

09

**RIESGOS**

**DE EXPOSICIÓN A LA CONTAMINACIÓN POR METALES EN  
LAS COMUNIDADES**

# RIESGOS

## DE EXPOSICIÓN A LA CONTAMINACIÓN POR METALES EN LAS COMUNIDADES

### RISKS OF EXPOSURE TO METAL CONTAMINATION IN COMMUNITIES

Katherine Natasha Castillo-Asimbaya<sup>1</sup>

E-mail: [katherineca91@uniandes.edu.ec](mailto:katherineca91@uniandes.edu.ec)

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-0927-2052>

Dainelly Jaileth Beltrán-Gonzabay<sup>1</sup>

E-mail: [dainellybg02@uniandes.edu.ec](mailto:dainellybg02@uniandes.edu.ec)

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-4665-4351>

Alam Jamiel Chulco-Suquillo<sup>1</sup>

E-mail: [alamcs65@uniandes.edu.ec](mailto:alamcs65@uniandes.edu.ec)

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-8643-8518>

<sup>1</sup>Universidad Regional Autónoma de Los Andes, Ambato. Ecuador.

#### Cita sugerida (APA, séptima edición)

Castillo-Asimbaya, K. N., Beltrán-Gonzabay, D. J., & Chulco-Suquillo, A. J. (2025). Riesgos de exposición a la contaminación por metales en las comunidades. *Revista Metropolitana de Ciencias Aplicadas*, 8(2), 85-94.

#### RESUMEN

La contaminación por minerales pesados es un serio problema que afecta a varias poblaciones a nivel mundial. Con frecuencia se pueden encontrar múltiples afectaciones en las personas por esta causa y gran desinformación en la temática. En Ecuador existen comunidades que presentan serias dificultades por esta causa y los niveles de información que poseen son mínimos, de igual forma, las medidas que se toman para contrarrestar sus efectos y por ello, los problemas de salud son diversos. En la investigación se realiza una revisión documental de la temática con énfasis en la contaminación por arsénico, como uno de los metales de mayor influencia en los problemas que afectan a las comunidades en el país, tanto por su presencia en la aguas como por su ingestión a través de los productos alimentarios provenientes de la actividad agrícola que en ellas se desarrolla. Los síntomas y enfermedades presentadas en la población seleccionada, motivó al desarrollo de talleres con la comunidad para llevar la información y orientaciones necesarias, que permitan la adopción de medidas para cuidar la salud y contrarrestar el avance de los efectos actuales. Se aplicó encuestas y el método IADOV para obtener información de los niveles de conocimiento de los pobladores y la satisfacción que poseen con las actividades que fueron desarrolladas. Se pudo constatar la existencia de bajos niveles de conocimiento que propician mayores afectaciones a la salud, por lo que fueron orientadas formas de trabajo para mejorar la misma en los pobladores.

#### Palabras clave:

Arsénico, contaminación, salud, población, información.

#### ABSTRACT

Heavy mineral contamination is a serious problem affecting various populations worldwide. This cause is often associated with multiple health problems, as is widespread misinformation on the subject. In Ecuador, some communities face serious challenges due to this cause, with minimal information available. Likewise, the measures taken to counteract its effects are limited, resulting in a variety of health problems. This research conducted a documentary review of the issue with an emphasis on arsenic contamination, as one of the metals most influential in the problems affecting communities in the country, both due to its presence in water and its ingestion through food products derived from agricultural activities. The symptoms and illnesses experienced by the selected population motivated the development of workshops with the community to provide the necessary information and guidance to enable the adoption of measures to protect health and counteract the spread of the current effects. Surveys and the IADOV method were used to obtain information on residents' knowledge levels and their satisfaction with the activities carried out. It was found that low levels of knowledge lead to greater health impacts, and therefore, work methods were targeted to improve the health of residents.

#### Keywords:

Arsenic, pollution, health, population, information.

## INTRODUCCIÓN

La exposición a metales tóxicos, en particular al arsénico, representa un riesgo importante para la salud en Ecuador, principalmente debido a las actividades agrícolas y mineras. En Ponce Enríquez, una importante zona minera de oro, la concentración de arsénico y otros oligoelementos en los suelos y cultivos de las tierras agrícolas supera los niveles permitidos, lo que conlleva posibles riesgos para la salud de los habitantes locales, tanto cancerígenos como no cancerígenos, debido al consumo de alimentos (Romero et al., 2023). Del mismo modo, en la parroquia rural de Papallacta, se ha identificado como un problema crítico la contaminación por arsénico en los suelos agrícolas, agravada por el uso de agua contaminada para el riego. Los niveles de arsénico en estos suelos superan los límites establecidos por la legislación ambiental ecuatoriana, lo que indica una contaminación de moderada a considerable (Jiménez et al., 2023).

