

Arsénico en el agua potable en México

**Abril Munguía-Lara
Lucero Hernández Martínez
Nadia Martínez Villegas**

De los 88 elementos que de manera natural se localizan en la corteza terrestre, el arsénico ocupa el lugar 47 en abundancia (Plant *et al.*, 2004) y se halla naturalmente en más de 200 formas minerales asociado a metales como el oro (Au), la plata (Ag), el cobre (Cu), el hierro (Fe) y no metales como el azufre (S). Los minerales de arsénico más comunes son arsenopirita (FeAsS), realgar (As_2S_3), oropimente (As_2S_3), arsenolita (As_2O_3), mimetita ($\text{Pb}_5\text{Cl}(\text{AsO}_4)_3$) y cobaltita (CoAsS).

El arsénico en el medio ambiente proviene de fuentes naturales o antropogénicas. Las primeras se asocian a procesos geológicos, como la meteorización de las rocas, las emisiones volcánicas y la actividad geotermal. Las segundas incluyen la minería, la metalurgia, la agricultura (debido al trióxido de arsénico en los pesticidas) y la industria maderera que utiliza conservantes de madera con arsénico, como el arseniato de cobre cromatado. Se estima que más del 99 % del arsénico presente en la geósfera, atmósfera, hidrosfera y biosfera de nuestro planeta se asocia con rocas y minerales. En la mayoría de las rocas, la concentración de arsénico varía entre 0.5 y 2.5 mg/kg (Smedley y Kinniburgh, 2002). En el suelo, el arsénico varía entre 0.1 y 40 mg/kg, por lo que se dice que se encuentra enriquecido en comparación con las rocas. En sedimentos, el nivel de arsénico es menor a los 10 mg/kg. En el aire, sus concentraciones varían entre

Capas de la Tierra	Matrices ambientales y tejidos biológicos	Concentración promedio de arsénico
Geósfera	Rocas ígneas	1.5 mg/Kg
	Rocas metamórficas	< 5 mg/Kg
	Rocas sedimentarias	5-10 mg/Kg
	Suelo	0.1 y 40 mg/kg
	Sedimentos	< 10 mg/Kg
Atmósfera	Aire	0.4 y 30 ng/m ³
Biósfera	Plantas	0.01 a 5 mg/kg
	Moluscos y crustáceos	0.005 y 0.3 mg/kg
	Animales domésticos y humanos	< 0.3 mg/kg
Hidrosfera	Ríos y lagos	0.0008 mg/L
	Agua de mar	0.0015 mg/L
	Agua subterránea	< 0.0005 y 5 mg/L

Tabla 1. Concentraciones de arsénico en diferentes matrices ambientales y tejidos biológicos.

0.4 y 30 ng/m³. Adicionalmente, se ha observado que también se encuentra en los tejidos vivos. En plantas, la concentración varía de 0.01 a 5 mg/kg, mientras que, en animales marinos como moluscos y crustáceos, varía entre 0.005 y 0.3 mg/kg.

En animales domésticos y humanos sus concentraciones son generalmente menores a 0.3 mg/kg, y se acumula principalmente en el cabello y las uñas (Mandal y Suzuki, 2002) (Tabla 1). La concentración de arsénico en ríos y lagos es de alrededor de 0.0008 mg/L y varía dependiendo de factores como la recarga superficial y subterránea, la introducción de residuos urbanos e industriales y la actividad minera. En el agua de mar, el valor medio es de aproximadamente 0.0015 mg/L, mientras que en el agua subterránea varía entre < 0.0005 y 5 mg/L.

En general, los niveles de As son mayores en el agua subterránea que en el agua superficial (lagos, ríos y mares), especialmente en áreas con depósitos de roca volcánica o de minerales ricos en As (Smedley y Kinniburgh, 2002).

