

## Artículo de difusión

# Metales pesados: fuentes de origen, bioacumulación en moluscos bivalvos y su toxicidad sobre la salud humana en México

Carlos Humberto Sepúlveda<sup>1</sup> , Maria Isabel Sotelo-Gonzalez<sup>2</sup>   
Andrés Martín Góngora-Gómez<sup>3</sup>  & Manuel García-Ulloa Gómez<sup>3\*</sup> 

## Resumen

Los metales pesados forman parte de los elementos químicos que se encuentran en el aire, agua y suelo; son usados para elaborar diversos materiales, energía e, inclusive, fertilizantes, medicamentos y alimentos. Sin embargo, aún en cantidades pequeñas pueden ser tóxicos para los seres humanos y los organismos. Destacan el arsénico, cadmio, mercurio y plomo como algunos de los más peligrosos para la salud humana. En el medio acuático, los moluscos bivalvos como ostiones, almejas y mejillones, acumulan los metales pesados en sus tejidos al filtrar el agua, representando una fuente potencial de intoxicación para quien los consume. Debido a la intensa actividad de diferentes industrias, Sinaloa, México, registra los mayores índices de contaminación por estos elementos a lo largo de su costa, principalmente la región del centro y norte. Ya que los bivalvos son consumidos rutinariamente por las comunidades locales, es difícil evitar el contacto metales pesados/humanos, lo que compromete la seguridad alimentaria poblacional. Por lo anterior, es prioritario implementar un plan de monitoreo de los metales pesados en este grupo de organismos de forma regular y constante, junto con

## Abstract

Heavy metals are part of the chemical elements found in the air, water and soil; they are used to produce various materials, energy, and even fertilizers, medicines, and food. However, even in small quantities they can be toxic to humans and organisms. Arsenic, cadmium, mercury, and lead stand out as some of the most dangerous to human health. In the aquatic environment, bivalve mollusks such as oysters, clams, and mussels accumulate heavy metals in their tissues when filtering water, representing a potential source of toxicity for those who consume them. Due to the intense activity of different industries, Sinaloa, Mexico, registers the highest rates of contamination by these elements along its coast, mainly the central and northern region. Since bivalves are routinely consumed by local communities, it is difficult to avoid heavy metal/human contact, which compromises population food security. Therefore, it is a priority to implement a monitoring plan for heavy metals for this group of organisms on a regular and constant basis, along with comprehensive management for risk assessment and prevention on human health and the environment in relation to these dangerous substances.

<sup>1</sup> Estancias Posdoctorales por México, Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología. Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Sinaloa. Blvd. Juan de Dios Bátiz Paredes #250, Colonia San Joachin, Guasave, Sinaloa, C.P. 81101, México.

<sup>2</sup> Estancias Posdoctorales por México, Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología. Facultad de Ciencias del Mar, Universidad Autónoma de Sinaloa. Paseo Clausussen S/N, Colonia Los Pinos, Mazatlán, Sinaloa, CP 82000, México.

<sup>3</sup> Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Sinaloa. Blvd. Juan de Dios Bátiz Paredes #250, Colonia San Joachin, Guasave, Sinaloa, C.P. 81101, México.

\* Autor de correspondencia: turbotuag@hotmail.com (MGU)

una gestión integral para la evaluación de riesgos y prevención sobre la salud humana y el ambiente con relación a estos peligrosos elementos.

**Palabras clave:** bivalvos, ecotoxicología acuática, elementos potencialmente tóxicos, salud humana, Sinaloa.

**Key words:** aquatic ecotoxicology, bivalves, human health, potentially toxic elements, Sinaloa.

Recibido: 27 de agosto de 2024.

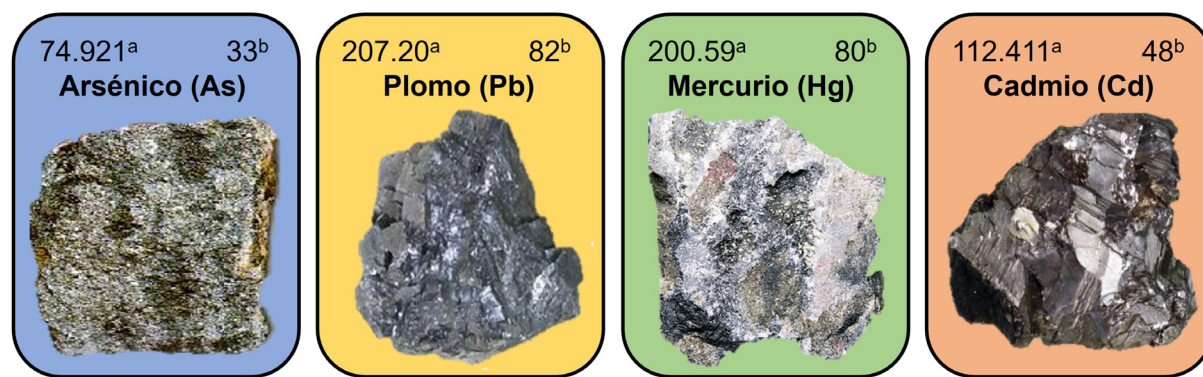
Aceptado: 16 de diciembre de 2024.

