

El mercurio como contaminante y factor de riesgo para la salud humana¹

Natalia Cadavid Muñoz², Álvaro Arango-Ruiz³

Resumen

El mercurio (Hg) es considerado en la actualidad un contaminante a nivel mundial, que además impacta de manera negativa sobre la salud de las personas que están expuestas a este. Dentro de sus efectos más graves se encuentran afectaciones a nivel del sistema nervioso, por lo cual se considera un problema de salud pública que requiere la atención adecuada. El mercurio puede entrar al cuerpo a través de la ingesta, inhalación y absorción, por lo cual las poblaciones expuestas a actividades como la minería en pequeña escala representa un factor de riesgo importante sobre el cual se deben establecer estrategias para la mitigación de la exposición al mercurio. Teniendo en cuenta lo anterior, este artículo de revisión presenta los avances y tendencias significativas reportadas por bibliografía indexada, tanto a nivel nacional como latinoamericano e internacional. Las evidencias son claras: la intervención de estrategias de mayor escala es urgente para controlar la contaminación por

mercurio de las fuentes de abastecimiento de agua y alimentos y prevenir afectaciones graves a la salud de los seres humanos.

Palabras clave: mercurio, bioacumulación, seguridad alimentaria, minería, contaminación, riesgo químico.

Mercury as a pollutant and risk factor for human health

Abstract

Mercury (Hg) is currently considered a global pollutant, which also has a negative impact on the health of people who are exposed to it. Among its most serious effects are affectations at the level of the nervous system, which is why it is considered a public health problem that requires adequate attention. Mercury can enter the body through ingestion, inhalation and absorption, which is why populations exposed to activities such as small-scale mining represent

1 Artículo de revisión derivado del proyecto de investigación “Análisis de riesgo de mercurio y metilmercurio en regiones de Antioquia asociados a minería de oro”, cofinanciado por Minciencias Convocatoria 725-2015 para proyectos de investigación en temáticas priorizadas en salud 2015 – en curso. Financiado por el Ministerio de Ciencia Tecnología y Educación – Colombia.

2 Química Farmacéutica, Magíster en Química y candidata a doctora en Ciencias Farmacéuticas y Alimentarias Universidad de Antioquia. Correo: natalia.cadavid1@udea.edu.co / ORCID 0000-0002-3082-8808

3 Ingeniero Químico, Magíster en Ingeniería Ambiental y Doctor en Ingeniería. Profesor Investigador Corporación Universitaria Lasallista, Director grupo de Investigación GAMA. Correo: alarango@lasallistadocentes.edu.co ORCID 0000-0001-6204-850X

Autor para Correspondencia: Álvaro Arango Ruiz, correo: alarango@lasallistadocentes.edu.co

Recibido: 15/10/2020 Aceptado: 30/12/2020

an important risk factor on which strategies must be established to mitigate mercury exposure. Taking the foregoing into account, this review article presents the progress and trends of 50 articles consulted from different indexed journals, both nationally and at the Latin American and international level. The evidence is clear: the intervention of larger-scale strategies is urgent to control mercury contamination of food and water supplies and prevent serious damage to human health.

Keywords: mercury, bioaccumulation, food safety, mining, pollution, chemical risk.

Mercúrio como poluente e fator de risco para a saúde humana

Resumo

O mercúrio (Hg) é atualmente considerado um poluente global, que também tem um impacto

negativo na saúde das pessoas que estão expostas a este. Entre seus efeitos de maior gravidade estão as afecções do sistema nervoso, por isso é considerado um problema de saúde pública que requer atenção adequada. O mercúrio pode entrar no corpo através da ingestão, inalação e absorção, razão pela qual populações expostas a atividades como a mineração em pequena escala representam um importante fator de risco sobre o qual estratégias devem ser estabelecidas para mitigar a exposição ao mercúrio. Tendo em conta o exposto, este artigo de revisão apresenta os avanços e tendências significativas relatadas pela bibliografia indexada, tanto no âmbito nacional, quanto latino-americano e internacional. A evidência é clara: a intervenção de estratégias em larga escala é urgente para controlar a contaminação por mercúrio das fontes de abastecimento de água e alimentos e prevenir sérios danos à saúde humana.

Palavras chave: mercúrio, bioacumulação, segurança alimentar, mineração, poluição, risco químico.

Introducción

El mercurio es un elemento químico que pertenece al grupo de los metales de transición. Su uso data desde la antigüedad y por lo tanto hoy día tiene una amplia distribución en el medio ambiente. Sin embargo, como especifican Zambrano et al. (2017), el mercurio también se reconoce como un elemento tóxico que puede provocar contaminación a gran escala. Por ser bioquímicamente activo, bioacumulable y persistente es altamente tóxico para el medio ambiente y los seres vivos.

Ahora bien, la problemática que se aborda a continuación a través de un ejercicio de

revisión bibliográfica se relaciona con la contaminación del mercurio y sus efectos sobre la salud. Esto ha llevado a la identificación de diferentes factores de riesgo, pero también de la población vulnerable y en riesgo y a la medición de exposición de este metal, así como posibles efectos sobre su salud. A partir de tres categorías claves: incidencia de la minería artesanal como factor de riesgo sobre la exposición de mercurio en mineros y población cercana; contaminación del mercurio sobre diferentes fuentes de agua y alimentos; y gestión de la contaminación por mercurio, se presenta un panorama desde trabajos investigativos tanto a nivel nacional como internacional.

La minería aurífera artesanal o de pequeña escala – MAPE como factor de riesgo por la exposición a mercurio

Lo primero que se debe mencionar respecto a la MAPE es que es una actividad económica de baja inversión que requiere una gran cantidad de mano de obra, pero que al mismo tiempo desconoce factores básicos de cuidado tanto para las personas que la ejercen como para el medio ambiente. La Organización Mundial de la Salud (2017) añade que, a pesar de esto, la MAPE se realiza en más de 70 países, dentro de los cuales son más frecuentes Sudamérica, África y Asia; y es ejecutada por más de 10 millones de mineros, dentro de los cuales se cuentan mujeres y niños.

