



Estudios de caso

Análisis de riesgo a la salud humana por ingesta de arsénico presente en agua purificada en Zinapécuaro, Michoacán: Un enfoque probabilístico

Human health risk analysis from arsenic ingestion via purified water in Zinapécuaro, Michoacán: A probabilistic approach

Alexis Calderón Herrera¹ , Marco Antonio Martínez Cinco¹ , José Leopoldo Mendoza Lagunas² , Laura Nelly Rodríguez Cantú¹ , María Mercedes Meza Montenegro³ , María del Mar Navarro Farfán⁴ , Jesús Ávila Guzmán¹ 

¹Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, C. de Santiago Tapia 403, Centro, 58000 Morelia, Michoacán, México

²Dirección Adjunta de Investigación, Humanidades y Ciencia, Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) Avenida Insurgentes Sur 1582, Colonia Crédito Constructor, Demarcación Territorial Benito Juárez, C.P. 03940, Ciudad de México.

³Dirección de Recursos Naturales, Instituto Tecnológico de Sonora, Ciudad Obregón, Sonora, México

⁴Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito de la Investigación Científica s/n, Ciudad Universitaria, Alcaldía Coyoacán, C.P. 04150, Ciudad de México, México.

Autor de correspondencia: Alexis Calderón Herrera, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, C. de Santiago Tapia 403, Centro, 58000 Morelia, Michoacán, México. Correo electrónico: 1414314k@umich.mx. ORCID: 0009-0009-1780-3188.

Recibido: 15 de abril del 2026

Aceptado: 13 de octubre del 2026

Publicado: 2 de septiembre del 2026

Resumen. - El arsénico (As) como elemento tóxico se encuentra de manera natural en regiones geotérmicas de México. En el área de Zinapécuaro, ubicado en Michoacán se han detectado concentraciones que superan la norma de salud de 10 µg/L, particularmente en las aguas subterráneas y de manantial. En este estudio se realizó el muestreo en 6 diferentes negocios de recarga de agua para determinar las concentraciones de arsénico inorgánico presente. El objetivo del trabajo es evaluar el riesgo para la salud humana, particularmente en la población infantil, considerada como altamente vulnerable, por la ingesta de agua purificada en la ciudad de Zinapécuaro, Michoacán. Se aplicó un enfoque cuantitativo de la Environmental Protection Agency (EPA) que incluye la caracterización de concentraciones del tóxico, el cálculo de exposición y un análisis probabilístico mediante simulación Monte Carlo. Las muestras de agua fueron recolectadas en meses consecutivos en los 6 negocios seleccionados y analizadas por espectroscopia de adsorción atómica. Los niveles de As obtenidos en las muestras de agua variaron de 0.00034 a 0.03695 µg/L. Se utilizaron las dosis de referencia listadas en la EPA para la evaluación de la estimación puntual del cociente de peligro (HQ) y el riesgo de cáncer (CR), en ingesta de los cuales los resultados se muestran a continuación respectivamente, con los datos medidos: M1(3.73,0.00014), M2(3.001,0.00012), M3(4.45,0.00017), M4(3.81,0.00015), M5(1.56, 0.000058), M6(1.83, 0.000068). Después de usar la simulación Montecarlo para los valores de HQ, se obtuvieron los siguientes percentiles al 5% y 95%. M1(2.76, 4.7), M2(2.57, 3.45), M3(3.50, 5.34), M4(2.92, 4.70), M5(1.27, 1.87), M6(1.52, 2.14) y para el CR fueron M1(0.00010, 0.00018), M2(0.000095, 0.00018), M3(0.00013, 0.00020), M4(0.00010, 0.00018), M5(0.000047, 0.000069), M6(0.000057, 0.000079). De acuerdo con los resultados del HQ en ingesta mayor a 1 se indica que existe un potencial peligro no carcinogénico de enfermar por consumo de agua en los sitios evaluados y en los resultados de ingesta del CR los sitios presentan riesgo carcinogénico que no es aceptable ya que el 80% de los valores simulados exceden significativamente el rango de 1×10^{-6} – 1×10^{-4} bajo el criterio de la EPA.

Palabras clave: Toxicidad; Riesgo; Arsénico.

Abstract. – Arsenic (As) is a toxic element naturally present in geothermal regions of Mexico. In the Zinapécuaro area of Michoacán, concentrations exceeding the 10 µg/L health standard have been detected, particularly in groundwater and spring water. This study involved sampling at six different water-refilling businesses to determine the concentrations of inorganic arsenic present. The objective was to evaluate the human health risk—specifically for the child population, which is considered highly vulnerable—associated with the consumption of purified water in the city of Zinapécuaro, Michoacán. A quantitative approach established by the Environmental Protection Agency (EPA) was applied, involving the characterization of toxicant concentrations, exposure calculation, and probabilistic analysis using Monte Carlo simulation. Water samples were collected over consecutive months from the six selected businesses and analyzed via atomic absorption spectroscopy. The As levels found in the water samples ranged from 0.00034 to 0.03695 µg/L. EPA-listed reference doses were used to calculate point estimates for the hazard quotient (HQ) and cancer risk (CR) associated with ingestion; the results based on measured data are as follows: M1 (3.73, 0.00014), M2 (3.001, 0.00012), M3 (4.45, 0.00017), M4 (3.81, 0.00015), M5 (1.56, 0.000058), and M6 (1.83, 0.000068). Following the Monte Carlo simulation for HQ values, the 5th and 95th percentiles were obtained. M1(2.76, 4.7), M2(2.57, 3.45), M3(3.50, 5.34), M4(2.92, 4.70), M5(1.27, 1.87), M6(1.52, 2.14); and for CR, the values were M1(0.00010, 0.00018), M2(0.000095, 0.00018), M3(0.00013, 0.00020), M4(0.00010, 0.00018), M5(0.000047, 0.000069), M6(0.000057, 0.000079). HQ results for ingestion exceeding 1 indicate a potential non-carcinogenic health risk associated with water consumption at the evaluated sites; regarding CR ingestion results, the sites present an unacceptable carcinogenic risk, as 80% of the simulated values significantly exceed the 1×10^{-6} – 1×10^{-4} range established by EPA criteria.

