

DOI: 10.24850/j-tyca-2021-06-12

Notas

Arsénico y mercurio en el paisaje de una zona minera histórica en el oriente de Michoacán, México

Arsenic and mercury in the landscape of a historic mining zone in Eastern Michoacán, Mexico

Roberto Lindig-Cisneros¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2542-7038>

Silvia Y. Gómez-Orozco²

Verónica Osuna-Vallejo³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2802-201X>

¹Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad, Universidad Nacional Autónoma de México, Michoacán, México, rlindig@cieco.unam.mx

²Departamento de Calidad del Agua, Comisión Nacional del Agua, Michoacán, México, silvia.gomezo@conagua.gob.mx

³Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad, Universidad Nacional Autónoma de México, Morelia, México, rosuna@cieco.unam.mx

Autora para correspondencia: Verónica Osuna-Vallejo,
rosuna@cieco.unam.mx

Resumen

Las actividades mineras tienen efectos negativos en sus diferentes tiempos de actividad y en todos los niveles ecológicos, lo que en muchas ocasiones perjudica a las poblaciones aledañas. Uno de esos efectos negativos es el ingreso de metales pesados a las redes tróficas en las regiones mineras, por lo que es importante cuantificar su presencia como resultado de la actividad minera. El distrito minero de Tlalpujahua y El Oro tiene una historia de más de 400 años, que cesó hace más de 60 años. En este distrito, uno de los métodos utilizados para el beneficio del mineral fue el de flotación de mercurio. Por lo anterior, en este estudio se cuantificó dicho metal en muestras de agua de Tlalpujahua. Los resultados obtenidos del muestreo realizado en diversas fuentes de agua de la población indican que las concentraciones de mercurio (Hg) y arsénico (As) se encontraron por debajo del límite de detección o por debajo de la norma. Con los resultados obtenidos y los de estudios anteriores se hace una propuesta de manejo ambiental para reducir los riesgos derivados de la presencia de mercurio en el paisaje.

Palabras clave: metales pesados, contaminación, residuos mineros.

Abstract

Mining has negative effects during all the stages of the processes involved and at all ecological levels, all of which frequently cause harm to local communities. One negative effect of particular concern is the entry of heavy metals into trophic nets in mining areas, because of this is important to quantify their presence because of mining activities. The mining district of Tlalpujahua y El Oro has a mining history of more than 400 years, that ended more than 60 years ago. In this district, one method that was employed to process the minerals was flotation by mercury. Because of this, we studied its presence in water samples of Tlalpujahua. The results from sampling diverse water sources of the town indicate that mercury and arsenic concentrations are below the detection limit or below the limit established by the applicable norm. With these results and those of former studies an environmental management proposal is made for reducing the risks to the population caused by the presence of mercury in the landscape.

Keywords: Heavy metals, contamination, mining waste.

Recibido: 26/06/2020

Aceptado: 14/11/2020

Introducción

La explotación de yacimientos minerales es una actividad humana que destruye de manera significativa a los ecosistemas. Por ejemplo, en México, en el año 2012, se reportó una superficie de 30 872 574 hectáreas con algún tipo de actividad minera, desde exploración hasta extracción, lo que representa poco más del 15 % de la extensión del territorio nacional (Servicio Geológico Mexicano 2013).

En las diferentes etapas de la actividad minera se generan diversos impactos al medio ambiente, al haber una alteración y destrucción del hábitat con la consecuente fragmentación de cobertura vegetal, desplazamiento de fauna y en ocasiones bioacumulación de contaminantes (Roberts & Johnson, 1978; Pratas, Prasad, Freitas, & Conde, 2005). Otras consecuencias son la eutroficación, reducción de disponibilidad de nutrientes en el medio abiótico, cambios significativos en las propiedades del suelo, y contaminación de la red hidrográfica (Corona-Chávez, Uribe-Salas, Razo-Pérez, & Martínez-Medina, 2010; Corona-Chávez, Uribe-Salas, Razo-Pérez, & Martínez-Medina, 2017). Las alteraciones de la topografía hacen a los suelos susceptibles a la erosión, se genera inestabilidad de taludes y se acumulan residuos en jales y terreros (Bradshaw 1997; Cortinas-de-Nava, 2008).

