

ARSÉNICO EN EL AGUA: EL ENEMIGO INVISIBLE QUE AMENAZA LA SALUD

Eligio Pastor Rivero Martínez y Francisca Alicia
Rodríguez Pérez



Resumen

¿Sabías que en México y en muchas otras regiones del mundo el agua puede contener arsénico? Este veneno invisible ha causado gran preocupación por los daños a la salud que puede ocasionar. El arsénico es un elemento químico presente de forma natural en la corteza terrestre y puede contaminar las fuentes de agua, especialmente las subterráneas. La exposición prolongada al agua contaminada conlleva riesgos severos que afectan la calidad y las expectativas de vida de la población. Por ello, se han desarrollado diversas tecnologías para eliminarlo del agua potable. Recientemente se ha investigado un proceso llamado electrodeionización, que emplea electricidad para eliminar iones de compuestos de arsénico. Lo más interesante es que esta técnica no requiere añadir químicos ni materiales adicionales y tampoco genera residuos sólidos contaminantes. En otras palabras, se trata de una alternativa innovadora y mucho más amigable con el medio ambiente, que abre nuevas posibilidades para garantizar un agua más segura y saludable.

Acceso al agua segura, un reto global

El agua es el líquido maravilloso que permite la vida en nuestro planeta. Este líquido es tan importante para la vida que la primera pregunta que nos hacemos para saber si hay vida en otros planetas es: ¿Hay agua? Efecti-

vamente, gran parte de los proyectos espaciales está interesada en determinar si hay agua en otros cuerpos celestes. En nuestro planeta tenemos la fortuna de contar con una gran cantidad de agua, que ha permitido el desarrollo de la vida en las formas más variadas que uno pueda imaginar. Nosotros mismos, los seres humanos, surgimos gracias al agua y dependemos por completo de ella. Nuestra supervivencia está ligada al agua, pero solo una pequeñísima fracción del agua del planeta podemos utilizarla para satisfacer nuestras necesidades de todos los días. Actualmente, la disponibilidad de agua potable es uno de los mayores desafíos que enfrenta la humanidad.

El agua subterránea puede parecer limpia, pero no lo está

Desafortunadamente, la disponibilidad del líquido vital para la población ha disminuido. Mientras la demanda sigue creciendo debido al aumento de la población y de las actividades humanas. La necesidad de una mayor cantidad de agua nos ha llevado a extraerla de fuentes subterráneas cada vez más profundas. Esta agua subterránea puede parecer limpia, pero en realidad contiene diversos minerales, sales y otros componentes que no siempre son deseados. Uno de los más preocupantes es el arsénico, un veneno que a veces se encuentra en este tipo de agua en concentraciones peligrosas, sin que podamos detectarlo a simple vista (Figura 1).



Figura 1. Agua subterránea contaminada con una sustancia invisible: el arsénico.

El arsénico es uno de los compuestos químicos de mayor preocupación en el mundo, según la Organización Mundial de la Salud (OMS) (World Health Organization, 2019). Aun cuando el arsénico se encuentra en los seres vivos en muy bajas concentraciones, bajo ciertas condiciones es muy tóxico y produce diferentes enfermedades. El arsénico se ha asociado con el cáncer de vejiga, pulmón, piel, riñón, fosas nasales, hígado y próstata. También se conocen daños no cancerígenos, entre los cuales se encuentran: engrosamiento y decoloración de la piel, malestares estomacales, náuseas, vómito, diarrea, entumecimiento de pies y manos, parálisis parcial y ceguera (Environmental Protection Agency, 2001).

¿Cómo llega el arsénico a nuestra agua?

El arsénico puede entrar en el cuerpo humano por exposición, a través de los alimentos, o principalmente, por el consumo de agua con altas concentraciones de este metaloide. Pero ¿cómo llega el arsénico al agua? Hay varias formas, la mayoría de las veces es por procesos geológicos naturales. El agua, al estar en contacto con rocas y minerales que contienen arsénico, disuelve parte de este (Hao et al., 2018). De esta manera, el agua, al filtrarse a través del suelo hacia los mantos freáticos, se contamina con arsénico y otros compuestos. También existe la contaminación del agua por arsénico, ocasionada por actividades humanas como la minería y el uso de pesticidas y herbicidas, entre otras. La Organización Mundial de la Salud ha recomendado un límite máximo para proteger nuestra salud: no debe haber más de 10 microgramos de arsénico por litro de agua potable (World Health Organization, 2019).