En Salar de Huasco en Chile, bacterias como las cepas de *Exiguobacterium* de ambientes extremos, han desarrollado mecanismos de resistencia, incluida la formación de biopelículas, para sobrevivir a altas concentraciones de arsénico. Estas biopelículas mejoran la resistencia bacteriana al arsénico al proporcionar una barrera protectora y facilitar el proceso de desintoxicación (Pavez et al., 2023). En los seres humanos, se ha demostrado que la exposición crónica al arsénico, especialmente en el útero y en la primera infancia, perjudica la función inmunológica. Estudios realizados en Bangladesh han demostrado que la exposición prenatal al arsénico reduce el número de células T en la placenta y la sangre del cordón umbilical, aumenta el estrés oxidativo y altera los niveles de citocinas, lo que debilita la respuesta inmune de los niños (Raqib et al., 2023).

La exposición a metales pesados y las respuestas celulares al arsénico en Latacunga, Ecuador, presentan importantes desafíos ambientales y de salud. Las actividades industriales han provocado concentraciones elevadas de metales pesados como el arsénico, cobre, el níquel y el plomo en el suelo, y en algunos casos los niveles de arsénico superan los límites reglamentarios locales. Esta contaminación plantea riesgos tanto para el medio ambiente como para la salud humana, especialmente a lo largo de la cadena alimentaria, ya que, la contaminación por arsénico en los suelos agrícolas, debida principalmente al uso de agua contaminada para el riego, ha provocado que los niveles de arsénico superen con crecen los límites permitidos establecidos por la legislación ambiental ecuatoriana (Romero et al., 2023).

La concentración de arsénico en los suelos agrícolas supera los límites permitidos establecidos por la legislación ambiental ecuatoriana, con niveles que oscilan entre 20,4 y 43,0 mg/kg, muy por encima del límite legal de 12 mg/kg para uso agrícola (Jiménez et al., 2023). Esta contaminación se ve agravada por el uso de aguas subterráneas

y geotérmicas cargadas de arsénico para el riego, lo que representa un riesgo para la salud humana. En el contexto de la producción de arroz, un alimento básico en Ecuador, se ha descubierto que los niveles de arsénico en el producto de regiones como Guayas y Los Ríos superan los límites recomendados por la FAO y la OMS, lo que indica un grave riesgo para la salud de la población (Atiaga et al., 2019).

A pesar de los avances en la investigación sobre los efectos del arsénico, existen importantes lagunas en el conocimiento científico. Específicamente, se requiere una mayor comprensión de la exposición crónica al arsénico, a menudo a través del agua contaminada, provoca problemas de salud graves, como cánceres, lesiones cutáneas, diabetes e hipertensión, principalmente debido a sus potentes efectos genotóxicos que dañan el ADN e inducen aberraciones cromosómicas (Mitra et al., 2019). En las células humanas, se ha demostrado que la exposición al arsénico altera significativamente los procesos celulares normales. Además, la exposición al arsénico se ha relacionado con una mayor susceptibilidad a las infecciones respiratorias. Los estudios han demostrado que la exposición crónica al arsénico aumenta la infección por el virus de la gripe en las células epiteliales, lo que aumenta la unión y la replicación del virus y reduce la eficacia de los medicamentos antivirales como el oseltamivir (Amouzougan et al., 2020). La exposición crónica al arsénico también se ha asociado con un mayor riesgo de neuropatías en el sistema nervioso central y con efectos genotóxicos e inmunotóxicos, posiblemente debido al estrés oxidativo y la inhibición de los procesos de reparación del ADN. La exposición prolongada a concentraciones micromolares de arsenito puede provocar una hipometilación global del ADN y una alteración de la expresión génica, lo que repercute en los genes que intervienen en la respuesta al daño del ADN, la inflamación y la respuesta al estrés oxidativo (Stöber et al., 2023).

El presente artículo se enfoca en analizar exhaustivamente la literatura científica actual sobre la exposición al arsénico y su impacto en la respuesta celular. El objetivo principal es evaluar los mecanismos celulares y moleculares mediante los cuales el arsénico afecta la función celular, con un énfasis particular en su relación con enfermedades cardiovasculares y trastornos neurológicos.

## MATERIALES Y MÉTODOS

En el estudio se realiza una investigación documental o revisión bibliográfica de modalidad cualitativa, mediante revisión bibliográfica sobre la exposición a metales y la respuesta celular. Las fuentes de información estarán compuestas por todos los artículos científicos, libros, tesis y otros documentos relevantes publicados sobre el tema. La muestra será una selección representativa de estos documentos, estableciendo los siguientes criterios de inclusión y exclusión: artículos originales, tesis y estudios

de caso publicados en revistas científicas indexadas; documentos publicados entre los años 2019 y 2024 en español, inglés y francés. Los criterios de exclusión incluirán documentos sin acceso al texto completo, publicaciones en formato de resúmenes o abstracts, y documentos duplicados. Se descartaron artículos que no clasificaron para los criterios de búsquedas relativas, como artículos de base de datos regionales, cartas al editor, documentos no revisados por pares y que no abordaran aspectos relacionados con la temática considerándose las investigaciones comprendidas desde enero de 2019 hasta julio de 2024.