Keywords: Toxicity; Risk; Arsenic.



1. Introducción

El arsénico (As) es un metaloide tóxico clasificado como carcinogénico del grupo 1 por la Agencia Internacional para la investigación del cáncer (IARC). Su exposición crónica en los seres humanos ocurre principalmente a través de la ingesta de agua se ha asociado con el desarrollo de cáncer de piel, vejiga, pulmón, así como con severos efectos no carcinogénicos que incluyen alteraciones cardiovasculares metabólicas, daño renal y trastornos neurológicos. Ante esta amenaza global, la Organización Mundial de la Salud (OMS) ha establecido un valor guía máximo de 10µg/L en el agua de consumo humano como criterio de seguridad para la protección de la salud. [1, 2, 3].

En América Latina, y de manera particular en México, la presencia natural de este metaloide en acuíferos en el centro y norte del país está asociada a formaciones geológicas de origen volcánico [6,7]. En el estado de Michoacán diversas investigaciones han documentado una serie de concentraciones de arsénico y algunos otros metales que superan los límites normativos nacionales e internacionales [8,9].

A pesar de las elevadas concentraciones reportadas en el ambiente, existe hoy en día una brecha importante en las evaluaciones integrales del riesgo a la salud humana, que la mayoría de estos estudios se han centrado exclusivamente en las caracterizaciones fisicoquímicas de las aguas. En el municipio de Zinapécuaro, el agua de relleno es consumida crónicamente al ser percibida por la población como una alternativa segura y económica, esto resulta imperativo evaluar si este tipo de establecimiento realmente mitiga la exposición, especialmente en poblaciones que son más susceptibles a ser más afectadas por la toxicidad por arsénico, como lo es la población infantil [10,11].

Para la cuantificación de estos peligros y riesgos a la salud dictadas por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) han dependido de enfoques deterministas, sin embargo, el uso de los valores puntuales para las variables como lo es la concentración del elemento tóxico, la tasa de ingesta y el peso corporal, no puede capturar la variabilidad real de la exposición ni la incertidumbre a los análisis ambientales. Por ello el presente estudio adopta un enfoque metodológico probabilístico. La simulación Monte Carlo permite asignar distribuciones de probabilidad a los parámetros de entrada, los cuales nos facilitan la generación de un espectro de escenarios posibles, esta herramienta caracteriza de manera más explícita la variabilidad en el cálculo de las dosis, asegurando una interpretación más rigurosa, transparente y justificada del riesgo [11,12].

El presente trabajo tiene el objetivo de evaluar cuantitativamente, mediante un enfoque probabilístico de simulación Monte Carlo, el riesgo carcinogénico y no carcinogénico asociado a la ingesta de arsénico presente en agua purificada de consumo de Zinapécuaro, Michoacán.

2. Antecedentes

2.1 Arsénico en agua de consumo: contexto global y bases toxicológicas.

En el contexto del arsénico este se ha considerado en los últimos tiempos como un contaminante de mayor prioridad que otros presentes en el agua de consumo esto por ser un potencial carcinogénico y su alta toxicidad, ya que la Agencia Internacional de investigación sobre el cáncer lo clasificó como carcinogénico humano Grupo 1 [13], por otro lado el consejo nacional de investigación en (2001)[14],



concluyo que existe una fuerte evidencia de asociación entre la exposición crónica a este metaloide y el cáncer de piel, pulmón y vejiga.

2.2 Presencia de arsénico en agua en Latinoamérica y México.

En el último tiempo en Latinoamérica esta problemática acerca del arsénico está asociada a los procesos naturales geogénicos [15,16], en los cuales se han documentado concentraciones muy elevadas en varios países de la región, incluyendo México.

En el contexto de México, existe una descripción de la presencia natural de arsénico en los acuíferos que están asociados con la actividad volcánica e hidrotermales [17,18]. Estudios posteriores han hecho la confirmación de concentraciones que son superiores al límite recomendado en el país. En lo que compete a la evaluación de riesgo en México se han realizado una serie de análisis de riesgo por el consumo de arsénico presente en agua en Colima, identificando el riesgo carcinogénico superiores al umbral aceptable [19,20].

2.3 Exposición humana a EPTs y efectos a la salud

La exposición del ser humano a los EPTs, pueden originarse por diversas vías de exposición, como lo es la ingesta, la inhalación y contacto dérmico, en las comunidades rurales la ingestión de agua que usualmente está contaminada se ha constituido como la principal vía de exposición, por su parte la inhalación de polvo y la ingesta de alimentos que son cultivados en suelos que también pueden llegar a estar contaminados han representado una serie de rutas, especialmente en las poblaciones que son más vulnerables como lo son los niños, mujeres embarazadas y adultos mayores [21].

En numerosos estudios de procedencia epidemiológica han demostrado que la exposición crónica al arsénico está asociada con un incremento al riesgo de cáncer como puede incidir en pulmón, piel e hígado, así como con algunos efectos no carcinogénicos que pueden incluir alteraciones cardiovasculares, diabetes, daño renal, entre otros trastornos neurológicos [22].

Por su parte los metales pesados como lo son el plomo el cual está relacionado con la neurotoxicidad y afectaciones al desarrollo infantil, el cadmio por su parte con el daño renal y óseo, en el caso del mercurio con alteración neurológica y sistema nervioso central [23].

