

Contaminación de Agua por Arsénico en México: Una Revisión Sistemática Presence of Arsenic in Water in Mexico: A Systematic Review

Rodríguez Cantú Laura Nelly. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Enfermería, Morelia, Michoacán, México.

Correo: nelly.rodriguez@umich.mx. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4173-2171>.

Martínez Cinco Marco Antonio. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Posgrado de Ingeniería Química, Morelia, Michoacán, México.

Correo: marco.martinez@umich.mx. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8931-4169>.

Mendoza Lagunas José Leopoldo. Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación, Instituto Tecnológico de Sonora, Dirección de Recursos Naturales, Ciudad Obregón, Sonora, México.

Correo: jose.mendoza69@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0818-3492>.

Resumen

Introducción: La contaminación por arsénico es una problemática global de salud pública, debido a que las concentraciones elevadas afectan a una gran parte población mundial. En México, los principales ambientes hidrogeológicos relacionados con la presencia de arsénico en el agua subterránea son: los acuíferos aluviales, del norte y centro del país, áreas de actividad minera y aguas geotérmicas asociadas a rocas volcánicas en la zona del Cinturón Volcánico Mexicano. **Objetivo:** Realizar una revisión sistemática sobre los estudios reportados sobre la presencia de arsénico en agua. **Método:** Se realizó una revisión sistemática en el año 2025, con un rango de búsqueda del 1952 al 2022 de acuerdo a los principios metodológicos PRISMA 2020 en las bases de datos PubMed, Scopus y Scielo, en inglés y español, cumpliendo con criterios de inclusión y exclusión, se obtuvo una muestra de 53 artículos. **Resultados:** Se revisaron 53 artículos, 79% reportaron presencia de arsénico en pozos de agua, agua de manantial (6%), agua de llave (6%) y agua subterránea (6%), agua superficial (4%) y pozo geotérmico (2%). De los artículos revisados, el 73% la zona de estudio pertenece a la región centro norte y noroeste del país, 18% al oeste, 7% al este y 2% al centro sur del país. **Conclusión:** La presencia de arsénico en México, tanto en agua subterránea como en manantiales y aguas de pozo, y siendo el metaloide que causa más daños a órganos y sistemas en el humano, crea una preocupación, ya que la población está susceptible a su exposición, incrementando el probable daño a la salud.

Palabras clave: arsénico, México, agua de pozo, agua subterránea, manantial

Abstract

Introduction: Arsenic contamination is a global public health problem, due to the fact that high concentrations affect a large population in the world. In Mexico, the main hydrogeological environments related to the presence of arsenic in groundwater are: alluvial aquifers in the north and center of the country, areas of mining activity and geothermal waters associated with volcanic rocks in the area of the Mexican Volcanic Belt. **Objective:** To perform a systematic review of the studies reported on the presence of arsenic in water. **Methods:** A systematic review was carried out during February to April 2024 according to PRISMA 2020 methodological principles in PubMed, Scopus and Scielo databases, in english and spanish, complying with the inclusion and exclusion criteria, a sample of 53 papers was obtained. **Results:** Fifty-two papers were

reviewed, of which 79% reported the presence of arsenic in water wells, followed by spring water (6%), tap water (6%) and groundwater (6%), surface water (4%) and geothermal well (2%). From the articles reviewed, 73% of the study area belongs to the north-central and northwestern México, 18% to the western México, 7% to the east and 2% to the south-central México. **Conclusion:** The presence of arsenic in Mexico, in groundwater, as well as in springs and well water, and being the metalloid that causes the most damage to human organs and systems, creates greater concern, since the population is susceptible to exposure to this metalloid, increasing the probable damage to health.

Key words: arsenic, Mexico, well water, groundwater, spring water

Introducción

El consumo de agua contaminada por arsénico es un factor determinante de la salud humana, por lo tanto, se convierte en un problema de salud pública, sin embargo, el efecto sobre la salud no siempre es inmediato, sino a mediano o largo plazo (Vargas, 2005).

El arsénico proviene principalmente de fuentes naturales como reacciones ambientales, actividad biológica, emisiones volcánicas y de actividades antropogénicas como la minería (Rangel et al, 2015; Bundschuh et al, 2012) y este metaloide pertenece al Grupo 1, de acuerdo a la Agencia Internacional de Investigación del Cáncer (IARC, por sus siglas en inglés), por la evidencia de causar varios tipos de cáncer en el humano, además, ocupa el primer lugar, dentro de la lista de las sustancias prioritarias peligrosas de la Agencia de Sustancias Tóxicas y Enfermedades (ATSDR, por sus siglas en inglés), por su toxicidad y efectos a la salud, ya que es el elemento químico que causa más daños a órganos y sistemas en el humano (ASTDR, 2022).