## Introducción

Los metales pesados son elementos químicos que, a simple vista, no podemos ver pero que están presentes en nuestro entorno, no pueden ser degradados y son potencialmente tóxicos para el ser humano y los organismos en general. Para que un metal pueda considerarse como “pesado” debe presentar un número atómico superior a 20, y una densidad cinco veces mayor que la del agua (entre 4 y 7 g cm<sup>-3</sup>). Se encuentran presentes en la corteza terrestre de forma natural y son dispersos en el ambiente por medio de fuentes naturales y –principalmente– antropogénicas; ya que se utilizan en numerosos procesos para generar alimentos, energía, materiales y servicios (Lira-Lerma *et al.* 2023). La presencia de metales pesados en el medio ambiente, especialmente agua y alimentos, ha llegado a considerarse una problemática internacional de suma importancia, debido al alto grado de toxicidad que provocan

en la salud humana –sobre todo, en niños y ancianos–; ya que sus efectos son silenciosos, no se observan síntomas a corto plazo, es difícil extraerlos del cuerpo y pueden ser letales a concentraciones elevadas o por exposiciones prolongadas (Polo-Bravo & Sulca-Quispe 2018).

En México, existen reportes de contaminación por metales pesados en lagos, ríos, suelos, cultivos y aire de zonas urbanas, así como en ambientes costeros y marinos, lo que compromete la seguridad alimentaria y salud pública (Covarrubias & Peña-Cabriales 2017). Bajo este término genérico de “metal pesado”, destacan: el arsénico (As), plomo (Pb), mercurio (Hg) y cadmio (Cd), que son clasificados por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés) como los de mayor prioridad ecológica, debido a su alta toxicidad para el ambiente acuático y el ser humano, incluso, a bajas concentraciones (Fig. 1).



**Figura 1.** Principales metales pesados estudiados por su grado de toxicidad. a, Masa atómica; b, Número atómico del elemento.

## Fuentes de origen de los metales pesados

El origen de emisión de los metales pesados varía por región, país y contexto local. En las eco-regiones de México, la contaminación por tales elementos es un problema que va en aumento; se debe a la combinación de varias fuentes de dispersión naturales, como: la meteorización geológica, el lixiviado de los suelos, sedimentos y las rocas, erupciones volcánicas, depósitos hidrotermales-fósiles, emisiones oceánicas, incendios forestales y desgasificación de la corteza terrestre. En cambio, las actividades antropogénicas que contribuyen de manera importante a la dispersión y al aumento de los niveles de los metales pesados en el ambiente son la minería de oro y plata –debido al manejo inadecuado de sus residuos denominados “jales mineros” –, agricultura (por el uso excesivo de agroquímicos), acuicultura, ganadería, avicultura, urbanización, plantas de energía y diversas industrias (metalúrgica, manufacturera, química, electrónica y farmacéutica, entre otras) (Sepúlveda *et al.* 2023a). Son tantas las actividades contaminantes que, actualmente, muchas pinturas, detergentes, baterías, gasolinas, neumáticos, tubería de acero inoxidable, sistemas de calefacción residenciales, juguetes, objetos de odontología, termómetros, esfigmomanómetros, muebles de madera, medicamentos, papeles, cosméticos, dispositivos electrónicos y objetos de barro vidriado, entre muchos más productos de uso cotidiano, contienen algún metal pesado (Jaishankar *et al.* 2014).

## Contaminación por metales pesados en ambientes costeros

Los metales pesados pueden esparcirse hasta los ambientes costeros a través de las

descargas de aguas residuales, escorrentía continental, deposición directa, filtración y transporte atmosférico (Páez-Osuna & Osuna-Martínez 2015). Por medio de los procesos biogeoquímicos, los metales pesados se distribuyen en la columna del agua –de acuerdo a su tamaño– como material particulado ( $> 0.45 \mu\text{m}$ ), coloidal (1 nm a  $0.45 \mu\text{m}$ ) y especies disueltas (1 nm) (Polo-Bravo & Sulca-Quispe 2018). Estos elementos se transportan desde la columna del agua a los sedimentos y los tejidos de los organismos acuáticos; desde los productores primarios (como el fitoplancton, macroalgas y pastos marinos), hasta los grandes depredadores (como tiburones, atunes y marlín), donde serán bioacumulados gradualmente (Valladolid-Garnica *et al.* 2023). Algunos metales –como el mercurio orgánico (metilmercurio)– puede ser biomagnificado; es decir: los contaminantes acumulados en los tejidos de los organismos acuáticos se transfieren a los siguientes niveles tróficos (Lira-Lerma *et al.* 2023). Altos niveles de metales pesados en organismos acuáticos pueden provocar daño genético, mutaciones, apoptosis, carcinogénesis e, incluso, infertilidad (Vázquez-Boucard *et al.* 2014).