2.4 Exposición múltiple ambiental

En México, diversas investigaciones han hecho reportes de la presencia de arsénico en acuíferos del norte y centro del país, particularmente como en los estados de Durango, Coahuila, Chihuahua, San Luis Potosí, Guanajuato y Michoacán. En estos estudios se han señalado que la principal fuente de contaminación es de origen geogénico, que está asociada a las formaciones volcánicas y a procesos hidrotermales [24]. Sin embargo, a pesar de la existencia de las concentraciones elevadas en el ambiente, son muy limitados los estudios que han incorporado las evaluaciones integrales de riesgo a la salud humana, y son aún más escasos los estudios que emplean enfoques probabilísticos.



En el estado de Michoacán, las investigaciones que se han documentado acerca de la presencia de arsénico y otros metales pesados en cuerpos de agua, particularmente en las zonas del Lago de Cuitzeo y en municipios aledaños a la ciudad de Morelia. Estos estudios han demostrado que en algunos casos las concentraciones superan los límites establecidos por las normativas nacionales como internacionales para el agua de consumo humano [25].

Así mismo también se ha demostrado la acumulación de metales pesados en suelos agrícolas de las regiones aledañas al Lago de Cuitzeo, lo que sugiere un riesgo potencial a la salud por vía alimentaria, no obstante, la mayoría de estos trabajos de investigación enfocados en la caracterización fisicoquímica del ambiente, sin profundizar en la cuantificación del riesgo a la salud humana mediante herramientas probabilísticas [26].

Esta falta de estudios los cuales no han integrado estas múltiples matrices ambientales, como en las poblaciones más vulnerables, así como los análisis de incertidumbres han representado una brecha importante en el conocimiento de índole científico a nivel regional. Todo lo anterior justifica la necesidad que hay de desarrollar investigaciones que apliquen las metodologías más avanzadas de la evaluación de riesgo en la región de Morelia y sus cercanías [27].

2.5 Simulación Montecarlo

La simulación Monte Carlo es una herramienta probabilística que nos permite caracterizar de una manera explícita la variabilidad y la incertidumbre en la evaluación de riesgos, esto mediante el uso de distribuciones de probabilidad para las variables de entrada y la generación de los posibles escenarios reales, así podemos analizar la influencia de las suposiciones del modelo y facilitar la identificación de poblaciones en riesgo, siempre que se cumplan los criterios estrictos de transparencia, justificación de datos y reproductividad. [28,29,30].

2.6 Ubicación de la zona de estudio

El Municipio de Zinapécuaro se localiza al Noroeste del Estado de Michoacán, limita al norte con el Estado de Guanajuato, al noroeste con el lago de Cuitzeo, su distancia a la capital del estado es de 50 km y forma parte del cinturón volcánico mexicano. El estudio se realizó en dos comunidades: Dentro del municipio de Zinapécuaro, el cual se encuentra a 19° 51' 36" latitud Norte, 100° 49' 39" longitud Oeste a una altitud de 1,887m sobre el nivel del mar, y tiene una población de 15,875 habitantes. Esta localidad tiene tres pozos como principal fuente de agua potable, que bombea para suministrar suficiente agua potable al centro de Zinapécuaro de Figueroa.

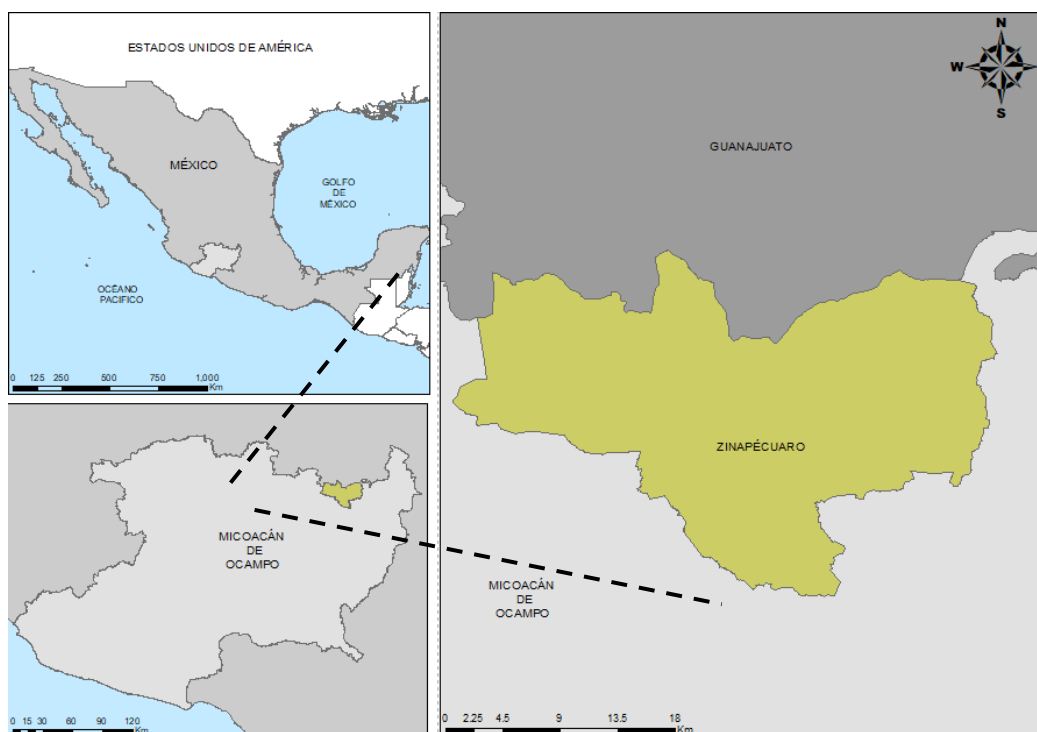


Figura 1. Localización del municipio de Zinapécuaro, Michoacán.