La contaminación por arsénico es una problemática global de salud pública, debido a que las concentraciones elevadas afectan a una gran población del mundo (ASTDR, 2007). En diversos países, se ha detectado contaminación de arsénico en aguas subterráneas con concentraciones arriba de los 10 µg/L, límite recomendado por la Organización Mundial de la Salud (OMS), entre los que se encuentran Argentina, Bangladesh, Bolivia, Brasil, Canadá, Colombia, Costa Rica, Chile, China, Cuba, Ecuador, El Salvador, Estados Unidos, Filipinas, Guatemala, Honduras, Hungría, India, Indonesia, Japón, Laos, México, Myanmar, Nepal, Nicaragua, Nueva Zelanda, Pakistán, Perú, Rusia, Tibet, Turquía, Uruguay, Vietnam, entre otros (Sahji et al., 2020, Bundschuh et al., 2001; Bundschuh y Maity, 2015; Webster, 2003).

En México, los principales ambientes hidrogeológicos relacionados con la presencia de arsénico en el agua subterránea son: los acuíferos aluviales, del norte y centro del país, áreas de actividad minera y aguas geotérmicas asociadas a rocas volcánicas en la zona del Cinturón Volcánico Mexicano (Alarcón-Herrera et al., 2013). La Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, establece los valores límite permisibles para asegurar la calidad del agua. Durante los años 2000 a 2005, la normatividad modificó los límites permisibles en la concentración de arsénico de 50 µg/L a 25 µg/L; en el año 2021 se propone una modificación para el límite permisible a 10 µg/L, homologándose así con las recomendaciones internacionales de la EPA y la OMS, sin embargo, esto se aplicará de manera gradual de 1, 3 o 6 años posterior a la entrada en vigor de la Norma de acuerdo a la cantidad de habitantes de una localidad.

La ingestión de arsénico a través del agua potable se ha relacionado con cánceres de piel, riñón, vejiga y pulmón, y está asociada con efectos adversos en los sistemas cardiovascular, inmunológico, endocrino y neurológico (Kuo et al., 2017; Tsuji et al., 2015); Walton et al., 2004). Las principales fuentes de

exposición al arsénico para los seres humanos son a través del consumo de agua potable y alimentos contaminados, cerca del 57 al 96%, entre los diferentes grupos de edad, la exposición más alta se presenta en niños debido al peso y a la superficie corporal (Sim, 2019). Sin embargo, existen otras vías importantes, como la ingestión o inhalación de polvo, suelo o sedimento, que rara vez han sido estudiadas (García-Rico et al., 2018; Beamer et al., 2016).

Existe poca información en México y en el estado de Michoacán sobre la exposición crónica a dosis baja de arsénico, debido a esto, el objetivo es realizar una revisión sistemática sobre los estudios reportados sobre la presencia de arsénico en agua.

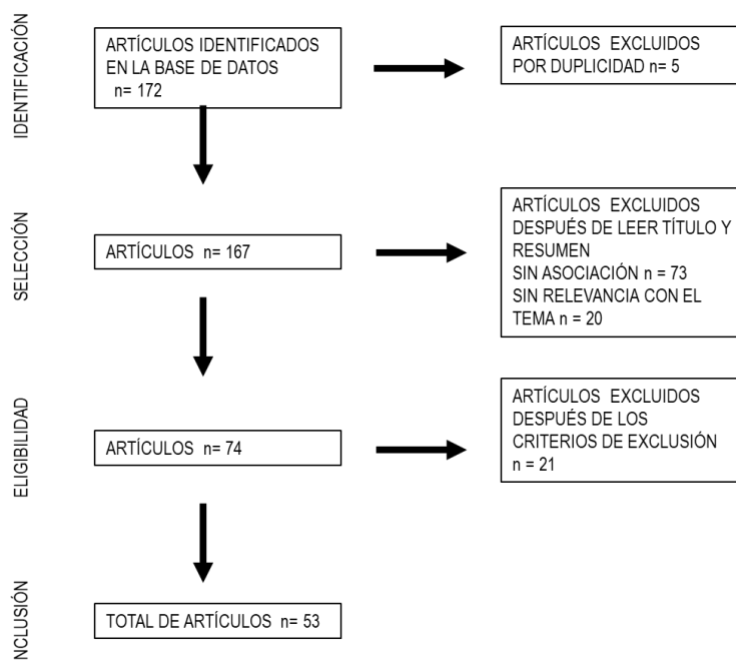
Método

Se realizó una revisión sistemática durante febrero a abril de 2024 de acuerdo a los principios metodológicos PRISMA 2020 (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) (Page, et al., 2020) para la recuperación de archivos se utilizó como motor de búsqueda el Google académico, en tres diferentes bases de datos (PubMed, Scopus, Scielo). Los estudios identificados se evaluaron por título y resumen para determinar su elegibilidad, así como en idioma inglés y español. De los estudios relevantes se leyeron en texto completo de acuerdo con los siguientes criterios de inclusión: estudios donde reportan la presencia de arsénico en agua México, estudios que evalúan la exposición al arsénico en agua para consumo o de pozo de agua, estudios que evalúen el riesgo a la salud en alguna zona de México por la presencia de arsénico en el agua. Para asegurar la inclusión de literatura no encontrada, se revisaron las referencias de los artículos incluidos para recuperar artículos adicionales. Los criterios de exclusión fueron los artículos que reportaban la presencia de arsénico donde no incluían México, que no tuvieran relación con el tema, así como los artículos duplicados.