A partir de estudios realizados en la zona costera del estado de Sinaloa (sureste del Golfo de California), se observó que, al igual que como ocurre a nivel internacional, en esta región de México, los moluscos bivalvos son el grupo de organismos acuáticos más utilizados como biomonitores (Roldán-Wong *et al.* 2023). Los bivalvos se encuentran en el segundo nivel trófico de los ecosistemas; y desde la prehistoria hasta la actualidad se han aprovechado, principalmente, para consumo humano; debido al alto contenido nutricional (fuente importante de proteínas, minerales y vitaminas

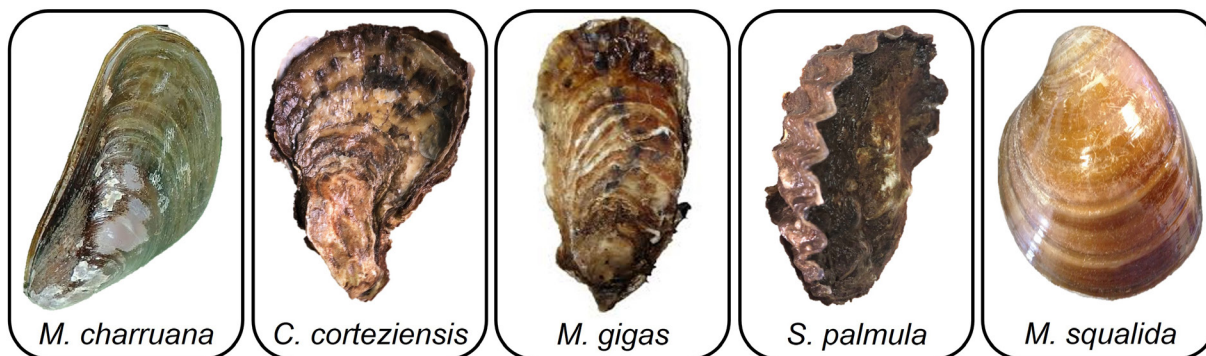
esenciales de alto valor biológico) que presentan algunas especies, como el ostión japonés *Magallana gigas* (Góngora-Gómez *et al.* 2019). Sin embargo, su consumo está ligado a la intoxicación humana por metales pesados, ya que estos moluscos tienen la capacidad de bioacumular altos niveles de tales tóxicos en su cavidad corporal, provenientes de las partículas – orgánicas e inorgánicas – que filtran del agua (Sepúlveda *et al.* 2023b). Por lo tanto, es importante monitorear la presencia de metales pesados en los tejidos de estos organismos –de manera permanente– para evaluar el nivel de riesgo por su consumo. Durante los últimos 15 años, las especies de bivalvos que más se han empleado exitosamente para monitorear la disponibilidad de metales pesados en las lagunas costeras de Sinaloa son: los mejillones (*Mytella charruana*), ostiones (*Crassostrea corteziensis*, *M. gigas* y *Saccostrea palmula*) y almejas (*Megapitaria squalida*) (Fig. 2; Tabla I).

Recientemente, Roldán-Wong *et al.* (2023) evaluaron el riesgo para la salud humana causada por metales pesados, considerando el consumo de 16 especies de bivalvos comerciales recolectados en 23 lagunas costeras, distribuidas en cinco estados dentro del Golfo de California; y concluyeron que la bioacumulación de los elementos varía marcadamente entre

grupos (ostiones > mejillones > almejas) y localidades (mayor contaminación en Sinaloa debido a las intensas actividades antropogénicas). Por su parte, Sepúlveda *et al.* (2023b) reportaron que las lagunas El Colorado (Ahome) y Macapule (Guasave), que se encuentran en la parte norte y centro del estado de Sinaloa, respectivamente, son las zonas más contaminadas por As, Pb y Cd, como se puede apreciar en la Tabla I.

### Rutas de exposición y toxicidad en humanos

La ruta de exposición a los metales pesados más frecuente en humanos es la oral, debido a la ingesta de agua y alimentos (Ramírez-Cota *et al.* 2023); mientras que la exposición más peligrosa es la inhalatoria (efectos rápidos, notorios y agresivos; Chávez-Gómez *et al.* 2017). Por el contrario, la vía dérmica suele ser de bajo riesgo (no todos los metales pueden absorberse por la piel; Gamboa-Loira *et al.* 2020). Es importante mencionar que los metales pesados no se pueden metabolizar ni desechar en su totalidad por nuestro cuerpo; por lo tanto, se van acumulando en diferentes órganos y algunos elementos serán diluidos en la sangre; sus efectos tóxicos pueden variar de acuerdo con el tipo de metal, su forma química, la concentración, el tiempo de



**Figura 2.** Apariencia externa de la concha de los principales bivalvos biomonitores de metales pesados en la zona costera de Sinaloa, México.

Tabla I. Valores promedio de las concentraciones de As, Pb, Hg Cd (mg kg<sup>-1</sup> peso seco) en moluscos bivalvos de las costas de Sinaloa, México: 15 años de estudio.