Los jales que se generan en los diferentes procesos de extracción de los minerales con valor económico como el oro, plata, zinc y cobre generalmente contienen minerales metálicos residuales que son la fuente de elementos potencialmente tóxicos (EPT), como mercurio (Hg), arsénico (As), cadmio (Cd), plomo (Pb), cobre (Cu) y zinc (Zn) (Romero, Armienta, & González-Hernández, 2007). El principal problema ambiental asociado con los jales está relacionado con la generación de drenajes tóxicos y su dispersión a través de los escurrimientos superficiales (Martin & Gutiérrez, 2010). Cabe destacar que las altas concentraciones de EPT disueltos derivan en problemas ambientales severos, pues al transportarse contaminan suelos, sedimentos, aguas superficiales y aguas subterráneas (Armienta & Segovia, 2008; Jung, 2001; Lin, 1997; Johnson *et al.*, 2003; Moncur, Ptaceka, Blowesa, & Jamborc, 2005).

Tlalpujahua, Michoacán, en el centro-oeste de México es un sitio con una historia minera significativa de más de 400 años de explotación, que ha dejado residuos mineros en los que ha ocurrido una regeneración natural, pero parcial, de la vegetación después de 60 años de abandono de tal actividad (Corona-Chávez *et al.*, 2010). El descubrimiento de las vetas que contenían oro y plata en Tlalpujahua fue en el año de 1558. Para la extracción del metal de interés se comenzó utilizando el proceso de beneficio del mineral por medio de amalgamación con mercurio, que fue introducido a mediados del siglo XVI en América. Este método lo implementaron por 352 años (1554-1906) en el distrito minero (Lacerda 1997; Martínez-Medina 2009a). En 1897 se introduce el método de

cianuración (proceso de McArthur Forrest), en un principio para reciclar los residuos mineros y se hacía a la par que la amalgamación hasta que éste lo sustituye totalmente en 1906 (Uribe-Salas, 2006; Uribe-Salas, 2008). Los residuos de dichos procedimientos se acumularon en jales cercanos a la zona de extracción. Por otro lado, las rocas de la formación geológica del Distrito Minero de Tlalpujahua y el Oro, de manera natural poseen concentraciones altas de As, que en los jales oscila entre 3.0 y 83.9 ppm (Corona-Chávez *et al.*, 2017), por lo que este elemento es también una fuente potencial de riesgos para la población.

Los jales han sido una fuente de riesgo constante para las personas que habitan esta zona, como el terrible accidente ocurrido el 27 de mayo en 1937, cuando un desbordamiento de los jales mató a más de 300 personas y derramó desechos tóxicos en toda la zona (Macías *et al.*, 2015).

Se ha reportado la reducción del volumen de los jales en un 37 a 35 % debido a procesos de erosión y fuertes precipitaciones en Tlalpujahua (Martínez-Medina 2009b; Corona Chávez *et al.*, 2010). Hoy en día, alrededor y en los propios jales se han establecido asentamientos humanos, y se practica agricultura de subsistencia, en particular el cultivo de maíz. En un estudio previo se detectó y cuantificó el Hg contenido en tejidos vegetales de plantas creciendo en el paisaje de Tlalpujahua (Osuna-Vallejo, Sáenz-Romero, Escalera-Vázquez, De-la-Barrera, & Lindig-Cisneros, 2019). Los resultados de este estudio mostraron que las concentraciones más altas de Hg corresponden a

muestras de madera de árboles (13.84 ± 3.88 ppm), y que la vegetación que se desarrolla en los bosques alrededor de los jales muestra concentraciones bajas de Hg entre 2.2 y 4.3 ppm; una especie arbórea, *Juniperus deppeana*, presentó las concentraciones más altas cuando crece en los jales (16.05 ± 2.3 ppm). Las semillas de maíz cultivado en los jales también mostraron concentraciones de Hg de 2.2 ± 0.34 ppm (Figura 1).