Se empleó la combinación de palabras clave: “arsenic”, “groundwater”, “well water”, “spring water”, “Latinoamérica”, “México” y una asociación entre ellos, utilizando operadores booleanos como “AND” y “OR”. En la Figura 1, se muestra el diagrama de flujo de la identificación y selección de artículos.

De los estudios seleccionados se extrajo la siguiente información: Autor, Año de publicación, Localidad y Estado, tipo de muestra, resultado de la concentración mínima y máxima de arsénico.

Figura 1.
Diagrama de flujo de identificación y selección para la revisión sistemática



Nota: Elaboración propia

Resultados

Se revisaron 53 artículos de los cuales, 79% reportaron presencia de arsénico en pozos de agua, seguido de agua de manantial (6%), agua de llave (6%) y agua subterránea (6%), agua superficial (4%) y pozo geotérmico (2%). De los artículos revisados, el 73% la zona de estudio pertenece a la región centro norte y noroeste del país (Cantellano L et al., 1964, Albores et al. 1979, Cebrián et al., 1983, Del Razo et al., 1990, García-Vargas et al., 1991, Díaz-Barriga et al., 1993, Cebrián et al., 1994, Planer-Friedrich et al., 2001, Alarcón et al., 2001, Rodríguez R et al., 2002, Razo et al., 2004, Ortega-Guerrero 2009, Olivas-Calderón E et al., 2015, Rodríguez R et al., 2015, CONAGUA, 2019, Martínez-Acuña et al., 2016), 18% a la parte oeste (Brikle y Merkel 2000, Israde-Alcántara I et al., 2005, Hurtado-Jiménez y Gardea-Torresdey, 2006, Vázquez M et al., 2015, CONAGUA, 2019, Rodríguez-Cantú, 2021), 7% al este (Hurtado et al., 2004, García-Nieto et al., 2011, CONAGUA, 2019) y 2% a la parte centro sur del país (CONAGUA, 2019).

La descripción de los artículos encontrados de las diferentes localidades nacionales, así como las concentraciones de arsénico en las diferentes fuentes se concentran en la Tabla 1.

Tabla 1.
Concentraciones de arsénico en agua de llave, pozo, subterránea y manantial en México.

Estado	Localidad	Tipo de muestra	Concentración de min-máx (µg/L)	Referencia
Coahuila	Torreón	Pozo de agua	3980	Cantellano L et al., 1964
Coahuila y Durango	Región Lagunera	Pozo de agua	1-500	Albores et al., 1979
Coahuila y Durango	El Salvador de Arriba and San José del Viñedo	Pozo de agua	7-410	Cebrián et al., 1983
Coahuila y Durango	Región Lagunera	Pozo de agua	8-624	Del Razo et al., 1990
Coahuila y Durango	Santa Ana and Lujan	Pozo de agua	12-390	García-Vargas et al., 1991
San Luis Potosí	San Luis Potosí	Agua de llave	7.7-17.5	Díaz-Barriga et al., 1993
Coahuila y Durango	Comarca Lagunera (El Salvador de Arriba and San José del Viñedo)	Agua de llave	160-590	Cebrián et al., 1994
Sonora	Sonora	Pozo y tanque de agua	3-117	Wyatt et al., 1998
Sonora	Hermosillo	Pozo de agua	9-30	Wyatt et al., 1998
Michoacán	Los Azufres	Pozo geotérmico	5100-24000	Birkle y Merkel 2000
San Luis Potosí	San Luis Potosí	Pozo de agua	5-50	Planer-Friedrich et al., 2001
Durango	Valle de Guadiana	Pozo de agua	5-167	Alarcón et al., 2001
Guanajuato	Salamanca	Agua subterránea	14-73	Rodríguez R et al., 2002
Chihuahua	Chihuahua, México	Pozo de agua	75-134	Piñon-Miramontes et al., 2003
Sonora	Sonora, México	Pozo de agua	67	Westerhoff et al., 2004
Chihuahua	Chihuahua, México	Pozo de agua	267	Westerhoff et al., 2004
Hidalgo	Zimapán, Hidalgo	Agua subterránea	14-1097	Hurtado et al., 2004
Sonora	Valle del Yaqui, Sonora, México	Pozo de agua	3.30-49.26	Meza et al., 2004
San Luis Potosí	San Luis Potosí, México	Agua superficial	8-420	Razo et al., 2004
Michoacán	Morelia, Michoacán.	Pozo y agua de manantial	5-158	Israde-Alcántara I et al., 2005
Jalisco	Los Altos de Jalisco, México	Pozo de agua	0.5-262.9	Hurtado-Jiménez y Gardea-Torresdey, 2006
Chihuahua	Chihuahua	Pozo de agua	34-344	Mahlknecht et al., 2008
Chihuahua	Julimes, Rosales, Meoqui y Delicias	Pozo de agua	10-376	Espino-Valdés et al., 2009