Es posible registrar concentraciones elevadas en acuíferos con condiciones oxidantes, reductoras, con circulación geotermal, relacionados con depósitos minerales, formaciones volcánicas, volcano-sedimentarias, cuencas aluviales terciarias y cuaternarias e, incluso, ligadas a actividades antropogénicas. A nivel mundial, la mayor parte de los acuíferos con altas concentraciones de arsénico tienen origen en procesos geoquímicos naturales de disolución de minerales (principalmente óxidos de hierro) o desorción de arsénico en condiciones reductoras (Smedley y Kinniburgh, 2002).

TOXICIDAD Y EXPOSICIÓN A ARSÉNICO

El origen del arsénico no determina su toxicidad, pues esta se establece por la especie y el estado de oxidación del elemento, mismos que, a su vez, están controlados por el potencial redox (Eh) y el pH. La toxicidad de las especies de arsénico varía, en general, de acuerdo a la siguiente tendencia: compuestos inorgánicos trivalentes > compuestos orgánicos trivalentes > compuestos inorgánicos pentavalentes > compuestos orgánicos pentavalentes > arsénico elemental (Tabla 2). Por consiguiente, los compuestos inorgánicos (que no contienen carbono (C) en su estructura química) se consideran más tóxicos que los orgánicos (en los que el arsénico se combina con carbono (C) y oxígeno (O)).

En aguas superficiales con alto contenido de oxígeno (que genera, a su vez, condiciones oxidantes), el arsénico predomina en estado de oxidación +5 (o pentavalente), como ocurre en el ácido arsénico H₃AsO₄, que es la forma ácida del ion arsenato, AsO₄³⁻. En condiciones reductoras, generalmente en sedimentos de lagos o aguas subterráneas, predomina en estado de oxidación +3 (o trivalente), como ocurre en el ácido arsenioso de fórmula química H₃AsO₃, que es la forma ácida del ion arsenito AsO₃³⁻ (Alarcón *et al.*, 2014).

Nivel de toxicidad	Nombre del compuesto	Estado de oxidación	Fórmula química
	Arsina	-III	AsH_3
	Ácido arseenioso	+III	H_3AsO_3
	Ácido metilarsenioso	+III	MMA(III) , $\text{CH}_3\text{As(OH)}_2$
	Ácido arseenico	+V	H_3AsO_4
	Ácido monometilarseenico	+V	MMA(V) , $\text{CH}_3\text{AsO(OH)}_2$
	Arsénico elemental	0	As

Tabla 2. Compuestos orgánicos e inorgánicos de arsénico con diferentes estados de oxidación mostrando el nivel de toxicidad.

La exposición actual o reciente a arsénico en humanos se mide en la orina. Concentraciones de $20 \mu\text{g/L}$ se consideran normales, mientras que mayores a $200 \mu\text{g/L}$ se consideran exposiciones elevadas, y mayores a $500 \mu\text{g/L}$ se consideran tóxicas. La exposición a arsénico a largo plazo (meses o años), se mide en el cabello y las uñas, considerados los mejores indicadores a largo plazo (Suárez-Solá *et al.*, 2004).

Dependiendo de la concentración, la frecuencia (exposición aguda o crónica) y la ruta de exposición (inhalación, ingestión de agua contaminada con arsénico o absorción a través de la piel) se pueden presentar síntomas como entumecimiento y mareo, diarrea, dolor abdominal y vómito, o incluso la muerte. Entre los efectos causados por su ingesta se encuentran los que se presentan en la piel, como la hiperpigmentación (oscurecimiento de la piel por exceso del pigmento cutáneo llamado melanina), hipopigmentación (aclarado de la piel por deficiencia de melanina) e hiperqueratosis (engrosamiento de la capa externa de la piel que se caracteriza por la formación de callosidades). Se ha observado que estos efectos se producen tras una exposición mínima de aproximadamente cinco años y pueden ser precursores de cáncer de piel. Otros efectos incluyen alteraciones renales y hepáticas, diabetes y enfermedades pulmonares y cardiovasculares.

