

Análisis de la problemática ambiental en Villa de la Paz-Matehuala-Cerrito Blanco, San Luis Potosí

Analysis of environmental issues at Villa de la Paz-Matehuala-Cerrito Blanco, San Luis Potosí

Jejanny Lucero **Hernández-Martínez**¹, Yadira Jazmín **Mendoza-Chávez**¹, Francisco Martín **Romero**², Nadia **Martínez-Villegas**^{1,*}

¹ División de Geociencias Aplicadas, IPICYT, Camino a la Presa San José 2055, Lomas 4a Sección, S.L.P., 78216, San Luis Potosí, México.

² Departamento de Geoquímica, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Cd. Universitaria, Circuito de la Investigación Científica, Coyoacán, 04510, CDMX, México.

* Autor para correspondencia: (N. Martínez-Villegas) nadia.martinez@ipicyt.edu.mx

Cómo citar este artículo:

Hernández-Martínez, J.L., Mendoza-Chávez, Y.J., Romero, F. M., Martínez-Villegas, N., 2023, Análisis de la problemática ambiental en Villa de la Paz-Matehuala-Cerrito Blanco, San Luis Potosí: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 75 (2), A030523. <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2023v75n2a030523>

Manuscrito recibido: 2 de Diciembre de 2022.
Manuscrito corregido: 23 de Febrero de 2023.
Manuscrito aceptado: 1 de Marzo de 2023.

La revisión por pares es responsabilidad de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia [CCBY-NC-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>)

RESUMEN

El suelo de Villa de la Paz y Matehuala, en San Luis Potosí, México, se encuentra contaminado por metales pesados. La responsable de la contaminación en Villa de Paz ha sido la industria minera, mientras que la industria metalúrgica lo ha sido en Matehuala. En éste último, la contaminación por As ha incluso llegado a impactar el agua subterránea del acuífero somero. El agua subterránea contaminada llega a la localidad de Cerrito Blanco y es utilizada para uso de la población (irrigación de cultivos, pasto y actividades recreativas). La zona de interés (Villa de la Paz, Matehuala y Cerrito Blanco) ha sido estudiada para determinar la afectación al suelo, al agua y a la salud de la población. En este trabajo se realizó una búsqueda sistemática de la literatura publicada disponible. La literatura fue gestionada y evaluada de acuerdo a la metodología propuesta por la EPA en el año 2012 que comprende los siguientes factores: solidez, aplicabilidad y utilidad, claridad e integridad, incertidumbre y variabilidad y evaluación y revisión. Los trabajos que aprobaron dichos factores de evaluación fueron utilizados para analizar y sintetizar la información. El estudio de la zona de interés comenzó hace 25 años. A lo largo del tiempo, se ha encontrado contaminación del suelo de Villa de la Paz por la presencia de la industria minera, así como exposición de la población a Pb y As. También, se han encontrado altas concentraciones de As en el agua subterránea de un acuífero somero en Matehuala que llega a Cerrito Blanco a través de un sistema de lumbreras. Mientras la contaminación del suelo se atribuye principalmente a la industria minera, la contaminación del agua subterránea se atribuye a la industria metalúrgica, donde la movilidad del As presente en el suelo está controlada por procesos de disolución/precipitación de arseniatos metálicos. Sin embargo, la contaminación tiende a reducirse de 91.5 mg/L de As a 11.2 mg/L a lo largo de 1.3 km atribuyéndose esto a dos procesos: dilución y atenuación natural vía el ascenso capilar del agua subterránea. El último proceso resulta interesante de estudiar a mayor profundidad, así como la continuidad de la investigación que versa en la remediación del suelo y el agua subterránea. Al tratarse de un sitio con suelos altamente contaminados con As, ricos en Ca (ambiente semiárido) y bajas concentraciones de oxihidróxidos de hierro la información generada hasta ahora puede dar oportunidad a replicar los métodos empleados en otros sitios con características semejantes.

Palabras clave: arsénico, metalurgia, minería, agua subterránea, suelo.

ABSTRACT

The soil of Villa de la Paz and Matehuala, in San Luis Potosí, Mexico, is contaminated by heavy metals by the mining and metallurgical industries, respectively. Arsenic contamination impacted shallow groundwater. Groundwater contamination reached Cerrito Blanco, where groundwater is used for recreational activities and irrigation. The area of interest (Villa de la Paz, Matehuala and Cerrito Blanco) has been studied to determine the impact on soil, water, and the health of the population. In this paper, a systematic search of the available published literature was carried out. The literature was managed and evaluated according to the methodology proposed by the EPA in 2012 according to soundness, applicability and utility, clarity and completeness, uncertainty and variability, and evaluation and review criteria. The studies that approved these evaluation criteria were used to analyze and synthesize the information. The study of the area of interest began 25 years ago. Soil contamination and Pb and As exposure were found in Villa de la Paz due the presence of the mining industry. Additionally, high concentrations of As were found in shallow groundwater in Matehuala, which reaches Cerrito Blanco through a qanat. While soil contamination is mainly attributed to the mining industry, groundwater contamination is attributed to the metallurgical industry, where the mobility of As present in the soil is controlled by dissolution/precipitation processes of metallic arsenates. Arsenic contamination decreases from 91.5 mg/L of As to 11.2 mg/L along 1.3 km, likely due to dilution and natural attenuation via capillary rise of groundwater. The last process is interesting to study in greater depth, as well as the continuity of the research that deals with the remediation of soil and groundwater. Being a site with soils highly contaminated with As, rich in Ca (semi-arid environment) and low concentrations of iron oxyhydroxides, the information generated up to now can provide an opportunity to replicate the methods used in other sites with similar characteristics.

Keywords: arsenic, mining, metallurgy, groundwater, soil.

1. Introducción

El arsénico (As) es un metaloide del grupo 15 de la tabla periódica con masa atómica de 74.92 g/mol, número atómico de 33 y estados de oxidación de -3, +3 y +5. La abundancia del As en la corteza terrestre es de 1.7 mg/kg (Evanko y Dzombak, 1997; Yaroshevsky, 2006) y de manera natural se encuentra en sulfuros minerales como la arsenopirita (FeAsS), el oropimente (As_2S_3) o el realgar ($\alpha\text{-As}_4S_4$) (Ravenscroft *et al.*, 2009). La exposición prolongada a As a través del uso y consumo de agua contaminada para beber, preparar alimentos, irrigar cultivos o comer alimentos contaminados tiene efectos adversos en la salud. Algunos de estos incluyen lesiones cutáneas, trastornos circulatorios, complicaciones neurológicas, diabetes, complicaciones respiratorias, disfunción hepática y renal, cáncer y mortalidad (WHO, 2021). En México, 2 millones de personas están expuestas a concentraciones de As en agua que exceden los límites máximos permisibles establecidos en la normatividad ambiental mexicana (25 $\mu\text{g/L}$) (DOF, 2019).

En Villa de la Paz, Matehuala y Cerrito Blanco, en el Estado de San Luis Potosí, existe contaminación por As derivada de actividades mineras y metalúrgicas. En el distrito minero de Santa María de la Paz, ubicado en Villa de la Paz, se explotan minerales de oro (Au), cobre (Cu), plata (Ag), plomo (Pb) y zinc (Zn) de las minas Cobriza y Dolores, desde hace más de 200 años (Castro-Larragoitia *et al.*, 1997; Pinto-Linares, 2008). Como resultado de lo anterior existen depósitos de residuos de mina históricos y recientes (Manz y Castro, 1997). Los residuos históricos corresponden a depósitos de estériles de mina o terreros así como presas de jales inactivas con evidencias claras de alteración (oxidación) avanzada de minerales sulfurosos (Razo, 2002; Mccauley-Whiteker, 2021). Los residuos más recientes corresponden a terreros y depósitos de jales (material fino remanente de la flotación selectiva) que se encuentran en una presa activa de jales (Razo, 2002; Mccauley-Whiteker, 2021). La presa más grande de residuos históricos

de la explotación del sistema Pb-Zn-Ag contiene aproximadamente 8×10^6 toneladas de jales con una concentración promedio de 4,000 mg/kg de As y una concentración de hasta 41,000 mg/kg de As en las partículas más pequeñas ($<63 \mu\text{m}$) (Castro-Larragoitia *et al.*, 1997). Los jales de la zona contienen cantidades residuales de elementos potencialmente tóxicos (EPT) y minerales sulfurosos (como piritita y arsenopiritita) que generan drenaje ácido de mina (DAM) y/o se dispersan por viento y agua contaminando el suelo y el agua de la zona (Castro-Larragoitia *et al.*, 1997; Razo, 2002). La dispersión de la contaminación incluye también el acarreo de jales y material de los terreros por parte de la población para la construcción de viviendas y otras obras urbanas. Lo anterior sugiere, por lo tanto, un riesgo para la población expuesta a residuos que pudieran llegar a ser peligrosos. Para el año 2021, existía un total de cuatro depósitos de jales, entre ellos, uno activo al que se adicionaban, aproximadamente, 10,000 toneladas de material al día (Mccauley-Whiteker, 2021).