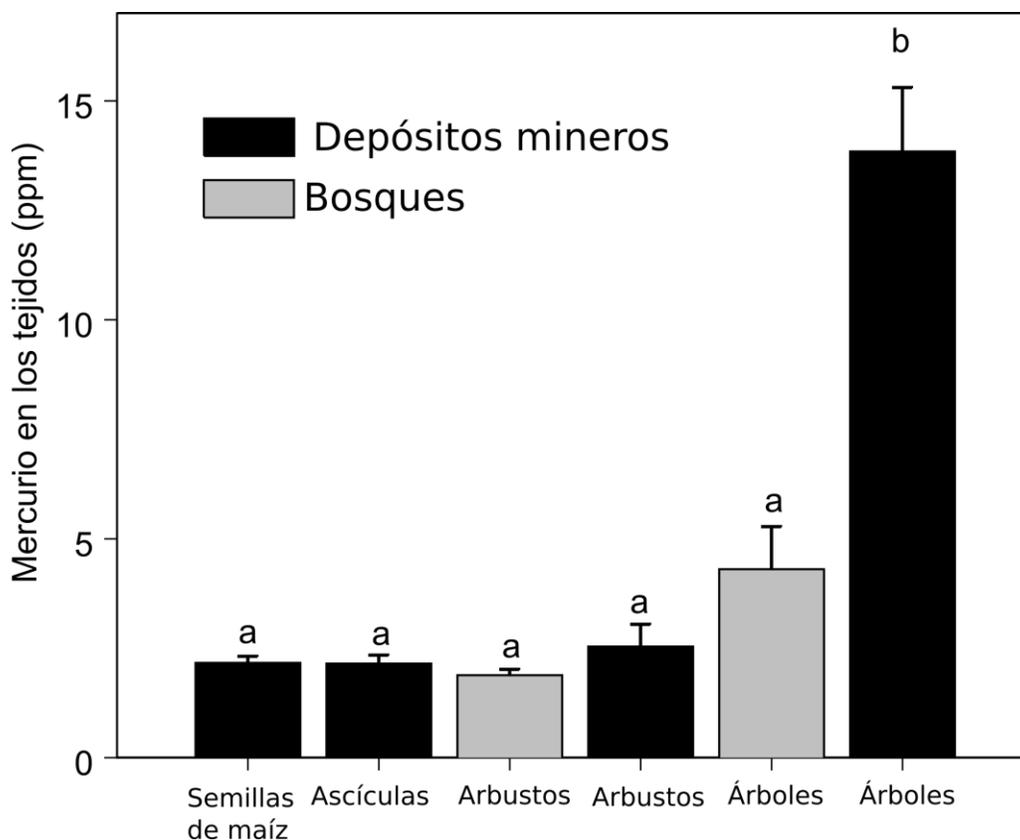


Figura 1. Hg en los tejidos de plantas creciendo en los depósitos mineros (jales) y en el bosque circundante.

Se ha reportado que los residuos mineros de Tlalpujahua no producen drenaje ácido (Corona-Chávez *et al.*, 2010), por lo que la mayoría de los metales pesados que contienen no se dispersan y no se encuentran biodisponibles; sin embargo, los datos obtenidos de la vegetación indicaron que existe cierta movilidad de este elemento en el ecosistema (Osuna-Vallejo, Sáenz-Romero, Villegas, & Lindig-Cisneros, 2017). Por lo anterior, para evaluar la posible exposición de la población al Hg, se llevaron a cabo análisis de agua por absorción atómica de diversas fuentes en Tlalpujahua.

Métodos

Las muestras se tomaron en la semana del 16 al 20 de noviembre de 2019; se localizaron 25 sitios de interés considerando la cercanía y la influencia minera de la zona, para ello se contó con el apoyo del Organismo Operador de Agua Potable de Tlalpujahua de los pozos profundos utilizados para el abastecimiento público de la localidad. El muestreo lo efectuó personal técnico de la Comisión Nacional del Agua

(Conagua), acreditado como signatarios de muestreo ante la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA) de acuerdo con lo establecido en la NOM-230-SSA1-2002. Se determinaron parámetros de campo (pH, conductividad eléctrica, salinidad, y potencial redox) con apoyo de la sonda marca Hydrolab, modelo DS-5. Cada sitio se georreferenció con apoyo del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) marca GARMIN.