Colombia hace parte de los grandes productores de oro en América Latina, por lo cual las actividades de minería son comunes en zonas específicas de su territorio; sin embargo, estos procesos traen consigo la degradación de la naturaleza por la liberación de metales pesados y contaminación de diferentes fuentes de agua y de alimentos tanto para las poblaciones aledañas como para los productos que son importados desde allí. Como lo explican Alcalá-Orozco et al. (2020), el problema radica en que los metales pesados son elementos que no son biodegradables pero que participan en el ciclo de la vida del ser humano ya que son transportados de manera dinámica a través del aire, la tierra y el agua, así logran llegar a la cotidianidad del ser humano.

Trabajos como los de Carranza-Lopez et al. (2019), Gutiérrez-Mosquera et al. (2018), Narváez et al. (2017) y Palacios-Torres et al. (2018) muestran un ejercicio complejo de investigación que parte de encuestas sociodemográficas para establecer las características de la población respecto a sus hábitos de salud. Esto se hace con la intención de rastrear posibles fuentes de exposición

al mercurio. Adicionalmente, algunas investigaciones hacen recolección de muestras de sangre y cabello, para hacer un biomonitoreo de la intoxicación por mercurio de una muestra específica.

Como lo explican Carranza-Lopez et al. (2019), el análisis de mercurio en cabello humano, pescado y suelos se puede realizar a través de un analizador directo de mercurio como el Milestone DMA-80, siguiendo el método USEPA 7473 y finalmente, la cuantificación de T-Hg se hace realizando calibración de curvas con materiales de referencia certificados (MRC). De esta manera, se puede establecer si la exposición a elementos contaminantes puede resultar tóxicos para la población estudiada. Así mismo se pueden realizar análisis para analizar el perfil hematológico para darle una mayor amplitud al planteamiento de la problemática.

Este tipo de análisis ha sido fundamental, especialmente teniendo como muestra a población aledaña a las actividades de minería, debido a que su dieta se compone de pescado y vegetales que son cultivados en tierras cuya exposición a metales pesados es inminente. Manjarres-Suarez y Olivero-Verbel (2020) son enfáticos en que los perfiles hematológicos por muestra de sangre o cabello permiten analizar con certeza la exposición al mercurio, ya que este llega a la sangre del ser humano y luego es absorbida por los eritrocitos. Una fracción de MeHg se administra al bazo y al hígado, donde puede convertirse en Hg²⁺ mediante la desmetilación. En las células, el mercurio genera toxicidad por diversos mecanismos como el estrés oxidativo, alteraciones en la membrana, permeabilidad y disfunción mitocondrial, provocando diferentes fallas en el sistema.

Continúan Narváez et al. (2017) mencionando que gracias a este tipo de investigaciones se ha podido considerar que el estrés oxidativo es el mecanismo principal implicado en la toxicidad

del mercurio y causa cambios epigenéticos. Dentro de los cuales se menciona una alteración común como la hipometilación que se asocia generalmente al desarrollo de cáncer por inestabilidad cromosómica y alteración en transcripción de otros genes adyacentes silenciosos. Todo esto representa la necesidad de mejorar las condiciones de salud de aquellas personas que se dedican a la minería, pues su exposición al mercurio y otros metales pesados puede resultar mortal.

Por tal motivo, diferentes investigaciones se han centrado en analizar las posibles consecuencias que tiene sobre la salud de los seres humanos la exposición a metales pesados, especialmente en el caso del mercurio. En años recientes, estas investigaciones han advertido sobre la exposición peligrosa de muchos mineros que sobreviven a través de la minería artesanal, pero que además son más propensos a consumir alimentos y agua contaminada con diferentes metales preciosos por la precariedad con la que se desarrolla dicha actividad económica. Como lo explican Gutiérrez-Mosquera et al. (2018), la realidad detrás de esta problemática es compleja en la medida en la que la dieta de los habitantes aledaños a la minería se basa principalmente en pescado y alimentos que contienen mercurio y que a pesar de que se ha demostrado en numerosos estudios que no alcanzan los límites establecidos, el consumo continuo podría representar problemas graves para la población más vulnerable.

En segunda instancia, a nivel latinoamericano los estudios parecen centrarse sobre las poblaciones cercanas al Amazonas brasileño, por ser una importante fuente acuífera de actividad pesquera y económica para un gran número de personas. Estudios como los de Lacerda et al. (2019), Pavilonis et al. (2017) y Souza Vieira et al. (2020) se enfocan de nuevo en hacer un estudio de las concentraciones de

mercurio en mineros de una zona específica para dar cuenta de la exposición a metales pesados.

Brito et al (2020) añaden que es necesario que los resultados de este tipo de investigaciones sean considerados dentro de planes para la mitigación de la contaminación y llaman la atención respecto a las necesidades de la población respecto a programas de educación, que por ejemplo les ayude a identificar los riesgos al exponerse a contaminantes como el mercurio. A pesar de esto, para Souza Vieira et al. (2020), la problemática requiere de acciones a mayor escala, en la medida en la que a pesar de que muchos mineros reconocen los riesgos por exposición a mercurio, no tienen otra opción para obtener ingresos y sobre todo, no pueden dejar de consumir pescado porque este es fundamental para su ingesta diaria de proteína.

