

Efectos sobre la salud por agua contaminada con metales pesados

Health effects by heavy metals in polluted water

Diana Aurora Olmos-Palma

ol368943@uaeh.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0002-1739-9412>

Pablo Octavio-Aguilar

pablo_aguilar9900@uaeh.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0002-4636-9773>

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Recibido: 4 de febrero de 2022

Aceptado: 15 de marzo de 2022

Publicado: 5 de julio de 2022



Intoxicación por arsénico. Fotografía: Anita Ghosh/REA CH, bajo licencia Creative Commons (CC BY 2.0).

Resumen

Las sustancias contaminantes a las que nos enfrentamos hoy en día crecen rápidamente en variedad y volumen. Entre estos, los metales pesados destacan por su capacidad de interactuar con moléculas biológicas, pero ¿qué hacen exactamente una vez dentro del organismo? Aun cuando son necesarios en pequeñas cantidades para diversos procesos fisiológicos, tienden a acumularse en el organismo más rápido de lo que pueden ser eliminados. La principal vía de entrada de los metales pesados es a través de la ingesta, presentando mayor disponibilidad al ser solubilizados en agua o al ingerirse en alimentos marinos, además de la bioacumulación que se produce a través de las cadenas tróficas. Entre los metales de interés toxicológico más comunes identificados en cuerpos de agua se encuentran el arsénico, cadmio, cromo, mercurio y plomo, cada uno genera diferentes padecimientos al inducir alteraciones bioquímicas y fisiológicas. El objetivo de este trabajo es documentar las alteraciones provocadas por la exposición a metales pesados a través de las cadenas tróficas, comenzando por la contaminación en cuerpos de agua y finalizando en la alimentación humana.

Palabras clave: Arsénico, cadmio, cromo, mercurio, plomo, alteraciones fisiológicas, contaminación del agua.

Abstract

The pollutants we are exposed to in the present day are rapidly growing in variety and quantity. Among these, heavy metals are particularly notable for their ability to interact with biological molecules. But what exactly do they do once they are inside our bodies? Even though they are needed in small amounts for various physiological processes, they tend to accumulate in the body faster than they can be eliminated. The main route of entry of heavy metals is through ingestion. They have greater availability when solubilized in water or when ingested in seafoods, in addition to bioaccumulation that occurs through food chains. Among the most common metals of toxicological interest identified in bodies of water are arsenic, cadmium, chromium, mercury and lead. Each one generates different illnesses or conditions by inducing certain biochemical and physiological alterations. The objective of this study is to document the changes caused by exposure to heavy metals through food chains, from pollution of water bodies up to human food.

Keywords: Arsenic, cadmium, chromium, mercury, lead, physiological alterations, water pollution.

Introducción

Los metales pesados son, según la tabla periódica, elementos químicos con alta densidad (mayor a 4 g/cm³) y con una masa y peso atómico por encima de 20. Los metales pesados se pueden encontrar en varias formas, incluidos vapores, iones disueltos en agua, sales/minerales en rocas, suelo y arena. También pueden estar presentes en moléculas orgánicas e inorgánicas o pueden adherirse a partículas del aire. Normalmente se encuentran presentes de manera natural en el ambiente a concentraciones que, por lo general, no perjudican las diferentes formas de vida, ya que se requieren en pequeñas cantidades para diversos procesos fisiológicos. Por ejemplo, el cobre, zinc, hierro, etc., requeridos en procesos como la absorción de nutrientes, la replicación del material genético, el transporte de oxígeno en células sanguíneas, entre otros, se consideran micronutrientes al ser coadyuvantes de procesos vitales para los organismos. Sin embargo, una concentración excesiva asociada con actividades humanas puede alterar la concentración de estos en matrices ambientales y en la biota; y así afectar los procesos bioquímicos y/o fisiológicos (Molina *et al.*, 2013).