3 Metodología

a) Metodología del muestreo

Se realizó un muestreo que está dirigido al agua supuestamente purificada destinada al consumo humano. Se seleccionaron los puntos de muestreo representativos como lo fueron los puntos de recarga de agua (garrafones), el número de muestras se definió considerando la variabilidad espacial y la disponibilidad de sitios, con la finalidad de representar el consumo de la población, evitando sesgos de estacionalidad cuando fue posible.

En la recolección de muestras se emplearon los siguientes materiales:

- Botellas de polímero de alta densidad (HDPE) de 100 – 250 mL
- Guantes de nitrilo
- Hielera con refrigerantes (4°C)
- Ácido nítrico (HNO_3) ultrapuro
- Pipetas o goteros para acidificación
- Etiquetas y marcadores indelebles
- Bitácora de campo

Preparación de envases:



Los envases fueron lavados previamente con detergente neutro, enjuagados con agua destilada y posteriormente acondicionados con ácido nítrico al 10% durante al menos 24 horas, siguiendo protocolos de limpieza para metales traza.

El muestreo se realizó siguiendo procedimientos estándar de metales:

1. Se enjuagó cada recipiente tres veces con el agua de la muestra antes de su recolección.
2. Se recolectaron aproximadamente 100 mL de muestra, evitando así la formación de burbujas y contaminación externa.
3. En los puntos de dispensación se dejó correr agua durante 1 minuto antes de la toma de agua, esto para asegurar la representatividad.
4. Cada muestra fue etiquetada con un código, fecha, hora y ubicación.

Para preservar la integridad de las muestras y evitar la adsorción o precipitación de metales:

- Las muestras se acidificaron inmediatamente después de su recolección con ácido nítrico (HNO_3) hasta alcanzar un $\text{pH} < 2$.
- Se utilizó aproximadamente entre 1 y 2 mL de HNO_3
- Posteriormente las muestras fueron almacenadas en la hielera a 4 °C y transportadas al laboratorio para su análisis dentro de un periodo máximo recomendado de menor o igual a seis meses según Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos.

b) Análisis de las muestras

El análisis de arsénico inorgánico total se realizó con un Espectrofotómetro de Absorción Atómica Agilent 240 FS acoplado a un Generador de Hidruros Agilent VGA 77 siguiendo el método de análisis de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana: NMX-AA-051-SCFI-2016. Para el control de calidad se utilizó el estándar de referencia de agua (Trace Elements in Water) 1640a del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST, U.S. Department of Commerce: Gaithersburg, MD), el porcentaje de recuperación estuvo entre 97 y 120%, el coeficiente de variación fue menor a 5% y el límite de cuantificación fue de 3.3 g/L. En los blancos de campo no se observaron valores de detección, lo cual indica que no hubo contaminación durante la colecta, manejo y envío de las muestras.

c) Evaluación del riesgo a la salud

Se utilizó el modelo de evaluación de riesgo a la salud presentado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA, por sus siglas en inglés). Se calculó la exposición humana al arsénico debida a la ingestión. La dosis diaria promedio de ingestión (ADD_{ing}) mg/kg/día se cuantificó como la ingesta de arsénico contenido en el agua potable. La ADD de arsénico a través de la ruta de exposición por ingestión se estimó utilizando la ecuación 1:

$$ADD(ing) = \frac{C \times IR \times EF \times ED}{BW \times AT}$$

Ec.1

6



donde C es la concentración de arsénico en las muestras de agua de cada sitio (mg/L). En nuestro estudio, para calcular los ADD de cada sitio, utilizamos la concentración media de arsénico obtenida en cada lugar de muestreo. El BW es el peso corporal en kg y se seleccionó el valor promedio de (28.93 kg) obtenido de los datos de la Encuesta Nacional de Salud y Nutrición, para niños mexicanos [32]. EF es la frecuencia de exposición (días/año) y ED es la duración de la exposición (años). Para nuestros escolares se utilizaron los valores de 350 días y 6 años respectivamente, según la recomendación de la USEPA (1989) y USEPA (2004). AT es el tiempo medio de exposición en días ($ED \times EF$). Para el efecto no carcinogénico, se consideraron 15 días fuera de su residencia y se calculó ($ED \times 350$ días), pero para el efecto carcinogénico, el AT se calculó utilizando $ED = 70$ años [$AT = 70 \times 365$ días = 25,550 días].

Evaluación del riesgo no carcinogénico.

El riesgo no carcinogénico se determina mediante el cociente de peligro (HQ), que se define como la relación entre la dosis diaria media estimada (ADD) a la dosis de referencia de arsénico o valor umbral (RfD) (Ecuación 2).

Para la vía de ingestión del arsénico por el agua potable, el valor de la RfD oral es de 0.0003 mg/kg/día [32].

$$HQ = \frac{ADD}{RfD} \quad \text{Ec.2}$$

Evaluación del riesgo carcinogénico

El riesgo carcinogénico se estima como el riesgo potencial de que un individuo desarrolle cáncer a lo largo de su vida como resultado de la exposición al carcinógeno potencial [33].

El cálculo del riesgo de cáncer (CR) se basa en la toxicidad analizada para producir cáncer en términos de un factor de la pendiente (SF) que se multiplica por la dosis diaria media (ADD) a lo largo de 70 años (Ecuación 3). El valor de SF oral se da en mg/kg/día. Un rango de riesgo de cáncer aceptable es de 1×10^4 a 1×10^6 [34].

$$CR = ADD \times SF \quad \text{Ec.3}$$



Tabla 1. Parámetros de exposición utilizados como valores de estimación puntual para calcular el riesgo carcinogénico y no carcinogénico utilizando el modelo de la EPA.