Referencia	Localidad	Especie	As	Pb	Hg	Cd
<b>Mejillones</b>						
Frías-Espericueta <i>et al.</i> (2008)	Laguna Altata	<i>M. charruana</i>	-	5.40 ± 1.24	-	6.10 ± 2.24
Osuna-López <i>et al.</i> (2009)	Laguna Navachiste	<i>M. charruana</i>	-	13.55 ± 3.20	-	1.90 - 0.70
Osuna-López <i>et al.</i> (2009)	Laguna Altata	<i>M. charruana</i>	-	17.10 ± 4.50	-	1.65 - 0.40
Osuna-López <i>et al.</i> (2009)	Laguna Ceuta	<i>M. charruana</i>	-	8.70 ± 1.85	-	0.73 ± 0.20
Osuna-López <i>et al.</i> (2009)	Laguna de Uriás	<i>M. charruana</i>	-	10.40 ± 2.80	-	0.95 ± 0.30
Astorga-Rodríguez <i>et al.</i> (2018)	Laguna Altata	<i>M. charruana</i>	-	1.67 ± 1.70	-	1.19 ± 1.01
Ruiz-Fernández <i>et al.</i> (2018)	Laguna de Urias	<i>M. charruana</i>	-	0.95 ± 0.13	-	0.22 ± 0.14
<b>Ostiones</b>						
Frías-Espericueta <i>et al.</i> (2008)	Laguna Altata	<i>C. corteziensis</i>	-	8.24 ± 2.93	-	6.60 ± 1.97
Ruelas-Inzunza & Páez-Osuna (2008)	Laguna Altata	<i>C. corteziensis</i>	-	3.40 ± 2.00	-	7.20 ± 2.80
Frías-Espericueta <i>et al.</i> (2009)	Laguna Navachiste	<i>C. corteziensis</i>	-	4.86 ± 1.02	-	6.47 ± 1.02
Frías-Espericueta <i>et al.</i> (2009)	Laguna La Reforma	<i>C. corteziensis</i>	-	5.32 ± 1.32	-	5.81 ± 0.71
Frías-Espericueta <i>et al.</i> (2009)	Laguna Altata	<i>C. corteziensis</i>	-	5.71 ± 1.32	-	5.01 ± 0.94
Frías-Espericueta <i>et al.</i> (2009)	Laguna Ceuta	<i>C. corteziensis</i>	-	8.09 ± 3.27	-	6.91 ± 2.41
Frías-Espericueta <i>et al.</i> (2009)	Laguna de Uriás	<i>C. corteziensis</i>	-	6.51 ± 1.17	-	1.55 ± 0.31
Frías-Espericueta <i>et al.</i> (2009)	Laguna Teacapán	<i>C. corteziensis</i>	-	9.46 ± 0.97	-	3.64 ± 3.75
Osuna-Martínez <i>et al.</i> (2010, 2011)	Laguna El Colorado	<i>Magallana gigas</i>	-	1.85 ± 0.52	0.93 ± 0.12	5.10 ± 0.38
Osuna-Martínez <i>et al.</i> (2010, 2011)	Laguna La Reforma	<i>M. gigas</i>	-	0.92 ± 0.11	0.77 ± 0.17	11.80 ± 1.23
Osuna-Martínez <i>et al.</i> (2010, 2011)	Laguna Altata	<i>M. gigas</i>	-	1.42 ± 0.31	0.40 ± 0.15	12.10 ± 2.58
Osuna-Martínez <i>et al.</i> (2010, 2011)	Laguna Ceuta	<i>M. gigas</i>	-	1.11 ± 0.45	0.23 ± 0.07	8.60 ± 1.84
Osuna-Martínez <i>et al.</i> (2010, 2011)	Laguna Ceuta	<i>C. corteziensis</i>	-	0.47 ± 0.05	0.56 ± 0.10	10.00 ± 1.57
Bergés-Tiznado <i>et al.</i> (2013)	Laguna El Colorado	<i>M. gigas</i>	9.56 ± 0.53	-	-	-
Bergés-Tiznado <i>et al.</i> (2013)	Laguna La Reforma	<i>M. gigas</i>	6.06 ± 1.30	-	-	-
Bergés-Tiznado <i>et al.</i> (2013)	Laguna Altata	<i>M. gigas</i>	8.11 ± 2.47	-	-	-
Bergés-Tiznado <i>et al.</i> (2013)	Laguna Ceuta	<i>M. gigas</i>	5.44 ± 0.30	-	-	-
Bergés-Tiznado <i>et al.</i> (2013)	Laguna Ceuta	<i>C. corteziensis</i>	4.90 ± 0.04	-	-	-
Páez-Osuna & Osuna-Martínez (2015)	Laguna El Colorado	<i>C. corteziensis</i>	-	0.74 ± 0.05	0.54 ± 0.15	7.65 ± 5.15
Páez-Osuna & Osuna-Martínez (2015)	Laguna Ohuira	<i>C. corteziensis</i>	-	0.30 ± 0.24	0.18 ± 0.13	5.56 ± 4.06
Páez-Osuna & Osuna-Martínez (2015)	Laguna Navachiste	<i>C. corteziensis</i>	-	0.65 ± 0.33	0.39 ± 0.17	8.39 ± 5.03

Tabla I. Continuación.