Los Andes Bolivianos no escapan a esta realidad, pues como lo exponen Pavilonis et al. (2017), si se hicieran análisis más exhaustivos respecto a la aparición de enfermedades como el cáncer por exposición a metales pesados, se daría una mayor dimensión a la problemática de muchos mineros que no cuentan con el respaldo de medidas adecuadas. De acuerdo con su informe, los autores concluyeron que, en los mineros adultos, el riesgo de cáncer era alto, con una probabilidad de que un individuo desarrollara cáncer de 1,3 sobre 100; sin embargo, el riesgo de cáncer fue menor en las personas expuestas al medio ambiente, aunque mayor que el criterio aceptable de la EPA.

De la misma manera sucede en el Ecuador, que cuenta con una economía sobre todo informal basada en la agricultura, pero también en menor medida en minería. Marshall et al. (2020) añaden que los procesos de extracción son por lo general dañinos con el medio ambiente; sin embargo, la población desconoce el grado de afectación sobre la salud que puede generar a gran escala este ejercicio. Esto

provoca que en las fuentes de agua cercanas se encuentren en altas concentraciones de otro tipo de componentes como el cianuro libre y el mercurio, lo que puede resultar mortal por larga exposición.

En Perú, como lo explican Gonzalez et al. (2019), Weinhouse et al. (2021) y Wyatt et al. (2017) se han dado avances importantes para la mitigación del impacto de la minería artesanal, en el año 2016 se ratificó el Convenio del Tratado de Minamata, con lo que se obligó a frenar las emisiones de mercurio y monitorear a poblaciones en riesgo de exposición y ha sido un elemento fundamental para el cuidado de la salud pública. Esto se ha dado a partir del reconocimiento de la toxicidad por exposición al mercurio como un asunto de salud pública y las graves afectaciones sobre la salud que representa este tipo de contaminantes.

En último lugar, el panorama internacional no es diferente a lo que se ha venido hilando, pues refleja una preocupación inminente por mejorar las condiciones de los mineros y población cercana a las actividades de minería, que muchas veces es artesanal e ilegal. Dentro de las regiones analizadas se encuentran Pakistán (Riaz et al., 2018), Indonesia (Junaidi et al., 2019; Reichelt-Brushett et al., 2017) e India (Subhavana et al., 2019) donde la actividad de la minería artesanal es común, pero también las centrales eléctricas de carbón, que representan una actividad clave para las emisiones de mercurio al medio ambiente.

En estos casos, la exposición al mercurio es latente en productos de consumo tanto de pescado como de arroz. Todo esto anudado a una inminente crisis social en la que los agentes contaminantes no son gestionados de manera adecuada y las fuentes de agua sufren de grandes consecuencias por la contaminación. Estas investigaciones muestran la magnitud de la problemática en países del medio oriente y,

sobre todo, la necesidad urgente de establecer planes de intervención gubernamental para cuidar la salud de la población expuesta.

Contaminación de mercurio en alimentos y fuentes de agua

Sobre las consideraciones anteriores, muchas investigaciones se han inclinado hacia el análisis de la contaminación por metales pesados en fuentes de agua de consumo humano y diferentes alimentos, reconociendo así el riesgo generalizado al que está expuesta la población humana a riesgos sobre su salud. Muchas veces, las personas no son realmente conscientes de los agentes contaminantes que pueden estar deteriorando la calidad del producto que están consumiendo; sin embargo, a pesar de su invisibilidad, estos factores afectan la calidad de vida del ser humano a corto, mediano y largo plazo.

Al respecto, en el caso de Colombia, las investigaciones tienden a situar la calidad del agua como un componente esencial de la salud pública, reconociendo además que hay una problemática asociada a las actividades industriales que generan contaminantes. Estudios como el de Guzmán Barragán et al. (2020) se han enfocado a analizar la calidad de fuentes de suministro de agua, siguiendo las pautas de recomendación de la American Public Health Association – APHA. Estos arrojan datos relacionados con la temperatura y el Ph de las muestras de agua que se toman de diferentes fuentes de consumo general.

En consecuencia, se puede evidenciar la presencia de agentes contaminantes, dentro de los cuales se menciona el mercurio en fuentes de abastecimiento urbano, por lo cual se evidencian debilidades en el tratamiento de agua para el consumo humano. En ese sentido, las autoridades sanitarias deben fortalecer el sistema de tratamiento de agua y evaluar

efectivamente los factores de riesgo que afectan la calidad del agua de consumo.

De igual manera, otras investigaciones también se han centrado en la valoración del riesgo por contaminación en fuentes de agua potable y alimentos, como es el caso de Echeverry et al. (2014), haciendo uso de modelos de la *Environmental Protection Agency* (EPA) y prestando mayor atención a contaminantes como el mercurio. Este tipo de estudios muestran la evidente exposición que tiene la población, a pesar de no estar expuesta directamente a actividades industriales o de minería.

Bajo el mismo propósito, se combinan técnicas de recolección de la información, incluyendo entrevistas y encuestas a poblaciones cercanas a riberas de ríos u otras fuentes naturales de agua en Colombia. Esto además complementario a muestras de sangre para el análisis de presencia de zinc protoporfirina (ZPP) y mercurio. Como lo explican Díaz et al. (2020), las muestras biológicas a una muestra seleccionada permiten analizar la exposición que ha tenido la persona a un agente contaminante en particular. Generalmente, este análisis de muestras de sangre para el caso del mercurio se obtiene mediante espectrofotometría de absorción atómica por vapor frío.

Además, en el contexto colombiano, las investigaciones también han sido numerosas alrededor del análisis de los peces como alimentos que aumentan la exposición de las personas a la contaminación por mercurio. Para López-Barrera y Barragán-Gonzalez (2016) es importante que se haga recolección del tejido muscular de la parte dorsal de diferentes especies comerciales de consumo de diferentes fuentes de venta. Para su análisis se recurre generalmente al Metal Pollution Index (MPI) o índice de contaminación por metales y a

diferentes métodos para concretar la exposición al mercurio por consumo.