Al proceso de acopiar sustancias en el organismo se le conoce como bioacumulación, la cual involucra el aumento progresivo en la concentración de metales (u otras sustancias) con la ingesta gradual. Al paso de un nivel trófico al siguiente y la consecuente ingesta del contaminante se le conoce como bio-magnificación. Se relaciona con la acumulación de contaminantes en tejidos biológicos mediante el consumo de fuentes de agua contaminada, alimentos y partículas suspendidas de sedimento. De igual manera, la bioacumulación ocurre cuando estos compuestos incrementan su concentración progresivamente dentro del organismo a un ritmo mayor del que pueden ser eliminados (Molina *et al.*, 2013). Se debe considerar que la presencia de metales pesados en el ambiente, alimentos y en los propios organismos, alteran procesos bioquímicos y fisiológicos lo que ocasiona diversas patologías, intoxicaciones y daños irreparables en la salud, tales como efectos mutagénicos (daños al material genético), teratogénicos (alteraciones durante el desarrollo embrionario), carcinogénicos (diversas tumoraciones) e incluso la muerte (Londoño-Franco *et al.*, 2016).

Un ejemplo de metal pesado es el plomo, que se encuentra disperso en el medio ambiente y tiene la capacidad de bioacumularse en animales y plantas. Para las personas, la principal vía de exposición es la dieta. Se calcula que diariamente ingerimos de 0.3 a 0.5 mg de plomo sin estar directamente expuestos a él. Estudios recientes indican que hoy en día hay de 400 a 1,000 veces más plomo en los huesos de la gente que hace 400 años (Matés *et al.*, 2010). Sus efectos tóxicos en el organismo afectan al sistema nervioso central, la síntesis del grupo HEMO en sangre y pueden provocar saturnismo (plumbosis o plumbemia, se denomina así debido a que, en la antigüedad, los alquimistas llamaban “saturno” a dicho elemento químico).

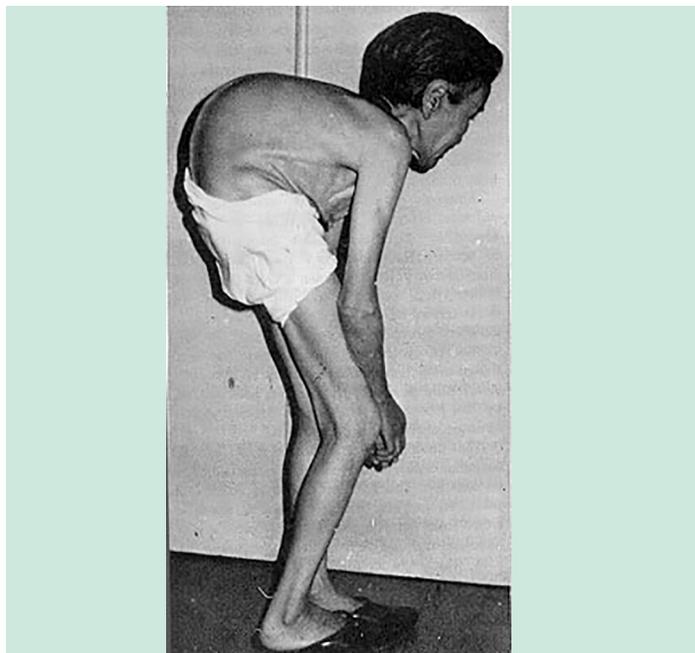
Otro ejemplo es el cadmio, que por lo general está presente en el medio ambiente en niveles bajos. Es un metal que tiene efectos tóxicos en los riñones, en el sistema óseo y en el respiratorio, además de ser considerado cancerígeno en seres humanos. El cadmio puede recorrer grandes distancias desde la fuente de emisión a través del aire. Se acumula rápidamente

en muchos organismos, principalmente moluscos y crustáceos, y en alimentos ricos en almidón. La principal forma de contaminación es la inhalación secundaria al tabaquismo (producto que tiene al menos 400 sustancias distintas, entre ellos cromo, cadmio y mercurio) y por ingestión de alimentos y aguas contaminadas. Se ha calculado que más del 80% del cadmio ingerido proviene de cereales (especialmente arroz y trigo), verduras (de hoja) y raíces (Pérez y Azcona, 2012).

Estos metales llegan a la gente por ingesta de alimentos, principalmente de origen marino y por el acceso a agua contaminada; aunque el tipo y cantidad depende de la zona, el estilo de vida, el lugar de trabajo, entre otras causas. En muchos países se ha constatado que la actividad agrícola e industrial puede afectar la calidad tanto del agua superficial (ríos y lagos) como subterránea (acuíferos), entendiéndose como “calidad del agua” al grado de salubridad y pureza que tiene para el consumo humano.