Las muestras se analizaron en el Laboratorio de Calidad del Agua perteneciente al Organismo de Cuenca Balsas de la Conagua, en el municipio de Cuernavaca, Morelos, y que cuenta con la acreditación ante la EMA de la NMX-AA-051-SCFI-2001 para la determinación de metales pesados por absorción atómica (marca Perkin Elmer y el modelo de hidruros es FIAS 100), en la cual se incluyen los parámetros en estudio As y Hg. Los sitios considerados para la toma de muestras fueron tres pozos profundos, un tanque de almacenamiento, dos manantiales, un ojo de agua, dos tomas del río Tlalpujahuá, dos tomas de agua inmediatas a una entrada de la mina Dos Estrellas y 14 tomas domiciliarias con agua provenientes de la red de distribución de agua potable del municipio. Los sitios de toma de muestras se muestran en la Figura 2.

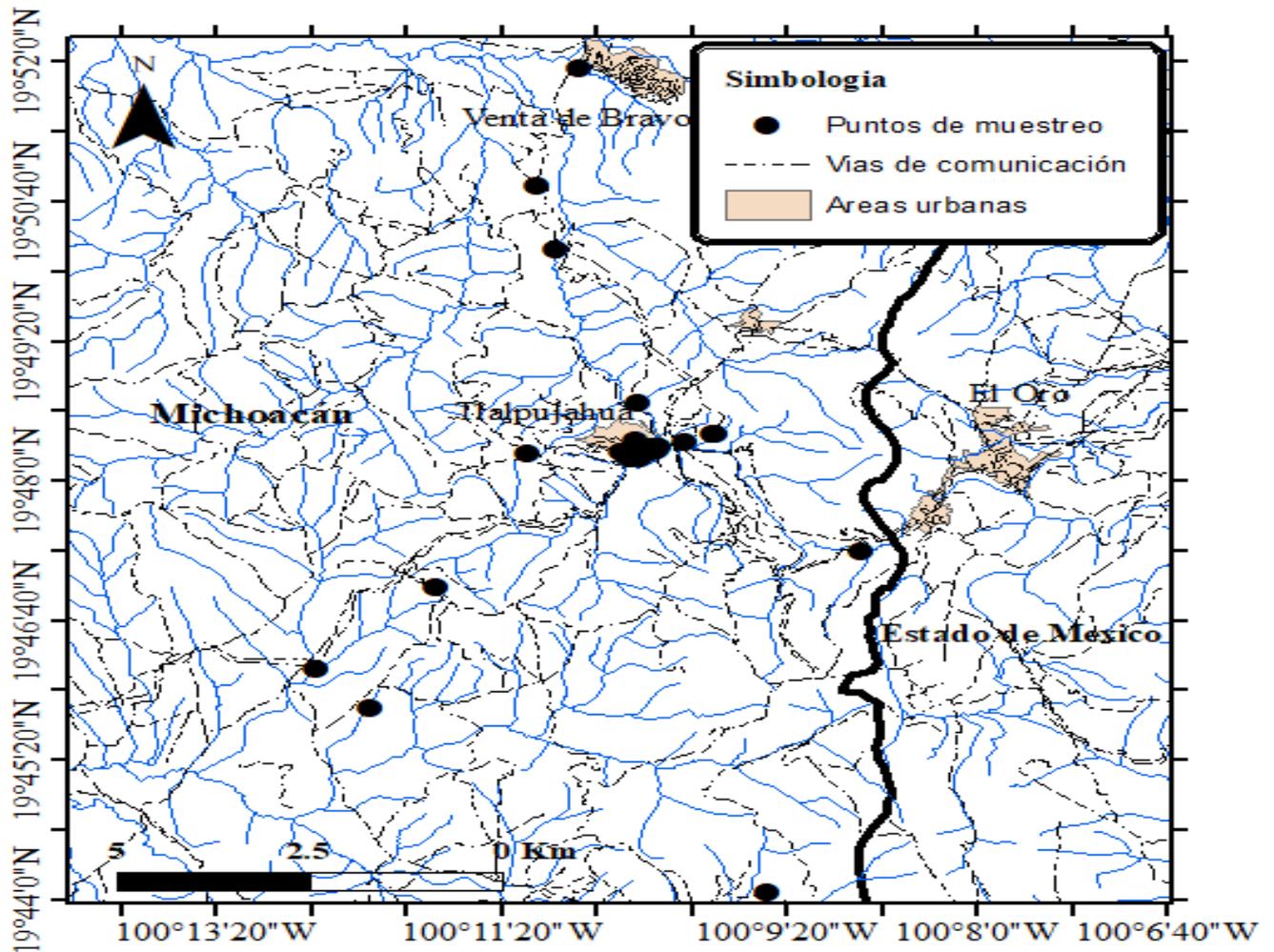


Figura 2. Mapa de los puntos de muestreo del distrito minero Tlapujahua-El Oro.

Resultados

Los resultados de los análisis que se observan en la Tabla 1 nos indican que en las muestras tomadas en los pozos profundos de agua considerada para uso y consumo humano se encuentran dentro los límites máximos permisibles establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 (1996), donde la cantidad máxima permisible para As es de 0.025 ppm y Hg es de 0.001 ppm.

Tabla 1. Concentraciones de Hg y As en los puntos de muestreo y parámetros determinados en campo (16-20 de noviembre 2019).

Muestra	Hg mg/l	As	pH (UpH)	C.E. (μ S/cm)	Salinidad	O.D. (mg/l)	Latitud	Longitud
Toma domiciliada 1	< 0.001	< 0.002	8.05	216	0.1	5.22	19.8066	-100.1732
Toma domiciliada 2	< 0.001	< 0.002	8.41	178	0.08	7.06	19.8053	-100.1735
Toma domiciliada 3	< 0.001	< 0.002	7.97	245	0.12	7.45	19.8047	-100.1713
Toma domiciliada 4	< 0.001	< 0.002	6.5	221	0.1	8.15	19.8050	-100.1708
Toma domiciliada 5	< 0.001	< 0.002	6.5	278	0.13	6.9	19.8054	-100.1715