Al realizar la búsqueda de la información se encontró como resultado principal 516 artículos relacionados con el tema por lo que contando con los caracteres de exclusión e inclusión mencionados anteriormente, se ha desarrollado una ecuación de búsqueda para poder reducir y especificar los artículos de consulta utilizando los siguientes descriptores: “Arsénico” AND “lisis celular” OR “daño renal” OR “daño hepático” OR “trastornos neurológicos” OR “exposición” dando como resultado un total de 60 artículos de los cuales la búsqueda se redujo a 20 artículos cuya información es más relevante para el tema.

Para la revisión, se emplearon documentos como artículos científicos y libros actualizados en bases de datos como Scopus, Redalyc, EBSCO, Scielo, repositorios de diferentes universidades y el motor de búsqueda Google Académico. Los autores, capacitados en la búsqueda de estudios relevantes, accedieron a estos recursos para identificar publicaciones de los últimos cinco años. Se utilizó una combinación de los siguientes términos de búsqueda para garantizar la efectividad del proceso y cumplir con el objetivo de investigación: “Metales; respuesta celular; trastornos; arsénico y función celular”. Tras la búsqueda inicial, se aplicarán los criterios de inclusión y exclusión para seleccionar los estudios más relevantes para la revisión.

A partir de la información obtenida se realizaron talleres de capacitación en comunidades, las cuales estuvieron dirigidas a la preparación de los pobladores y la prevención de la salud en áreas afectadas por la contaminación por arsénico. Fueron aplicadas encuestas al finalizar los talleres, teniendo en cuenta su elaboración con sencillez y claridad (Santamaría et al., 2020) y la organización en correspondencia con los objetivos de la actividad (Figura 1).

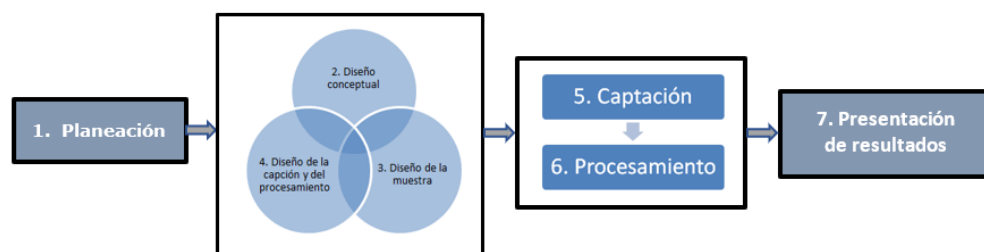


Figura 1. Organización para aplicación de las encuestas.

**IADOV:** La técnica de V.A. ladov en su versión original fue creada por su autor para el estudio de la satisfacción por la profesión en carreras pedagógicas. La técnica para su aplicación está conformada por cinco preguntas, de ellas tres cerradas y 2 abiertas. Constituye una vía indirecta para el estudio de la satisfacción, ya que los criterios que se utilizan se fundamentan en las relaciones que se establecen entre tres preguntas cerradas que se encuentran intercaladas dentro de un cuestionario cuya relación el sujeto desconoce. Estas tres preguntas se relacionan a través de lo que se denomina el “Cuadro Lógico de ladov”. Las preguntas no relacionadas o complementarias sirven de introducción y sustento de objetividad al encuestado que las utiliza para ubicarse y contrastar las respuestas. El número resultante de la interrelación de las tres preguntas indica la posición de cada sujeto en la escala de satisfacción (Andrade Santamaría et al., 2020; Rey Squilanda et al., 2020) (Tabla 1).

Tabla 1. Sistema de evaluación para los estudiantes.

Categoría		Puntuación	
A	Claramente satisfecho(a)	3	(+1)
B	Más satisfecho(a) que insatisfecho(a)	2,3	(+0,5)
C	No definido	1.5	(0)
D	Más insatisfecho(a) que satisfecho(a)	1	(-0,5)
E	Claramente insatisfecho(a)	0	(-1)
C	Contradictorio(a)	2	(0)

Fuente: Hernández (2013).

Para la triangulación de las preguntas intercaladas en la encuesta aplicada que permite valorar el nivel de satisfacción, se emplea el Cuadro Lógico de IADOV (Tabla 2).

Tabla 2. Cuadro Lógico de IADOV.

	1ª pregunta								
	Si			No sé			No		
	2ª pregunta								
	Si- No sé-No			Si- No sé-No			Si- No sé-No		
3ª pregunta									
Me gusta mucho	1	2	6	2	2	6	6	6	6
Me gusta más de lo que me disgusta	2	3	3	2	3	3	6	3	6
Me es indiferente	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Me disgusta más de lo que me gusta	6	3	6	3	4	4	3	4	4
No me gusta	6	6	6	6	4	4	6	4	5
No sé decir	2	3	6	3	3	3	6	3	4

Fuente: Hernández (2013).

El índice de satisfacción grupal (ISG) se obtiene utilizando la fórmula siguiente:

$$ISG = \frac{A(+1) + B(+0.5) + C(0) + D(-0.5) + E(-1)}{N} \quad (F1)$$

Donde: N es la cantidad total de encuestados y las letras corresponden a la cantidad de encuestados en las categorías que se indican en la tabla 1.