Por otro lado, los metales pueden incorporarse a un sistema de abastecimiento de agua de forma natural, si es que el suelo es rico en estos materiales, o por medio de residuos industriales y mineros que son vertidos sin tratamiento previo, que posteriormente se depositan en lagos, ríos y distintos sistemas acuíferos. Una vez que los metales han entrado en los ecosistemas acuáticos, se transforman a través de procesos biogeoquímicos y se dispersan en varios compuestos reactivos con distintas características fisicoquímicas, por ejemplo, material particulado (>0.45 µm), coloidal (1 nm-0.45 µm) y partículas disueltas (=1 nm). El tamaño de estas partículas influye sobre la capacidad de bioabsorción por parte de las plantas, que es generalmente el primer paso para su entrada en la cadena alimentaria.

La emisión de contaminantes, la falta de plantas de tratamiento, el mal manejo de residuos, la actividad minera a cielo abierto y la agroindustria en las cuencas, permiten la entrada de metales pesados en la dieta de las personas.



Deformación de columna por envenenamiento por cadmio, enfermedad de Itai-Itai. Autor desconocido, bajo licencia Creative Commons (CC BY 2.0)

Efectos agudos y crónicos

La contaminación por metales pesados se puede dividir en dos grupos según los efectos que pueden ocasionar: efectos agudos y efectos crónicos. Los agudos ocurren dentro de unas horas o días posteriores al momento en que el individuo se expone a dicho contaminante. Casi todos los contaminantes pueden tener un efecto agudo si se consumen en niveles excesivamente altos, los cuales varían de acuerdo con el tipo de contaminante. Los efectos crónicos ocurren después de que un individuo consume un contaminante en niveles superiores a los estándares de seguridad, diferentes para cada sustancia; durante muchos años. El principal efecto de la exposición crónica a contaminantes es el cáncer, además de problemas hepáticos y renales o dificultades en la reproducción. El principal mecanismo molecular del daño crónico está mediado por estrés oxidativo que termina por modificar el metabolismo de citocromo P450, la enzima superóxido dismutasa y el glutatión, que son los principales efectores en la prevención de daños por ROS (agentes reactivos de oxígeno). En otras palabras, los metales pesados nos oxidan y envejecen a nivel celular (Matés *et al.*, 2010).

Arsénico (As)

El As es un metaloide inorgánico biodisponible que produce toxicidad aguda y cuya ingestión en dosis altas (mayores a 70 mg) provoca síntomas gastrointestinales, trastornos de las funciones de los sistemas cardiovascular y nervioso y, en último término, la muerte. Cuando se trata de intoxicación aguda, esta generalmente inicia con la sensación de sabor metálico en la boca, ardor y disfagia (dificultad para tragar), además de sintomatología gastrointestinal entre los cuales se encuentran dolor abdominal, diarrea, náusea y vómitos con hematemesis (sangre) (ATSDR, 2007; CAS#: 7440-38-2).

Por otra parte, la exposición prolongada al arsénico en el agua tiene una relación causal con un aumento de los riesgos de cáncer de piel, pulmón, vejiga y riñón, debido al proceso de biotransformación a través de reacciones reductivas, oxidativas y de metilación, así como con otros cambios cutáneos, por ejemplo, hiperqueratosis y cambios de pigmentación. Esto se debe a que el As^{+3} (arsenito) tiene un efecto directo en el desacoplamiento de la fosforilación oxidativa, afectando la respiración celular, además de que, al unirse a grupos sulfhídrico, también daña los procesos gluconeogénicos y la captación de glucosa. Suprime proteínas control del ciclo celular (ciclínas) y activa algunas vías oncogénicas, por lo que promueve la resistencia a la apoptosis (WHO, 2011).

En lo particular, la Norma Oficial Mexicana (NOM-201-SSA1-2015) dice que no es seguro beber agua con concentraciones de As mayores a 0.01 mg/L. Desafortunadamente, se han detectado niveles desde 400 a 500 ppb en algunas zonas del estado de México y superiores a 1,200 ppb en pozos de agua potable en la comunidad de Zimapán, Hidalgo, lo que resulta en Arsenicosis, diabetes y cáncer juvenil en los pobladores de dicha región.