Toma domiciliada 6	< 0.001	< 0.002	7.55	755	0.39	4.16	19.8054	-100.1715
Toma domiciliada 7	< 0.001	< 0.002	6.5	439	0.22	7.44	19.8063	-100.1676
Toma domiciliada 8	< 0.001	< 0.002	7	882	0.46	6.57	19.8077	-100.1643
Manantial Ramón Rayón	< 0.001	< 0.002	7.5	1034	0.54	3.57	19.8076	-100.1639
Pozo venta de Bravo	< 0.001	< 0.002	7.83	439	0.22	5.83	19.8659	-100.1800
Tanque campo del Gallo	< 0.001	< 0.002	7.01	440	0.22	5.36	19.8044	-100.1858
Pozo La Estigia	< 0.001	< 0.002	7.01	377	0.19	5.3	19.7703	-100.2106
Pozo San Isidro	< 0.001	0.063 ± 0.0005	7.13	352	0.12	-	19.7638	-100.2044
Manantial Chichije	< 0.001	< 0.002	8.05	61.9	0.02	7.5	19.7831	-100.1967
Ojo de agua	< 0.001	< 0.002	7.43	238	0.11	6.58	19.8471	-100.1848
Río Tlalpujahua	< 0.001	0.064 ± 0.0005	7.75	1046	0.55	7.66	19.8369	-100.1825
Río Tlalpujahua 2	< 0.001	< 0.002	7.78	300.3	0.15	4.74	19.7890	-100.1470
Aportador Mina Dos	< 0.001	< 0.002	7.77	1825	0.97	6.34	19.8004	-100.0761

Estrellas								
Los Cedros	< 0.001	0.0751 ± 0.0024	7.48	1864	0.99	4.46	19.7346	-100.1579
Toma domiciliada 9	< 0.001	< 0.002	7.3	173	0.08	6.83	19.8047	-100.1749
Toma domiciliada 10	< 0.001	< 0.002	7.96	245	0.12	6.94	19.8038	-100.1738
Toma domiciliada 11	< 0.001	< 0.002	7.91	216	0.1	6.53	19.8038	-100.1728
Toma domiciliada 12	< 0.001	< 0.002	7.19	72.8	0.15	6.8	19.8125	-100.1729
Toma domiciliada 13	< 0.001	< 0.002	7.12	233	0.11	6.98	19.8043	-100.1743
Toma domiciliada 14	< 0.001	< 0.002	7.47	181	0.08	7.29	19.8056	-100.1707

Los resultados obtenidos de las muestras tomadas en el río Tlalpujahuá están dentro de los límites máximos establecido por los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (CE-CCA-001/89), considerando la clasificación para uso en riego agrícola, donde el máximo permisible

para As es de 0.1 ppm, mientras que el mercurio no se regula para estos fines de uso.

