Las actividades mineras son un asunto que requiere de atención prioritaria. A través de los años ha sido cada vez más evidente la fragmentación de los ecosistemas que deterioran y reducen la flora, fauna y recursos físicos, entre ellos el suelo y el estrés hídrico, al cual son sometidas las regiones aledañas a las industrias que hacen uso de los recursos minerales. Aunado a esto, hay evidencia del deterioro de la calidad de vida de las poblaciones que se intoxican cotidianamente con el agua que beben y con los alimentos que cultivan, consumen y comercializan fuera de la región, llevando el problema a otros lugares.

[La realidad es que aun cuando las actividades mineras representan un fuerte problema ambiental, no es posible prescindir de ellas; la minería forma una parte importante del PIB y es fuente de materias primas en la industria de las telecomunicaciones, la construcción, la industria farmacéutica y los transportes, además de que es una fuente importante de empleo.

Los avances que se han generado a través de los años para tratar los residuos de la minería han contribuido de manera significativa al mejoramiento del ambiente. No se tiene la solución final, pero las investigaciones continúan y los aportes seguirán llegando a través de los años. Es de suma importancia reforzar los conocimientos científicos y tecnológicos en esta problemática como lo es el reforzamiento de las leyes en materia de protección ambiental en México y el mundo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo otorgado al proyecto financiado por la SIEA-UAEMEX (6449/2022 CIB).

REFERENCIAS

- Akcil, A. & Koldas, S. (2006). Acid Mine Drainage (AMD): causes, treatment and case studies. *Journal of Cleaner Production*, 14 (12-13), 1139 -114.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.09.006>
- Alcalá-Delgado, A. G., Lugo-Lugo, V., Linares-Hernández, I., Martínez-Miranda, V., Fuentes-Rivas, R. M. & Ureña-Nuñez, F. (2018). Industrial wastewater treated by galvanic, galvanic Fenton, and hydrogen peroxide systems. *Journal of Water Process Engineering*, 22(1–12), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.01.001>
- Alonso, D. L., Pérez, R., Okio, C. K. Y. A. & Castillo, E. (2020). Assessment of mining activity on arsenic contamination in surface water and sediments in southwestern area of Santurbán paramo, Colombia. *Journal of Environmental Management*, 264, 110478. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110478>
- Ambiado, K., Bustos, C., Schwarz, A. & Bórquez, R. (2017). Membrane technology applied to acid mine drainage from copper mining. *Water Science and Technology*, 75(3), 705-715. <https://doi.org/10.2166/wst.2016.556>
- Atangana, E. & Oberholster, P. J. (2021). Using heavy metal pollution indices to assess water quality of surface and groundwater on catchment levels in South Africa. *Journal of African Earth Sciences*, 182, 104254.
<https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2021.104254>
- Ayala, J. & Fernández, B. (2019). Treatment from abandoned mine landfill leachates. Adsorption technology. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(3), 2732–2740. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.04.009>
- Bai, S., Bi, Y., Li, J., Yu, P., Ding, Z., Lv, C. & Wen, S. (2021). Innovative utilization of acid mine drainage (AMD): A promising activator for pyrite flotation once depressed in a high alkali solution (HAS)—Gearing towards a cleaner production concept of copper sulfide ore. *Minerals Engineering*, 170, 106997.
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.106997>
- Bwapwa, J. K., Jaiyeola, A. T. & Chetty, R. (2017). Bioremediation of acid mine drainage using algae strains: A review. *South African Journal of Chemical Engineering*, 24, 62-70. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2017.06.005>