En la ciudad de Matehuala, localizada en el municipio del mismo nombre, se encuentra una fundición de Pb que operó de 1905 a 1965, procesó pirometalúrgicamente concentrados provenientes de la mina de Villa de la Paz y generó un depósito de escorias negras de aproximadamente 150,000 m^2 de área y 15-20 metros de altura (Manz y Castro, 1997). De manera general, las escorias contienen una matriz silicatada de SiO_2 (40%), FeO (24%), CaO (21%), Al_2O_3 (3%), K_2O (2%), MgO (1%), MnO (1%), Zn (3%), Pb (0.5%), As (0.4%), Cu (0.2%) y Ba (0.2%) y cantidades importantes de EPT de muy baja movilidad a condiciones ambientales (Manz y Castro, 1997). Los restos de la fundición que fue demolida en el sitio en 1965 son ricos en EPT derivados de la deposición de vapores y polvos en las paredes de la chimenea del proceso pirometalúrgico. Dichos restos generaron escombros que contaminaron el suelo y fueron utilizados ocasionalmente como banco de material para tapar baches en las calles de la ciudad de Matehuala (Hernández-Bárceñas, 2017). Los escombros de la fundición han sido recientemente

diferenciados de escombros de construcción que son eventualmente depositados en el terreno de la fundición abandonada pero que podrían no estar contaminados con EPT.

El suelo del terreno de la antigua fundición abandonada está altamente contaminado con As (hasta 49,413 mg/kg) y el agua subterránea del acuífero somero localizado en Matehuala está contaminado (con hasta 150 mg/L de As; (Rodríguez-Rodríguez, 2016; Martínez-Villegas *et al.*, 2013a). El agua subterránea contaminada es utilizada en Cerrito Blanco para irrigar pasto y cultivos (Hernández-Ruiz, 2017). Así pues, las fuentes de contaminación ponen en riesgo la salud de la población de Villa de la Paz, Matehuala y Cerrito Blanco por lo que desde 1997 se han realizado una gran cantidad de estudios que requieren ser analizados integralmente a fin de sintetizar los principales resultados obtenidos, analizar y estar en condiciones de comenzar a proponer soluciones

de gran impacto y alcance. Por tal motivo, en este trabajo se evaluó, sintetizó y analizó información de la zona de interés para coadyuvar a la propuesta de soluciones integrales a la problemática de contaminación de la zona.

2. Zona de interés

La zona de interés comprende los municipios de Villa de la Paz, Matehuala y el Ejido de Cerrito Blanco y está localizada en la parte N del estado de San Luis Potosí, a 192 km al NW de la capital, en la zona denominada altiplano potosino (Figura 1).

La cabecera municipal de Villa de la Paz se encuentra en las coordenadas 23°41'00'' N y 100°43'01'' W con una altitud promedio de 1,895 ms.n.m. La superficie del municipio es de 131.3 km² y colinda al N con el municipio de Cedral,

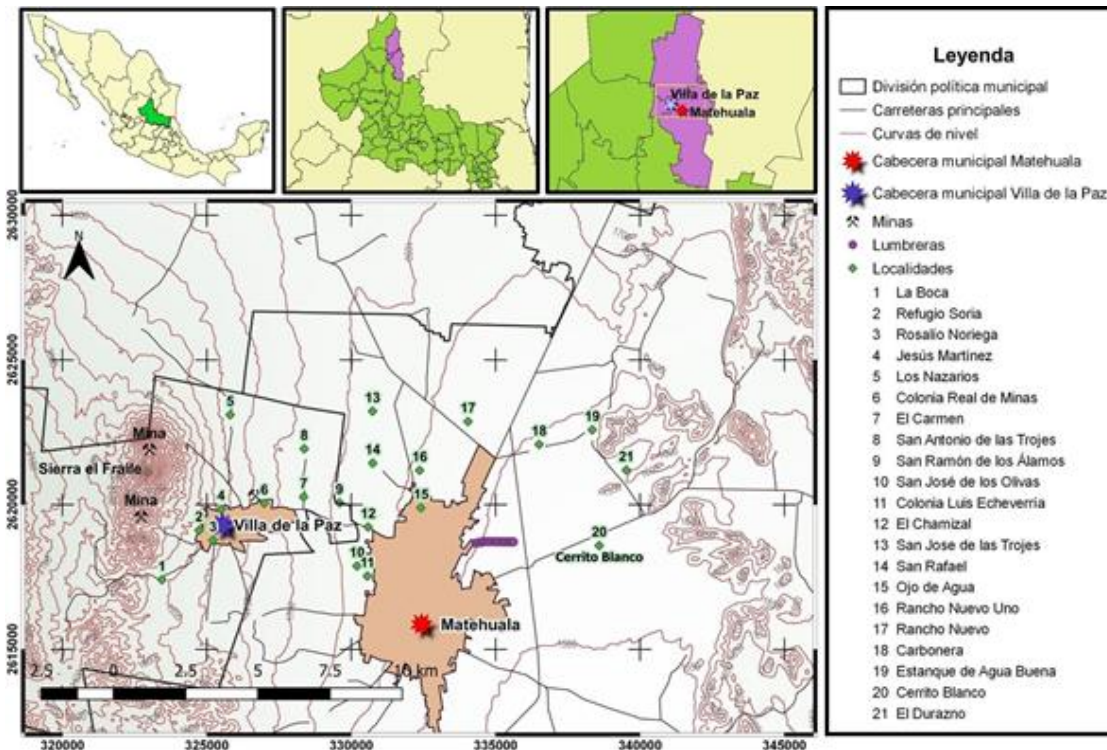


Figura 1 Mapa de la zona de Villa de la Paz-Matehuala-Cerrito Blanco mostrando los municipios de Matehuala y Villa de la Paz así como Cerrito Blanco y algunas otras localidades presentes en el área de estudio.

al E con el municipio de Matehuala, al S con el municipio de Villa de Guadalupe y al W con el municipio de Catorce. El municipio cuenta con una población total de 5, 298 (INEGI, 2020). La cabecera municipal de Matehuala está ubicada en las coordenadas 23°38'47'' N y 100°38'40'' W con una altitud promedio de 1,577 ms.n.m. La superficie total del Municipio es de 1,286.6 km² y colinda al N con los municipios de Villa de la Paz, Cedral y el estado de Nuevo León; al E con el estado de Nuevo León; al S con el estado de Nuevo León y el municipio de Villa de Guadalupe; al W con los municipios de Villa de Guadalupe y Villa de La Paz. El municipio cuenta con una población de 102,199 habitantes distribuidos en 136 localidades (INEGI, 2020). Una de esas 136 localidades es el Ejido de Cerrito Blanco, el cual cuenta con 277 habitantes (INEGI, 2020) y se encuentra situado a 6.8 kilómetros de la cabecera municipal de Matehuala específicamente en las coordenadas 23°40'9.0'' N y 100°35'3.0'' W con altitud promedio de 1,520 ms.n.m. Los sectores económicos que concentraron más unidades económicas en Villa de la Paz y Matehuala fueron comercio al por menor (INEGI, 2020).

La zona de interés tiene un clima semiárido, donde, según el Servicio Meteorológico Nacional, con datos de 22 años, reporta precipitación anual de la región de 533 mm, evaporación de 2,041 mm/año y temperaturas que oscilan entre los 4.4 y los 31.5 °C. Los suelos presentes en la zona de interés son principalmente litosol, regosol, rendzina y xerosol asociados a materiales parentales como rocas calizas, lutitas, ígneas y aluvión (Chiprés *et al.*, 2008).

3. Metodología

Se realizó una búsqueda sistemática de literatura en la base de datos Web of Science y repositorios institucionales de la Universidad de Sonora, Universidad Tecnológica de Tabasco, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Universidad Autónoma de Nuevo León, Instituto Potosino

de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., Universidad Nacional Autónoma de México con las siguientes palabras clave: mining, soil contamination, water contamination, arsenic, risk, environmental pollution, Villa de la Paz y Matehuala, tanto en inglés como en español para el período 1900-2022. Adicionalmente, se realizó una búsqueda de informes públicos en dependencias gubernamentales federales del Sistema Meteorológico Nacional (SMN), el Servicio Geológico Mexicano (SGM), la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y prontuarios municipales de Matehuala y Villa de la Paz.

Los recursos bibliográficos fueron gestionados en Zotero y evaluados críticamente utilizando la guía para evaluar y documentar la calidad de la información científica y técnica existente de la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés) de los Estados Unidos de América (EPA, 2012) considerando los siguientes factores: solidez, aplicabilidad y utilidad, claridad e integridad, incertidumbre y variabilidad y evaluación y revisión. Posteriormente, los recursos bibliográficos fueron utilizados para analizar y sintetizar la información generada en éstos.

4. Resultados de la búsqueda y evaluación de la literatura

La Tabla 1 muestra la frecuencia de recursos bibliográficos publicados para la zona Villa de la Paz-Matehuala-Cerrito Blanco, en el Estado de San Luis Potosí para el período 1971-2021. El total de recursos bibliográficos ascendió a 75 documentos, de los cuales 19 fueron artículos científicos en revista de indexadas en la base de datos Web of Science, 37 fueron trabajos de tesis (6 de licenciatura, 23 de maestría y 8 de doctorado), 1 fue memoria en congreso y 18 fueron informes públicos de dependencias gubernamentales.