Dentro de esta tendencia investigativa se distinguen además aquellos trabajos que centran su interés en zonas costeras donde el consumo de pescado es mayor que en otras zonas del interior del país. Pinzón-Bedoya et al. (2020) especifican que la concentración de mercurio en las zonas costeras no excede el límite máximo de consumo, sí representa un riesgo potencial para población vulnerable, como es el caso de mujeres en estado de embarazo. La problemática todavía va más allá si se tiene en cuenta que la población costera tiene una dieta alimenticia en la que su proteína predominante es el pescado.

En ese sentido, investigaciones como la de Gallego Ríos et al. (2018) muestran que las concentraciones de mercurio pueden superar el límite máximo permitido en productos no solo como el pescado, sino también en la reutilización de sus componentes para otros productos, lo que conduce a una bioacumulación de metales. Es allí donde se encuentra un vacío en la legislación colombiana, respecto a la falta de regulación de concentraciones máximas de metales pesados para la producción de subproductos de origen animal.

Adicionalmente, Fuentes-Gandara et al. (2018) afirman que se debe establecer un mayor control sobre los productos importados, en la medida en la que en muchos productos pesqueros importados se encuentran concentraciones altas de mercurio, especialmente en el atún enlatado. Esto trae a colación una problemática respecto a la información que manejan algunos productos comerciales, que muchas veces terminan engañando al consumidor. Así lo ratifican diferentes trabajos de revisión de la literatura en Colombia, que informan sobre niveles alarmantes de contaminación por metales en peces colombianos. Los datos de Hg en la sangre y el cabello de los colombianos exceden los

límites permitidos por la OMS, EPA y ATSDR. Se necesita mayor investigación sobre los efectos del Hg en la población colombiana, especialmente las que dependen del pescado para alimentarse.

A nivel latinoamericano, se puede evidenciar un amplio número de investigaciones centradas en Brasil por su cercanía con el río Amazonas y la importancia de este para el desarrollo de la vida de la población. Algunas investigaciones reúnen muestras de especies de pescado que son comunes para el consumo humano en la zona a estudiar y toman muestras del tejido muscular para estimar la exposición al metilmercurio a través de modelos determinísticos, así como técnicas espectro analíticas (Ferreira da Silva et al., 2019; Ferreira da Silva y Oliveira Lima, 2020; França da Silva, Daniel Levi et al., 2019; Lino et al., 2019; Mirlean et al., 2019). Sin embargo, Ferreira da Silva y Oliveira Lima (2020) hacen una observación fundamental: la concentración de mercurio varía según el tejido, la especie de pez y la categoría. Por tal motivo, las muestras se toman en diferentes tiempos y en el músculo del pescado, pues este alberga mayores concentraciones de mercurio. Así mismo las especies más estudiadas son aquellas que se encuentran comúnmente en el océano Atlántico y que son especialmente comerciales para el consumo humano, como es el caso de *Genidens Barbus*, *Isurus Oxyrinchus*, *Galeorhinus Galeus*, y *Epinephelus Marginatus* (Mirlean et al., 2019).

De la misma manera que durante las épocas de lluvia se presentan mayores concentraciones de mercurio en los tejidos de los peces que son comercializados. Ferreira da Silva et al. (2019) sugieren que este tipo de estudios pueden ser buenos biomonitores para evaluar la contaminación por mercurio en los sistemas acuáticos y pueden usarse en evaluaciones y monitoreos adicionales de los riesgos para la salud humana.

Vianna et al. (2019) concluyen a través de un ejercicio de revisión de la información, que hace falta información tanto a nivel latinoamericano como a nivel mundial respecto al efecto hematológico como resultado primario a la exposición de contaminación por metales pesados. Esta es una consideración fundamental para entender la magnitud del impacto de la exposición a mercurio en el ser humano. A pesar de la evidencia de la toxicidad del mercurio sobre los ecosistemas y la vida humana, todavía no parece evidenciarse medidas efectivas para mitigar las fuentes de exposición de este tipo de contaminantes en la cotidianidad de los seres humanos.

En definitiva, a pesar de que los trabajos investigativos analizados muestran que los niveles de mercurio en especies de peces de consumo humano a nivel general cumplen con el límite máximo de mercurio, el consumo continuo en zonas ribereñas y costeras representa un riesgo para la población de estos sectores. Como lo explican França da Silva, Daniel Levi et al. (2019), el pescado aporta nutrientes fundamentales para la dieta humana, pero al mismo tiempo son organismos con capacidad para absorber elementos que están contenidos en el agua y almacenarlos en su tejido muscular. Por esto, algunas iniciativas de mitigación han buscado educar a la población para que consuma diferentes especies de pescado que están menos expuestas a contaminación por mercurio.

De acuerdo con Lino et al. (2019) la carga de mercurio es transportada principalmente por partículas suspendidas en el agua. Por lo tanto, el mercurio puede asentarse en la sección dinámica más baja de las fuentes de agua, donde se potencia su metilación. Las llanuras de inundación son sitios importantes para la metilación del mercurio y pueden aumentar la transferencia de mercurio de las matrices abióticas a la cadena alimentaria. Por lo tanto, los esfuerzos de conservación deben centrarse

en todas las actividades que aumentan la erosión. Para Zamora-Arellano et al. (2018), desde el caso de estudio de la costa de Sinaloa, la solución se puede centrar en promover los beneficios para la salud del consumo de pescado, el riesgo podría reducirse mediante la incorporar en la dieta especies de peces con bajo contenido de mercurio, como el delfín o la sierra del Pacífico.