Los distintos tipos de cáncer que se originan por la exposición crónica de arsénico incluyen cáncer de piel, vejiga, pulmón y riñón (Alarcón *et al.*,

2014). La dosis máxima en la que no se observan efectos adversos equivale a $0.08 \times 10^{-2} (\text{mg/kg})/\text{día}$, mientras que la dosis mínima en la que ya se muestran efectos adversos es $1.4 \times 10^{-2} (\text{mg/kg})/\text{día}$ (EPA, 1996).

El arsénico representa una amenaza importante para la salud pública, sobre todo cuando se encuentra en aguas usadas como fuente de agua potable. Por es tal motivo, la Organización Mundial de la Salud (OMS) ha establecido un valor guía recomendable de arsénico en agua potable de $10 \mu\text{g/L}$ (WHO, 2017). Este valor sirve de base para que cada país establezca su propia normativa del límite máximo permisible en función de las tecnologías o técnicas de remediación asequibles y sus fuentes de agua potable alternativas.

NORMATIVIDAD MEXICANA

En México, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) establece la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 que indica los límites permisibles de distintos contaminantes orgánicos e inorgánicos en el agua potable, entre los que se encuentra el arsénico. En 1994 esta norma establecía un límite máximo permisible de $50 \mu\text{g/L}$. En el año 2000 fue modificada para reducir el nivel de arsénico en el agua para uso y consumo humano a $25 \mu\text{g/L}$ en un período de 5 años. Recientemente (el 5 de mayo de 2022), el Diario Oficial de la Federación (DOF) publicó una