En cumplimiento al control de calidad analítica y como control se consideró dentro del muestreo un blanco de viaje con agua destilada para arsénico y otro para mercurio, los cuales se consideran como el valor referencia a restar de cada resultado obtenido para cada sitio, lo que quiere decir que las muestras que presenten como resultado estas mismas concentraciones se consideran como "no detectable". Los resultados obtenidos del blanco de viaje para arsénico < 0.0020 mg/l y para mercurio < 0.0010 mg/l.

En concordancia con lo anterior y del análisis de los resultados obtenidos de las muestras se consideran con valores "detectables" en el parámetro arsénico los siguientes cuerpos de agua:

- Río Tlalpujahua: As 0.0064 mg/l
- Los Cedros: As 0.0751 mg/l
- Pozo San Isidro: As 0.0063 mg/l

Sin embargo, los resultados obtenidos de arsénico tanto en el río Tlalpujahua como en el cuerpo de agua Los Cedros se encuentran dentro de las concentraciones máximas recomendadas por los CE-CCA-001/89 "uso riego agrícola". Para el caso de Los Cedros se toma de seguimiento la muestra colectada en el aportador de la Mina Dos Estrellas

(considerada como punto aguas abajo del mismo cauce), que muestra concentraciones “no detectables”, indicativo de la dilución natural del cauce. En el caso del Pozo San Isidro, se toma como concentración máxima permisible según NOM-127-SSA1-1994 para As: 0.025 mg/l, por lo que el resultado obtenido está por debajo del máximo recomendable.

Discusión y recomendaciones de manejo ambiental

Los resultados del presente estudio y del estudio previo sobre mercurio en la vegetación (Osuna-Vallejo *et al.*, 2019) indican que este metal se encuentra en el ambiente de Tlalpujahua, y sugieren que debido a la geología del sitio y las características fisicoquímicas de los jales no se moviliza fácilmente, pues las fuentes de agua están libres de mercurio. Sin embargo, la práctica de cultivar maíz en los jales debe ser evitada dado que se detectaron concentraciones altas del metal en las semillas que son consumidas (Osuna-Vallejo *et al.*, 2019). El hecho de que los árboles, en particular *Juniperus deppeana*, acumulen mercurio en la

madera permite proponer que se les utilice para secuestrar este metal y mantenerlo, en la medida de lo posible, fuera de las redes tróficas (Cunningham, Berti, & Huang, 1995; Wong, 2003; Petruzzelli, Pedron, Rosellini, & Barbafieri, 2013). Por otro lado, el arsénico que forma parte de las rocas de la región también se encuentra en concentraciones muy bajas en el agua aun por debajo de lo que establece la norma oficial mexicana. Sin embargo, se sabe que las actividades mineras pueden causar que se contaminen las fuentes de agua con arsénico (Armienta & Segovia, 2008) y que en algunas regiones de México la sobreexplotación de acuíferos puede incrementar la concentración de este elemento en el agua (Martínez-Rodríguez, Faz-Contreras, Rivera-González, Núñez-Hernández, & De-Paul-Alvarez-Reyna, 2006; Salas-Escageda, Salas-Plata-Mendoza, Sanín, & Dena-Ornelas, 2015). Con base en lo anterior, se propone para los jales del distrito minero de Tlalpujahuá y El Oro que se prescindan del cultivo en los mismos, así como de actividades pecuarias, para evitar que el Hg sea consumido por los pobladores y la zona se reforeste con especies de coníferas.