Por último, las investigaciones a nivel internacional de igual manera muestran una tendencia hacia el ejercicio de muestreo de especies de pescado que son comunes para el consumo humano en diferentes lugares que se pueden identificar o no como zonas de mayor exposición por actividades de minería. Aun así, Gonzalez et al. (2019) explican que es responsabilidad del gobierno hacer ejercicios de diagnóstico oportuno sobre la calidad de los alimentos, esto se ha orientado hacia estudios conocidos como total diet studies (TDSs) que tienen la intención de mostrar la posible contaminación alimentaria en diferentes grupos de población. A partir de allí, desde diferentes organizaciones internacionales se han propuesto una serie de recomendaciones de consumo de pescado para evitar una sobre exposición a contaminantes como el mercurio que pueden resultar incluso mortales para los grupos más vulnerables (Malvandi y Alahabadi, 2019).

El panorama mundial sitúa especialmente el caso de China, pues como lo explican Chen et al. (2018) en años recientes, el flujo de mercurio anualmente en el océano alcanzó incluso las 77 toneladas, especialmente en el caso de especies predatoras, como consecuencia de ello, muchas estrategias a nivel mundial sugieren el consumo de especies no depredadoras, en la medida en la que su exposición al mercurio sería menor.

Esta misma conclusión se da en zonas dentro de Malasia (Junaidi et al., 2019) donde ya se han emprendido campañas para que población

vulnerable como mujeres embarazadas, que junto con sus bebés podrían verse afectados en su sistema nervioso. Jeevanaraj et al. (2016) explican que en esta zona se considera que la población vulnerable no debería consumir peces demórale y de alto trófico, en la medida en la que están expuestos al mercurio que se encuentra en los sedimentos: a medida que el mercurio se bioacumula en la cadena alimentaria, los peces de tróficos más altos pueden acumular mercurio cerca del límite máximo o incluso lo pueden superar.

Añadiendo a lo anterior, en oriente se ha estudiado ampliamente la enfermedad de Minamata como un síndrome neurológico que es causado por el envenenamiento por mercurio, que se dio entre 1956 y 1965 por el consumo de mariscos contaminados con mercurio (Choi et al., 2017). Los autores sitúan este precedente para mencionar la incidencia que tienen los mecanismos de toxicidad del mercurio sobre los sistemas cardiovascular, endocrino, reproductivo e inmunológico.

Nakamura et al. (2014) consideran que el hígado juega un papel importante en el metabolismo y la desintoxicación, y se cree que el mercurio tiene efectos estructurales y funcionales en el hígado, pero los estudios de los efectos de la exposición al mercurio en el tejido hepático humano, particularmente a niveles relativamente bajos, son limitados. De la misma manera sucede con la aparición de enfermedades como el cáncer, que de acuerdo con Kim et al. (2020), a pesar de que los estudios todavía no son concluyentes, representan un punto de partida importante para asociar una ingesta elevada de mercurio con un mayor riesgo de aparición de cáncer colorrectal y así poder contribuir a su prevención y tratamiento.

Todavía cabe señalar que Pardo et al. (2014) sugieren que es necesario analizar las otras fuentes de exposición al mercurio

de las fuentes de agua y alimentos de los consumidores, en la medida en la que la ingesta contaminada puede darse también a través del polvo y otros productos como carnes, huevos, productos lácteos, vegetales e incluso el aire. No hay que olvidar además que el mercurio se puede biomagnificar en la cadena alimentaria, provocando una bioacumulación de concentraciones tóxicas, especialmente en organismos de tróficos superiores (Kershaw y Hall, 2019).

En definitiva, las investigaciones relacionadas con el análisis de la contaminación por mercurio de alimentos y fuentes de agua se centran en enfoques de procesamiento de muestras de peces que son comerciales, enfoques determinadas y enfoques probabilísticos que permiten distribuir las ingestas de alimentos probablemente contaminados en una población específica, a partir de muestras de sangre, cabello o dieta.

Las recomendaciones de consumo de pescado a nivel global se sitúan especialmente en población vulnerable. De acuerdo con Kimáková et al. (2018) la carne de tiburón, pez espada y caballa no es apropiada para niños, mujeres en edad fértil, mujeres embarazadas y madres lactantes. Las recomendaciones dietéticas incluyen la reducción del consumo de carne de atún y otros pescados, o una dieta alternativa.

De igual manera, Ralston y Raymond (2018) y Stackelberg et al. (2017) mencionan que desde Estados Unidos, la Environmental Protection Agency (EPA) y la Food and Drug Administration (FDA) han emitido incluso asesoramiento sobre el consumo de pescado, que está especialmente dirigida a mujeres embarazada, madres lactantes y padres de niños pequeños, para que logren tomar decisiones informadas respecto a qué especies de pescado son saludables y seguras para el consumo. No

hay que olvidar entonces que de acuerdo con Esposito et al. (2018) la gestión de riesgos es un componente fundamental para la gestión alimentaria de cualquier gobierno y por lo tanto, las investigaciones revisadas pueden ser útiles para implementar bases de datos sobre diferentes criterios para analizar la exposición al mercurio de diferentes productos de mar comerciales de consumo en todo el mundo.

Gestión de la contaminación por mercurio en Colombia

Para terminar, también es importante reconocer la manera en la se ha venido dando la gestión institucional respecto al manejo de los riesgos de contaminación de mercurio, reconociendo esto como una problemática de salud pública. Desde esta mirada, las investigaciones revisadas y, en consecuencia, sus autores dirigen la discusión hacia las medidas que son necesarias para minimizar la contaminación por mercurio en diferentes fuentes de exposición para el ser humano y así evitar posibles afectaciones a la salud a corto, mediano y largo plazo.

Vargas y Marrugo (2019) empiezan por advertir sobre los efectos que ya han sido estudiados y presentados en diferentes investigaciones sobre la salud de los seres humanos que están expuestos a metales como el mercurio, metilmercurio y otros metales pesados, atendiendo especialmente el caso colombiano. La primera reflexión surge entorno al consumo promedio de pescado o mariscos en el país, debido a que a pesar de que este se encuentra por debajo del promedio de Latinoamérica, se debe considerar el hecho de que este consumo es regionalizado, especialmente en zonas costeras y ribereñas.