Cadmio (Cd)

La exposición al Cd, en humanos proviene principalmente de la ingesta de alimentos contaminados y del humo de los cigarrillos. Sin embargo, también puede ocurrir a través de cañerías cuyas soldadoras contienen cadmio, o bien, por el consumo de agua contaminada por fábricas y otras actividades antropogénicas como la minero-metalúrgica de metales no ferrosos, la metalúrgica del hierro y acero, la fabricación de fertilizantes fosfatados, la incineración de residuos de madera, carbón o plásticos, la combustión de aceite y gasolina; en todo caso los desechos de estas actividades normalmente se vierten en cuerpos de agua dulce por arrastre o lixiviación (ATSDR, 2007, CAS#: 7440-43-9).

Los síntomas iniciales de la ingesta de agua contaminada por cadmio son náusea, vómito, dolor abdominal y diarrea, pero esto solo llega a ocurrir cuando se ha ingerido en concentraciones de aproximadamente 15 ppm. A largo plazo, se considera que tanto el riñón como el hígado son los órganos más dañados por efecto del Cd. Además, hay enfermedades crónicas obstructivas de las vías respiratorias asociadas a la exposición prolongada e intensa por inhalación de este metal al fumar. La absorción mediante la ingesta se da cuando las células de la mucosa intestinal



Contaminación de agua por metales pesados en el Oconal de Mesapata, distrito de Cátaç, Perú. Provincia Minera de Recuay.
Autor: Cecilia Solange Espinoza Alvarado,
bajo licencia Creative Commons (CC BY 2.0).

internalizan el Cd del lumen, que posteriormente atraviesa la membrana lateral de los enterocitos para llegar a la circulación sanguínea. La citotoxicidad del Cd se debe a su afinidad por radicales de los grupos - SH, - OH, carboxilo, fosfatil, cisteinil e histidil, propios de las proteínas, y a la competitividad que genera con elementos funcionales afines a estos grupos como el zinc, cobre, hierro y calcio, lo que produce, en última instancia, radicales libres y deficiencias en los procesos celulares. Por esto último, hay múltiples pruebas de que la exposición al Cd puede contribuir al desarrollo de cáncer renal, osteomalacia y necrosis del tejido renal. En la mayoría de las zonas no contaminadas con Cd la ingesta diaria media con los alimentos se encuentran entre 10-40 µg. De acuerdo con la Occupational Safety and Health Administration (OSHA, 2004), la ingestión diaria normal es de 7 µg/semana por kg de peso corporal, por lo que este es uno de los contaminantes más comunes en la ingesta. Sin embargo, en zonas donde se procesa zinc, el cadmio es un producto de desecho que normalmente termina en los ríos que se usan para el cultivo de cereales. El caso más sonado fue en el pueblo de Toyama, Japón donde se desarrolló una epidemia de huesos quebradizos y osteomalacia en la década de 1930, enfermedad llamada Itai-Itai, cuya causa fue el envenenamiento de los campos de arroz por Cd.

Cromo (Cr)

Cuando el Cr ingresa al organismo es distribuido a la médula ósea, pulmones, ganglios linfáticos, bazo, riñón e hígado. Entre los problemas de salud que son causados por el Cr se encuentran: erupciones cutáneas, malestar de estómago y úlceras, problemas respiratorios, debilitamiento del sistema inmune, daño en los riñones e hígado, alteración del material genético y cáncer de pulmón (ATSDR, 2007, CAS#: 7440-47-3). El Cr es tomado por los eritrocitos e integrado a otras células por el sistema transportador de sulfatos. El Cr VI se reduce en Cr III dentro de las mitocondrias y el núcleo celular, esta reducción genera intermediarios reactivos como el Cr V, Cr IV y Cr III, radicales libres, hidroxilo y oxígeno, las cuales son susceptibles de alterar el DNA (Molina *et al.*, 2010).