Chihuahua	Chihuahua	Pozo de agua	7000-11000	Ochoa et al., 2009
Sonora	Sonora	Pozo de agua	3.91-48.37	Cantú-Soto et al., 2009
San Luis Potosí	San Luis Potosí	Pozo de agua	1-120	Ortega-Guerrero 2009
Chihuahua	Valle de Tabaloapa, Aldama and Dolores	Pozo de agua	5-42	Reyes-Gómez et al., 2010
Tlaxcala	Zahuapan-Atoyac	Agua superficial	60-870	García-Nieto et al., 2011
Coahuila	Comarca Lagunera	Pozo y agua de llave	42.9-181.4	Olivas-Calderón E et al., 2015
Guanajuato	Bajío Guanajuatense (Irapuato, Salamanca, Juventino Rosas, Cuitzeo and Jicotitlan).	Agua subterránea	300-3800	Rodríguez R et al., 2016
Michoacán	Araró, Michoacán.	Manantial de aguas termales	10-626	Vázquez M et al., 2015
Zacatecas	Guadalupe, Jerez, Ojocaliente, Villanueva, Jalpa, Tabasco, Huanusco, El Visitador	Agua de llave	4-298	Martínez-Acuña et al., 2016
Sonora	Potam, Vicam, Cocorit	Pozo de agua	6.2-108.2	Maldonado JF et al., 2018
Aguascalientes	Aguascalientes	Pozo de agua	10-164.6	CONAGUA, 2019
Baja California Sur	Baja California Sur	Pozo de agua	10-103.7	CONAGUA, 2019
Chihuahua	Chihuahua	Pozo de agua	10-203	CONAGUA, 2019
Guanajuato	Guanajuato	Pozo de agua	10-243.5	CONAGUA, 2019
Hidalgo	Hidalgo	Pozo de agua	10-91.8	CONAGUA, 2019
Michoacán	Michoacán	Pozo de agua	10-140.8	CONAGUA, 2019
Nayarit	Nayarit	Pozo de agua	10-73.4	CONAGUA, 2019
Puebla	Puebla	Pozo de agua	10-30.2	CONAGUA, 2019
San Luis Potosí	San Luis Potosí	Pozo de agua	10-14.8	CONAGUA, 2019
Tabasco	Tabasco	Pozo de agua	10-20.3	CONAGUA, 2019
Tlaxcala	Tlaxcala	Pozo de agua	10-13.6	CONAGUA, 2019
Zacatecas	Zacatecas	Pozo de agua	10-401.3	CONAGUA, 2019
Coahuila	Coahuila	Pozo de agua	10-359.4	CONAGUA, 2019
Durango	Durango	Pozo de agua	10-462.8	CONAGUA, 2019
Jalisco	Jalisco	Pozo de agua	10-170.3	CONAGUA, 2019
Baja California Norte	Baja California Norte	Pozo de agua	10-32	CONAGUA, 2019

Sonora	Sonora	Pozo de agua	10-117.4	CONAGUA, 2019
Sinaloa	Sinaloa	Pozo de agua	10-93	CONAGUA, 2019
Michoacán	Zamora	Pozo de agua	0.032-1.24	Reyes-Toscano et al., 2020
Michoacán	Zinapécuaro de Figueroa	Pozo de agua y manantial	10-91	Rodríguez-Cantú, et al. 2022

Discusión

Desde 1958, se identificó la presencia de arsénico en agua en la región de la Comarca Lagunera localizada en los estados de Coahuila y Durango, donde se reportaron por primera vez problemas de salud en sus residentes por consumo de agua con arsénico (Chávez et al., 1964, Tovar et al., 1964; Quiñonez et al., 1964; Cebrián et al., 1983). Algunas regiones o estados afectados con concentraciones de arsénico arriba de la normatividad mexicana son: Aguascalientes, Coahuila, Colima, Chihuahua, Durango, Guanajuato, Hidalgo, Jalisco, La Comarca Lagunera, Michoacán, Morelos, Nuevo León, Puebla, San Luis Potosí, Sonora y Zacatecas (Bundschuh et al., 2012; Hurtado y Gardea 2006; Meza et al., 2004) (Tabla 1).