Parámetro	Unidad	Características de los parámetros		Referencia
Frecuencia de exposición (EF)	Día/año	350		[40]
Duración de la exposición (ED)	Años	Escolares	6	[40]
Tiempo promedio (AT)	Días	Escolares	No carcinogénico (ED x 350) 2100 Carcinogénico (70x365)=25550	[39]
Dosis de referencia oral (RfDingestión)	mg/kg/día	3.0 x10 ⁻⁴		[41]
Factor de la pendiente oral (SF)	mg/kg/día	1.5		[41]
Ingesta de agua (IR)	(L/día)	Escolares	0.52	[40]
Peso corporal (BW)	Kg	28.93		[26]

d) Simulación de Monte Carlo

Se ejecutó la simulación Monte Carlo (MCS) para generar distribuciones de probabilidad del cociente de peligro y riesgo carcinogénico. Este método tiene en cuenta las incertidumbres y variabilidades en la evaluación del riesgo [35]. Se calcularon los ADD, HQ, CR para cada sitio de estudio.

Las simulaciones Monte Carlo se ejecutaron utilizando el software Risk Analyzer de Add ins.com LLC (Hockessin, Delaware, USA. 19707) haciendo uso de una hoja de cálculo y añadido como complemento en el software MS Excel 2010. Para la simulación de MCS, se utilizó un tamaño de iteración de 10,000 repeticiones para adquirir estadísticas (distribución de probabilidad, distribución de probabilidad acumulada, media, mediana, desviación estándar y percentiles).



Tabla 2. Parámetros de exposición considerando las distribuciones utilizadas para calcular el cociente de peligro y riesgo carcinogénico en la simulación Monte Carlo.

Parámetro	Distribución de probabilidad	Unidad	Características de los parámetros Promedio (min-máx)		Referencia
Concentración de As por cada sitio					Presente estudio
M1	LogNormal	mg/L	0.0205 (0.0106, 0.0369)		
M2	LogNormal	mg/L	0.0166 (0.0125, 0.0243)		
M3	LogNormal	mg/L	0.0246 (0.0067, 0.0320)		
M4	LogNormal	mg/L	0.0210 (0.006, 0.030)		
M5	LogNormal	mg/L	0.0087 (0.0046, 0.0127)		
M6	LogNormal	mg/L	0.0100(0.0067, 0.0150)		
Tasa de ingestión (IR)	LogNormal	L/día	Escolares	1.7 (0.5, 2.5)	[34]
Peso corporal (BW)	Normal	kg	Escolares	28.93 (11.6, 97.25)	[26]

4. Resultados y discusión

En este estudio, los niveles de arsénico detectados en cada localidad de Zinapécuaro, Michoacán se utilizaron para determinar el cociente de peligro (HQ). Los valores de ADDing se muestran en la Tabla 1. En todos los casos, ADDing tuvo valores altos, mostrando el valor más alto en el sitio M3 y el más bajo para el sitio M5 con medias de 1.34×10^{-3} y 4.69×10^{-4} mg/kg-día respectivamente (Tabla 3). Estos resultados concuerdan con estudios recientes que informaron que la vía de exposición más importante para el arsénico en el agua potable es la ingestión [36, 37].


Tabla 3. Dosis diaria promedio (ADD) en niños (mg/kg/day) expuestos al arsénico por ingestión a través del agua de consumo.

<i>Sitio</i>	<i>Vía de contacto</i>	<i>Promedio ± SD</i>	<i>Mediana</i>	<i>Min-max</i>	<i>P5%</i>	<i>P95%</i>
M1	Ingestión	1.12E-03 ± 1.78E-04	0.001113758	0.000584 - 0.001909	0.000827288	0.00141341
M2	Ingestión	9.00E-04 ± 9.17E-04	0.00090996	0.0005774 - 0.0015989	0.000655088	0.00119838 1
M3	Ingestión	1.34E-03 ± 1.66E-04	0.001332484	0.000682 - 0.001742	0.001052984	0.00160003 3
M4	Ingestión	1.15E-03 ± 1.62E-04	0.00114254	0.000557 - 0.001619	0.000873132	0.00141044 1
M5	Ingestión	4.69E-04 ± 5.45E-05	0.000469865	0.000286 - 0.000675	0.000379631	0.00055935 6
M6	Ingestión	5.48E-04 ± 5.56E-05	0.000547467	0.000367 - 0.00074	0.000455193	0.00063999 5

Como era de esperar, el HQ promedio por vía de ingestión tuvo valores altos, el sitio M3 tuvo el valor más alto siendo este 4.45, mientras que el sitio M5 tuvo el valor más bajo con 1.57, los demás sitios estuvieron en el rango de estos valores (Tabla 4), Para esta vía de ingestión los valores del percentil 95 del HQ estuvieron por encima del criterio de seguridad de 1 en cada uno de los sitios de muestreo.

Tabla 4. Cociente de peligro (HQ) en escolares expuestos al arsénico por ingestión a través del agua de consumo.

<i>Sitio</i>	<i>Vía de contacto</i>	<i>Promedio ± SD</i>	<i>Mediana</i>	<i>Min-max</i>	<i>P5%</i>	<i>P95%</i>
M1	Ingestión	3.73 ± 0.59	3.712526985	1.948728 - 6.364286	2.751353687	4.700710572
M2	Ingestión	3.00 ± 0.55	3.033200879	1.924551 - 5.329558	2.567272799	3.440655625
M3	Ingestión	4.45 ± 0.55	4.441613661	2.294259 - 5.808141	3.509945029	5.333442475
M4	Ingestión	3.81 ± 0.54	3.808466621	1.855185 - 5.395757	2.910440297	4.701469872
M5	Ingestión	1.57 ± 0.18	1.566216679	0.951723 - 2.249322	1.265436752	1.864518679
M6	Ingestión	1.83 ± 0.19	1.824890339	1.223215 - 2.46666	1.517311253	2.13331686

El hallazgo más contundente y preocupante es que prácticamente toda la distribución probabilística se encuentra a la derecha de la línea roja (HI = 1) (Figura 2). Esto significa que la probabilidad de que un niño en esta zona experimente un peligro inaceptable es cercana al 100%. No estamos ante un problema que afecte únicamente a un percentil extremo (como el P95); es una condición de riesgo sistémico que afecta a la media y a la totalidad de la población infantil evaluada.