El índice de satisfacción grupal puede oscilar entre [-1;1], dividido en las categorías siguientes (Figura 2):



Figura 1. Categorías de satisfacción

Figura 2. Categorías de satisfacción.

Fuente: Hernández (2013).

## RESULTADOS-DISCUSIÓN

La exposición al arsénico (As) desencadena una respuesta celular multifacética en varios organismos, que involucra una variedad de vías bioquímicas y moleculares. En las células humanas, incluso en concentraciones no tóxicas, el arsénico puede inducir cambios duraderos en la expresión génica relacionados con la inflamación, el estrés oxidativo y la modulación epigenética, lo que puede mejorar la tolerancia celular a otros contaminantes, como las nanopartículas de dióxido de titanio (Liu et al., 2019).

La exposición aguda al arsénico en los seres humanos puede provocar una serie de efectos graves para la salud, que a menudo se presentan con síntomas gastrointestinales como náuseas, vómitos, diarrea y dolor abdominal, que pueden progresar a afecciones más críticas, como el colapso cardiovascular y la insuficiencia multiorgánica, si no se trata con prontitud (Mittra et al., 2019).

Los mecanismos subyacentes de la toxicidad del arsénico son multifacéticos e implican vías tanto directas como indirectas. El metabolismo del arsénico desempeña un papel crucial en su toxicidad, ya que se reduce a un estado trivalente mediado por la metiltransferasa, seguido de una metilación oxidativa a un estado pentavalente. Los arsénicos trivalentes, incluidas las formas metiladas, son significativamente más tóxicos que sus homólogos pentavalentes. Uno de los principales mecanismos de toxicidad inducida por el arsénico es la generación de especies reactivas de oxígeno (ROS), que provocan estrés oxidativo, daño celular y apoptosis. Este estrés oxidativo se agrava aún más por la acumulación de Ca<sup>2+</sup>, la regulación positiva de la caspasa-3, la regulación negativa del Bcl-2 y la deficiencia de p-53,

lo que contribuye a la carcinogenicidad, los problemas cardiovasculares y los trastornos del sistema nervioso.

La exposición aguda también afecta a las vías metabólicas, especialmente en los riñones, donde puede inhibir enzimas como el piruvato deshidrogenasa, lo que provoca alteraciones metabólicas y lesiones renales agudas (Moore et al., 2023). La complejidad del perfil toxicológico del arsénico requiere un enfoque integral para comprender sus mecanismos, que incluye el monitoreo ambiental, la vigilancia de la salud y los estudios integrados sobre la exposición y la caracterización del riesgo individual. Por lo tanto, la exposición aguda al arsénico en los seres humanos es un problema crítico de salud pública, que exige atención inmediata e investigaciones avanzadas para mitigar sus efectos devastadores.

La exposición crónica al arsénico se ha relacionado con varios tipos de cáncer, incluidos los cánceres de pulmón, piel y vejiga urinaria, así como con un mayor riesgo de cáncer de hígado, riñón y próstata (González et al., 2024). Los efectos tóxicos del arsénico están mediados por varios mecanismos, incluida la generación de especies reactivas de oxígeno (ROS), que provocan estrés oxidativo, daños en el ADN e inhibición de los procesos de reparación del ADN (Stöber et al., 2023).

Además, la exposición al arsénico interrumpe la respiración celular al inhibir las enzimas mitocondriales y desvincular la fosforilación oxidativa, lo que contribuye a la neurotoxicidad e inmunotoxicidad. Las modificaciones epigenéticas, como las alteraciones de la metilación del ADN, las modificaciones de las histonas y la expresión diferencial del miARN, desempeñan un papel crucial en la carcinogénesis inducida por el arsénico y otros efectos sobre la salud. Por ejemplo, la exposición crónica a bajas dosis de arsenito puede provocar una hipometilación global del ADN y una alteración de la expresión génica, lo que afecta a los genes que intervienen en la respuesta al daño del ADN, la inflamación y la respuesta al estrés oxidativo (Stöber et al., 2023).

En la comunidad de Ponce Enríquez teniendo en cuenta las principales actividades económicas de la zona y las posibles afectaciones que puede presentar sus habitantes, fue seleccionada al azar una muestra de 121 habitantes, entre las edades de 18 a 65 años de edad. A esta muestra le fue aplicada una encuesta para indagar los niveles de conocimientos de la temática y las posibles afectaciones que ya se presentaban. Al hacer referencia

al nivel de conocimiento que poseen sobre la problemática, solo el 17,3% de ellos, pudo abordar el tema con elementos básicos mientras el resto no conocía mucho y el 9,09% no tenía ningún conocimiento.