En México, una de las principales fuentes de agua potable es de origen subterráneo y hay regiones donde es la única fuente. Esta agua se originó por filtración a través del suelo y las rocas. En este recorrido natural, el agua puede arrastrar consigo minerales, microorganismos y, en algunos casos, sustancias tóxicas como el arsénico. Se ha estimado que 8,81 millones de personas en México están expuestas al agua con niveles de arsénico superiores al límite recomendado por la OMS (10 microgramos por litro),

esta exposición prolongada podría provocar más de 13000 casos de cáncer (Alarcón-Herrera et al., 2020). El arsénico se encuentra presente en el agua subterránea de muchos países. En nuestro país se encuentra en acuíferos del norte, noroeste y centro de México, así como en zonas mineras o geotérmicas (Alarcón-Herrera et al., 2020). Los estados con concentraciones de arsénico por encima de 25 microgramos por litro son Baja California Sur, Sonora, Chihuahua, Coahuila, Sinaloa, Nayarit, Durango, Zacatecas, San Luis Potosí, Jalisco, Aguascalientes, Guanajuato, Hidalgo, Michoacán y Yucatán.

¿Cómo se puede eliminar el veneno invisible del agua?

Se han propuesto diversos métodos para reducir la concentración de arsénico en el agua hasta niveles seguros, por debajo de 10 microgramos por litro. Algunos de los métodos propuestos se basan en el uso de materiales sólidos especiales en los que el arsénico puede quedar atrapado en su superficie mediante un proceso llamado adsorción. Es como si el contaminante se “pegara” al material, lo que facilita su remoción. Otro método, común en plantas de tratamiento de agua, llamado coagulación, consiste en la adición de una sustancia que provoca la formación de grumos o aglomerados de arsénico y otras impurezas, para su posterior separación. También se utiliza una técnica llamada intercambio iónico, en la que se emplean resinas en forma de pequeñas esferas capaces de retener los iones de los compues-

tos de arsénico y liberar en su lugar iones inocuos. Mediante este proceso de “trueque” químico se logra purificar el agua. Algunos otros métodos utilizan membranas para separar el arsénico, o incluso procesos biológicos (Hao et al., 2018; Jain & Singh, 2012; Alka et al., 2021; Mondal et al., 2013). Algunos de estos métodos han sido seleccionados para su aplicación en plantas de tratamiento de agua para la remoción de arsénico (Hering et al., 2017). Cada país o región puede aplicar la técnica que mejor se adapte a sus necesidades, desde el uso de materiales adsorbentes de fácil acceso hasta el de membranas de alta tecnología.

Un método amigable con el ambiente para limpiar el agua de arsénico

Un método novedoso para la remoción de arsénico utiliza resinas y membranas de intercambio iónico para extraer iones de arsénico mediante corriente eléctrica y se considera una tecnología amigable con el medio ambiente. Las resinas y las membranas se fabrican con materiales poliméricos en forma de pequeñas esferas (perlas) en el caso de las resinas y de láminas delgadas en el caso de las membranas. En su interior se encuentran sitios con carga eléctrica que permiten el intercambio de iones con el agua. Así, las resinas y membranas pueden ser catiónicas o aniónicas si intercambian iones positivos (cationes) o iones negativos (aniones), respectivamente.