Un caso particular es la quemadura que produce el ácido crómico, un reactivo utilizado en la industria para la limpieza de tuberías y cristalería, que resulta ser altamente corrosivo y provoca lesiones masivas de la piel. La quemadura se considera una exposición aguda a esta forma reactiva de cromo y genera insuficiencia renal fulminante. Además, se ha reportado erosión dental por exposición al ácido crómico (CrO₃) o sus formas nativas (cromio y cromita). Ambos son agentes altamente oxidantes usados en electrodeposición, para limpiar metales, curtido de cuero y fotografía.

Mercurio (Hg)

Este metal induce daños neurológicos cuando es consumido por infantes. Normalmente la exposición llega en la ingesta de alimentos marinos y se trasmite a los bebés a través de la leche materna (Al-Saleh *et al.*, 2016). El mercurio (Hg) induce estrés oxidativo y es liposoluble, por lo que afecta al sistema nervioso, en caso de bioacumulación esta se produce en hígado. La exposición aguda al Hg induce un decremento en la acetilcolinesterasa (AChE), fosfatasa ácida y alcalina (AcP y AIP) y glutatión S-transferasa, que es el principal protector contra el estrés oxidativo (ATSDR, 2007, CAS#: 7439-97-6). Por otro lado, se induce la actividad de lactato deshidrogenasa, así como de aspartato y alanina aminotransferasa, aumento que se ha asociado a deficiencias endócrinas (problemas reproductivos), infarto al miocardio, hepatitis, cirrosis y hemólisis. En el cerebro se incrementa la acumulación de formas reactivas de ácido tiobarbitúrico lo que lleva a un decremento de la actividad cerebral irreversible, así como a estados depresivos crónicos. Es notorio que la modificación del metabolismo de las proteínas, aquí mencionadas, alteran la excreción renal de urea a largo plazo, por lo que se pueden identificar marcadores de la intoxicación crónica por Hg en orina, como son marcadores funcionales (creatinina y beta 2-microglobulina en suero, proteínas urinarias de bajo o alto peso molecular), marcadores de citotoxicidad (antígenos tubulares y enzimas en orina) y marcadores bioquímicos (eicosanoides, tromboxano, fibronectina, calicreína, ácido siálico, glucosaminoglicanos en orina, cargas negativas de la membrana de los eritrocitos).

El mercurio metálico no es normalmente biodisponible, aunque sus vapores sí pueden producir intoxicación por inhalación, considerando que a 18°C la forma metálica emite gases. Si se consume esta forma metálica no se observan efectos mayores, son las sales inorgánicas y el mercurio orgánico (en combinación con carbono también llamados organomercurial) los que generan todos los síntomas y cuadros clínicos comentados en párrafos anteriores.

Actualmente, Colombia y Perú reportan más de 2,000 casos de intoxicación por mercurio en comunidades cercanas a mineras auríferas, donde las sales de Hg se utilizan como método de limpieza del mineral. En México, el caso más importante sucedió en Pinal de Amoles, Sierra Gorda, Querétaro, donde casi la totalidad del pueblo se intoxicó por este metal, ya que, en la localidad hay minas artesanales para su procesamiento y muchos pobladores tienen hornos para extraer el metal líquido en sus traspatios.



Plomo (Pb)

Se ha mostrado que el Pb participa en muchos procesos bioquímicos. En particular, se han estudiado los efectos en la síntesis del grupo hemo en adultos y niños (Pb-H). Se observan niveles más altos de porfirina eritrocitaria sérica (necesaria para la producción de hemoglobina) y mayor excreción urinaria de coproporfirina y de ácido delta-aminolevulínico cuando las concentraciones de Pb-H son elevadas, lo que corresponde a una porfiria, trastorno ocasionado por la deficiencia de la actividad enzimática en la biosíntesis de hemoglobina (Medina *et al.*, 2000). Como resultado de los efectos del plomo en el sistema hematopoyético, disminuye la síntesis de hemoglobina y se ha observado anemia en niños a concentraciones de Pb-H superiores a 40 µg/dl.