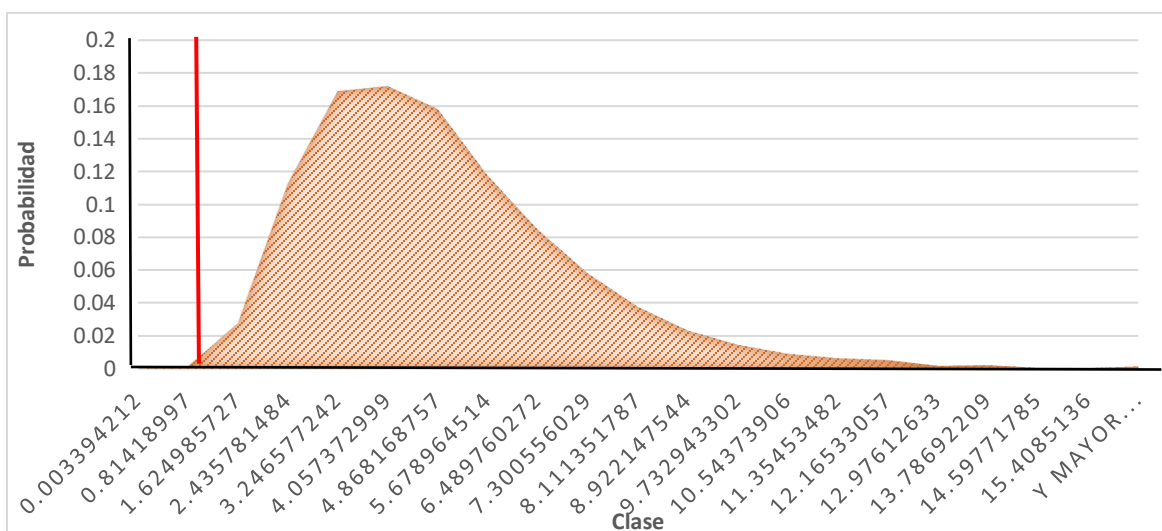


Figura 2. Resultado de la simulación Monte Carlo del índice de peligrosidad (HI). Distribución probabilística del índice de peligrosidad por grupos de edad. Valor de seguridad = 1.

En cuanto al CR, promedio por vía de ingestión tuvo valores que llegan a hacer aceptables o.

Los resultados en los promedios son tolerables, pero también algunos que rozan el riesgo no aceptable siendo 4 sitios de estos como lo son el M1, M2, M3 y M4. El sitio M3 tuvo el valor más alto siendo este 1.65×10^{-4} , mientras que el sitio M5 tuvo el valor más bajo con 5.79×10^{-5} , los demás sitios estuvieron en el rango de estos valores (Tabla 4).

Tabla 4. Índice de riesgo (CR) en niños expuestos al arsénico por ingestión a través del agua de consumo.

Sitio	Vía de contacto	Promedio $\pm$ SD	Mediana	Min-max	P5%	P95%
M1	Ingestión	$1.38\text{E-}04 \pm 2.19\text{E-}05$	0.000137303	0.0000721 - 0.000236	0.000101989	0.000174241
M2	Ingestión	$1.2\text{E-}04 \pm 2.0\text{E-}05$	0.000112181	0.00007118 - 0.000198	$8.0761\text{E-}05$	0.000147735
M3	Ingestión	$1.65\text{E-}04 \pm 2.05\text{E-}05$	0.000164265	0.0000848 - 0.000215	0.000129811	0.000197245
M4	Ingestión	$1.41\text{E-}04 \pm 2.02\text{E-}05$	0.000140851	0.0000687 - 0.0001996	0.000107641	0.000173875
M5	Ingestión	$5.79\text{E-}05 \pm 6.70\text{E-}06$	$5.79269\text{E-}05$	0.0000352 - 0.00008319	$4.68027\text{E-}05$	$6.89593\text{E-}05$
M6	Ingestión	$6.75\text{E-}05 \pm 6.85\text{E-}06$	$6.74937\text{E-}05$	0.00004524 - 0.00009123	$5.61182\text{E-}05$	$7.89004\text{E-}05$

Al hacer el análisis con los datos de la Simulación Montecarlo y realizar el histograma, la línea azul marca el límite máximo aceptable por la EPA para el riesgo de desarrollar cáncer en una población expuesta



(1×10^{-4} o 1 caso en 10,000 personas). Al observar la curva, la gran mayoría del área sombreada en color verde (aproximadamente el 80%) se desplaza significativamente hacia la derecha de la línea azul (Figura 3). Esto significa que la gran mayoría de los escolares simulados enfrentan un riesgo de contraer cáncer que supera la norma de seguridad internacional.

La cola de la distribución se extiende hacia valores alarmantes como 0.000419843 (4.2×10^{-4}) e incluso superiores. En estos percentiles más altos, el riesgo se multiplica por cuatro respecto al límite tolerado. Esto indica que los niños con mayor ingesta de agua o menor peso corporal sufren una vulnerabilidad extrema que incrementa drásticamente la probabilidad acumulativa de daño genético y celular.