¿Cómo funciona esta tecnología? La figura 2 ilustra el funcionamiento de la celda de electrodeionización. Esta celda está formada por compartimentos alternados de dilución y concentración. El primero, por donde circula el agua que se quiere limpiar, contiene una mezcla de resinas aniónicas y catiónicas; el segundo, por donde circula el agua que recibirá el arsénico, típicamente no contiene resina. Los compartimentos están separados por membranas de intercambio iónico que permiten el paso selectivo de iones. La vista ampliada del interior de la celda muestra el arreglo de membranas y resina, e ilustra el movimiento de los iones de acuerdo con el campo eléctrico. En los extremos de la celda se encuentran los electrodos, que se conectan a una fuente de alimentación para suministrar corriente eléctrica a la celda. El agua que contiene arsénico fluye a través de los compartimentos diluidos y concentrados. En el compartimento con la resina, el campo eléctrico impulsa a los iones positivos a moverse a través de la resina y de la membrana catiónica hacia el electrodo negativo. Mientras que los iones negativos son impulsados hacia el electrodo positivo a través de la resina y la membrana aniónica. Otros iones en las soluciones se mueven de manera similar para mantener la neutralidad eléctrica, como se puede ver en la figura. De esta manera, el contenido de arsénico disminuye en el agua diluida hasta alcanzar el valor final deseado.

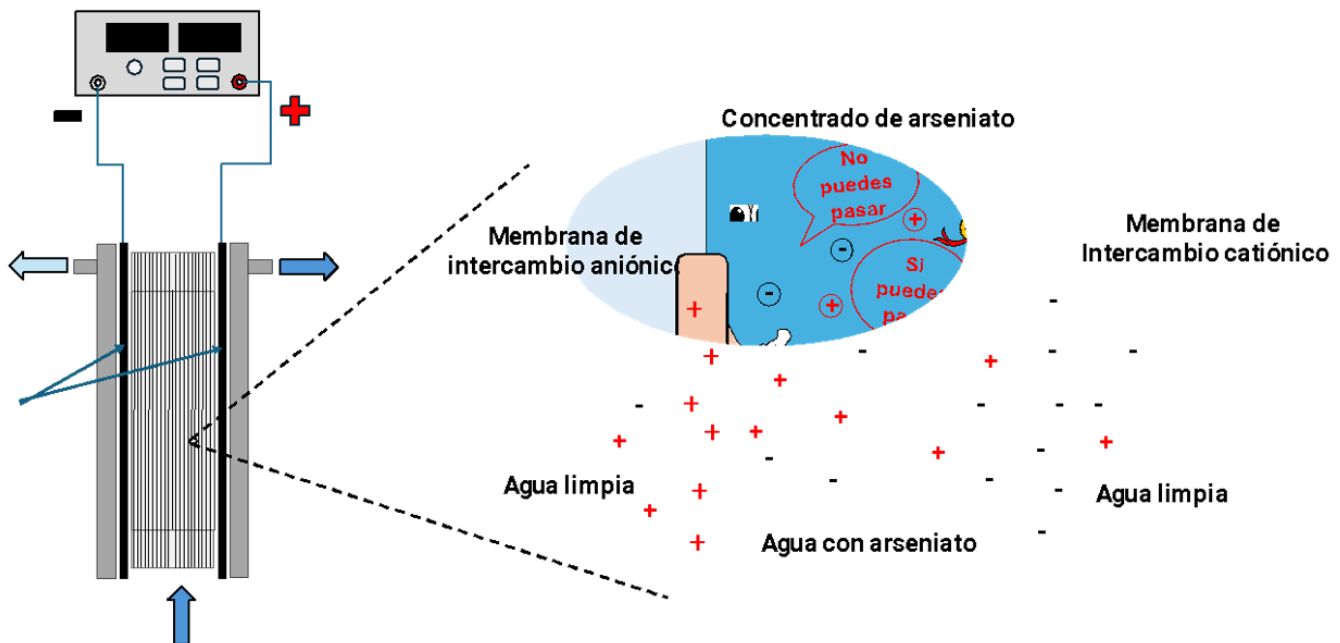


Figura 2. Un método para limpiar el agua de arsénico con electricidad (electrodeionización).