Los recursos bibliográficos de corte académico (37 tesis, 19 artículos científicos y 1 memoria de congreso) fueron evaluados en el marco de la me-

Metodología de la EPA (EPA, 2012), aprobaron dicha evaluación y, por lo tanto, fueron analizados en este trabajo.

La Figura 2 muestra los 57 recursos bibliográficos académicos generados a lo largo del tiempo, así como las principales matrices estudiadas. De estos 57 recursos bibliográficos, el 46% abordó el estudio de EPT en el suelo, el 21% riesgo a la salud, el 20% agua superficial y subterránea, el 5% cultivos, el 4% riesgo ambiental y el 4% geología de los yacimientos minerales. A pesar de la dispersión de partículas de jales por el viento y los fuertes vientos que se presentan en la zona de interés, no se encontraron estudios de evaluación de aire ni de EPT en material particulado (Figura 3).

5. Análisis del impacto ambiental por actividades minero-metalúrgicas en Villa de la Paz-Matehuala-Cerrito Blanco. Compartimentos ambientales afectados y valoración del impacto en salud.

5.1. RESIDUOS

En la zona de interés, las industrias minera y metalúrgica han generado residuos y son: 1) presas de jales inactivas, estériles de mina o terreros antiguos, 2) presa de jales activa y 3) escoria de fundición y residuos en el terreno abandonado. Los dos primeros ubicados en el municipio de Villa de la Paz y los terceros en la ciudad de Matehuala.

Los dos promedios más altos de concentración de As reportados en los residuos se encontraron en los generados por la industria metalúrgica específicamente en los ladrillos de la chimenea de la antigua fundición abandonados sobre el suelo (26,705 mg/kg), seguido del presente en las escorias de fundición (1,124 mg/kg) y por último en los residuos de la industria minera, específicamente en jales presentes en las presas inactivas y en la presa activa (884 mg/kg).

Los jales presentes en las presas inactivas y la presa activa procedentes de la industria minera fueron muestreados y caracterizados (Val-

dez-Comparan, 2021) obteniéndose altas concentraciones de As y otros metales pesados (Cu, As, Zn, Pb y Cr). El rango de concentración de As fue 140-5,439 mg/kg, de Cu 198-5,680 mg/kg, de Zn 99-2,076 mg/kg, de Pb <LD-620 mg/kg y de Cr 85-110 mg/kg y se observa que las concentraciones promedio decrecieron en el siguiente orden: Cu>As>Zn>Pb>Cr (Valdez-Comparan, 2021).

Por otro lado, las escorias de fundición, que corresponden a los residuos generados por la industria metalúrgica al N de la ciudad de Matehuala, han sido caracterizadas y se evidenció que contienen cantidades importantes de elementos potencialmente tóxicos en una matriz silicatada (SiO₂ (40%), FeO (24%), CaO (21%), Al₂O₃ (3%), K₂O (2%), MgO (1%), MnO (1%), Zn (3%), Pb (0.5%), As (0.4%), Cu (0.2%) y Ba (0.2%)) (Manz y Castro, 1997). Las concentraciones totales de Cu, Zn As y Pb en muestras de escorias se presentan en la Tabla 2 y se observa que las concentraciones decrecieron en el siguiente orden: Zn>Pb>Cu>As. Si bien, las concentraciones de As y Pb en la escoria sobrepasaron hasta más de 50 veces y de 6 a 7 veces respectivamente las concentraciones de referencia total (CR_T) establecidas en la Nor-

Tabla 1. Recursos bibliográficos localizados en Web of Science, repositorios institucionales y dependencias gubernamentales sobre estudios e investigaciones de la zona Villa de la Paz-Matehuala-Cerrito Blanco, en el Estado de San Luis Potosí.

Periodo	Número de publicaciones	Porcentaje de publicaciones (%)
Sin especificar	1	
1971-1981	1	1.35
1982-1991	0	0.00
1992-2001	5	6.76
2002-2011	32	43.24
2012-2021	36	48.65
Total	75	100

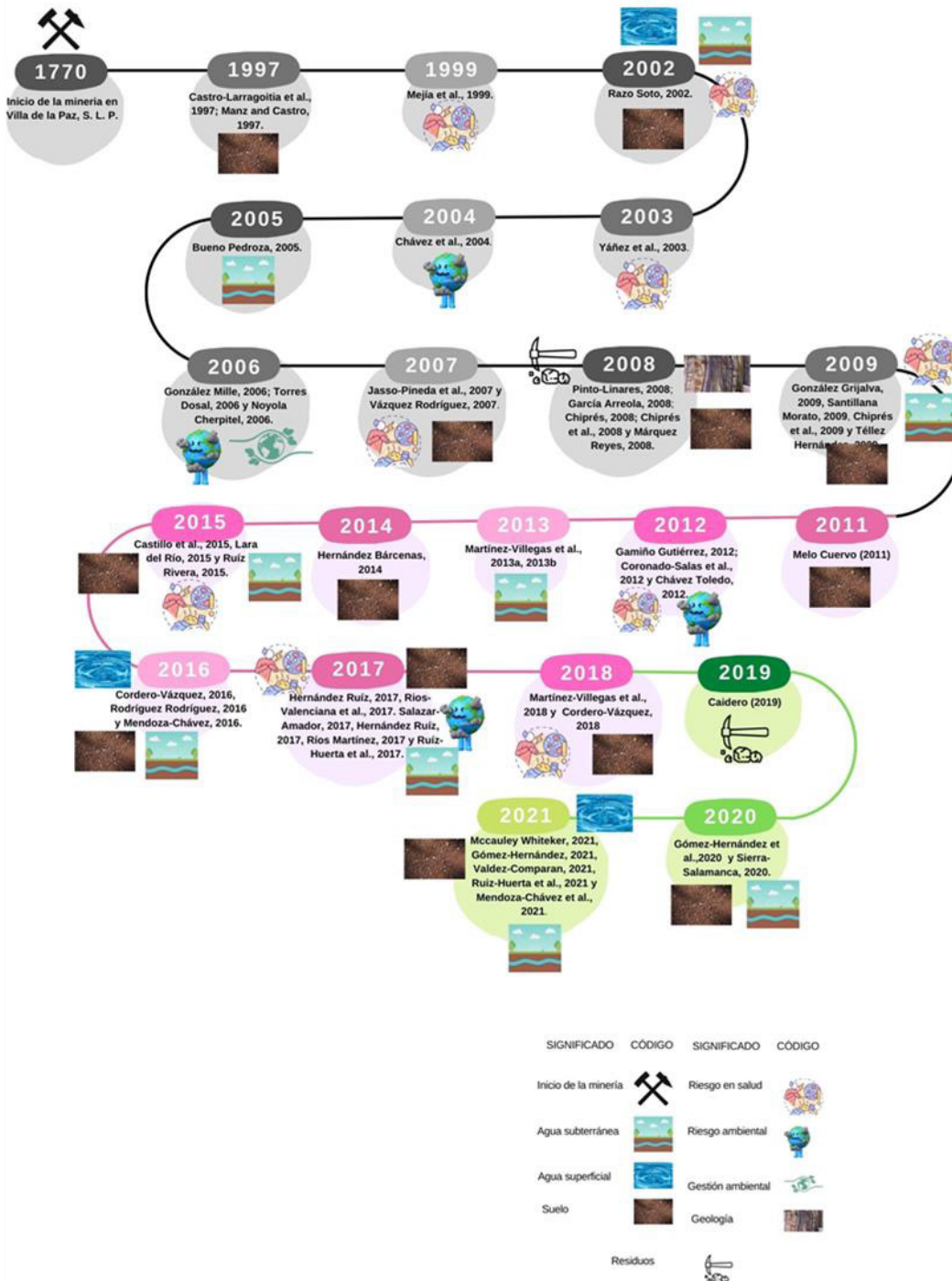


Figura 2 Recursos bibliográficos académicos publicados a lo largo del tiempo y temáticas abordadas.