En un ensayo de restauración se determinaron dos especies, *Pinus pseudostrabus* y *Pinus devoniana*, que tuvieron el mayor incremento en altura dos años después de plantados, pero *Juniperus deppeana* mostró la mayor supervivencia (96 %). *Pinus devoniana* es exótica al sitio de prueba en Tlalpujahuá y se localiza de manera natural en menor altitud que la plantación (2 596 m), por lo que podría ser de utilidad para compensar los efectos del cambio climático. Así, en cuanto a la escala del paisaje (Figura 3), se propone establecer plantaciones para

biosecuestración en los jales y limitar las actividades agropecuarias fuera de estos depósitos mineros. Por otro lado, la reforestación y restauración de los bosques permitiría conservar la recarga de los acuíferos, y evitar el fenómeno de aumento en la concentración de arsénico por sobreexplotación que se ha observado en otras partes del país.



Figura 3. Esquema de manejo propuesto para el distrito minero de Tlalpujahuá y El Oro para reducir el riesgo de la población a la exposición de mercurio y arsénico.

En cuanto a los resultados de pH en los sitios de muestreo todo está dentro de los rangos permisibles en la Norma Oficial Mexicana PROY NOM-250-SSA1-2014.

Referencias

- Armienta, M. A., & Segovia, N. (2008). Arsenic and fluoride in the groundwater of Mexico. *Environmental Geochemistry and Health*, 30, 345-53.
- Bradshaw, A. D. (1997). Restoration of mine lands: Using natural processes. *Ecological Engineering*, 8, 225-269.
- Corona-Chávez, P., Uribe-Salas, A. J., Razo-Pérez, N., & Martínez-Medina, M. (2010). The impact of mining in the regional ecosystem: The mining district of El Oro and Tlalpujahua, México. *De Re Metallica*, 15, 21-34.
- Corona-Chávez, P., Maldonado, R., Ramos-Arroyo, Y. P., Robles-Camacho, J., Lozano-Santa-Cruz, R., & Martínez-Medina, M. (2017). Geoquímica y mineralogía de los jales del distrito minero Tlalpujahua-El Oro, México, y sus implicaciones de impacto ambiental. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 34, 250-273.
- Cortinas-De-Nava, C. (2008). *Manejo de los relaves o jales mineros*. México, DF, México: Instituto Nacional de Ecología, Dirección General de Materiales, Residuos y Actividades Riesgosas del INE. Recuperado de <http://www.ine.gob.mx>

- Cunningham, S. D., Berti, W. R., & Huang, J. W. (1995). Remediation of contaminated soils and sludges by green plants. In: Hinchee, R. E., Means, J. L., & Burris, D. R. (eds.). *Bioremediation of inorganics* (pp. 33-54). Columbus-Richland, USA: Batelle Press.
- Johnson, D. B., (2003) Chemical and Microbiological Characteristics of Mineral Spoils and Drainage Waters at Abandoned Coal and Metal Mines. *Water, Air and Soil Pollution: Focus*, 3, 47-66
- Jung, M. C., (2001). Heavy metal contamination of soils and waters in and around the Imcheon Au-Ag mine, Korea. *Applied Geochemistry*, 16, 1369-1375.
- Lacerda, L. D. (1997). Global mercury emissions from gold and silver mining. *Water, Air and Soil Pollution*, 97, 209-221.
- Lin, Z. (1997). Mobilization and retention of heavy metals in mill-tailings from Garpenberg sulfide mines, Sweden, *Science of The Total Environment*, 198, 13-31.
- Heavy metal retention in secondary precipitates from a mine rock dump and underlying soil, Dalarna, Sweden
- Macías, J. L., Corona-Chávez, P., Sánchez-Núñez, J. M., Martínez-Medina, M., Garduño-Monroy, V. H., Capra, L., García-Tenorio, F., & Cisneros-Máxim, G. (2015). The 27 May 1937 catastrophic flow failure of gold tailings at Tlalpujahua, Michoacán, Mexico. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15, 1069-1085.