La segunda reflexión lleva a afirmar que la minería artesanal con propósitos de extracción de oro en Colombia es la principal fuente

de contaminación, anudado a problemas por contaminación ambiental como consecuencia de un mal manejo de fuentes residuales, prácticas industriales y agrícolas que contaminan cuerpos de agua y abuso de sustancias químicas para la explotación de minerales. Esto representa una situación crítica para el país y para los colombianos, que muchas veces desconocen las consecuencias sobre su salud por contaminación con metales pesados presentes en el medio ambiente.

Respecto al manejo normativo, Vargas y Marrugo (2019) explican que en Colombia existe legislación vigente que busca regular los metales pesados desde las afectaciones que pueden generar sobre la salud humana por bioacumulación. Esta responsabilidad le compete específicamente al Ministerio de Ambiente, Salud y Protección Social; sin embargo, los autores reconocen que no se reporta en ningún documento oficial el límite máximo para el consumo del As, así como tampoco una diferenciación clara para los límites máximos de consumo para poblaciones que son más vulnerables, pero que no necesariamente están en zonas de mayor exposición, como las mujeres embarazadas, los niños y los consumidores frecuentes.

Adicionalmente, gracias a este ejercicio de revisión y análisis se pudo concluir que en el país todavía no se da una gestión adecuada sobre la contaminación de mercurio y sus efectos sobre la salud, en la medida en la que hacen falta herramientas para evaluar aspectos relacionados a la toxicología ambiental y el riesgo a la salud. Adicionalmente, no se hace un diagnóstico efectivo de la exposición al mercurio de la población colombiana, en la medida en la que no se puede poner en el mismo plano aquellas zonas mineras y aquellas que no lo son; pero, lo que es más, que no se le debe restar importancia a las zonas donde no hay actividad minera. Esto en la medida en la

que la población colombiana consume pescado como parte de su ingesta alimenticia y se ha demostrado que las concentraciones de metales pesados en estos peces de consumo representan un riesgo inminente.

Por su parte, Arias, et al. (2018) reconocen que Colombia ha realizado mejoras importantes en la gestión ambiental, desde la apuesta por la conservación de los recursos naturales y la gestión de residuos sólidos. Todas estas iniciativas se pueden consultar en la Constitución y certifican un marco normativo fundamental en materia del cuidado del medio ambiente. Sin embargo, todavía no existe un marco consistente sobre el manejo de la tierra o zonas contaminadas, en la medida en la que, como Arias, et al (2018), hay un conflicto de intereses desde diferentes actores: gobierno, comunidad, industrias y política).

Como consecuencia de ello, las iniciativas para la mitigación de factores de riesgo por la exposición a diferentes metales pesados como el mercurio se pueden considerar como poco efectivas. Para Arias, et al. (2018), el país puede tomar los marcos de acción de países como el Reino Unido y Estados Unidos, para aprender sobre sus lecciones aprendidas y la experiencia de aplicación en cada caso, reconociendo especialmente las necesidades de la población colombiana. Es necesario entonces consolidar el marco colombiano para la gestión de tierras contaminadas.

Arias, et al. (2018) concluyen a través de su ejercicio de revisión que este marco de gestión para la contaminación por metales pesados, debe darse alrededor de cuatro aspectos: primero, hacer una definición clara de las tierras o zonas contaminadas; segundo, establecer un proceso para la toma de decisiones que se base en un enfoque de gestión de riesgos; tercero, establecer un desarrollo de un sistema regulatorio que sea consistente, transparente e integrados; y cuarto,

implementar mecanismos de financiamiento para la educación y capacitación de profesionales que contribuyen a crear una mayor conciencia pública sobre los riesgos de la contaminación por metales pesados. A partir de allí, se considera que este marco de acción no solo contribuiría a la mitigación del impacto de la contaminación por mercurio, sino también a la restauración y usabilidad del valor económico del suelo. Por tal motivo, se espera que este marco haga parte de la práctica de gestión de suelos en Colombia desde un enfoque transversal.

Finalmente, y de manera complementaria a los estudios anteriores, en el caso de Casas et al. (2015), presentan no solo una reflexión en torno a las medidas e iniciativas que han tenido lugar en el territorio nacional, sino también los resultados de un proyecto cuyo objetivo fue el de concretar lineamientos para el desarrollo de un plan para el control de efectos del mercurio en la salud en Colombia, esto con miras además hacia una política pública integral. De ahí que se estableciera un trabajo de revisión de evidencia científica, normativa y técnica de la problemática del mercurio en Colombia y una validación de dicha evidencia desde actores relevantes en la gestión institucional de dicha problemática. Adicionalmente, los autores se ciñeron a los pasos metodológicos del modelo preceder-proceder de los modelos de planificación integral en salud.

Lo primero que afirman los autores es que la gestión institucional y académica se ha centrado en sectores identificados como de mayor exposición y concentración del mercurio por actividades de minería y en consecuencia posible contaminación por consumo de pescado, estos son: Antioquia, Costa Atlántica y Santander. En segundo lugar, se afirma que a través de las diferentes investigaciones se ha podido comprobar la asociación entre la exposición al mercurio y los efectos negativos en la salud del ser humano, que presenta diferentes síntomas.

Y tercero, los autores afirman que en Colombia todavía no hay evidencia investigativa suficiente para afirmar que hay una asociación entre las vacunas que contienen componentes de mercurio y la aparición de cáncer.