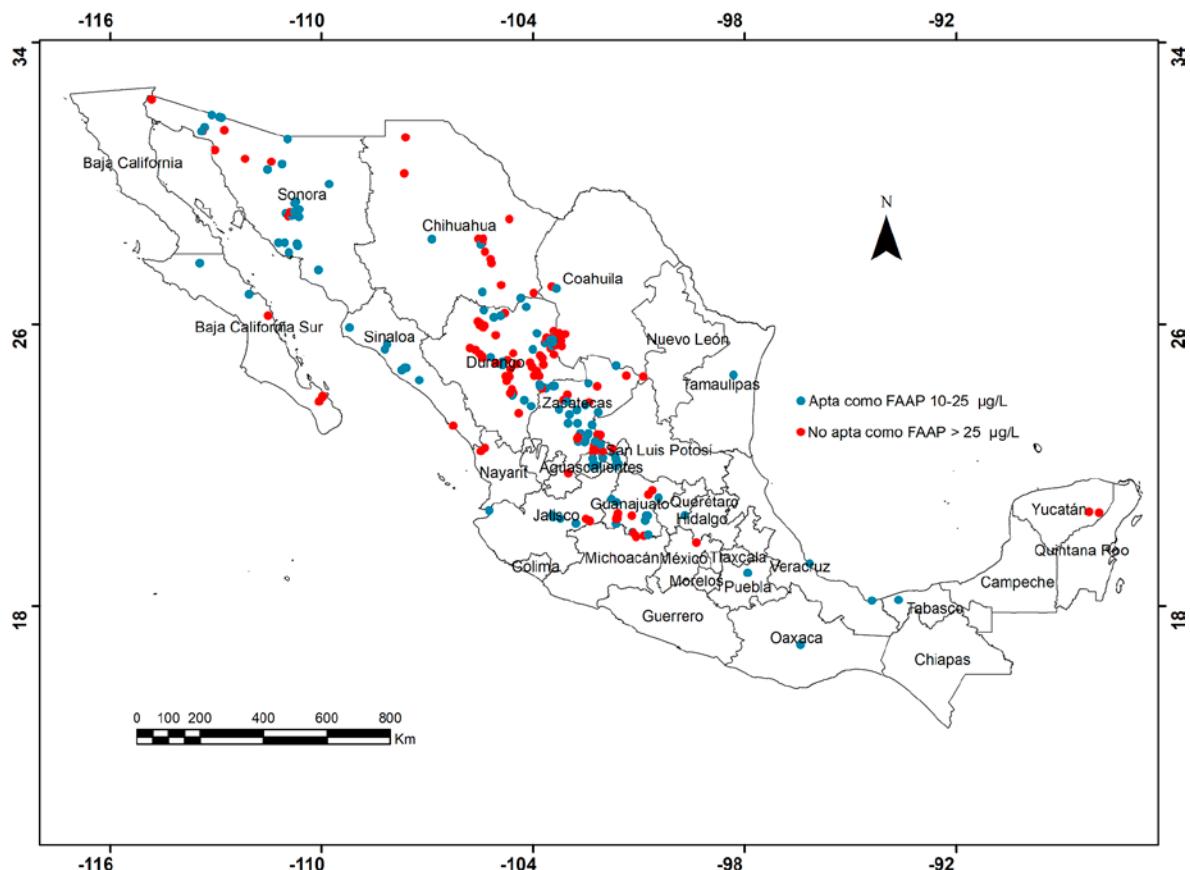


Figura 1. Fuentes de abastecimiento de agua potable en México aptas (con concentraciones de arsénico en agua potable entre 10 y 25 µg/L (azul)) y no aptas (> 25 µg/L (rojo)).

actualización de la NOM-127-SSA1-2021 “Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua” que entrará en vigor en mayo de 2023. Esta nueva actualización especifica un límite de 25 µg/L que deberá disminuir gradualmente a 10 µg/L en 2024 para aquellas localidades con una población mayor a 500,000 habitantes, en 2026 para poblaciones entre 50,000 y 499,000 habitantes y en 2029 para localidades con una población menor a 50,000 habitantes. Esta nueva norma entrará en vigor en mayo de 2023 y dejará sin efectos a la Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 del año 2000.

EL ARSEÑICO EN MÉXICO

Actualmente, en México, 1.5 millones de personas consumen agua con concentraciones de arsénico

por encima de los 25 µg/L, y cerca de 150,000 personas están expuestas a concentraciones más altas, de entre 75 y 350 µg/L (Alfaro de la Torre *et al.*, 2021).

Por ello, desde 2012, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) monitorea la concentración de arsénico y otros elementos en los cuerpos de agua más importantes del país a través de la Red Nacional de Monitoreo de la Calidad de Aguas Nacionales (RENAMENA) que, en 2020, contaba con 5,034 sitios de monitoreo de la calidad del agua en todo el país, de los cuales 1,068 monitoreaban y reportaban concentraciones de arsénico (y otros elementos) en agua subterránea. De acuerdo con estos resultados, el 76.4 % de los sitios (816) proveía agua subterránea potable de excelente calidad al presentar concentraciones totales de arsénico por debajo de los 10 µg/L. El 11.7 % (125) producía agua apta como fuente de abastecimiento de agua potable al presentar concentraciones totales de arsénico entre 10 y 25 µg/L y el 11.9 % (127) agua no apta como fuente

de abastecimiento de agua potable por presentar concentraciones de arsénico total por encima de los 25 µg/L (Figura 1).

Los resultados de la RENAMECA confirman que los estados con concentraciones de arsénico por encima de los 25 µg/L son Baja California Sur, Sonora, Chihuahua, Coahuila, Sinaloa, Nayarit, Durango, Zacatecas, San Luis Potosí, Jalisco, Aguascalientes, Guanajuato, Hidalgo, Michoacán y Yucatán.

Un monitoreo más amplio, de 3,951 sitios muestreados entre enero y diciembre del 2017 a lo largo de todo el país, mostró que el 83.8 % de los sitios (3,312) presentaba concentraciones de arsénico por debajo de los 10 µg/L, mientras que el 16.2 % (639) mostraba concentraciones por encima de dicho valor. De los sitios con concentración por encima de los 10 µg/L, el 51 % (326) correspondía a agua subterránea, el 28 % (179 sitios) a ríos y el 21 % (134 sitios) a cuerpos de agua superficial (Alarcón-Herrera *et al.*, 2020).