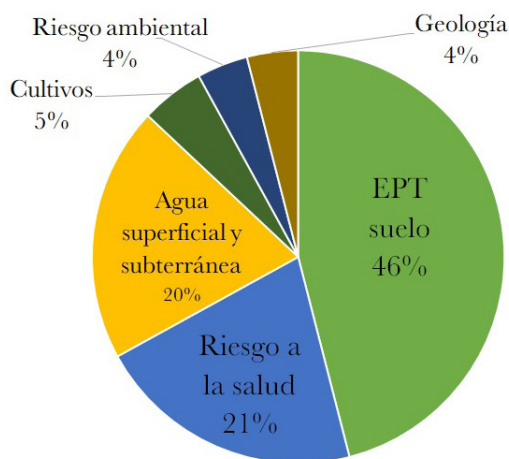


Figura 3 Porcentaje de las temáticas abordadas en los recursos bibliográficos.

ma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, se ha demostrado la baja movilidad de éstos en condiciones ambientales (Manz y Castro, 1997; Melo-Cuervo, 2011; Caicedo-Quintero, 2019). Experimentos de movilidad de EPT han puesto en evidencia que, en ningún caso se superaron los límites máximos permisibles (5.0 mg/L para As y 5.0 mg/L para Pb) de la NOM-157-SEMARNAT-2009 (DOF, 2009). Sin embargo, los estudios de biodisponibilidad en las escorias mostraron que son peligrosas para la salud humana ya que se encontró que la bioaccesibilidad del As y Pb es mayor en la fase gástrica (pH = 1.5), donde se lleva a cabo la digestión de los seres humanos; en comparación con la fase intestinal (pH = 7.0), donde se lleva a cabo la absorción. Específicamente, la bioaccesibilidad gástrica de As varió entre 28% a 75% y en el caso del Pb de 34% a 80%. Respecto a la bioaccesibilidad intestinal de As varió entre 7% a 43% y en el caso del Pb de 2.5% a 5% (Caicedo-Quintero, 2019).

Por otro lado, en el terreno que ocupaba la antigua fundición de Pb, se encuentran las ruinas de ésta y se presume que durante el proceso de fundición de los sulfuros se generaron vapores y polvos con altos contenidos de EPT, los cuales podrían haber contaminado las paredes cuyos restos aún se encuentran expuestos al ambiente (Manz y Castro, 1997). Los residuos encontrados en el terreno abandonado, especialmente los que corresponden

a la chimenea principal de la fundición (Figura 4), contienen 26,705 mg/kg de As, 3,663 mg/kg de Pb, 1,435 mg/kg de Cd, 1,948 mg/kg de Cu y 13,067 mg/kg de Zn (Razo, 2006).

5.2. SUELO

El suelo del municipio de Villa de la Paz, presentó evidencia de contaminación por As y metales pesados (Pb, Cd, Cu y Zn) teniendo como fuente de contaminación los residuos de la minería (Manz y Castro, 1997; Razo, 2002; Razo, 2006). El suelo superficial (0-5 cm de profundidad) presentó los siguientes rangos de concentraciones de EPT: 38-11,930 mg/kg de As, 87-7,200 mg/kg de Cu, 45-3,450 mg/kg de Pb y 170-4,920 mg/kg de Zn (Razo, 2002; Razo *et al.*, 2004). Comparando la concentración de As y Pb (Razo, 2002) versus las CR_T (concentraciones de referencia total) establecidas en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 para estos elementos (22 mg/kg y 400 mg/kg, respectivamente para suelos de uso agrícola y residencial) se observa que, el 100% de las muestras de suelo superficial se encuentran por encima del CR_T en el caso del As y el 31% de las muestras en el caso del Pb (DOF, 2007).

Ahora bien, la comparación de la concentración de elementos potencialmente tóxicos (As, Pb, Cu y Zn) reportadas por Razo (2002), versus los valores de fondo geoquímicos reportados por Chi-prés (2008) se observó que: i) el valor más alto de concentración de As encontrado en el suelo superficial (11,930 mg/kg de As) sobrepasa 341 veces el valor máximo de fondo geoquímico (4-35 mg/kg de As), ii) el valor más alto de concentración de Pb encontrado en el suelo superficial (3,450 mg/kg de Pb) sobrepasa 138 veces más el valor máximo de fondo geoquímico (25 mg/kg de Pb), iii) el valor más alto de concentración de Cu encontrado en el suelo superficial (7,200 mg/kg de Cu) sobrepasa 205 veces más el valor máximo de fondo geoquímico (35 mg/kg de Cu) y, iv) el valor más alto de concentración de Zn encontrado en el suelo superficial (4,920 mg/kg de Zn) sobrepasa 39 veces más el valor máximo de fondo geoquímico (125 mg/kg de Zn). Lo anterior indica que en la zona Villa

de la Paz las concentraciones de EPT en muestras de suelo superficial excedieron, hasta por órdenes de magnitud en algunas muestras, las concentraciones de origen natural en la región reforzando la hipótesis de una posible contribución de origen antropogénico importante.

No existen datos respecto a la geodisponibilidad de elementos potencialmente tóxicos en el suelo de Villa de la Paz. Por otro lado, los datos de biodisponibilidad obtenidos por Razo (2006) evidenciaron que el 10% del As total y el 50% del Pb total estaba biodisponible en el suelo de Villa de la Paz. El autor atribuyó la menor biodisponibilidad de As con respecto al Pb a la presencia de arsenopirita y arseniatos férricos como fases portadoras de éste. En el caso de la elevada biodisponibilidad del Pb, se explicó por la presencia de mimetita, así

como de anglesita y cerusita, como productos de alteración de la galena.

Las mayores concentraciones de As y Pb han sido encontradas en el suelo del terreno que ocupaba la antigua fundición de Pb en Matehuala (Martínez-Villegas *et al.* 2013a; Salazar-Amador, 2017). Respecto al suelo de la antigua fundición de Pb, el valor de concentración de As (49,413 mg/kg de As reportado por Martínez-Villegas *et al.* (2013a) sobrepasó por casi dos órdenes de magnitud la concentración de referencia de As (260 mg/kg de As) establecida en la NOM-147-SEMAR-NAT/SSA1-2004 para suelo de uso industrial (DOF, 2007). Para otros elementos, como Cd, la concentración de referencia (450 mg/kg de Cd) se sobrepasa por un orden de magnitud (1,554 mg/kg de Cd). Para Pb, la concentración de referencia



Figura 4 Restos de la chimenea principal de la antigua fundición de Pb en Matehuala. Se observan los restos de la construcción altamente contaminados por As, Pb, Cd, Cu y Zn en contacto con el suelo.

Tabla 2. Resumen de datos estadísticos de Cu, Zn, As y Pb (mg/kg) en escoria de fundición presente en Matehuala, SLP.

Elemento	Media	Mediana	Mínimo	Máximo	Desv Est.	n	Referencia
Cu	1,732.2	1,550.0	1,230.0	2,370.0	364.1	9	Melo-Cuervo, 2011
	1,774.9	1,645.4	1,225.1	4,192.8	614.2	28	Caicedo-Quintero, 2019
Zn	>10,000.0	-	-	-	-	9	Melo-Cuervo, 2011
	20,818.3	21,866.4	9,117.8	29,651.8	4,733.0	28	Caicedo-Quintero, 2019
As	1,124.0	1,040.0	576.0	1,840.0	383.8	9	Melo-Cuervo, 2011
	1,101.2	1,115.1	679.3	2,672.4	366.7	28	Caicedo-Quintero, 2019
Pb	2,642.2	2,530.0	1,260.0	5,110.0	1,012.5	9	Melo-Cuervo, 2011
	3,058.5	2,935.9	2,109.2	4,300.4	584.5	28	Caicedo-Quintero, 2019

(800 mg/kg de Pb) igualmente se sobrepasa por un orden de magnitud (34,827 mg/kg de Pb). Investigaciones sobre la distribución de los elementos potencialmente tóxicos en las diferentes fracciones sólidas del suelo, indicaron que una cantidad importante del As se encontró en la fracción soluble (del 2% al 14% del As total), intercambiable (del 5% al 23% del As total) y extraíble (del 4% al 22% del As total) (Salazar-Amador, 2017), las cuales son consideradas las fracciones geoquímicas más móviles y lábiles del suelo sugiriendo un alto potencial de liberación de dicho elemento hacia el ambiente. Los resultados de fraccionamiento de As son consistentes con la alta contaminación por este elemento que se observó en el acuífero adyacente a la zona de interés (Salazar-Amador, 2017). La concentración de As en la fracción residual también fue elevada (del 42% al 73% del As total), lo que sugirió la presencia de algunas fases químicas estables. Resultados similares a estos últimos fueron también reportados para el Pb, muy probablemente derivados de la posible presencia de arseniatos de Pb poco solubles, como la beudantita, minerales químicamente más estables (Salazar-Amador, 2017).

En este mismo sitio, la antigua fundición de Pb, Hernández-Bárceñas (2017) evidenció que las muestras de suelo se encuentran constituidas

mayoritariamente por calcita, yeso y cuarzo. Además, demostró la presencia de minerales de As tales como farmacosiderita ($KFe_4(AsO_4)_3(OH)$), bukovskyita ($Fe_2(AsO_4)(SO_4)(OH) \cdot 9H_2O$), escorodita ($FeAsO_4 \cdot 2H_2O$), beudantita ($PbFe_3(OH)_6SO_4AsO_4$), clinoclasa ($Cu_3AsO_4(OH)_3$), arseniato de sodio (Na_3AsO_4), adamita (Zn_2AsO_4OH), arsenolita (As_2O_3), oropimente (As_2S_3), una mezcla de arseniatos de calcio entre los que se encuentran guerinita ($Ca_5H_2(AsO_4)_4 \cdot 9H_2O$), haidingerita ($CaHAsO_4 \cdot H_2O$) y farmacolita ($CaHAsO_4 \cdot 2H_2O$). Adicionalmente, sugirió la presencia de As adsorbido sobre ferrihidrita ($As \equiv Fe(OH)_3$). De las fases anteriores, clinoclasa, adamita, arsenolita, farmacolita y haidingerita poseen productos de solubilidad relativamente altos ($-4.79 < \log K_{sp} < 10.10$) que explican la movilidad del As en el área de estudio a través de procesos de disolución (Hernández-Bárceñas, 2017). Las investigaciones y los resultados anteriores ayudaron a comprender los procesos geoquímicos que sufre el As a lo largo del tiempo cuando se expone al ambiente sobre suelos de tipo calcisol, en donde el principal reservorio de As por excelencia, los óxidos de Fe, son insuficientes para contener la movilidad del As. En este mismo sentido, se ha demostrado que la disolución de los arseniatos de calcio en residuos dispuestos en el terreno ocupaba la antigua

fundición de Pb ha causado altos niveles de contaminación por As en el acuífero, alcanzando hasta 158 mg/L de As disuelto, y liberando un total de aproximadamente 7.5 toneladas de As en un año (Martínez-Villegas *et al.*, 2013a).