- Carrillo Cisneros, E., Espinosa Guillén, S., Olgún Negrete, B. R. & Cuevas Contreras, T. (2015). Imagen del destino turístico frente a la contingencia ambiental del 2014 en el Estado de Sonora. *La Revista de la Universidad Estatal de Sonora*, 4, 9-27.
- Carneiro Brandão Pereira, T., Batista dos Santos, K., Lautert-Dutra, W., de Souza Teodoro, L., de Almeida, V. O., Weiler, J., Homrich Schneider, I. A. & Reis Bogo, M. (2020). Acid mine drainage (AMD) treatment by neutralization: Evaluation of physical-chemical performance and ecotoxicological effects on zebrafish (*Danio rerio*) development. *Chemosphere*, 253, 1126665. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126665>
- Castillo-Suárez, L. A., Lugo-Lugo, V., Linares-Hernández, I., Martínez-Miranda, V., Esparza-Soto, M. & Mier-Quiroga, M. D. L. Á. (2019). Biodegradability index enhancement of landfill leachates using a Solar Galvanic-Fenton and Galvanic-Fenton system coupled to an anaerobic-aerobic bioreactor. *Solar Energy*, 188, 989-1001. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.07.010>
- COCHILCO. (2020). *Proyección de consumo de agua en la minería del cobre 2020-2031*. Dirección de Estudios y Políticas Públicas, DEPP 27/20.
- Corriveau, M. C. & Jamieson, H. E. Parsons, M. B. & Hall, G. E. M. (2011). Mineralogical characterization of arsenic in gold mine tailings from three sites in Nova Scotia. *Geochemistry Exploration Environment Analysis* 11(3), 179-192. <https://doi.org/10.1144/1467-7873/09-246>
- Csavina, J., Field, J., Taylor, M. P., Gao, S., Landázuri, A., Betterton, E. A. & Sáez, A. E. (2012). A review on the importance of metals and metalloids in atmospheric dust and aerosol from mining operations. *Science of the Total Environment*, 433, 58-73. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.06.013>
- Csavina, J., Landázuri, A., Wonaschütz, A., Rine, K., Rheinheimer, P., Barbaris, B., Conant, W., Sáez, A. E. & Betterton, E. A. (2011). Metal and metalloid contaminants in atmospheric aerosols from mining operations. *Water, Air, and Soil Pollution*, 221(1-4). <https://doi.org/10.1007/s11270-011-0777-x>
- EPA (2011). Method 1627: Kinetic test method for the prediction of mine drainage quality. USA environmental protection agency: Washington D.C., EPA-821-R-09-002
- Foudhaili, T., Lefebvre, O., Coudert, L. & Neculita, C. M. (2020). Sulfate removal from mine drainage by electrocoagulation as a stand-alone treatment or polishing step. *Minerals Engineering*, 152, 106337. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106337>

- Gaikwad, R. W. & Gupta, D. V. (2008). Review on removal of heavy metals from acid mine drainage. *Applied Ecology and Environmental Research*, 6(3), 81-98. https://doi.org/10.15666/aeer/0603_081098
- Gutiérrez-Ruiz M. & Moreno Turrent M. (1995). Los residuos en la minería mexicana, en F. J. Garfias Ayala y L. Barojas Weber (Eds.), *Residuos peligrosos en México* (pp. 37-44). Semarnap/INE, México D.F.
- Kaur, G., Couperthwaite, S. J., Hatton-Jones, B. W. & Millar, G. J. (2018). Alternative neutralisation materials for acid mine drainage treatment. *Journal of Water Process Engineering*, 22, 46-58. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.01.004>
- Kefeni, K. K., Msagati, T. A. M., Nkambule, T. T. I. & Mamba, B. B. (2018). Synthesis and application of hematite nanoparticles for acid mine drainage treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(2), 1865-1874. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.02.037>
- Lutz Ley, A. N. (2020). Minería y seguridad hídrica en el noroeste de México: un análisis de doble exposición. *Región y Sociedad*, 32, e1295. <https://doi.org/10.22198/rys2020/32/1295>
- Mafra, C., Bouzahzah, H., Stamenov, L. & Gaydardzhiev, S. (2020). Insights on the effect of pyrite liberation degree upon the acid mine drainage potential of sulfide flotation tailings. *Applied Geochemistry*, 123, 104774. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2020.104774>
- Magowo, W. E., Sheridan, C. & Rumbold, K. (2020). Global Co-occurrence of Acid Mine Drainage and Organic Rich Industrial and Domestic Effluent: Biological sulfate reduction as a co-treatment-option. *Journal of Water Process Engineering*, 38, 101650. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101650>
- Martínez-Macias, M. del R., Correa-Murrieta, M. A., Villegas-Peralta, Y., Dévora-Isiordia, G. E., Álvarez-Sánchez, J., Saldivar-Cabrales, J. & Sánchez-Duarte, R. G. (2019). Uptake of copper from acid mine drainage by the microalgae *Nannochloropsis oculata*. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(7), 6311-6318. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3963-1>
- Méndez-García, C., Peláez, A. I., Mesa, V., Sánchez, J., Golyshina, O. V. & Ferrer, M. (2015). Microbial diversity and metabolic networks in acid mine drainage habitats. In *Frontiers in Microbiology*, 6, 475. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.00475>