En México, los principales ambientes hidrogeológicos relacionados con la presencia de arsénico en el agua subterránea son: los acuíferos aluviales, del norte y centro del país, áreas de actividad minera y aguas geotérmicas asociadas a rocas volcánicas en la zona del Cinturón Volcánico Mexicano (Alarcón-Herrera et al., 2013). La diversa geología y entorno tectónico que caracteriza a México, son factores que favorecen la contaminación natural del agua subterránea por arsénico (Armienta y Segovia, 2008), dentro de los estudios revisados el 30% se encuentran dentro del Cinturón Volcánico Mexicano, lo que explicaría presencia de arsénico.

El 79% de los estudios, reportaron presencia de arsénico en pozos de agua con concentraciones reportadas en un rango de 0.032 a 11,000 µg/L en la parte del norte de México, coincide con el estudio de Alarcón-Herrera (2019) en donde la ocurrencia y el posible origen se centraba al norte de México donde el clima es más árido. En pozos geotérmicos, por su naturaleza, se registraron concentraciones hasta 24,000 µg/L.

La Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, establece los valores límite permisibles para asegurar la calidad del agua. Durante los años 2000 a 2005, la normatividad modificó los límites permisibles en la concentración de arsénico de 50 µg/L a 25 µg/L; en el año 2021 se propone una modificación para el límite permisible a 10 µg/L, homologándose así con las recomendaciones internacionales de la EPA y la OMS, sin embargo, esto se aplicará de manera gradual de 1, 3 o 6 años posterior a la entrada en vigor de la Norma de acuerdo a la cantidad de habitantes de una localidad. Se considera que, en México, alrededor de 1.5 millones de personas están expuestas a aguas subterráneas con alto contenido de arsénico, ya que en varias localidades es única fuente de agua potable de la población (39%) (Alarcón-Herrera et al., 2020).

Conclusiones

En esta revisión sistemática se encontró la presencia de arsénico en México, tanto en agua subterránea como en manantiales y aguas de pozo, siendo el metaloide que ocupa el primer lugar, dentro de la lista de las sustancias prioritarias peligrosas de la Agencia de Sustancias Tóxicas y Enfermedades, debido a su toxicidad y efectos a la salud, ya que es el elemento químico que causa más daños a órganos y sistemas en el humano, esto crea una preocupación mayor, ya que la población está susceptible a la exposición de este metaloide incrementando el daño a la salud. La continua vigilancia/revisión que realiza la Comisión Nacional del Agua, es parte importante para poder asegurar a la población que la utilización para la preparación de alimentos o consumo de agua es seguro. Se recomienda realizar estudios de riesgo a la salud por el consumo de arsénico a través del agua, especialmente a baja dosis (menores e iguales a 50 µg/L).

Referencias

- Alarcón-Herrera, M. T., Bundschuh, J., Nath, B., Nicolli, H. B., Gutierrez, M., Reyes-Gomez, V. M., Nuñez, D., Martín-Domínguez, I. R., Sracek, O. (2013). Co-occurrence of arsenic and fluoride in groundwater of semi-arid regions in Latin America: Genesis, mobility and remediation. *Journal of Hazardous Materials*, 262: 960-969. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.08.005>
- Alarcón-Herrera M T, Martin-Alarcón D A, Gutiérrez M, Reynoso-Cuevas L, Martín-Domínguez A, Olmos-Márquez M A, Bundschuh J. (2020). Co-occurrence, possible origin, and health-risk assessment of arsenic and fluoride in drinking water sources in Mexico: Geographical data visualization. *Sci Total Environ*. 698. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134168>
- Albores, A., Cebrián, M., Téllez, I., Valdéz, B. (1979). Estudio comparativo de hidroarsenismo crónico en dos comunidades rurales de la región Lagunera de México. *Bol Of Sanit Panam*. 86(3), 196-205
- Armienta, M. A., Segovia, N. (2008). Arsenic and fluoride in the groundwater of Mexico. *Environ Geochem Health*. 30(4),345-53. <https://doi.org/10.1007/s10653-008-9167-8>
- ATSDR. (2022). Summary data for 2022 priority list of hazardous substances ATSDR, division of toxicology & human health sciences. <http://www.atsdr.cdc.gov/spl/>. Accessed August, 2022.
- Beamer, P. I., Klimecki, W. T., Loh, M., Van Horne, Y. O., Sugeng, A. J., Lothrop, N., ... & Martinez, F. D. (2016). Association of children's urinary CC16 levels with arsenic concentrations in multiple environmental media. *International journal of environmental research and public health*, 13(5), 521.
- Birkle, P., & Merkel, B. (2000). Environmental impact by spill of geothermal fluids at the geothermal field of Los Azufres, Michoacán, México. *Water, air, and soil pollution*,124(3), 371-410. <https://doi.org/10.1023/A:1005242824628>
- Bundschuh, J., Litter, M. I., Parvez, F., Román-Ross, G., Nicolli, H. B., Jean, J. S., Liu, C. W., López, D., Armienta, M. A., Guilherme, L. R., Gómez, A., Cornejo, L., Cumbal, L., Toujaguez, L.(2012). One century of arsenic exposure in Latin America: a review of history and occurrence from 14 countries. *Sci Tot Environ*. 429, 2-35. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.06.024>
- Bundschuh, J. & Maity, J. P. (2015). Geothermal arsenic: Occurrence, mobility and environmental implications. *Renew Sust Energ Rev*. 42, 1214-1222. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.092>
- Cantellano, L., Viniegra, G., Eslava, R., Alvarez, J. (1964). El Arsenismo en la Comarca Lagunera. *Salud Pub Mex*. 3, 375- 385
- Cantú-Soto, E. U. (2009). Determinación de polimorfismos del gen Arsénico 3 Metiltransferasa (As3MT) asociado al metabolismo del arsénico, en la población del Valle del Yaqui, Sonora, México. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 5(2), 155-160.
- Cebrián, M. E., Albores, A., Aguilar, M., Blakely, E. (1983). Chronic arsenic poisoning in the north of Mexico. *Hum Toxicol*. 2(1),121-33. doi: 10.1177/096032718300200110.
- Chávez, A., Pérez, C., Tovar, E., Garmilla, M. (1964). Estudios en una comunidad con arsenismo crónico, Datos Generales de la Comunidad. *Salud Pub Mex*. 3, 435-442
- CNA. 2019. CONAGUA. Portal de Sistemas de Información del Agua. Calidad del Agua. <https://www.gob.mx/conagua/articulos/calidad-del-agua>. Accessed August 19, 2021.
- Del Razo, L. M., Arellano, M. A., & Cebrian, M. E. (1990). The oxidation states of arsenic in well-water from a chronic arsenicism area of northern Mexico. *Environmental pollution*, 64(2), 143-153.