Debido a lo anterior, se concluyó que los suelos ubicados en el terreno que ocupaba la antigua fundición de Pb están altamente contaminados y con un alto porcentaje de As (hasta un 50%) en las fracciones más móviles del suelo (Hernández-Bárceñas, 2017; Martínez-Villegas *et al.*, 2013a; Salazar-Amador, 2017). La movilidad del As se exagera en la zona debido a una granulometría relativamente gruesa que presenta el suelo del sitio (arenas gruesas y gravas) lo que le atribuye una alta permeabilidad (Cordero-Vázquez, 2016).

Por otro lado, Ruiz-Huerta *et al.*, (2022) estudiaron la capacidad del helecho *Argyrochosma formosa* que crece sobre el suelo altamente contaminado del terreno de la antigua fundición de Pb en Matchuala, identificando 294 individuos en diferentes estados de desarrollo, lo que indicó el establecimiento de los helechos en el sitio. Las características morfológicas de *A. formosa* en órganos de plantas de helecho no mostraron efectos estructurales, en comparación con las plantas de herbario. La distribución de As en los tejidos de las plantas de helecho fue de 192–764 mg/kg, 188–1,017 mg/kg y 113–2,008 mg/kg, en raíces, rizomas y hojas, respectivamente. El factor de bioacumulación calculado en frondas varió de 2 a 7, mientras que el factor de translocación varió de 0.6 a 2.1. De acuerdo a los resultados obtenidos, las autoras concluyeron que *Argyrochosma formosa* es una especie tolerante al As y la consideraron una especie viable para la fitorremediación del lugar.

Con el objetivo de buscar alternativas de remediación del suelo de la antigua fundición de Pb en Matchuala, se realizó investigación para evaluar la estabilización química de As y Pb en el suelo contaminado empleándose enmiendas químicas a base de dihidrogenofosfato de calcio monohidrato ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$), ferrihidrita y cloruro de hierro (III) hexahidratado ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) a través de

pruebas de laboratorio en reactores de lotes (Sierra-Salamanca, 2020). Después de los tratamientos se evaluó la bioaccesibilidad de As y Pb. Los resultados mostraron que, las enmiendas que más redujeron el riesgo para la salud humana que representa la ingestión incidental de estos suelos fueron la ferrihidrita y la combinación balanceada de $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ con $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Sin embargo, la última combinación moviliza Cd y Zn y se concluyó que la enmienda química que más reduce el riesgo para el medio ambiente y la salud humana es la ferrihidrita. La autora recomendó continuar la investigación reemplazando al $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ en la enmienda combinada por ferrihidrita y de este modo evaluar si pudiese ser buena opción de tratamiento.

Lo anterior se vuelve un tema prioritario a resolver ya que investigaciones realizadas evidenciaron que la problemática del As se extiende fuera del terreno que ocupaba la antigua fundición de Pb. El agua subterránea contaminada por la lixiviación del As presente en el suelo de la fundición es utilizada en la localidad de Cerrito Blanco para el esparcimiento y la agricultura (Martínez-Villegas *et al.*, 2018, 2013a, 2013b; Rodríguez-Rodríguez, 2016). En el club deportivo Joya Verde (Hernández-Ruiz, 2017), los campos de fútbol son irrigados con agua contaminada (concentración >0.4 mg/L de As) lo que ha derivado que las concentraciones de As en el suelo sobrepasen hasta 5 veces (13.1–353.3 mg/kg de As) el límite de 22 mg/kg para As en suelos residenciales en México (DOF, 2007). En la zona agrícola de Cerrito Blanco, la cual asciende a 79 hectáreas, se reportaron concentraciones de As en el suelo de hasta 185 mg/kg (Ruiz-Huerta *et al.*, 2017; Cordero-Vázquez, 2018). Dichas concentraciones excedieron (Cordero-Vázquez, 2018), hasta 8 veces, lo permitido en la Norma Oficial Mexicana (22 mg/kg). Adicionalmente, a pesar de la baja conductividad hidráulica del suelo agrícola (predominantemente muy baja), se reportó que el As es transportado a lo largo del perfil del suelo, presentando concentraciones de hasta 94.3 mg/kg a 60 cm de profundidad (Cordero-Vázquez, 2018).

5.3. AGUA

En la zona de interés se evidenció la existencia de dos sistemas acuíferos (Bueno-Pedroza, 2005; Rodríguez-Rodríguez, 2016), uno regional (profundo) y uno local (somero). El acuífero regional, denominado Cedral-Matehuala, es de tipo libre conformado por arenas y gravas de gran heterogeneidad y anisotropía. La zona de recarga se localiza en la parte oeste y norte de la zona de interés (Sierra de Catorce y Cedral) y la zona de descarga en la parte sur con una dirección de flujo subterráneo de NW a SE (CONAGUA, 2015). El agua subterránea del acuífero regional no presentó, en general, evidencia de contaminación por As o metales pesados (Cu, Zn y Pb) e incluso su uso doméstico y agrícola es considerado adecuado (Bueno-Pedroza, 2005).

Por otro lado, el acuífero local, clasificado como acuicludo (Núñez-Hernández, 2007) o colgado (Rodríguez-Rodríguez, 2016) está localizado en la Ciudad de Matehuala presentando niveles estáticos del orden de 6 m y una dirección de flujo de O-E (Rodríguez-Rodríguez, 2016). El agua subterránea del acuífero somero presenta altas concentraciones de As (de hasta 153 mg/L) al nororiente de la ciudad de Matehuala (Martínez-Villegas *et al.*, 2013a). Diversas investigaciones han tratado de elucidar los mecanismos que favorecen la transferencia y/o la movilización de As entre el agua y la fase sólida en los sitios más impactados (Lara-Castro, 2003; Pelallo-Martínez, 2006). Posteriormente, después de un análisis crítico y profundo de los estudios reportado hasta esas fechas, bajo la premisa de que procesos como el de la oxidación de sulfuros metálicos no podrían dar lugar a las concentraciones de As observadas en agua en Matehuala y Cerrito Blanco (ambos ambientes calcáreos semiáridos) y con una visión más aguda hacia el posible rol de los impactos de la metalurgia en la problemática observada en la zona, Martínez-Villegas *et al.*, (2013a) proponen un modelo conceptual que consistía en la presencia de suelos y/o residuos relativa y altamente solubles que contenían As. En dicho modelo se proponía, además, que dichos suelos y/o residuos

se encontraban en los terrenos que ocupaba la antigua fundición de Pb y que estos se disuelven en la presencia de agua, hipotéticamente proveniente de lluvia y/o el acuífero muy somero que corre de W a E, por encima del acuífero regional. Y que dicho acuífero somero era captado por el sistema de lumbreras y canal subterráneo que transportaba agua (lamentablemente ya contaminada) hacia Cerrito Blanco. Para probar dicho modelo se realizó un estudio espacio-temporal que consistió en la toma de muestras de agua a lo largo de 13 meses en 8 puntos de muestreo distribuidos en la zona impactada en donde se determinó la hidrogeoquímica del agua y se realizó modelación hidrogeoquímica. Interessantemente, los resultados de este estudio evidenciaron una fuente puntual de contaminación, a quien se le identificó como la principal responsable de las grandes concentraciones de As que se observaban en el agua subterránea del acuífero somero en Matehuala. Dicha fuente correspondió a la antigua fundición de Pb en donde se propuso que el proceso de movilización de As era la disolución de arseniatos, presentes en suelos y/o residuos metalúrgicos dispuestos en la antigua fundición de Pb, que cuando entraban en contacto con agua (de lluvia o del acuífero somero) liberaban altas concentraciones de As (de hasta 158 mg/L) hacia el acuífero colgado, y estimaron que, por ejemplo, en el año de estudio, la movilización de As correspondió a un total de 7.5 toneladas de As al agua subterránea. Además, a través de dicho estudio se propuso que la movilización de As, aguas abajo, podría estar controlada por la precipitación diagenética de un arseniatos de calcio (con una estequiometría teórica de $\text{Ca}_5\text{H}_2(\text{AsO}_4)_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) que evitaba, en cierto grado, una mayor movilización de As en el espacio, proceso al que se le identificó como atenuación natural del contaminante.