Al hacer referencia a las enfermedades que se pudieran presentar, el 27,3% mostró algo de conocimiento y pudo relacionar algunas, mientras el 34,7% no pudo mencionar ninguna de las afectaciones que se producen por este tipo de contaminación. De la muestra el 30,5% trabaja directamente en las producciones de las minas, el 36,4% en actividades agrícolas y el resto en diversas actividades. De la muestra se pudo apreciar la existencia de afectaciones en el 61,9% de los mismos, mostrando en la figura 3, la cantidad por las diferentes afectaciones y síntomas.

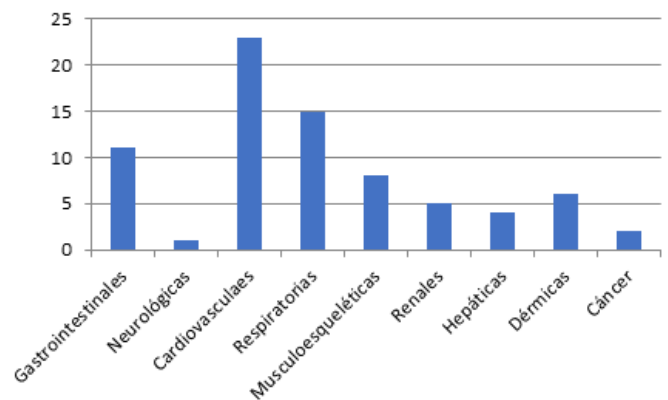
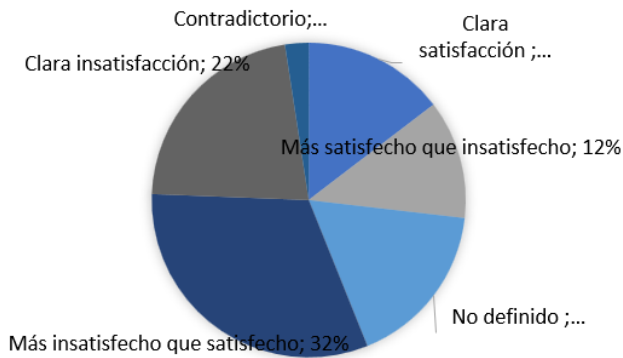


Figura 3. Afectaciones presentadas dentro de la muestra.

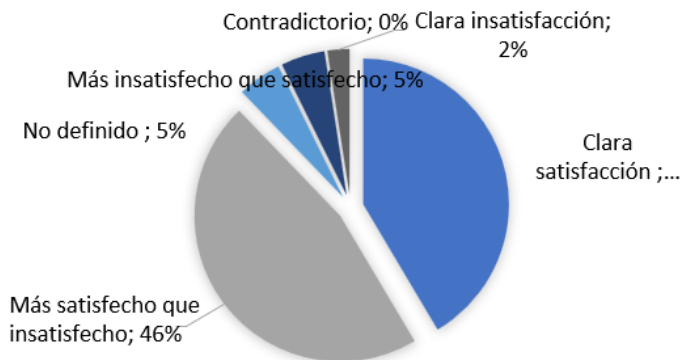
A partir de los resultados obtenidos y la observación a los pobladores de la comunidad, fue evidenciada la necesidad de realizar talleres de intercambio y socialización con los pobladores con respecto a la temática. Se desarrollaron cinco actividades en las cuales se abordó información sobre el arsénico, la contaminación por este mineral, el estado de las aguas y su influencia dentro de las actividades agrícolas que allí se desarrollan. Fue analizada además las principales enfermedades que provoca, los síntomas que se pueden presentar y algunas de las acciones para contrarrestar en parte el efecto negativo que se está generando dentro de la población. Luego del desarrollo de estas actividades, fue aplicada la encuesta de satisfacción a una muestra de 41 pobladores, para valorar los niveles existentes en la población con las actividades de orientación desarrolladas. Estos resultados fueron procesados aplicando el método IADOV (Tabla 3 y figura 4).

Tabla 3. Distribución de especialistas según escala de satisfacción.

Escala de satisfacción	Antes de aplicación	Actual con la aplicación
Clara satisfacción	6	17
Más satisfecho que insatisfecho	5	19
No definido	7	2
Más insatisfecho que satisfecho	13	2
Clara insatisfacción	9	1
Contradictorio	1	0
<b>Total</b>	<b>41</b>	<b>41</b>
<b>ISG</b>	<b>-0.171</b>	<b>0.598</b>



Resultados antes del desarrollo de las actividades



Resultados actuales luego de las actividades

Figura 4. Gráficos comparativos entre la percepción de los encuestados.

El análisis de los resultados obtenidos muestra que el índice de satisfacción grupal alcanzado en los pobladores refleja satisfacción con las actividades de orientación desarrolladas, dado que en esta técnica se considera el rango entre 0,5 y 1 como indicador de satisfacción, por lo que este resultado se ha interpretado como un buen nivel de información recibido por los pobladores. Es decir, que coinciden en mayoría que el trabajo que se realiza contribuye a lograr una mejor forma de vida y protección a la salud dentro de la población.