- Espino-Valdés, M. S., Barrera-Prieto, Y., Herrera-Peraza, E. (2009). Presencia de arsénico en la sección norte del acuífero Meoqui-Delicias del estado de Chihuahua, México. *Tecnociencia Chihuahua*. 3, 8-18
- García-Nieto, E., Carrizales-Yañez, L., Juárez-Santacruz, L., García-Gallegos, E., Hernández-Acosta, E., Briones-Corona, E., & Vázquez-Cuecuecha, O. G. (2011). Lead and arsenic in the Alto Atoyac sub-basin in Tlaxcala, Mexico. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 17(1), 7-17.
- García-Rico, L., Meza-Figueroa, D., Gandolfi, A. J., Ibañez del Rivero, C., Martínez-Cinco, M. A., Meza-Montenegro, M. M. (2018). Health Risk Assessment and Urinary Excretion of Children Exposed to Arsenic through Drinking Water and Soils in Sonora, Mexico. *Biol Trace Elem Res*. 187(1), 9-21. <https://doi.org/10.1007/s12011-018-1347-5>
- García-Vargas, G. G., García-Rangel, A., Aguilar-Romo, M., García-Salcedo, J., del Razo, L. M., Ostrosky-Wegman, P., ... & Cebrián, M. E. (1991). A pilot study on the urinary excretion of porphyrins in human populations chronically exposed to arsenic in Mexico. *Human & experimental toxicology*, 10(3), 189-193.
- González-Arqueros, M. L., Domínguez-Vázquez, G., Alfaro-Cuevas, R., Villanueva, R., Israde-Alcantara, I., Buenrostro-Delgado, O. (2021). Hazardous solid waste confined in closed dump of Morelia: An urgent environmental liability to attend in developing countries. *Sustainability*. 13, 2557-2565. <https://doi.org/10.3390/su13052557>
- Hurtado-Jiménez, R. & Gardea-Torresdey, J. L. (2006). Arsenic in drinking water in the Los Altos de Jalisco region of Mexico. *Rev Panam Salud Pub*. 20(4), 236–47.
- International Agency for Research on Cancer. IARC. 2012. Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Arsenic, metals, fibres, and dusts. Volume 100 C. A review of human carcinogens. *IARC Monogr Eval Carcinog Risks Hum*. 100:11–465
- Israde-Alcantara, I., Buenrostro, D. O., Carrillo, C. A. (2005). Geological characterization and environmental implications of the placement of the Morelia dump, Michoacán, Central Mexico. *J Air Waste Manag Assoc*. 55:755-764. <https://doi.org/10.1080/10473289.2005.10464665>
- Kuo, C. H., Moon, K. A., Wang, S. L., Silbergeld, E., Navas-Acien, A. (2017). The Association of Arsenic Metabolism with Cancer, Cardiovascular Disease, and Diabetes: A Systematic Review of the Epidemiological Evidence. *Environ Health Perspect*. 125, 087001-1-087001-15 <https://doi.org/10.1289/EHP577>
- Mahlknecht, J., Horst, A., Hernández-Limón, G., & Aravena, R. (2008). Groundwater geochemistry of the Chihuahua City region in the Rio Conchos Basin (northern Mexico) and implications for water resources management. *Hydrological Processes: An International Journal*, 22(24), 4736-4751.
- Martínez-Acuña, M., Mercado-Reyes, M., Alegría-Torres, J., Mejía-Saavedra, J. (2016). Preliminary human health risk assessment of arsenic and fluoride in tap water from Zacatecas, México. *Environ Monit Assess*. 188, 475- 488. <http://doi.org/10.1007/s10661-016-5453-6>
- Maldonado Escalante, J. .F, Meza Figueroa, D., Dévora Figueroa, A. G., García Rico, L., Burgess, J. L., Lantz, R. C., Yañez Estrada, L., Martínez Cinco, M. M., Balderas Cortés, J. J., Moncada Fernández, I., Meza Montenegro, M. M. (2018). An integrated health risk assessment of indigenous children exposed to arsenic in Sonora, Mexico. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*. 25(3), 706-721. DOI:[10.1080/10807039.2018.1449098](https://doi.org/10.1080/10807039.2018.1449098)