Los resultados propuestos por Martínez-Villegas *et al.*, (2013a) propusieron un modelo que permitía explicar congruentemente las altas concentraciones de As en los diferentes aprovechamientos de agua contaminados en Matehuala y Cerrito Blanco, al mismo tiempo que evidencia-

ban un mecanismo de movilidad y retención de As muy poco reportado en la literatura que, probablemente, podría dominar en ambientes ricos en calcio (como sedimentos y suelos calcáreos), donde el mecanismo de adsorción de As a oxihidróxidos de hierro comúnmente descrito no era el proceso dominante. No obstante, Mccauley-Whiteker (2021) desestimó el proceso de precipitación diagénica proponiendo que la dilución era el proceso responsable de la disminución de las concentraciones de As en el agua subterránea del acuífero somero. Por otro lado, Gómez-Hernández (2021) atribuyó la disminución de la concentración de As a un proceso de atenuación natural controlado por el ascenso capilar de agua contaminada hacia el suelo sobreyacente en donde se acumula el As en la franja capilar del suelo.

En resumen, las elevadas concentraciones de As en agua superficial y subterránea de Matehuala y Cerrito Blanco se atribuyeron a suelos y/o residuos conteniendo As presentes en el terreno que ocupaba la antigua fundición de Pb (Martínez-Villegas *et al.*, 2013a; Mccauley-Whiteker, 2021) y desconfirmaron las hipótesis planteadas por Pelallo-Martínez (2006). Las altas concentraciones de As en el agua en Matehuala y Cerrito Blanco han persistido a lo largo del tiempo. En los años 2015 y 2016, se reportaron concentraciones de As en agua de Matehuala, (incluyendo Cerrito Blanco y Club de Tiro) con hasta 74.08 mg/L de As (Lara del Río, 2015; Mendoza-Chávez, 2016). Por su parte, Gómez-Hernández *et al.*, (2020) propusieron que el As se transportaba hacia Cerrito Blanco a través de los paleocanales del karst de Matehuala, morfologías que puede modificar drásticamente el movimiento del agua provocando, a su vez, el transporte de contaminantes a lugares remotos y exacerbar el riesgo y la amenaza de oligoelementos a la población.

Para reducir el riesgo a la población, la comunidad científica comenzó a investigar alternativas para la remediación del agua subterránea del acuífero somero. Tal es el caso de (Mccauley-Whiteker, 2021), quien encontró que la utilización de la caliza lutita carbonosa de la Formación Indi-

dura logró retener entre 78% y 88% del As acuoso en pruebas realizadas al agua altamente contaminada de Cerrito Blanco. Sin embargo, no se logró reducir las concentraciones de As hasta los límites máximos permisibles por la normatividad ambiental. Por tales motivos, se propuso realizar un tratamiento en cascada.

Por otro lado, los organismos vivos no dejan de sorprender tal y como lo evidenciaron las investigaciones realizadas por (Mendoza-Chávez, 2021) y Mendoza-Chávez *et al.*, (2021) en las cuales se reportaron estudios de un organismo de zooplankton habitando en aguas altamente contaminadas con As en el Club de Tiro “Halcones”, demostrando así la incorporación de dicho metaloide a los consumidores primarios de la cadena trófica.

5.4. SALUD

Conociendo la problemática ambiental expuesta previamente en esta revisión, se consideró de suma importancia conocer y analizar la información existente con respecto a la evaluación de riesgo en Villa de la Paz y Matehuala.

Los reportes para el riesgo a la salud de diversos grupos de población expuestos a la contaminación en los municipios de Villa de la Paz y Matehuala incluyen reportes de biodisponibilidad de metales, cuantificando: i) el As urinario en niños de entre 3 y 12 años (Gamiño-Gutiérrez, 2012; Mejía *et al.*, 1999; Santillana, 2009; Yáñez *et al.*, 2003), ii) el As en el cabello de población de 1 a 79 años (Lara del Río, 2015), iii) la dosis aproximada de ingesta de As absorbida proveniente del suelo por niño de entre 5 y 6 años (Díaz-Barriga, 1999; Razo, 2002), iv) el Pb en sangre (PbB) de niños entre 3 y 12 años (Díaz-Barriga, 1999; Gamiño-Gutiérrez, 2012; Mejía *et al.*, 1999; Razo, 2002; Santillana, 2009; Yáñez *et al.*, 2003), v) la genotoxicidad y daño celular inducida por As y/o por Pb en niños de entre 3 y 10 años (Gamiño-Gutiérrez, 2012; Yáñez *et al.*, 2003), vi) el As y Pb en polvo de las manos de niños entre de 3 y 12 años de edad (Santillana, 2009) y vii) el riesgo de exposición humana al As debido a actividades deportivas (Martínez-Villegas *et al.*, 2018).

Se encontró que el 71% de las muestras de orina recolectada de niños contenían niveles de As por encima del valor normal (50 µg/g de creatinina) (Mejía *et al.*, 1999). También, que la ingesta de As proveniente del suelo por niño era 13 veces mayor, en promedio, que la dosis de referencia dada por la EPA (RfD = 0.3 µg/kg/día) en población infantil de Villa de la Paz, teniendo un máximo de hasta 61.24 veces más alta. Se observó que en niños expuestos a suelo cerca de la antigua fundición en Matehuala este valor máximo era 35.25 veces más alto. En este sentido Yáñez *et al.* (2003), reportaron niveles de As en orina y PbB significativamente más altos en Villa de la Paz (As = 136 µg/g de creatinina, PbB = 11.6 µg/dL) que en Matehuala (As = 34 µg/g de creatinina, PbB = 8.3 µg/dL), así como daño en el ADN de niños expuestos a As y Pb en ambos municipios. En 1999 Díaz-Barriga reportó que el 38% de los niños analizados tenían niveles que excedían el límite de PbB de 10 µg/dL. En el año 2009, Santillana reportó que el 15% de la población que estudió excedió dicho límite. Por otro lado, Gamiño-Gutiérrez (2012) reportó que más del 90% de los niños evaluados en su estudio presentaron niveles de daño celular por arriba de los niveles basales. Para el caso del grupo de edad más amplio estudiado, Lara del Río (2015) evidenció la exposición de la población a concentraciones peligrosas de As a largo plazo, cuantificando dicho metaloide en el cabello y encontrando que el 16% de la población estudiada sobrepasó el límite (1 mg/kg según ATSDR, 2007). Encontró, además, que dicha población habitaba, en su gran mayoría, cerca de la fuente de contaminación de Matehuala, el complejo hidráulico Matehuala-Cerrito Blanco y la comunidad de Cerrito Blanco. Cabe destacar que no se realizaron mediciones de As en cabello de la población del municipio de Villa de la Paz. Martínez-Villegas *et al.* (2018) reportaron que el contacto dérmico entre los usuarios expuestos (en las canchas de fútbol de la comunidad de Cerrito Blanco en Matehuala) y los suelos contaminados representó un valor máximo de riesgo cancerígeno de 1.8×10^{-5} , que es un orden de magnitud superior al valor de riesgo recomendado

y, por su parte, Chávez-Toledo (2012), encontró que los mayores riesgos por efectos no cancerígenos “No aceptables” se presentaban en la población infantil y estimó que, por efectos cancerígenos “No aceptables”, los mayores riesgos ocurrían en zonas residenciales de Villa de la Paz.

En el 2006, Torres-Dosal identificó al municipio de Villa de la Paz y al terreno que ocupaba la antigua fundición de Pb ubicada en el municipio de Matehuala como dos de los 42 sitios potencialmente peligrosos en el Estado de San Luis Potosí, colocando a Villa de la Paz como prioritario considerando el suelo agrícola y el residual como el bien a proteger. Si bien en dicho estudio no se realizó una evaluación de riesgo como tal, sí evidenció que dichos sitios serían prioritarios de evaluar derivado de la problemática que presentan. Aunado a esto, en el año 2012, Chávez-Toledo realizó una evaluación en el distrito minero de Santa María de la Paz (Villa de la Paz) utilizando información histórica del sitio. Derivado de esto, construyó un modelo conceptual de riesgo ambiental e identificó las zonas de mayor potencial de riesgo por exposición a As y Pb. Encontró que los suelos de Villa de la Paz, los suelos en áreas cercanas a las presas de jales y antigua planta de reciclado de Pb, los suelos al norte de Matehuala y en la antigua fundición, la zona agrícola de la comunidad de Cerrito Blanco eran los suelos con mayor potencial de riesgo.