Referencia	Localidad	Especie	As	Pb	Hg	Cd
Páez-Osuna & Osuna-Martínez (2015)	Laguna La Reforma	<i>C. corteziensis</i>	-	1.64 ± 1.04	0.30 ± 0.06	9.02 ± 2.54
Páez-Osuna & Osuna-Martínez (2015)	Laguna Altata	<i>C. corteziensis</i>	-	2.11 ± 0.37	0.52 ± 0.10	6.47 ± 2.80
Páez-Osuna & Osuna-Martínez (2015)	Laguna Ceuta	<i>C. corteziensis</i>	-	0.96 ± 0.24	0.57 ± 0.19	4.27 ± 1.12
Páez-Osuna & Osuna-Martínez (2015)	Laguna de Urías	<i>C. corteziensis</i>	-	1.36 ± 1.14	0.17 ± 0.13	1.45 ± 0.75
Góngora-Gómez <i>et al.</i> (2017)	Laguna Macapule	<i>M. gigas</i>	0.37 ± 0.08	2.18 ± 1.28	0.02 ± 0.01	13.84 ± 4.22
Jonathan <i>et al.</i> (2017)	Laguna Macapule	<i>M. gigas</i>	0.58 ± 0.91	2.22 ± 1.33	0.14 ± 0.06	14.54 ± 4.28
Muñoz-Sevilla <i>et al.</i> (2017)	Laguna Macapule	<i>M. gigas</i>	-	2.79 ± 1.12	0.18 ± 0.17	10.51 ± 3.77
Muñoz-Sevilla <i>et al.</i> (2017)	Laguna El Colorado	<i>M. gigas</i>	-	3.08 ± 1.65	0.10 ± 0.02	3.68 ± 0.83
Muñoz-Sevilla <i>et al.</i> (2017)	Laguna Altata	<i>M. gigas</i>	-	2.39 ± 1.07	0.30 ± 0.11	6.29 ± 1.49
Frías-Espicqueta <i>et al.</i> (2018)	Laguna de Urías	<i>C. corteziensis</i>	-	-	0.23 ± 0.11	-
Ruiz-Fernández <i>et al.</i> (2018)	Laguna de Urías	<i>S. palmula</i>	-	0.23 ± 0.37	-	0.26 ± 0.19
Sepúlveda <i>et al.</i> (2023a, b)	Laguna Altata	<i>S. palmula</i>	23.23 ± 6.39	7.26 ± 1.67	0.60 ± 0.24	9.69 ± 3.42
Sepúlveda <i>et al.</i> (2023a, b)	Laguna Macapule	<i>S. palmula</i>	19.60 ± 2.64	6.29 ± 0.96	0.43 ± 0.24	7.61 ± 1.60
Sepúlveda <i>et al.</i> (2023a, b)	Laguna Navachiste	<i>S. palmula</i>	18.26 ± 3.16	8.20 ± 1.89	0.42 ± 0.23	10.55 ± 8.80
Sepúlveda <i>et al.</i> (2023a, b)	Laguna El Colorado	<i>S. palmula</i>	20.01 ± 5.48	9.67 ± 1.05	0.44 ± 0.23	7.58 ± 1.11
Sepúlveda <i>et al.</i> (2023a, b)	Laguna Altata	<i>C. corteziensis</i>	20.67 ± 3.98	7.84 ± 1.70	0.47 ± 0.28	4.47 ± 1.67
Sepúlveda <i>et al.</i> (2023a, b)	Laguna Macapule	<i>C. corteziensis</i>	20.31 ± 5.70	6.00 ± 0.85	0.36 ± 0.17	5.83 ± 1.33
Sepúlveda <i>et al.</i> (2023a, b)	Laguna Navachiste	<i>C. corteziensis</i>	19.36 ± 4.37	7.08 ± 1.36	0.47 ± 0.21	9.88 ± 6.48
Sepúlveda <i>et al.</i> (2023a, b)	Laguna El Colorado	<i>C. corteziensis</i>	21.15 ± 3.70	9.97 ± 2.65	0.47 ± 0.27	5.03 ± 1.44
<b>Almejas</b>						
Frías-Espicqueta <i>et al.</i> (2008)	Laguna Altata	<i>M. squalida</i>	-	7.51 ± 1.44	-	3.36 ± 1.28
Delgado-Alvarez <i>et al.</i> (2019)	Laguna Navachiste	<i>M. squalida</i>	-	-	0.99 - 0.52	4.47 ± 3.18
Sepúlveda <i>et al.</i> (2020)	Laguna Altata	<i>M. squalida</i>	4.47 ± 0.37	5.68 ± 1.80	0.28 ± 0.08	2.48 ± 0.37
Sepúlveda <i>et al.</i> (2020)	Laguna Agiabampo	<i>M. squalida</i>	4.52 ± 1.36	5.54 ± 1.58	0.32 ± 0.10	2.38 ± 0.38

exposición y, en algunos casos, la edad de la población expuesta; además de la ruta o vía de acceso por la que los metales ingresan al organismo.

### **Arsénico (As)**

Entre los efectos nocivos más frecuentes en humanos por exposición al As se incluyen diferentes tipos de cáncer (pulmón, vejiga, piel, hígado, riñón, próstata y mama). El As afecta a prácticamente todos los aparatos y sistemas del cuerpo, puesto que interfiere con reacciones enzimáticas de amplia distribución (Gamboa-Loira *et al.* 2020). Puede causar efectos gastrointestinales, hepáticos, renales, cardiovasculares, neurológicos, dérmicos, respiratorios, hematopoyéticos y reproductivos. Además, la exposición al As está ligada a un aumento en la frecuencia de abortos espontáneos, esterilidad, malformaciones congénitas y alteración del ADN (Rosales-Castillo *et al.* 2004).