De acuerdo con Casas, et al. (2015) es importante que las investigaciones sobre la contaminación de mercurio se centren también en población vulnerable, sobre la que todavía no hay suficiente indagación académica. Dentro de esta población vulnerable se encuentran entonces mujeres embarazadas, menores de edad y aquella población cuyos hábitos de consumo pueda estar especialmente expuesta a componentes del mercurio. Como afirmaron Vargas y Marrugo (2019), es erróneo considerar desde el mismo plano el riesgo sobre la población cercana a sectores mineros y aquella que no es cercana, pero que de igual manera es consumidora frecuente de pescado o mariscos. Con todo esto, se considera que una primera labor antes de establecer estrategias de contingencia por contaminación es un ejercicio de diagnóstico que permita concluir aspectos relacionados con la cobertura real de exposición al mercurio en Colombia; identificación de cantidad y tipos de fuentes de exposición al mercurio; afectaciones en población vulnerable que no ha sido considerada en otros estudios.

Adicionalmente y en correspondencia con los objetivos planteados, los planes de intervención en Colombia se deben articular alrededor de tres componentes: salud ambiental, salud pública y salud ocupacional. Se evidencia que el país todavía necesita de intervenciones integrales y efectivas para la mitigación de la contaminación por mercurio, no sólo en aquellas zonas de mayor exposición. El panorama presenta entonces varios retos: primero, fortalecimiento institucional para el manejo de la prevención y control de la exposición a mercurio desde diferentes fuentes; segundo, mayor gestión tecnológica alrededor de la problemática;

tercero, fortalecimiento de los procesos de diagnóstico y atención a la población afectada por exposición a mercurio; y finalmente, una mayor gestión de la educación sobre los riesgos del mercurio sobre la salud humana.

Conclusiones

De manera concluyente, las investigaciones de los últimos 5 años plantean la peligrosidad de la exposición al mercurio por diferentes fuentes en la población humana. Dentro de dicha preocupación se han adelantado estudios atendiendo especialmente aquella población que está expuesta a actividades de minería de extracción de oro, plata y/o cobre o que tienen alguna relación con las fuentes de emisión y aplicación de los metales pesados. Los resultados en ese sentido son contundentes: los mineros y la población aledaña pueden resultar con afectaciones mayores a su salud por intoxicación por mercurio, teniendo en cuenta que no solo se trata de un trabajo peligroso y sin equipos de protección adecuados, sino que además existe un alto riesgo de contaminación por el aire, la tierra y el agua, lo que en definitiva termina por deteriorar las fuentes naturales de agua y los alimentos cultivados.

De esta manera, a pesar de que se puede encontrar evidencia científica y evidencia suficiente para advertir sobre los riesgos por intoxicación, las estrategias de manejo y mitigación de esta problemática son deficientes. Todo esto resulta de la consideración de que la minería artesanal es para muchos mineros su única fuente de trabajo e ingreso y que el pescado es la base de la alimentación de poblaciones aledañas a ríos y zonas costeras. Sin embargo, algunas investigaciones parecen sugerir recomendaciones para el consumo de ciertas especies de pescado que no son dañinas para la salud de la población vulnerable como mujeres embarazadas, lactantes y niños

pequeños. En Colombia, a pesar de existir un marco regulatorio, todavía no se concretan avances para el manejo de la contaminación por mercurio en diferentes zonas de vulnerabilidad.

Referencias

- Alcala-Orozco, M., Caballero-Gallardo, K. y Olivero-Verbel, J. (2020). Biomonitoring of Mercury, Cadmium and Selenium in Fish and the Population of Puerto Nariño, at the Southern Corner of the Colombian Amazon. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 79(3), 354–370. <https://doi.org/10.1007/s00244-020-00761-8>
- Arias, V., Rodríguez, A., Bardos, P. y Naidu, R. (2018). Contaminated land in Colombia: A critical review of status and future approach for the management of contaminated sites. *Science of the Total Environment*(618), 199–209.
- Carranza-Lopez, L., Caballero-Gallardo, K., Cervantes-Ceballos, L., Turizo-Tapia, A. y Olivero-Verbel, J. (2019). Multicompartment Mercury Contamination in Major Gold Mining Districts at the Department of Bolívar, Colombia. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 76(4), 640–649. <https://doi.org/10.1007/s00244-019-00609-w>
- Casas, I., Gómez, E., Rodríguez, L., Girón, S. y Mateur, J. (2015). Hacia un plan nacional para el control de los efectos del mercurio en la salud en Colombia. *Biomédica*, 35(30).
- Chen, S.-W., Chen, Z.-H., Wang, P., Huang, R., Huo, W.-L., Huang, W.-X., Yang, X.-F. y Peng, J.-W. (2018). Health Risk Assessment for Local Residents from the South China Sea Based on Mercury Concentrations in Marine Fish. *Bulletin of Environmental*