Esta tecnología no requiere agregar nuevos químicos ni materiales, ni genera desechos sólidos contaminantes, lo que la convierte en una alternativa mucho más amigable con el medio ambiente. Las resinas de intercambio iónico se regeneran mediante corriente eléctrica, sin necesidad de agentes químicos. Esto puede ser muy importante en comunidades o zonas con acceso limitado a reactivos químicos. Adicionalmente, se prevé integrar esta tecnología con fuentes de energía renovable, como la solar o la eólica, para cubrir la demanda de energía. Así, no solo se limpia el agua de arsénico, sino que se hace de manera sustentable reduciendo el impacto ambiental y promoviendo el acceso a esta tecnología.

La presencia de arsénico en el agua representa un grave problema de salud pública. La principal contaminación del agua por arsénico ocurre de forma natural, pero el problema se agrava por la excesiva demanda del vital líquido que nos lleva a obtenerla de fuentes subterráneas más profundas donde aumenta la posibilidad de concentraciones altas de arsénico. La exposición prolongada a este metaloide conlleva el riesgo de enfermedades que afectan la calidad de vida y la expectativa de vida de la población. Así, eliminar el arsénico del agua contaminada se convierte en una prioridad que requiere métodos efectivos y accesibles. Si combinamos la investigación científica aplicada con políticas públicas efectivas y la conciencia de la población, se puede eliminar el arsénico para disfrutar de agua potable de calidad, libre de este veneno.

Referencias

- Alka, S., Shahir, S., Ibrahim, N., Ndejiko, M. J., Vo, D.-V. N., & Manan, F. A. (2021). Arsenic removal technologies and future trends: A mini review. *Journal of Cleaner Production*, 278, 123805. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123805>
- Environmental Protection Agency. (2001). Technical fact sheet: final rule for arsenic in drinking water. 20001XXE.PDF
- Hao, L., Liu, M., Wang, N., & Li, G. (2018). A critical review on arsenic removal from water using iron-based adsorbents, *RSC Advances*, 8(69), 39545–39560. <https://doi.org/10.1039/C8RA08512A>
- Hering, J. G., Katsoyiannis, I. A., Theoduloz, G. A., Berg, M., & Hug, S. J. (2017). Arsenic Removal from Drinking Water: Experiences with Technologies and Constraints in Practice. *Journal of Environmental Engineering*, 143(5), 03117002. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001225](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001225)
- Jain, C. K., & Singh, R. D. (2012). Technological options for the removal of arsenic with special reference to South East Asia. *Journal of Environmental Management*, 107, 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.04.016>
- Mondal, P., Bhowmick, S., Chatterjee, D., Figoli, A., & Van der Bruggen, B. (2013). Remediation of inorganic arsenic in groundwater for safe water supply: A critical assessment of technological solutions. *Chemosphere* 92(2), 157–170. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.01.097>

Ortega, A., Oliva, I., Contreras, K. E., González, I., Cruz-Díaz, M. R., & Rivero, E. P. (2017). Arsenic removal from water by hybrid electro-regenerated anion exchange resin/electrodialysis process. *Separation and Purification Technology* 184, 319–326. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.04.050>

World Health Organization. (2019). Preventing disease through healthy environments exposure to arsenic: a major public health concern. [who-ced-phe-pe-19-4-1-eng.pdf](https://www.who.int/publications-detail/preventing-disease-through-healthy-environments-exposure-to-arsenic-a-major-public-health-concern)



Dr. Eligio Pastor Rivero Martínez. Profesor en la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán de la UNAM. Líneas de investigación: Modelado y análisis de reactores electroquímicos para la recuperación de metales de efluentes, el almacenamiento de energía y la remoción de contaminantes del agua mediante procesos híbridos de intercambio iónico/electrodialisis, entre otros. SNII nivel 2. Mail: priveromtz@msn.com

Dra. Francisca Alicia Rodríguez Pérez. Profesora en la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, UNAM, en las carreras de Ingeniería Química y Química Industrial. Líneas de investigación: Procesos electroquímicos para la oxidación de compuestos recalcitrantes; tratamientos electroquímicos para la separación de iones mediante intercambio iónico y electrodialisis. SNII nivel 1. Mail: ica1_alicia@hotmail.com