Como se observa, desde 1999 se han desarrollado diversos estudios con el fin de demostrar y tener certeza de las fuentes de contaminación que podrían estar afectando a la población. Siendo la población que habita en el poblado de Villa de la Paz y cerca de la antigua fundición en Matehuala, las que demostraron durante todos estos años estar en el mayor riesgo de salud por su contacto con el suelo y agua contaminados con As y Pb. Hay que considerar que en dichos estudios se reportó el uso de poblaciones de control en lugares cercanos más no expuestos, que demuestran que la exposición al suelo y agua contaminados son la causa de los niveles de As en orina y cabello y de Pb en sangre de los diversos grupos de personas analizadas. El último de los estudios de riesgo a la salud es el

reportado por Martínez-Villegas *et al.*, (2018), en donde a pesar de haber transcurrido casi 20 años del primer estudio de biodisponibilidad reportado (Mejía *et al.*, 1999), los niveles de contaminación siguen siendo altos y no hay evidencia reciente de que el riesgo a la exposición al As y el Pb haya disminuido o se haya erradicado.

6. Conclusiones

Como resultado del análisis de la información recabada y evaluada en este análisis se concluye que:

- El suelo de Villa de la Paz está contaminado por metales pesados (Zn, Pb, Cd, Cu y As) provenientes de las presas de jales y los terrenos.
- El suelo del terreno donde operaba la antigua fundición de Pb en Matchuala está altamente contaminado con As y Pb.
- El agua subterránea del acuífero somero que subyace a la ciudad de Matchuala y descarga en la localidad de Cerrito Blanco está contaminada con As por disolución del arsénico proveniente de la antigua fundición.
- El suelo de Cerrito Blanco está contaminado con As por irrigación con agua contaminada del acuífero somero de Matchuala.
- La población se encuentra expuesta a As y otros elementos traza.

Por lo anterior, la zona de estudio es susceptible de remediación. Para dicho efecto, se recomienda el desarrollo de un plan integral de remediación que garantice la inmovilización de los contaminantes en las presas de jales, los terreros y el suelo y su remediación en el agua subterránea.

Contribuciones de los autores

Conceptualización: HMJL y MVN; Análisis y adquisición de datos: HMJL y MCYJ; Desarrollo metodológico/técnico: HMJL, MCYJ; Redacción del manuscrito original: HMJL y MCYJ; Revi-

sión y corrección del borrador de artículo: HMJL, MCYJ, MVN y MRF; Supervisión: MVN y MRF; Financiamiento: MVN y MRF.

Financiamiento

Este trabajo fue financiado por el proyecto IPI-CYT S-2911.

Agradecimientos

Yadira Mendoza y Lucero Hernández agradecen al consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por las becas No. 575862 y CVU 166112, respectivamente. Las y el autor agradecen a los revisores anónimos que aportaron valiosas sugerencias a este artículo de revisión.

Conflictos de interés

Las y el autor declaran que no existe algún conflicto de interés con otros autores, instituciones u otros terceros sobre el contenido del presente artículo de revisión.

Referencias

- Bueno-Pedroza, A., 2005, Interpretación hidrogeoquímica de los sistemas de flujo de la parte norte del altiplano potosino: México, Universidad Autónoma de Nuevo León, Tesis de Maestría.
- Caicedo-Quintero, J.A., 2019, Evaluación de la estabilidad geoquímica de las escorias metalúrgicas de Matchuala, San Luis Potosí: Ciudad de México, Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis de Maestría.
- Castillo, F., Avalos-Borja, M., Jamieson, H., Hernández-Bárceas, G., Martínez-Villegas, N., 2015, Identification of diagenetic calcium arsenates using synchrotron-based micro X-ray diffraction: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 67(3), 479–491. <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2015v67n3a11>

- Castro-Larragoitia, J., Kramar, U., Puchelt, H., 1997, 200 years of mining activities at La Paz/San Luis Potosí/Mexico — Consequences for environment and geochemical exploration: *Journal of Geochemical Exploration* 58, 81–91. [https://doi.org/10.1016/S0375-6742\(96\)00054-4](https://doi.org/10.1016/S0375-6742(96)00054-4)
- Chávez, C.T., Castro, J.L., Díaz-Barriga, F.M., Monroy, M.F., 2004, Modelo conceptual de riesgo ambiental por arsénico y plomo en el distrito minero de Santa María de la Paz, San Luis Potosí, México: *e-Gnosis* 9, 1–25.
- Chávez-Toledo, C., 2012, Evaluación de riesgos ambientales para sitios mineros: Caso del distrito minero Santa María de la Paz: México, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Tesis Doctoral.
- Chiprés, J.A., 2008, Cartografía geoquímica multiescalar de valores de fondo y líneas base en el altiplano potosino, S.L.P., México: México, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Tesis Doctoral.
- Chiprés, J.A., Castro-Larragoitia, J., Monroy, M.G., 2009, Exploratory and spatial data analysis (EDA–SDA) for determining regional background levels and anomalies of potentially toxic elements in soils from Catorce–Matehuala, Mexico: *Applied Geochemistry* 24, 1579–1589. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2009.04.022>
- Chiprés, J.A., Salinas, J.C., Castro-Larragoitia, J., Monroy, M.G., 2008, Geochemical mapping of major and trace elements in soils from the Altiplano Potosino, Mexico: a multi-scale comparison. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis* 8, 279–290. <https://doi.org/10.1144/1467-7873/08-181>
- CONAGUA, 2015, Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Cedral-Matehuala (2407), Estado de San Luis Potosí: México, Comisión Nacional del Agua.
- Cordero-Vázquez, C., 2016, Determinación de granulometría y textura de suelos de Matehuala, San Luis Potosí contaminados con Arsénico: México, Universidad Tecnológica de Tabasco, Tesis de Licenciatura.
- Cordero-Vázquez, C., 2018, Caracterización geoquímica y geofísica de suelos agrícolas en el área de Cerrito Blanco, Matehuala, San Luis Potosí: México, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, Tesis de Maestría.
- Coronado-Salas, C., Díaz-Barriga, F., Moreno-Sánchez, A.R., Carrizales-Yáñez, L., Torres-Nerio, R., Rentería-Guzmán, Y.J., Cubillas-Tejeda, A.C., 2012, La comunicación de riesgos como una herramienta para disminuir la exposición infantil a plomo y arsénico en la zona contaminada de Villa de la Paz-Matehuala, San Luis Potosí, México: *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 28, 167–181.
- DOF, 2019, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua: México, Secretaria de Gobernación.
- DOF, 2009, Que establece los elementos y procedimientos para instrumentar planes de manejo de residuos mineros: México, Secretaria de Gobernación.
- DOF, 2007, Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio: México, Secretaria de Gobernación.
- EPA, 2012, Guidance for evaluating and documenting the quality of existing scientific and technical information: USA, Environmental Protection Agency.
- Evanko, C.R., Dzombak, D., 1997, Remediation of Metals-Contaminated Soils and Groundwater (No. TE-97-01): Pittsburgh, Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center, 61p.
- Gamiño-Gutiérrez, S.P., 2012, Evaluación de la genotoxicidad en poblaciones infantiles expuestas a contaminación por As, Pb Y

- Cd en zonas mineras: México, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Tesis Doctoral.
- García-Arreola, M.E., 2008, Estudios de la distribución y especiación de arsénico en suelos de Villa de la Paz, S.L.P.: México, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Tesis de Maestría.
- Gómez-Hernández, A., Rodríguez, R., Lara del Río, A., Aurora Ruiz-Huerta, E., Aurora Armenta, M., Dávila-Harris, P., Sen-Gupta, B., Delgado-Rodriguez, O., Del Angel Rios, A., Martínez-Villegas, N., 2020, Alluvial and gypsum karst geological transition favors spreading arsenic contamination in Matehuala, Mexico: Science Of The Total Environment, 707, 135340. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135340>
- Gómez-Hernández, A.D., 2021, Identificación de los procesos de atenuación de arsénico en el subsuelo de Matehuala (SLP), México: S.L.P. México, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, Tesis Doctoral.
- González-Grijalva, M.D., 2009, Evolución espacio-temporal de la calidad del agua subterránea en el acuífero Cedral-Matehuala: alternativas de uso: México, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Tesis de Maestría.
- González-Mille, D.J., 2006, Riesgo ecológico en la zona minera de Villa de la Paz: México, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Tesis de Maestría.
- Hernández-Bárceñas, L.G., 2017, Caracterización mineralógica de suelos impactados por residuos minero-metalúrgicos en una fundición abandonada en Matehuala, San Luis Potosí: México, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, Tesis de Maestría.
- Hernández-Bárceñas, L.G., 2014, “Síntesis de arseniatos de calcio a partir de $\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ y $\text{Ca}(\text{OH})_2$: México, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Tesis de Licenciatura.
- Hernández-Ruiz, A., 2017, Distribución de arsénico en suelos y evaluación de riesgos en las actividades en canchas de fútbol soccer irrigadas con agua contaminada con arsénico, en el Club Deportivo Joya Verde, Matehuala, San Luis Potosí: México, Universidad de Sonora, Tesis de Licenciatura.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), 2020, Censos Económicos, San Luis Potosí, México, INEGI.
- Jasso-Pineda, Y., Espinosa-Reyes, G., González-Mille, D., Razo Soto, I., Carrizales-Yáñez, L., Torres-Dosal, A., Mejía, J., Monroy, M., Ize, A., Yarto, M., Díaz-Barriga, F., 2007, An Integrated Health Risk Assessment Approach to the Study of Mining Sites Contaminated With Arsenic and Lead: Integrated Environmental Assessment and Management, 3, 344–50. <https://doi.org/10.1002/ieam.5630030305>
- Lara del Río, A. de J., 2015, Determinación de arsénico en cabello de poblaciones expuestas en Matehuala, San Luis Potosí: México Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, Tesis de Maestría.
- Lara-Castro, R., 2003, Comportamiento geoquímico del arsénico en cuerpos de agua superficiales contaminados en la región minera de Villa de la Paz-Matehuala, S.L.P.: México, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Tesis de Maestría.
- Manz, M., Castro, L.J., 1997, The environmental hazard caused by smelter slags from the Sta. Maria de la Paz mining district in Mexico: Environmental Pollution 98, 7–13. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(97\)00107-3](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(97)00107-3)
- Márquez-Reyes, J.M., 2008, Modificación de la bioaccesibilidad de residuos mineros en presencia de materia orgánica empleando bacterias reductoras de sulfatos: México, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Tesis de Maestría.
- Martínez-Villegas, N., Briones-Gallardo, R., Ramos-Leal, J.A., Avalos-Borja, M., Castañon-Sandoval, A.D., Razo-Flores, E., Villalobos, M., 2013a, Arsenic mobility