Adicionalmente, se estima que en México hay 8.8 millones de personas expuestas a arsénico por encima del límite de 10 µg/L y se esperan 13,070 nuevos casos de cáncer en los estados áridos del centro y norte de México, donde se presentan las concentraciones más elevadas (Alarcón-Herrera, *et al.*, 2020).

CONCLUSIONES

La concentración elevada de arsénico en aguas superficiales y subterráneas de México alerta sobre posibles afectaciones a la salud en el caso de consumo de agua contaminada. Con la finalidad de prevenirlas y reducir el riesgo es indispensable diseñar estrategias que garanticen la provisión de agua con concentraciones menores a 10 µg/L, apta para consumo humano.

Adicionalmente, es indispensable realizar campañas de sensibilización entre comunidades y poblaciones expuestas a arsénico para coadyuvar a disminuir el riesgo a la salud derivado de la ingesta directa de agua potable contaminada con arsénico y el consumo de alimentos regados o cocinados con agua contaminada.

R E F E R E N C I A S

- Alarcón M, Leal L, Martín I, Miranda S y Benavides A (2014). *Arsénico en Agua: Presencia, cuantificación analítica y mitigación*. Centro de Investigación en Materiales Avanzados.
- Alarcón-Herrera MT, Martin-Alarcon DA, Gutiérrez M, Reynoso-Cuevas L, Martín-Domínguez A, Olmos-Márquez MA and Bundschuh J (2020). Co-occurrence, possible origin, and health-risk assessment of arsenic and fluoride in drinking water sources in Mexico: Geographical data visualization. *Science of The Total Environment* 698:134168. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134168>.
- Alfaro de la Torre MC, Ortiz-Perez MD, Alarcón MT, Martínez-Cruz DA y Ledón JM (2021). Concentraciones de Arsénico y Fluoruro en Agua Subterránea. En Del Razo LM, Ledón JM, Velasco MN (Eds.), *Hacia el cumplimiento del Derecho Humano al Agua: Vol. 1. Arsénico y fluoruro en agua: Riesgos y perspectivas desde la sociedad civil y la academia en México* (pp. 38-56). UNAM-Instituto de Geofísica, Ciudad de México.
- EPA (1996). Proposed guidelines for carcinogen risk assessment. *Federal Register* 61(79):17960-8011.
- Mandal BK and Suzuki KT (2002). Arsenic round the world: A review. *Talanta* 58(1):201-235.
- Plant J, Kinniburgh DG, Smedley PL, Fordyce FM and Klinck BA (2004). Arsenic and Selenium. En Lollar BS (Ed.), *Treatise on Geochemistry* (pp. 17-66). San Diego, CA, EE. UU.: Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B0-08-043751-6/09047-2>.
- Smedley PL and Kinniburgh DG (2002). A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry* 17(5):517-568. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(02\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(02)00018-5).
- Suárez Solá ML, González-Delgado FJ, González Weller D, Rubio Armendáriz C y Hardisson de la Torre A (2004). Análisis, diagnóstico y tratamiento de las intoxicaciones arsenicales. *Cuadernos de medicina forense* 35:05-14.
- WHO (2017). *Guidelines for drinking-water quality* (4a ed.). World Health Organization. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950>.
- IPICYT**
**Instituto Potosino de Investigación
Científica y Tecnológica**
División de Geociencias Aplicadas
San Luis Potosí
- Abril Munguía-Lara**
abril.munguia@ipicyt.edu.mx
- Jejanny Lucero Hernández Martínez**
jejanny.hernandez@ipicyt.edu.mx
- Nadia Valentina Martínez Villegas**
nadia.martinez@ipicyt.edu.mx



© Enrique Soto. Tehuantepec, Oaxaca XII, 2007.