### **Plomo (Pb)**

Por lo general, los efectos del Pb son mayores en niños y pueden aumentar si presentan deficiencia nutricional de hierro (Chávez-Gómez *et al.* 2017). El Pb se acumula principalmente en los huesos y afecta a la médula ósea roja, involucrada en la producción de sangre (Jaishankar *et al.* 2014). Los síntomas por la intoxicación por Pb son similares a los causados por otras enfermedades, como, por ejemplo, la esclerosis múltiple (enfermedad incurable); ya que afecta al sistema nervioso con signos clínicos parecidos. Otro lugar donde es frecuente encontrar altos niveles de Pb es el riñón; específicamente, en el sistema tubular de las nefronas. Los efectos agudos por exposición a Pb son: daño renal, psicosis,

hiperactividad, dislexia, autismo, trastornos cerebrales, anemia, pérdida de peso, parálisis de extremidades, alergias, malformación, abortos y alteración de la espermatogénesis (Al-Attar 2011).

### **Mercurio (Hg)**

La forma orgánica del mercurio es la más tóxica (metilmercurio) y provoca efectos adversos en los sistemas nervioso e inmunitario (principalmente en niños en gestación), el aparato digestivo, trastornos mitocondriales, daño pulmonar, renal y cardiovascular (Li *et al.* 2011). Además, puede cruzar la placenta materna, por lo tanto, este elemento se considera teratogénico y mutagénico. Otros efectos de este elemento son náuseas, vómitos, diarrea, dermatitis por contacto, dolor torácico, cefaleas e irritación ocular (Chávez-Gómez *et al.* 2017).

### **Cadmio (Cd)**

La exposición excesiva al Cd provoca daño renal, ya que su órgano principal es el riñón; también, causa efectos en el sistema esquelético, lo que ocasiona fracturas (osteoporosis). Asimismo, este metal puede ocasionar hipertensión arterial, lesiones pulmonares, daño al sistema nervioso central y al sistema inmune (Pérez-García & Azcona-Cruz 2012). Otros síntomas que se manifiestan son la reducción de peso en los recién nacidos, abortos espontáneos, infertilidad, desórdenes psicológicos y posible daño en el ácido desoxirribonucleico o desarrollo de cáncer. El Cd es altamente tóxico para el ser humano y puede acumularse en los riñones e hígado hasta por 30 años; lo que, sumado a la continua exposición, promueve su bioacumulación a lo largo de la vida (Reyes *et al.* 2016).

## Conclusión

La investigación desarrollada acerca de la contaminación por metales pesados en México es un tema que ha recibido poca cobertura por parte de las autoridades, en comparación con la que se hace en otros países del mundo. Recientemente, se ha incrementado el número de reportes científicos que indican altos niveles de contaminación por metales pesados – principalmente, los más tóxicos – y sus efectos perjudiciales sobre las especies acuáticas del Golfo de California. Es importante mencionar que muchas de las especies de bivalvos son consumidas rutinariamente; por lo tanto, es difícil evitar el contacto con metales pesados/humanos; lo que compromete la seguridad alimentaria poblacional. Aunque el arsénico, plomo, mercurio y cadmio son los metales pesados que merecen mayor atención toxicológica, existen varios elementos más, como: el zinc, cobre y cromo, entre otros; que, cuando rebasan los límites permisibles en moluscos bivalvos, se convierten, también, en agentes peligrosos para la salud ambiental y humana; por lo que su análisis no debe ser descartado. La intoxicación por As, Pb, Hg y Cd puede causar una gran variedad de enfermedades difíciles de diagnosticar en humanos, por lo que, de manera inmediata, se recomienda monitorear estos elementos en los moluscos bivalvos comerciales – principalmente – y realizar estudios clínicos en fluidos (sangre y orina), para detectar y analizar la presencia de posibles metales pesados en los consumidores; de esta forma, se implementaría un plan de gestión integral para la evaluación de riesgos y prevención sobre la salud humana y el ambiente con relación a estos peligrosos elementos.

## Referencias

- Attar A.M. 2011.** Antioxidant effect of vitamin E treatment on some heavy metals-induced renal and testicular injuries in male mice. *Saudi Journal of Biological Sciences* 18(1): 63-72.
- Astorga-Rodríguez, J.E., I.E. Martínez-Rodríguez, L.M. García-de la Parra, M. Betancourt-Lozano, R.C. Vanegas-Pérez, C.A. Ponce de León-Hill & J. Ruelas-Inzunza J. 2018.** Lead and cadmium levels in mussels and fishes from three coastal ecosystems of NW Mexico and its potential risk due to fish and seafood consumption. *Toxicology and Environmental Health Sciences* 10(3): 203-211.
- Bergés-Tiznado, M.E., F. Páez-Osuna, A. Notti & F. Regoli. 2013.** Arsenic and arsenic species in cultured oyster (*Crassostrea gigas* and *C. corteziensis*) from coastal lagoons of the SE Gulf of California, Mexico. *Biological Trace Element Research* 151: 43-49.
- Chávez-Gómez, N., A. Cabello-López, R. Gopar-Nieto, G. Aguilar-Madrid, K. Marín-López, M. Aceves-Valdez, C. Jiménez-Ramírez, M. Cruz-Angulo & C. Juárez-Pérez. 2017.** Enfermedad renal crónica en México y su relación con los metales pesados. *Revista Médica del Instituto Mexicano del Seguro Social* 55(6): 725-734.
- Covarrubias, S.A. & J.J. Peña-Cabrales. 2017.** Contaminación ambiental por metales pesados en México: problemática y estrategias de fitorremediación. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 33: 7-21.
- Delgado-Alvarez, C., J. Ruelas-Inzunza, O. Escobar-Sánchez, R. Covantes-Rosales, I.B. Pineda-Pérez, C.C. Osuna-Martínez, M. Aguilar-Juárez, J.I. Osuna-López, D. Voltolina & M.G. Frías-Espericueta. 2020.** Metal concentrations in age-groups of the clam, *Megapitaria squalida*, from a coastal lagoon in Mexico: a human health risk assessment. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 103: 822-827.
- Frías-Espericueta, M.G., J.I. Osuna-López, D. Voltolina, G. López-López, G. Izaguirre-Fierro & M.D. Muy-Rangel. 2008.** The metal content of bivalve molluscs of a Coastal Lagoon of NW Mexico. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 80: 90-92.
- Frías-Espericueta, M.G., J.I. Osuna-López, I. Bañuelos-Vargas, G. López-López, M.D. Muy-Rangel, G. Izaguirre-Fierro,**