- Meza, M. M., Kopplin, M. J., Burgess, J. L., & Gandolfi, A. J. (2004). Arsenic drinking water exposure and urinary excretion among adults in the Yaqui Valley, Sonora, Mexico. *Environmental research*, 96(2), 119-126.
- Meza-Montenegro, M. M., Kopplin, M.J., Burgess, J. L., Gandolfi, A. J. (2008). Urinary arsenic methylation profile in children exposed to low arsenic levels through drinking water. *Toxicol. Environ. Chem.* 90, 957–970. <https://doi.org/10.1080/02772240701782140>
- Norma Oficial Mexicana: Modificación a la NOM-127-SSA1-1994, Salud Ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad. Diario Oficial de la Federación, Noviembre 2000. Accessed August 19, 2021. http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=2063863&fecha=22/11/2000
- Olivas-Calderón, E., Recio-Vega, R., Gandolfi, J., Lantz, C., González-Cortés, T., González De Alba, C., Froinez, J., Espinoza-Fematt, J. (2015). Lung inflammation biomarkers and lung function in children chronically exposed to arsenic. *Toxic Appl Pharmacol.* 287, 161–167. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2015.06.001>
- Ortega-Guerrero, M. A. (2009). Occurrence, distribution, hydrochemistry and origin of arsenic, fluoride and other trace elements dissolved in groundwater at basin scale in central Mexico. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 26(1), 143-161.
- Page, M.J., McKenzie, J.E., Bossuyt, P.M., Boutron, I., Hoffmann, T.C., Mulrow, C.D., Shamseer, L., Tetzlaff, J.M., Akl, E.A., Brennan, S.E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J.M., Hróbjartsson, A., Lalu, M.M., Li, T., Loder, E.W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., McGuinness, L.A., Stewart, L.A., Thomas, J., Tricco, A.C., Welch, V.A., Whiting, P., Moher, D., 2021. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *Rev. Esp. Cardiol.* 74, 790–799. <https://doi.org/10.1016/j.recesp.2021.06.016>
- Piñón-Miramontes, M., Bautista-Margulis, R. G., & Perez-Hernandez, A. (2003). Removal of arsenic and fluoride from drinking water with cake alum and a polymeric anionic flocculent. *Fluoride*, 36(2), 122-128.
- Quiñones_Valenzuela A, I. GG, Carboney_Castellanos A. Arsénico y salud. . *Salud Publica Mex* ;21(2):187_197. Disponible en: <https://saludpublica.mx/index.php/spm/article/view/968>
- Rangel, E. A., Montañez, L. E., Luévanos, M. P., Balagurusamy, N. (2015). Impacto del arsénico en el ambiente y su transformación por microorganismos. *Terra Latinoam.* 33, 103-118.
- Razo, I., Carrizales, L., Castro, J., Díaz-Barriga, F., & 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.
- Reyes-Toscano, C. A., Alfaro-Cuevas-Villanueva, R., Cortés-Martínez, R., Morton-Bermea, O., Hernández-Álvarez, E., Buenrostro-Delgado, O., Ávila-Olivera, J. A. (2020). Hydrogeochemical characteristics and assessment of drinking water quality in the urban area of Zamora, Mexico. *Water*. 12, 556. <https://doi.org/10.3390/w12020556>
- Reyes-Gómez, V. M. (2010). Dinámica del arsénico en el valle de Tabalaopa-Aldama-El Cuervo, en Chihuahua, México. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 6(1), 21-31.
- Rodríguez-Cantú, L. N., Martínez-Cinco, M. A., Balderas-Cortés, J. J., Mondaca-Fernández, I., Navarro-Farfán, M. del M., & Meza-Montenegro, M. M. (2022). Arsenic-contaminated drinking water and