- Menzel, K., Barros, L., García, A., Ruby-Figueroa, R. & Estay, H. (2021). Metal sulfide precipitation coupled with membrane filtration process for recovering copper from acid mine drainage. *Separation and Purification Technology*, 270, 118721. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.118721>
- Moore, J. N. & Luoma, S. N. (1990). Hazardous wastes from large-scale metal extraction: A case study. *Environmental Science and Technology*, 24(9), 1278-1285. <https://doi.org/10.1021/es00079a001>
- Moran, R. E. (2000). Is this number to your liking? Water quality predictions in mining impact studies en D. Saraweit, R. A. Pielke, Jr., and R. Byerly, Jr. (Eds), *Prediction: Science, Decision Making and the Future of Nature* (185-198). Island Press
- Nqombolo, A., Mpupa, A., Gugushe, A. S., Moutloali, R. M. & Nomngongo, P. N. (2019). Adsorptive removal of lead from acid mine drainage using cobalt-methylimidazolate framework as an adsorbent: kinetics, isotherm, and regeneration. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(4), 3330-3339. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3868-z>
- Pan, Y., Ye, H., Li, X., Yi, X., Wen, Z., Wang, H., Lu, G. & Dang, Z. (2021). Spatial distribution characteristics of the microbial community and multi-phase distribution of toxic metals in the geochemical gradients caused by acid mine drainage, South China. *Science of the Total Environment*, 774, 145660. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145660>
- Park, I., Tabein, C. B., Jeon, S., Li, X., Seno, K., Ito, M. & Hiroyoshi, N. (2019). A review of recent strategies for acid mine drainage prevention and mine tailings recycling. *Chemosphere*, 219, 588-606. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.11.053>
- Pat-Espadas, A. M., Portales, R. L., Amabilis-Sosa, L. E., Gómez, G. & Vidal, G. (2018). Review of constructed wetlands for acid mine drainage treatment. *Water*, 10(11), 1685. <https://doi.org/10.3390/w10111685>
- Procuraduría Federal de Protección al Ambiente. (20 de septiembre de 2015) Atiende PROFEPA 44 emergencias ambientales en los últimos dos años. Gobierno de México. https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/v/7576/1/mx/atiende_profepa_44_emergencias_ambientales_en_los_ultimos_dos_anos.html.
- Ramírez Macedonio, J. L. & García Castro, N. (2020). Impacto socioambiental de la minería a cielo abierto en Mezcala, Guerrero, México. *RICSH Revista Iberoamericana de las Ciencias Sociales y Humanísticas*, 9(17), 219-239. <https://doi.org/10.23913/ricsh.v9i17.195>

- Ravi, S., D'Odorico, P., Over T. M. & Zobeck T. M. (2004). On the effect of air humidity on soil susceptibility to wind erosion: The case of air-dry soils. *Geophysical Research Letters*, 31, L09501.
- Rodríguez-Galán, M., Baena-Moreno, F. M., Vázquez, S., Arroyo-Torralvo, F., Vilches, L. F. & Zhang, Z. (2019). Remediation of acid mine drainage. *Environmental Chemistry Letters*, 17(4), 1529-1538. <https://doi.org/10.1007/s10311-019-00894-w>
- Ryu, S. C., Naidu, G., Moon, H. & Vigneswaran, S. (2020). Selective copper recovery by membrane distillation and adsorption system from synthetic acid mine drainage. *Chemosphere*, 260, 127528. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127528>
- Sahoo, H., Senapati, D., Thakur, I. S. & Naik, U. C. (2020). Integrated bacteria-algal bioreactor for removal of toxic metals in acid mine drainage from iron ore mines. *Bioresource Technology Reports*, 11, 100422. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100422>
- Sandlin, W., Langman, J. & Moberly, J. (2021). A review of acid rock drainage, seasonal flux of discharge and metal concentrations, and passive treatment system limitations. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 35(1), 34-47. <https://doi.org/10.1080/17480930.2020.1728035>
- SGM (Servicio Geológico Mexicano). (20 de septiembre de 2013). Panorama minero en México: Servicio Geológico Mexicano. Gobierno de México. Consulta los panoramas mineros estatales | Servicio Geológico Mexicano | Gobierno | gob.mx (www.gob.mx)
- Siew, Y. W., Zedda, K. L. & Velizarov, S. (2020). Nanofiltration of simulated acid mine drainage: Effect of pH and membrane charge. *Applied Sciences*, 10(1), 400. <https://doi.org/10.3390/app10010400>
- Volke, T., Velasco, A. & de la Rosa, A. (2005). Suelos contaminados por metales y metaloides: muestreo y alternativas para su remediación. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología. [SuelosContaminadosPorMetalesYMetaloides.pdf](https://www.gob.mx/documentos/SuelosContaminadosPorMetalesYMetaloides.pdf) (congreso.gob.pe)
- Zhao, Q., Huang, J. C., He, S. & Zhou, W. (2020). Enhancement of a constructed wetland water treatment system for selenium removal. *Science of the Total Environment*, 714, 136741. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136741>