El arsénico es un elemento natural que se puede encontrar en diversas formas, incluidos compuestos orgánicos e inorgánicos. Se libera al medio ambiente por la erosión de las rocas, los desechos industriales y las actividades agrícolas. Se estima que más de 200 millones de personas en todo el mundo están expuestas a niveles peligrosos de arsénico, en particular a través de aguas subterráneas contaminadas, que son una fuente importante de agua potable para más de la mitad de la población mundial. El arsénico también está presente en fuentes dietéticas comunes, como el arroz y los mariscos, donde el arroz contiene niveles más altos de arsénico inorgánico y los mariscos contienen predominantemente formas orgánicas. Debido a su falta de color, sabor u olor, la contaminación por arsénico es difícil de detectar

sin la instrumentación científica adecuada, lo que lleva a una exposición crónica hasta que aparecen los síntomas de toxicidad (Kepp et al., 2023).

El arsénico tiene distintas presentaciones ya antes expuestas, tanto inorgánicas como orgánicas, las cuáles fluyen por el medio ambiente debido a distintos factores naturales, industriales e inclusive agrícolas, lo cual ha llegado a afectar a más de 200 millones de personas alrededor del mundo a que se expongan en concentraciones peligrosas, las fuentes que generan su aumento son variadas, las comunes que son el agua subterránea que se ha contaminado, se usan para hacer aguas potables e inclusive como fuente dietética común, tal como el arroz y mariscos que poseen concentraciones elevadas de este metal pesado, el cual es difícilmente identificado debido a que particularidad incolora, sin sabor u olor, de esta manera su única manera de poder identificarlo es mediante los síntomas que genera su toxicidad (Kepp et al., 2023).

La intoxicación por arsénico, específicamente el trióxido de arsénico se habla en la mayoría de los artículos que actúan de manera similar, actuando en genes que causan apoptosis y autofagia, además de activar dos vías de celulares, que generan al final muerte y daño, además de que a nivel nuclear se propone que bloquea el ciclo celular, causando errores genéticos e inhibiendo la reparación (Fang et al., 2021), la cual se ve exacerbada debido a que su exposición además de la ya expuesta se produce por distintas fuentes, entre las cuales las aguas subterráneas contaminadas a nivel global, las fuentes dietéticas, emisiones atmosféricas y actividades industriales causan contaminación, otra forma de arsénico que se dice que se usó durante la historia es el arseniato de cobre el cuál servía de conservante para madera, ha causado lo presentado y que de esta manera causa daño en la salud (Muzaffar et al., 2023). Expuesto especialmente en sus formas trivalentes inclusive interfiere con la homeostasis, demuestra las mismas consecuencias de su mecanismo de acción, se incluye también la relación de la exposición al arsénico, polimorfismos genéticos y el riesgo de problemas de salud como el carcinoma urotelial y el cáncer de vejiga (El-Ghiaty & Kadi, 2022).

La exposición prolongada del arsénico causa toxicidad que inclusive se ha llegado a usar su forma trioxidada para el tratamiento de leucemia, en especial en casos de leucemia aguda promielocítica (Paul et al., 2022), en cambio existe otro tratamiento que minimiza las acciones del arsénico, incluyen agentes quelantes como BAL, DMPS y DMSA, aunque estos tienen un beneficio limitado contra la toxicidad crónica por arsénico. Además de que se han investigado chaperonas farmacológicas, como el 4-PBA, por su potencial para bloquear la señalización de la respuesta a proteínas mal plegadas (UPR) y proteger contra la toxicidad inducida por arsénico, a pesar de pruebas en ratones, el mecanismo exacto de acción de estos agentes 4-BPA aún no completamente definido, además el

estudio de los tratamientos del arsénico requieren más estudios que permitan ahondar a fondo en la mitigación de estos contaminantes tóxicos a los cuáles las personas se encuentran expuestas (Lapworth et al., 2022).

Las manifestaciones tóxicas del arsénico expuestas por distintos autores, demuestra trastornos cardiovasculares, diabetes, neurotoxicidad, y cáncer. Las condiciones de la piel son un biomarcador predictivo de la exposición sostenida al arsénico, en base al agua subterránea, arsenales de guerra enterrados y desechados en la profundidad del océano e inclusive pozos domésticos con alta concentración de arsénico. Para abordar la contaminación por arsénico, se recomienda implementar programas de monitoreo continuo en áreas agrícolas y mineras mediante estaciones equipadas con tecnologías avanzadas, como la espectrometría de masas acoplada a plasma de acoplamiento inductivo (ICP-MS), para detectar niveles traza de arsénico en suelo y aguas subterráneas. Además, es fundamental revisar y actualizar las normativas ambientales para establecer límites más estrictos de arsénico, siguiendo las recomendaciones de la EPA y la OMS. También se deben implementar políticas rigurosas de cumplimiento y sancionar a las entidades que violen estas regulaciones.