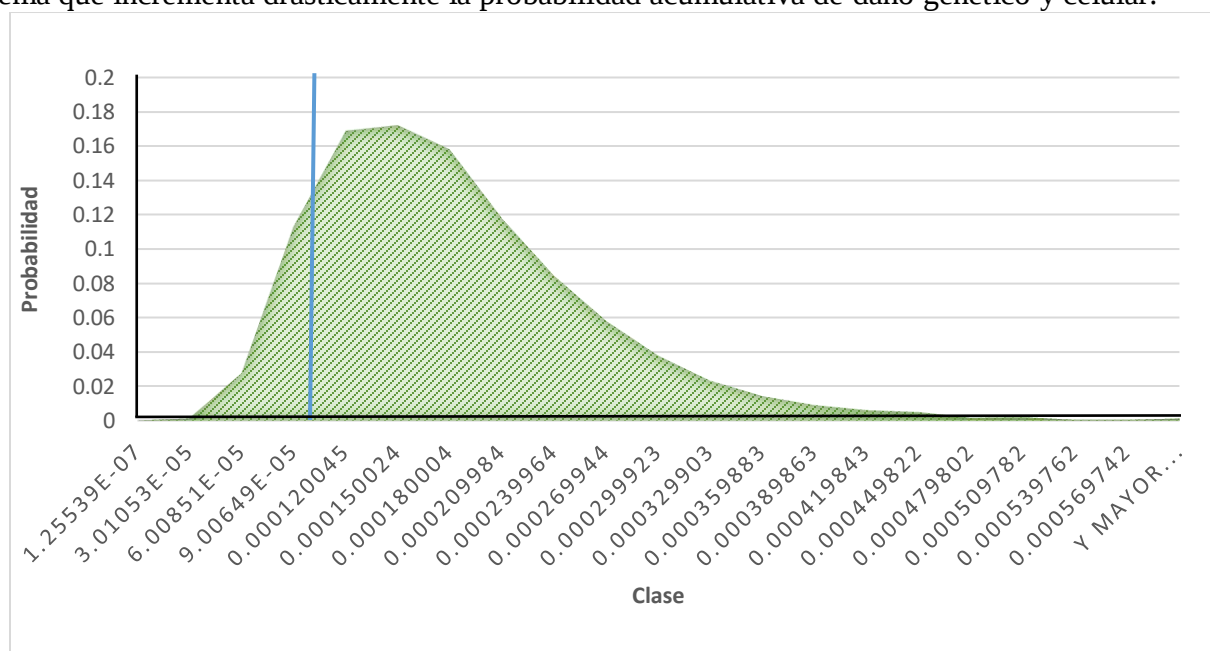


Figura 3. Resultado de la simulación Monte Carlo del Cancer Risk (CR). Distribución probabilística del índice de peligrosidad por grupos de edad. Valor de seguridad = 1×10^{-6} – 1×10^{-4} .

5. Conclusión

La simulación Monte Carlo permitió observar que la variabilidad de los datos mantiene la tendencia de riesgo, ya que los percentiles superiores (P95) del HQ permanecen por encima de la unidad en todos los casos, confirmando la consistencia del riesgo no carcinogénico.

Mientras que para los resultados del CR la presencia de los valores que son en el 80% de los casos superiores al límite superior de aceptación, nos indica de una condición de riesgo potencial que no debe de ignorarse.

Las contribuciones del presente trabajo aportan evidencia cuantitativa sobre la presencia de arsénico en el agua purificada de consumo, un tipo de fuente que es menos estudiada a comparación de las aguas subterráneas. Estas métricas evidencian un problema crítico de salud pública, afectando de manera



desproporcionada a subpoblaciones altamente susceptibles, en particular a la población en edad escolar, cuyo desarrollo continuo se ve fuertemente comprometido por la ingesta sostenida de este metaloide. La adopción de un modelo probabilístico representa un avance metodológico sustancial frente a los esquemas deterministas tradicionales, ofreciendo una interpretación integral del riesgo que fundamenta la toma de decisiones estratégicas para las autoridades sanitarias, con el fin de mitigar el impacto toxicológico y ambiental en la región.

5. Agradecimientos

Agradecimientos a cada uno de los integrantes del equipo de trabajo, por su aporte y conocimiento.

6. Agradecimientos de autoría

Alexis Calderón Herrera: Escritura; Ideas; Metodología; Análisis formal; Borrador original; Revisión y edición; Referencias. *Marco Antonio Martínez Cinco*: Conceptualización; Recursos; Ideas; Metodología; Análisis formal; Recursos; Análisis de datos. *José Leopoldo Mendoza Lagunas*: Conceptualización; Ideas; Investigación; Análisis de datos. *Laura Nelly Rodríguez Cantú*: Conceptualización; Ideas. *María Mercedes Meza Montenegro*: Conceptualización; Recursos; Ideas. *María del Mar Navarro Farfan*: Conceptualización; Recursos; Ideas, Análisis de datos. *Jesús Ávila Guzman*: Ideas; Metodología; Análisis formal.

References

- [1] International Agency for Research on Cancer (IARC), “Arsenic, metals, fibres and dusts,” IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, vol. 100C, pp. 11–465, 2012.
- [2] J. Podgorski and M. Berg, “Global threat of arsenic in groundwater,” *Science*, vol. 368, no. 6493, pp. 845–850, 2020.
- [3] E. Shaji et al., “Arsenic contamination of groundwater: Global synopsis,” *Geoscience Frontiers*, vol. 12, no. 3, 2021.
- [4] M. Berg et al., “Arsenic contamination in groundwater systems,” *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, vol. 49, pp. 191–216, 2021.
- [6] National Research Council, *Arsenic in Drinking Water: 2001 Update*. Washington, DC: National Academies Press, 2001.
- [7] World Health Organization, “Guidelines for drinking-water quality,” 4th ed., Geneva: WHO Press, 2018.
- [8] M. A. Armienta and N. Segovia, “Arsenic and fluoride in the groundwater of Mexico,” *Environmental Geochemistry and Health*, vol. 30, no. 4, pp. 345–353, 2008.