- W. Rubio-Carrasco & D. Voltolina. 2009. Cadmium, copper, lead and zinc contents of the mangrove oyster, *Crassostrea corteziensis*, of seven coastal lagoons of NW Mexico. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 83(4): 595-599.
- Frías-Espericueta, M.G., A. Vargas-Jiménez, J. Ruelas-Inzunza, I. Osuna-López, M. Aguilar-Juárez, J.C. Bautista-Covarrubias & D. Voltolina. 2018. Total mercury in the mangrove oyster *Crassostrea corteziensis* of the subtropical Urías Lagoon (NW Mexico). *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 18: 853-858.
- Gamboa-Loira, B.M., E. Cebrián & L. López-Carrillo. 2020. Arsenic exposure in northern Mexican women. *Salud Pública de México* 62(3): 262-269.
- Góngora-Gómez, A.M., M. García-Ulloa, N.P. Muñoz-Sevilla, A.L. Domínguez-Orozco, B.P. Villanueva-Fonseca, J.A. Hernández-Sepúlveda & R. Ortega-Izaguirre. 2017. Heavy-metal contents in oysters (*Crassostrea gigas*) cultivated on the southeastern coast of the Gulf of California, Mexico. *Hidrobiológica* 27(2): 219-227.
- Góngora-Gómez, A.M., F. Rubio-Zepeda, A. Santamaría-Miranda, B.P. Villanueva-Fonseca, A.L. Domínguez-Orozco, L.C. Villanueva-Fonseca, J.A. Hernández-Sepúlveda, H. Rodríguez-González, L.G. Espinosa-Alonso & M. García-Ulloa. 2019. *Perkinsus* sp. on *Crassostrea gigas* performance cultivated in the southeastern Gulf of California. *Revista Bio Ciencias* 6: e681.
- Jaishankar, M., T. Tseten, N. Anbalagan, B. Mathew & K. Beeregowda. 2014. Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. *Interdisciplinary Toxicology* 7: 60-72.
- Jonathan, M.P., N.P. Muñoz-Sevilla, A.M. Góngora-Gómez, R.G. Luna-Varela, S.B. Sujitha, D.C. Escobedo-Urías, P.F. Rodríguez-Espinosa & L.E. Campos-Villegas. 2017. Bioaccumulation of trace metals in farmed pacific oysters *Crassostrea gigas* from SW Gulf of California coast, Mexico. *Chemosphere* 187: 311-319.
- Li, P., X.B. Feng, L.H. Shang, G. Qiu, B. Meng, H. Zhang, Y. Guo & P. Liang. 2011. Human co-exposure to mercury vapor and methylmercury in artisanal mercury mining areas, Guizhou, China. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 74: 473-479.
- Lira-Lerma, G., O. Escobar-Sánchez & M.Á. Hurtado-Oliva. 2023. Metales pesados: ¿Qué son y cuál es su impacto ecológico y en el consumo humano de tiburones y rayas? *Ciencia y Mar* XXVII(81): 39-45.
- Muñoz-Sevilla, N.P., B.P. Villanueva-Fonseca, A.M. Góngora-Gómez, M. García-Ulloa, A.L. Domínguez-Orozco, R. Ortega-Izaguirre & L.E. Campos-Villegas. 2017. Heavy metal concentrations in diploid and triploid oysters (*Crassostrea gigas*) from three farms on the north-central coast of Sinaloa, Mexico. *Environmental Monitoring and Assessment* 189: 536.
- Osuna-López, J.I., M.G. Frías-Espericueta, G. López-López, H.M. Zazueta-Padilla, G. Izaguirre-Fierro, F. Páez-Osuna, A.C. Ruiz-Fernández & D. Voltolina. 2009. Cd, Pb and organochlorine pesticides of *Mytella strigata* (pelecypoda: mytilidae) of six coastal lagoons of NW Mexico. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras* 38(2): 233-239.
- Osuna-Martínez, C.C., F. Páez-Osuna & F. Alonso-Rodríguez. 2010. Mercury in cultured oysters (*Crassostrea gigas* Thunberg, 1793 and *C. corteziensis* Hertlein, 1951) from four coastal lagoons of the SE Gulf of California, Mexico. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 85(3): 339-343.
- Osuna-Martínez, C.C., F. Páez-Osuna & R. Alonso-Rodríguez. 2011. Cadmium, copper, lead and zinc in cultured oysters under two contrasting climatic conditions in coastal lagoons from SE Gulf of California, Mexico. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 87(3): 272-275.
- Páez-Osuna, F. & C.C. Osuna-Martínez. 2015. Bioavailability of cadmium, copper, mercury, lead, and zinc in subtropical coastal lagoons from the southeast Gulf of California using mangrove oysters (*Crassostrea corteziensis* and *Crassostrea palmula*). *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 68(2): 305-316.
- Pérez-García, P.E. & M.I. Azcona-Cruz. 2012. Los efectos del cadmio en la salud. *Revista de Especialidades Médico Quirúrgicas* 17: 199-205.
- Polo-Bravo, C. & L. Sulca-Quispe. 2018. Metales pesados: fuentes y su toxicidad sobre la salud humana. *Revista de Ciencias* 2: 1-16.
- Ramírez-Cota, M., O. Escobar-Sánchez & M.