En las prácticas agrícolas seguras, para reducir la acumulación de arsénico en suelos y cultivos, se recomienda usar técnicas de riego sostenible, como el riego por goteo y el empleo de aguas no contaminadas, junto con la fitoremediación utilizando plantas hiperacumuladoras. En prácticas agrícolas, se sugiere la rotación de cultivos, la incorporación de abonos orgánicos y el uso de enmiendas como el biochar para inmovilizar el arsénico. Además, se debe fomentar la investigación y el desarrollo de variedades de cultivos resistentes al arsénico.

Para remediar la contaminación por arsénico, se recomienda optimizar tecnologías como la lixiviación alcalina para eliminar el arsénico del suelo y explorar la bioremediación con microorganismos como *Exiguobacterium*. Además, la rehabilitación ambiental debe enfocarse en restaurar la vegetación natural y reintroducir especies nativas para estabilizar el suelo y reducir la erosión, complementado con estudios de impacto ambiental antes y después de estos proyectos para evaluar y ajustar su efectividad.

Para abordar la contaminación por arsénico, es crucial realizar campañas de concienciación en comunidades afectadas, informando sobre los riesgos de salud, fuentes de contaminación y medidas preventivas a través de folletos, videos y talleres con expertos en salud pública. Además, se debe instalar sistemas de filtración y purificación de agua, como filtros de arena biológica y carbón activado, así como implementar sistemas de captación y almacenamiento de agua de lluvia para asegurar el acceso a agua potable segura.



Es fundamental priorizar la investigación sobre los efectos a largo plazo de la exposición al arsénico en la salud, mediante estudios epidemiológicos y toxicológicos, y explorar los mecanismos moleculares y celulares del daño causado por el arsénico. Además, se debe continuar y optimizar el desarrollo de tratamientos para la toxicidad crónica por arsénico, como el uso de agentes quelantes (dimercaprol, DMSA, DMPS) y la investigación de chaperonas farmacológicas (4-PBA) para bloquear la señalización de la respuesta a proteínas mal plegadas y proteger contra la toxicidad inducida por arsénico.

El desarrollo de nuevas tecnologías para la remoción de arsénico del agua y del suelo es una prioridad. Métodos como la electrocoagulación, el uso de materiales adsorbentes avanzados como óxidos de hierro y los procesos de oxidación avanzada han demostrado ser altamente efectivos y deben ser probados y adaptados a diferentes contextos geográficos y ambientales. Las soluciones basadas en la naturaleza, como el uso de humedales construidos y la revegetación con plantas capaces de acumular y detoxificar arsénico, deben integrarse en la gestión ambiental, proporcionando beneficios adicionales como la mejora de la biodiversidad y la regulación del ciclo del agua.

## CONCLUSIONES

El arsénico un compuesto complejo con distintas formas presentadas por los distintos autores en sus trabajos investigativos, demuestran la exposición a gran escala que se halla en todo el mundo en sus distintos estratos geográficos, siendo no el único metal pesado, que existe en el medio ambiente y que su liberación es causa mayoritariamente humana, a pesar de eso se siguen tomando las medidas que mantengan dentro de los márgenes de exposición al ser humano, aunque como se ha demostrado también las afectaciones e inclusive las enfermedades por la toxicidad que esta genera, requieren de más estudios que permitan brindar más medidas que mitiguen y demuestren un tratamiento eficiente ante las intoxicaciones que causan estos metales, en todos los estratos de la vida. Que aseguren una calidad de vida optima a pesar de estar expuestos a gran concentración no solo de arsénico sino de muchos metales pesados que están en el ambiente.

En pocas palabras, el estudio del arsénico por sí solo permite indicar que un solo compuestos de los tantos existentes son patogénicos a nivel celular, por la misma razón requieren ser tratados, e investigados más a profundidad para promocionar un estado pleno de salud, sin embargo, se requieren más estudios y medidas para poder lograr ese objetivo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amouzougan, E.A., Lira, R., Klimecki, W. (2020). Chronic exposure to arsenite enhances influenza virus infection in cultured cells. *Journal of Applied Toxicology*, 1. <https://analyticalsciencejournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/jat.3918>
- Andrade Santamaría, D., Soxo Andachi, J., & Silva Montoya, Ó. (2020). Method for Evaluating the Principle of Interculturality in the Custodial Sentence using the Iadov Technique. *Neutrosophic Sets and Systems*, 37, 125-131. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4122047>
- Atiaga, O., Otero, X.L., Gallego, A., Escobar, L., Bravo, J., Carrera, D. (2019). Analysis of total arsenic content in purchased rice from Ecuador. *Czech Journal of Food Sciences*, 37(6), 425-431. [https://cjfs.agriculturejournals.cz/artkey/cjf-201906-0005\\_analysis-of-total-arsenic-content-in-purchased-rice-from-ecuador.php](https://cjfs.agriculturejournals.cz/artkey/cjf-201906-0005_analysis-of-total-arsenic-content-in-purchased-rice-from-ecuador.php)
- El-Ghiaty, M. A., & El-Kadi, A. O. (2023). The duality of arsenic metabolism: impact on human health. *Annual Review of Pharmacology and Toxicology*, 63(1), 341-358. <https://www.annualreviews.org/content/journals/10.1146/annurev-pharmtox-051921-020936>
- Fang, S., Wan, X., Zou, X., Sun, S., Hao, X., Liang, C., Zhang, Z., Zhang, F., Sun, B., Li, H., & Yu, B. (2021). Arsenic trioxide induces macrophage autophagy and atheroprotection by regulating ROS-dependent TFEB nuclear translocation and AKT/mTOR pathway. *Cell death & disease*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41419-020-03357-1>
- González, F., Johnson, B., Quiñones, L.A. (2024). Arsenic inorganic exposure, metabolism, genetic biomarkers and its impact on human health: A mini-review. *Toxicology Letters*, 398, 105-117. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037842742400136X>
- Hernández Calzada, A. (2013). E-SAEPEF: Sistema de actividades para propiciar la evaluación formativa en la enseñanza de la Física. (Tesis doctoral). Universitat de les Illes Balears.
- Jiménez, P.A., Díaz, X., Naves, M.L., Vega, V., Curi, N. (2023). Assessing and Understanding Arsenic Contamination in Agricultural Soils and Lake Sediments from Papallacta Rural Parish, Northeastern Ecuador, via Ecotoxicology Factors, for Environmental Embasement. *Sustainability*, 15(5). <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/5/3951>
- Kepp, O., Pan, H., Liu, P., & Kroemer, G. (2023). Arsenic trioxide as an inducer of immunogenic cell death. *Oncoimmunology*, 12(1), 2174723. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/2162402X.2023.2174723>