- associated health risks in children from communities located in a geothermal site of Michoacán, México: Monte Carlo probabilistic method. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 28(3–4), 408–432. <https://doi.org/10.1080/10807039.2022.2054771>
- Rodríguez, R., Morales, I., Armienta, A., Villanueva, R., Segovia, N. (2015). Geothermal systems of low temperature in Mexican Highlands: Alternative uses and associated risks. *Procedia Environ Sci.* 25, 214 – 219. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2015.04.029>
- Rodríguez, R., Morales-Arredondo, I., & Rodríguez, I. (2016). Geological differentiation of groundwater threshold concentrations of arsenic, vanadium and fluorine in El Bajío Guanajuatense, Mexico. *Geofísica internacional*, 55(1), 5-15.
- Ruiz García, V. (2014). Evaluación de la acumulación de arsénico en especies comestibles del lago de Cuitzeo, Michoacán. Tesis de Maestría. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Repositorio de Tesis Posgrado de Ingeniería Química, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. <https://posgrado-mcia.umich.mx/tesis/2014/2014-0008.pdf>
- Shaji, E., Santosh, M., Sarath, K. V., Prakash, P., Deepchand, V., & Divya, B. V. (2021). Arsenic contamination of groundwater: A global synopsis with focus on the Indian Peninsula. *Geoscience frontiers*, 12(3), 101079. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.08.015>
- Sim, K. T., Kim, D. H., Lee, J., Lee, C. H., Park, S., Seok, K. S., & Kim, Y. (2019). Exposure and risk assessments of multimedia of arsenic in the environment. *Journal of Environmental Impact Assessment*, 28(2), 152-168.
- Tsuji, J. S., Garry, M., Perez, V., Chang, E. T. (2015). Low-level arsenic exposure and developmental neurotoxicity in children: A systematic review and risk assessment. *Toxicol.* 337, 91–107. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2015.09.002>
- USEPA. IRIS. 2022. Arsenic Inorganic. CASRN 7440-38-2 | DTXSID4023886. Available at. https://iris.epa.gov/ChemicalLanding/&substance_nmbr=278 Accessed date: February 28, 2022.
- USEPA. (2009). National Secondary Drinking Water Regulations. (2009). Available at <https://www.epa.gov/sdwa/drinking-water-regulations-and-contaminants#Secondary> Accessed date: February, 2022
- Vázquez-Vázquez, M. J., Cortés-Martínez, R., Alfaro-Cuevas, R. (2015). Arsenic occurrence and water quality in recreational thermal springs at Araro, Mexico. *Int J Sci & Technol.* 5,1-5
- Villalobos-Castañeda, B., Cortés-Martínez, R., Segovia, N., Buenrostro-Delgado, O., Morton-Bermea, O., Alfaro-Cuevas- Villanueva, R. (2016). Distribution and enrichment of trace metals and arsenic at the upper layer of sediments from Lerma River in La Piedad, Mexico: Case history. *Environ Earth Sci.* 75, 1490-1501 <https://doi.org/10.1007/s12665-016-6251-8>.
- Walton, F. S., Harmon, A. W., Paul, D. S., Drobna, Z., Patel, Y. M., Styblo, M. (2004). Inhibition of insulin-dependent glu- cose uptake by trivalent arsenicals: possible mechanism of arsenic-induced diabetes. *Toxicol Appl Pharmacol.* 198, 424-433. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2003.10.026>
- WHO (World Health Organization). (2018). Guidelines for Drinking Water Quality: (4th ed) WHO Press, Geneva, Switzerland. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950>. Accessed July 04, 2021.

- Webster JG and D. Kirk Nordstrom, Chapter 4 Geothermal Arsenic The source, transport and fate of arsenic in geothermal systems en el libro Arsenic n groundwater: Geochemistry an Occurrence, 2003 Kluwer Academic Publishers.
- Westerhoff, P., Esparza-Soto, M., Mata, P. C., Parry, W. T., & Johnson, W. P. (2004). Drinking water quality in the US-Mexico border region. *Projcantúect Number: W-03-19, Arizona State University, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, University of Utah. Final Report Narrative.*
- Wyatt, C. J., Fimbres, C., Romo, L., Mendez, R. O., & Grijalva, M. (1998). Incidence of heavy metal contamination in water supplies in Northern Mexico. *Environmental research*, 76(2), 114-119.
- Wyatt, C. J., Quiroga, V. L., Acosta, R. T. O., & Méndez, R. O. (1998). Excretion of arsenic (As) in urine of children, 7–11 years, exposed to elevated levels of As in the city water supply in Hermosillo, Sonora, Mexico. *Environmental Research*, 78(1), 19-24.