- Betancourt-Lozano. 2023.** Metales pesados: antagonistas de la salud en México. *Ciencia* 74(3): 24-29.
- Reyes, Y., I. Vergara, O. Torres, M. Díaz-Lagos & E.E. González-Jiménez. 2016.** Contaminación por metales pesados: implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Ingeniería, Investigación y Desarrollo* 16(2): 66-77.
- Roldán Wong, NT, B.P. Ceballos Vázquez, J.A. Yee Duarte, M.A. Camacho Mondragón, K.A. Kidd, E. Shumilin & M. Arellano Martínez. 2023.** Human health risk assessment of metals and arsenic via consumption of commercial bivalves in the Gulf of California, Mexico. *Environmental Science and Pollution Research* 30: 51692-51710
- Rosales-Castillo, J.A., L.C. Acosta-Saavedra, R. Torre, J. Ochoa-Fierro, V.H. Borja-Aburto, L. López-Carrillo, G.G. García-Vargas, G.B. Gurrola, M.E. Cebrián & E.S. Calderón-Aranda. 2004.** Arsenic exposure and human papillomavirus response in non-melanoma skin cancer Mexican patients: a pilot study. *International Archives of Occupational and Environmental Health* 77(6): 418-23.
- Ruelas-Inzunza, J. & F. Páez-Osuna. 2008.** Trophic distribution of Cd, Pb, and Zn in a food web from Altata-Ensenada del Pabellón subtropical lagoon, SE Gulf of California. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 54: 584-596.
- Ruiz-Fernández, A.C., R. Wu, T.C. Lau, L.H. Pérez-Bernal, J.A. Sanchez-Cabeza & J.M.Y. Chiu. 2018.** A comparative study on metal contamination in Estero de Urias lagoon, Gulf of California, using oysters, mussels and artificial mussels: Implications on pollution monitoring and public health risk. *Environmental Pollution* 243: 197-205.
- Sepúlveda, C.H., A.M. Góngora-Gómez, S. Pérez-Álvarez, H. Rodríguez-González, N.P. Muñoz-Sevilla, B.P. Villanueva-Fonseca, J.A. Hernández-Sepúlveda & M. García-Ulloa. 2020.** Trace metals in two wild populations of the squalid callista clam (*Megapitaria squalida*) in the Southeastern Gulf of California, Mexico. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 36(3): 667-676.
- Sepúlveda, CH, M.I. Sotelo-Gonzalez, M. García-Ulloa, A.M. Góngora-Gómez, L.G. Espinosa-Alonso, R. Sánchez-Cárdenas & C.C. Osuna-Martínez. 2023a.** Mercury and selenium in oysters *Saccostrea palmula* and *Crassostrea corteziensis* from coastal lagoons of the southeastern Gulf of California: molar ratio and risk assessment on human health. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 111(2): 20.
- Sepúlveda, C.H., M.I. Sotelo-Gonzalez, C.C. Osuna-Martínez, M.G. Frías-Espericueta, R. Sánchez-Cárdenas, M.E. Bergés-Tiznado, A.M. Góngora-Gómez & M. García-Ulloa. 2023b.** Biomonitoring of potentially toxic elements through oysters (*Saccostrea palmula* and *Crassostrea corteziensis*) from coastal lagoons of Southeast Gulf of California, Mexico: health risk assessment. *Environmental and Geochemistry Health* 45: 2329-2348.
- Valladolid-Garnica, D.E., M.E. Jara-Marini, Y.E. Torres-Rojas & M.F. Soto-Jiménez. 2023.** Distribution, bioaccumulation, and trace element transfer among trophic levels in the southeastern Gulf of California. *Marine Pollution Bulletin* 194: 115290.
- Vázquez-Boucard, C., G. Anguiano-Vega, L. Mercier & E. Rojas del Castillo. 2014.** Pesticide residues, heavy metals, and DNA damage in sentinel oysters *Crassostrea gigas* from Sinaloa and Sonora, Mexico. *Journal of Toxicology and Environmental Health* 77(4): 169-176.