- Martín, F., & Gutiérrez, M. (2010). Estudio comparativo de la peligrosidad de jales en dos zonas mineras localizadas en el sur y centro de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 62(1), 43-53.
- Martínez-Rodríguez, J. G., Faz-Contreras, R., Rivera-González, M., Núñez-Hernández, G., & De-Paul-Alvarez-Reyna, V. (2006). Cambios temporales de metales pesados y nitratos en el acuífero principal de la Comarca Lagunera. *Agrofaz*, 6, 423-432.
- Martínez-Medina, M. (2009a). *Diagnóstico de impacto ambiental causado por la minería en el distrito minero de El Oro-Tlalpujahuá mediante el uso de un Sistema de Información Geográfica (SIG)* (tesis de maestría). Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México.
- Martínez-Medina, M. (2009b). *Evaluación de la importancia económica (recuperación secundaria) y del efecto del impacto ambiental en la calidad del agua por residuos mineros (jales) en el distrito minero de Tlalpujahuá Michoacán* (tesis). Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Postgrado en Geociencias y Planificación del Territorio, México.
- Moncur, M. C., Ptacek, C. J., Blowes, D. W., & Jambor, J. L. (2005). Release, transport and attenuation of metals from an old tailings impoundment. *Applied Geochemistry*, 20, 639-659.
- NOM-127-SSA1-1994. (1996). Salud ambiental, agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a

que debe someterse el agua para su potabilización, publicada en el *Diario Oficial de la Federación* del 18 de enero de 1996 y su modificación del 22 de noviembre del 2000.

Osuna-Vallejo, V., Sáenz-Romero, C., Escalera-Vázquez, L., De-la-Barrera, E., & Lindig-Cisneros, R. (2019). Total mercury in plant tissue from a mining landscape in Western Mexico. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 102, 19-24.

Osuna-Vallejo V., Sáenz-Romero, C., Villegas, J., & Lindig-Cisneros, R. (2017). Species and provenance trial conducted for selection of conifers to be used in the restoration of mine dumps. *Ecological Engineering*, 105, 15–20.

Pratas, J., Prasad, M. N. V., Freitas, H., & Conde, L. (2005). Plants growing in abandoned mines of Portugal are useful for biogeochemical exploration of arsenic, antimony, tungsten and mine reclamation. *Journal of Geochemical Exploration*, 85(3), 99-107.

Petruzzelli, G., Pedron, F., Rosellini, I., & Barbafieri, M. (2013). Phytoremediation towards the future: Focus on bioavailable contaminants. In: Gupta D. (ed.). *Plant-Based Remediation Processes*. *Soil Biology*, 35, 273-289.

Roberts, R. D., & Johnson, M. S. (1978). Dispersal of heavy metals from abandoned mine workings and their transference through terrestrial food chains. *Environmental Pollution*, 16, 293-310. Recuperado de [https://doi.org/10.1016/0013-9327\(78\)90080-0](https://doi.org/10.1016/0013-9327(78)90080-0)

- Romero, F. M., Armienta, M. A., & González-Hernández, G. (2007). Solid phase control on the mobility of potentially toxic elements in an abandoned lead/zinc mine tailings impoundment, Taxco, Mexico. *Applied Geochemistry*, 22, 109-127.
- Salas-Escageda, R. M., Salas-Plata-Mendoza, J. A., Sanín, L. H., & Dena-Ornelas, O. S. (2015). Arsénico en agua de pozos del sistema de abastecimiento de Ciudad Juárez, Chihuahua. *Ciencia en la Frontera: Revista de Ciencia y Tecnología de la UACJ*, 13, 9-17.
- Servicio Geológico Mexicano. (2013). *Anuario estadístico de la minería mexicana 2012*. Recuperado de http://www.sgm.gob.mx/productos/pdf/O_Anuario_2012_Edicion%202013.pdf.
- Uribe-Salas, J. A. (2008). *Historia de la minería en Michoacán, Morelia*. Dos volúmenes. Morelia, México: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Sociedad Mexicana de Mineralogía, Museo Tecnológico del Siglo XIX "Las Dos Estrellas", Morevallado Editores.
- Uribe-Salas, J. A. (2006). *Historia económica y social de la compañía minera Las Dos Estrellas, en El Oro y Tlalpujahuá, S. A. 1898-1938*. Morelia, México: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Historia.
- Wong, M. (2003). Ecological restoration of mine degraded soils, with emphasis on metal contaminated soils. *Chemosphere*, 50, 775-780.