- Lapworth, D. J., Boving, T. B., Kreamer, D. K., Kebede, S., & Smedley, P. L. (2022). Groundwater quality: Global threats, opportunities and realizing the potential of groundwater. *Science of the Total Environment*, 811. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969721075495>
- Liu, S., Wu, B., Yu, Y., & Shen, Z. (2019). Memory effect of arsenic-induced cellular response and its influences on toxicity of titanium dioxide nanoparticle. *Scientific Reports*, 107. <https://www.nature.com/articles/s41598-018-36455-4>
- Mitra, A., Chatterjee, S., Gupta, D. (2019). Environmental Arsenic Exposure and Human Health Risk, 1, 103-109. [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-21258-2\\_5](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-21258-2_5)
- Moore, K., Boitet, L.M., Chandrashekar, D., Traylor, A., Esman, S., Erman, E., Srivastava, R., Khan, J., Athar, M., Agarwal, A., George, J.F. (2023) Cutaneous arsenical exposure induces distinct metabolic transcriptional alterations of kidney cells. *Journal of Pharmacology and Experimental Therapeutics*, 388(2), 605-612. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37699712/>
- Muzaffar, S., Khan, J., Srivastava, R., Gorbatyuk, M. S., & Athar, M. (2023). Mechanistic understanding of the toxic effects of arsenic and warfare arsenicals on human health and environment. *Cell Biology and Toxicology*, 39(1), 85-110. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10565-022-09710-8>
- Paul, N.P., Galván, A.E., Yoshinaga, K., Rosen, B.P., & Yoshinaga, M. (2022). Arsenic in medicine: past, present and future. *BioMetals*, 36, 283–301. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10534-022-00371-y>
- Pavez, V., Pacheco, N., Castro, J., Pardo, C., Álvarez, J., Zepeda, P., Krüger, G.I., Gallardo, K., Melo, F., Vernal, R., Aranda, C., Remonsellez, F., Saavedra, C (2023). Characterization of biofilm formation by *Exiguobacterium* strains in response to arsenic exposure. *Microbiology spectrum*, 11(6). <https://x.com/JournalSpectrum/status/1715358748540027262>
- Raqib, R., Akhtar, E., Ahsanul, M., Sarker, P. (2023) . Efectos de la exposición prenatal al arsénico en el desarrollo de células T en niños. *Current Opinion in Toxicology*, 34. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2468202023000049>
- Rey Squilanda, C. F., Eras Diaz, J. A., & Gallegos, S. B. (2020). Validation of a Reform Project for Article 223 of The Ecuadorian Civil Code Through the Use Of Iadov Techniques and Neutrosophic Logic. *Neutrosophic Sets and Systems*, 37(1), 302-307. [https://digitalrepository.unm.edu/nss\\_journal/vol37/iss1/36/](https://digitalrepository.unm.edu/nss_journal/vol37/iss1/36/)
- Romero, P., Jiménez, S., Salgado, B., Zambrano, J., Goyburo, C., González, C., & Higuera, P. (2023). Trace elements in farmland soils and crops, and probabilistic health risk assessment in areas influenced by mining activity in Ecuador. *Environmental Geochemistry and Health*, 45, 4549-4563. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10653-023-01514-x>
- Stößer, S., Lumpp, T., Fischer, F., Gunesch, S., Schumacher, P. Hartwig, A. (2023). Effect of Long-Term Low-Dose Arsenic Exposure on DNA Methylation and Gene Expression in Human Liver Cells. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(20). <https://www.mdpi.com/1422-0067/24/20/15238>