- [9] J. Bundschuh et al., “One century of arsenic exposure in Latin America: A review of history and occurrence from 14 countries,” *Science of the Total Environment*, vol. 429, pp. 2–35, 2012.
- [10] P. Birkle, J. Bundschuh, and O. Sracek, “Mechanisms of arsenic enrichment in geothermal systems,” *Water Research*, vol. 44, pp. 5605–5617, 2010.
- [11] National Research Council, *Science and Decisions: Advancing Risk Assessment*. Washington, DC: National Academies Press, 2009.
- [12] G. C. Saha et al., “Probabilistic human health risk assessment of heavy metals in environmental matrices,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 403, p. 123724, 2021.
- [13] B. Rajasekhar, I. M. Nambi, and S. K. Govindarajan, “Human health risk assessment for exposure using deterministic and probabilistic methods,” *Environmental Pollution*, vol. 265, p. 114814, 2020.
- [14] International Agency for Research on Cancer (IARC), “Arsenic and inorganic arsenic compounds,” 2012.
- [15] National Research Council, *Arsenic in Drinking Water*, Washington, DC, 2001.
- [16] J. Bundschuh et al., “Arsenic in Latin America: Occurrence and health effects,” *Science of the Total Environment*, vol. 429, pp. 2–35, 2012.
- [17] M. A. Armienta and N. Segovia, “Arsenic and fluoride in Mexico’s groundwater,” *Environmental Geochemistry and Health*, 2008.
- [18] C. C. Osuna-Martínez et al., “Arsenic in waters, soils, sediments, and biota from Mexico: An environmental review,” *Science of the Total Environment*, vol. 752, p. 142062, 2021.
- [19] J. L. Mendoza-Lagunas and M. M. Meza-Montenegro, “Health risk assessment of children exposed to arsenic,” *Environmental Geochemistry and Health*, vol. 41, pp. 2807–2819, 2019.
- [20] M. A. Martínez-Cinco et al., “Evaluación del riesgo por exposición infantil a arsénico en agua purificada,” *PeerJ*, 2023.
- [21] L. N. Rodríguez-Cantú et al., “Monte Carlo probabilistic method for arsenic exposure,” *Human and Ecological Risk Assessment*, vol. 28, pp. 408–432, 2022.
- [22] R. Hurtado-Jiménez and J. L. Gardea-Torresdey, “Arsenic in drinking water in Los Altos de Jalisco,” *Revista Panamericana de Salud Pública*, vol. 20, no. 4, pp. 236–247, 2006.



- [23] A. H. Smith et al., “Increased mortality from lung cancer after arsenic exposure,” *Environmental Health Perspectives*, vol. 126, no. 6, 2018.
- [24] United States Environmental Protection Agency, “Risk Assessment Guidance for Superfund,” Washington, DC, 1989.
- [25] M. A. Martínez-Cinco et al., “Presencia de arsénico en agua purificada en Zinapécuaro, Michoacán,” *La Sociedad Académica*, vol. 31, no. 61, pp. 135–137, 2024.
- [26] ENSANUT, “Encuesta Nacional de Salud y Nutrición,” Instituto Nacional de Salud Pública, México, 2018.
- [27] J. C. Ruiz García, “Evaluación de la acumulación de arsénico en especies del lago de Cuitzeo,” Tesis de Maestría, Univ. Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 2014.
- [28] M. M. Maldonado et al., “Exposición infantil a metales en comunidades vulnerables,” *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, vol. 34, no. 2, pp. 277–294, 2018.
- [29] P. Rugen and B. Callahan, “An overview of Monte Carlo,” *Human and Ecological Risk Assessment*, vol. 2, no. 4, pp. 671–680, 1996.
- [30] U.S. Environmental Protection Agency, “Policy for use of probabilistic analysis in risk assessment at the U.S. Environmental Protection Agency,” EPA/630/R-97/001, Washington, DC, 1997.
- [31] J. Fernández-Macías et al., “Probabilistic human health risk assessment associated with fluoride and arsenic,” *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 192, p. 712, 2020.
- [32] H. Rezaei et al., “Health risk assessment of heavy metals in groundwater,” *Toxicology and Environmental Health Sciences*, vol. 11, pp. 54–62, 2019.
- [33] X. Zeng et al., “Health risk assessment of trace elements in surface water,” *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 22, pp. 9400–9412, 2015.
- [34] Vega-Millán, C., Dévora-Figueroa, A., Burguess, J., Beamer, P., Furlong, M., Lantz, C., Meza-Figueroa, D., O’Rourke, M., García-Rico, L., Meza-Escalante, E., Balderas-Cortés, J. J., Meza-Montenegro, M. M. (2021). Inflammation biomarkers associated with arsenic exposure by drinking water and respiratory outcomes in indigenous children from three Yaqui villages in southern Sonora, México. *Environ Sci Pollut Res*. 28, 34355-34366. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13070-x>
- [35] United States Environmental Protection Agency, “Risk Assessment Guidance for Superfund,” 1989.
- [36] Y. Huang et al., “Health risk assessment using Monte Carlo simulation,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 415, p. 125629, 2021.



- [37] United States Environmental Protection Agency, “Probabilistic Risk Assessment Guidelines,” 2001.
- [38] American Public Health Association, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23rd ed., Washington, DC, 2017.
- [39] USEPA. (1989a). Risk Assessment Guidance for Superfund Volume I Human Health Evaluation Manual (Part A). U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/540/1-89/002.
- [40] USEPA. (2004). Risk Assessment Guidance for Superfund Volume I: Human Health Evaluation Manual (Part E, Supplemental Guidance for Dermal Risk Assessment). U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/540/R/99/005.
- [41] USEPA. IRIS. 2022. Arsenic Inorganic. CASRN 7440-38-2 | DTXSID4023886. Available at. https://iris.epa.gov/ChemicalLanding/&substance_nmbr=278

Derechos de Autor (c) 2026 Alexis Calderón Herrera, Marco Antonio Martínez Cinco, José Leopoldo Mendoza Laguna, Laura Nelly Rodríguez Cantú, María Mercedes Meza Montenegro, María del Mar Navarro Farfán, Jesús Ávila Guzmán



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Usted es libre para compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia](#) - [Texto completo de la licencia](#)