Además, es sabido que el Pb provoca lesiones en los tubos proximales del riñón que se caracterizan por aminoaciduria generalizada, hipofosfatemia con hiperfosfatemia relativa y glucosuria acompañada de cuerpos de inclusión nuclear, modificaciones mitocondriales y citomegalia de las células epiteliales de los tubos proximales. Cuando el plomo se acumula en los huesos es liberado gradualmente hacia el sistema sanguíneo, por lo que, durante el embarazo, se convierte en una fuente de exposición para el feto (ATSDR, 2007, CAS# 7439-92-1).

Las personas se exponen principalmente al inhalar partículas generadas por combustión, por ejemplo, durante fundición y reciclaje de materiales o al servir combustibles con plomo (gasolina magna). Pero la forma más biodisponible nuevamente es en solución, por lo que es posible consumir grandes cantidades al tomar agua de tuberías soldadas con plomo o alimentos envasados en recipientes con esmalte de plomo o soldados con este metal.

Conclusión

La mayoría de los metales pesados inducen toxicidad del sistema nervioso central en humanos y otros mamíferos, el metabolismo energético, los transportadores de iones, la síntesis de proteínas, el sistema cardiovascular, respiratorio, reproductivo y órganos vitales como los pulmones, el hígado, el cerebro y los riñones. Se ha demostrado que el arsénico (As) genera enfermedades de la piel y cáncer; el cadmio (Cd) es uno de los principales carcinógenos; el cromo (Cr) induce cáncer de pulmón y daños hepáticos y renales; la ingesta de mercurio (Hg) causa efectos nocivos en las madres lactantes y neurodegeneración en los niños y el envenenamiento por plomo (Pb) induce infertilidad y neurotoxicidad/neurodegeneración. En todos los casos, la principal fuente de exposición son los alimentos y el agua contaminada, dejando en segundo lugar la exposición laboral incidental. 



Manifestación de plumbosis o saturnismo, dedos sucios.

Autor: Jenny Addison, bajo licencia Creative Commons (CC BY 2.0).

Referencias

- Al-Saleh, I., Elkhatib, R., Al-Rouqi, R., Abduljabbar, M., Eltabache, C., Al-Rajudi, T. y Nester, M. 2016. Alterations in biochemical markers due to mercury (Hg) exposure and its influence on infant's neurodevelopment. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 219 (8): 898-914.
- ATSDR. 2007. Agencia para sustancias tóxicas y registro de enfermedades. Perfil toxicológico de Arsénico (CAS#: 7440-38-2), Cadmio (CAS#: 7440-43-9), Cromo (CAS#: 7440-47-3), Mercurio (CAS#: 7439-97-6), Plomo (CAS# 7439-92-1). Atlanta, GA: Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE. UU., Servicio de Salud Pública. 10.15620/cdc:11481.
- Londoño-Franco, L., Londoño, P. T. y Muñoz, F. G. 2016. Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 14 (1): 145-153.
- Matés, J. M., Segura, J. A., Alonso, F. J. y Márquez, J. 2010. Roles of dioxins and heavy metals in cancer and neurological diseases using ROS-mediated mechanisms. *Free Radical Biology and Medicine*, 49 (9): 1328-1341.
- Medina, E., Carbajal, B., Ponce, C., Sandoval, N. y Valladares, E. 2000. Las Porfirias. *Revista Médica de Honduras*, 68: 16-24.
- Molina, N., Aguilar, P. y Cordovez, C. 2010. Plomo, cromo III y cromo VI y sus efectos sobre la salud humana. *Ciencia y Tecnología para la Salud Visual y Ocular*, 8 (1): 77- 88.
- Molina, C., Ibañez, C. y Gibon, F. M. 2013. Proceso de biomagnificación de metales pesados en un lago hiperhalino (Poopó, Oruro, Bolivia): posible riesgo en la salud de consumidores. *Ecología*, 47 (2): 99-118.
- OSHA, 2004. Cadmium. Occupational Safety and Health Administration, Department of Labor: Federal Register, 71 (39): 3136-06R.
- Pérez, P. E. y Azcona, M. I. 2012. Los efectos del cadmio en la salud. *Revista de Especialidades Médico-Quirúrgicas*, 17 (3): 199-205.
- WHO (World Health Organization). 2011. Arsenic in drinking-water. Background document for development of WHO guidelines for drinking-water quality. WHO/SDE/WSH/03.04/75/Rev/1. Recuperado de: https://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/chemicals/arsenic.pdf