- controlled by solid calcium arsenates: A case study in Mexico showcasing a potentially widespread environmental problem: *Environmental Pollution*, 176, 114-122. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.12.025>
- Martínez-Villegas, N., Hernández, A., Meza-Figueroa, D., Gupta, B.S., 2018, Distribution of arsenic and risk assessment of activities on soccer pitches irrigated with arsenic-contaminated water: *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(6), 1060. <https://doi.org/10.3390/ijerph15061060>
- Martínez-Villegas, N., Martínez-Salazar, J., Fuentes-Rivas, R.M., Avalos-Borja, M., Villalobos, M., 2013b, Morphology and solubility products of calcium arsenates found in arsenic contaminated soils in an abandoned smelter: *Procedia Earth and Planetary Science*, 7, 562–565. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2013.03.184>
- Mccauley-Whiteker, J., 2021, Evaluación de diferentes materiales geológicos para la retención de arsénico acuoso de los cuerpos de agua contaminados de Matehuala, San Luis Potosí: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis de Maestría.
- Mejía, J., Carrizales, L., Rodríguez, V.M., Jiménez, M.E., Díaz, F., 1999, Un método para la evaluación de riesgos para la salud en zonas mineras: *Salud Pública de México*, 41, S132–S140.
- Melo-Cuervo, R., 2011, Evaluación de un pasivo ambiental metalúrgico: México, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Tesis de Maestría.
- Mendoza-Chávez, Y.J., 2021, Estudios de la distribución, especiación y bioacumulación de arsénico en *Paracyclops chiltoni*, estimaciones filogenéticas y efectos morfológicos: México, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, S.L.P., Tesis Doctoral.
- Mendoza-Chávez, Y.J., 2016, Especies de zooplancton presentes en agua contaminada con arsénico en Matehuala, San Luis Potosí, México. S.L.P. México, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, Tesis de Maestría.
- Mendoza-Chávez, Y.J., Uc-Castillo, J.L., Cervantes-Martínez, A., Gutiérrez-Aguirre, M.A., Castillo-Michel, H., Loredó-Portales, R., SenGupta, B., Martínez-Villegas, N., 2021, *Paracyclops chiltoni* inhabiting water highly contaminated with arsenic: Water chemistry, population structure, and arsenic distribution within the organism: *Environmental Pollution* 284, 117155. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117155>
- Noyola-Cherpetel, R., 2006, Escenarios para la Gestión Ambiental: La Zona Minera de Villa de la Paz – Matehuala, SLP: México, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Tesis de Maestría.
- Núñez-Hernández, E., 2007, Vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación en el acuífero Cedral-Matehuala: México, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Tesis de Licenciatura.
- Pelallo-Martínez, N.A., 2006, Comportamiento químico de arsénico en sedimentos de sistemas acuáticos contaminados: México, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Tesis Doctoral.
- Pinto-Linares, P.J., 2008, Geología y génesis de la mineralización económica en el distrito minero de la Paz, S.L.P.: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis Doctoral.
- Ravenscroft, P., Brammer, H., Richards, K., 2009, *Arsenic Pollution: A Global Synthesis*: USA, Wiley, 588p. <https://doi.org/10.1002/9781444308785>
- Razo, I., Carrizales, L., Castro, J., Díaz-Barriga, E., Monroy, M., 2004, Arsenic and heavy metal pollution of soil, water and sediments in a semi-arid climate mining area in Mexico: *Water, Air, and Soil Pollution* 152, 129–152. <https://doi.org/10.1023/B:WATE.0000015350.14520.c1>

- Razo, I., 2006, Identificación de áreas prioritarias de restauración de suelos contaminados por arsénico y metales pesados en el sitio minero y metalúrgico de Villa de la Paz-Matehuala, S.L.P.: México, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Tesis Doctoral.
- Razo, I., 2002, Evaluación de la contaminación por metales y del riesgo en salud en un sitio minero de sulfuros polimetálicos: Caso de Villa de la Paz-Matehuala, S.L.P.: México, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Tesis de Maestría.
- Ríos-Martínez, C.F., 2017, Evaluación de la genotoxicidad de suelos y residuos mineros con células de raíz de haba (Vicia faba): México, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Tesis de Maestría.
- Rios-Valenciana, E.E., Briones-Gallardo, R., Chazaro-Ruiz, L., Martínez-Villegas, N., Celis, L., 2017, Role of indigenous microbiota from heavily contaminated sediments in the bioprecipitation of arsenic: *Journal of Hazardous Materials*, 339, 114-121. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.06.019>
- Rodríguez-Rodríguez, R.M., 2016, Obtención de un modelo conceptual hidrogeológico de concentraciones de arsénico variables en agua superficial y subterránea en Matehuala, San Luis Potosí: México, Universidad de Sonora, México, Tesis de Licenciatura.
- Ruiz-Rivera, C., 2015, Evaluación de la calidad del agua de Villa de la Paz, San Luis Potosí, México y propuestas de tratamiento: México, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Tesis de Maestría.
- Ruiz-Huerta, E., Varela, A., Gomez Bernal, J.M., Rivera, J.J.F., Avalos-Borja, M., Sengupta, B., Martínez-Villegas, N., 2017, Arsenic contamination in irrigation water, agricultural soil and maize crop from an abandoned smelter site in Matehuala, Mexico: *Journal of Hazardous Materials* 339, 330-339. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.06.041>
- Ruiz-Huerta, E.A., Gómez-Bernal, J.M., Barbosa-Martínez, C., Armienta-Hernández, M.A., Martínez-Villegas, N.V., 2021, Morphological characteristics and accumulation of arsenic in *Argyrochosma formosa* (Liebm.) Windham developed in a highly contaminated site with arsenic in Matehuala, SLP, Mexico: *Environmental Science and Pollution Research*, 29(2), 2685-2698. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15813-2>
- Salazar-Amador, M.E., 2017, Fraccionamiento de arsénico en suelos contaminados con arseniatos en Matehuala, San Luis Potosí: México, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Tesis de Licenciatura.
- Santillana, M, C., 2009, Caracterización del polvo como medio en la ruta de exposición en la zona minero-metalúrgica de Matehuala-Villa de la Paz, S.L.P.: México, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Tesis de Maestría.
- Sierra-Salamanca, J., 2020, Immobilization of lead in contaminated soils in Matehuala, San Luis Potosi, Mexico, to reduce the environmental risk: Darmstadt, Institut für Angewandte Geowissenschaften, Master's Thesis.
- Téllez-Hernández, J.I., 2009, Estabilización por fosfato de plomo y cadmio contenidos en suelos de Villa de la Paz-Matehuala, S.L.P.: México, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Tesis de Maestría.
- Torres-Dosal, A., 2006, Desarrollo de la metodología para la evaluación de riesgo en sitios contaminados: México, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Tesis Doctoral.
- Valdez-Comparan, O.E., 2021, Determinación de los valores de fondo y línea base de metales pesados que permitan valorar la contaminación antropogénica de suelos en la zona minera de Matehuala, San Luis Potosí: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis de Maestría.
- Vázquez Rodríguez, G., 2007, Movilización de elementos potencialmente tóxicos (EPT) en la rizósfera de *viguiera dentata*, una especie vegetal tolerante, de suelos de Villa de la

- Paz, Matchuala, S.L.P.: México, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Tesis de Licenciatura.
- WHO, 2021, Arsenic. World Health Organization. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/arsenic>
- Yáñez, L., García-Nieto, E., Rojas, E., Carrizales-Yáñez, L., Mejía, J., Calderón, J., Razo Soto, I., Díaz-Barriga, F., 2003, DNA damage in blood cells from children exposed to arsenic and lead in a mining area: *Environmental Research* 93, 231–40. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2003.07.005>
- Yaroshevsky, A.A., 2006, Abundances of chemical elements in the Earth's crust: *Geochemistry International* 44, 48–55. <https://doi.org/10.1134/S001670290601006X>