- Contamination and Toxicology*, 101(3), 398–402. <https://doi.org/10.1007/s00128-018-2388-3>
- Choi, J., Bae, S., Lim, H., Lim, J.-A., Lee, Y.-H., Ha, M. y Kwon, H.-J. (2017). Mercury Exposure in Association With Decrease of Liver Function in Adults: A Longitudinal Study. *Journal of Preventive Medicine and Public Health = Yebang Uihakhoe Chi*, 50(6), 377–385. <https://doi.org/10.3961/jpmph.17.099>
- Díaz, S. M., Varona-Uribe, M. E., Sánchez-Infante, C. I. y Idrovo, A. J. (2020). Exposición a plomo y mercurio en poblaciones de la ribera del río Bogotá: estudio multi-método [Lead and mercury exposure in populations on the banks of the Bogotá River: a multi-method study]. *Revista de salud pública*, 21(1), 1–8. <https://doi.org/10.15446/rsap.v21n1.72700>
- Echeverry, G., Zapata, A. M., Paéz, M. I., Méndez, F. y Peña, M. R. (2014). Valoración del riesgo en salud para un grupo poblacional de la ciudad de Cali-Colombia por exposición a Pb, Cd, Hg, 2-4D y Diuron debido al consumo de agua potable y alimentos. *Biomédica*, 35(0). <https://doi.org/10.7705/biomedica.v35i0.2464>
- Esposito, M., Roma, A. de, La Nucara, R., Picazio, G. y Gallo, P. (2018). Total mercury content in commercial swordfish (*Xiphias gladius*) from different FAO fishing areas. *Chemosphere*, 197, 14–19. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.01.015>
- Ferreira da Silva, S., Oliveira, D. C., Pereira, J. P. G., Castro, S. P., Costa, B. N. S. y Lima, M. d. O. (2019). Seasonal variation of mercury in commercial fishes of the Amazon Triple Frontier, Western Amazon Basin. *Ecological Indicators*, 106, 105549. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105549>
- Ferreira da Silva, S. y Oliveira Lima, M. de (2020). Mercury in fish marketed in the Amazon Triple Frontier and Health Risk Assessment. *Chemosphere*, 248. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.125989>
- França da Silva, Daniel Levi, Pitta da Costa, Meire Ane, Bastos Silva, L. O. y Lopes dos Santos, Walter Nei (2019). Simultaneous determination of mercury and selenium in fish by CVG AFS. *Food Chemistry*, 273, 24–30. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.05.020>
- Fuentes-Gandara, F., Herrera-Herrera, C., Pinedo-Hernández, J., Marrugo-Negrete, J. y Díez, S. (2018). Assessment of human health risk associated with methylmercury in the imported fish marketed in the Caribbean. *Environmental Research*, 165, 324–329. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.05.001>
- Gallego Ríos, S. E., Ramírez Botero, C. M., López Marín, B. E. y Velásquez Rodríguez, C. M. (2018). Evaluation of mercury, lead, and cadmium in the waste material of crevalle jack fish from the Gulf of Urabá, Colombian Caribbean, as a possible raw material in the production of sub-products. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(3), 115. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6480-2>
- Gonzalez, D. J. X., Arain, A. y Fernandez, L. E. (2019). Mercury exposure, risk factors, and perceptions among women of childbearing age in an artisanal gold mining region of the Peruvian Amazon. *Environmental Research*, 179(PtA), 108786. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108786>

- Gutiérrez-Mosquera, H., Sujitha, S. B., Jonathan, M. P., Sarkar, S. K., Medina-Mosquera, F., Ayala-Mosquera, H., Morales-Mira, G. y Arreola-Mendoza, L. (2018). Mercury levels in human population from a mining district in Western Colombia. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 68, 83–90. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2017.12.007>
- Guzmán Barragán, B. L., Gonzalez Rivillas, M. A., Cuero Villegas, M. S. y Olivar Medina, J. D. (2020). Presence of pesticides, mercury and trihalomethanes in the water supply systems of Ibagué, Colombia: threats to human health. *Ambiente E Agua—An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 15(2), 1. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2477>
- Jeevanaraj, P., Hashim, Z., Elias, S. M. y Aris, A. Z. (2016). Mercury accumulation in marine fish most favoured by Malaysian women, the predictors and the potential health risk. *Environmental Science and Pollution Research International*, 23(23), 23714–23729. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7402-x>
- Junaidi, M., Krisnayanti, B. D., Juharfa y Anderson, C. (2019). Risk of Mercury Exposure from Fish Consumption at Artisanal Small-Scale Gold Mining Areas in West Nusa Tenggara, Indonesia. *Journal of Health & Pollution*, 9(21), 190302. <https://doi.org/10.5696/2156-9614-9.21.190302>
- Kershaw, J. L. y Hall, A. J. (2019). Mercury in cetaceans: Exposure, bioaccumulation and toxicity. *The Science of the Total Environment*, 694, 133683. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133683>
- Kim, H., Lee, J., Woo, H. D., Kim, D. W., Oh, J. H., Chang, H. J., Sohn, D. K., Shin, A. y Kim, J. (2020). Dietary mercury intake and colorectal cancer risk: A case-control study. *Edinburgh, Scotland*, 39(7), 2106–2113. <https://doi.org/10.1016/j.clnu.2019.08.025>
- Kimáková, T., Kuzmová, L., Nevolná, Z. y Bencko, V. (2018). Fish and fish products as risk factors of mercury exposure. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine: AAEM*, 25(3), 488–493. <https://doi.org/10.26444/aaem/84934>
- Lacerda, E. M. d. C. B., Souza, G. d. S., Cortes, M. I. T., Rodrigues, A. R., Pinheiro, M. C. N., Silveira, L. C. d. L. y Ventura, D. F. (2019). Comparison of Visual Functions of Two Amazonian Populations: Possible Consequences of Different Mercury Exposure. *Frontiers in Neuroscience*, 13, 1428. <https://doi.org/10.3389/fnins.2019.01428>
- Lino, A. S., Kasper, D., Guida, Y. S., Thomaz, J. R. y Malm, O. (2019). Total and methyl mercury distribution in water, sediment, plankton and fish along the Tapajós River basin in the Brazilian Amazon. *Chemosphere*, 235, 690–700. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.06.212>
- López-Barrera, E. A. y Barragán-Gonzalez, R. G. (2016). Metals and metalloid in eight fish species consumed by citizens of Bogota D.C., Colombia, and potential risk to humans. *Journal of Toxicology and Environmental Health. Part a*, 79(5), 232–243. <https://doi.org/10.1080/15287394.2016.1149130>
- Malvandi, H. y Alahabadi, A. (2019). Evaluation of potential human health risk due to the exposure to mercury via fish consumption of *Alosa* spp. From the southern Caspian Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 143, 66–71. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.04.042>

- Manjarres-Suarez, A. y Olivero-Verbel, J. (2020). Hematological parameters and hair mercury levels in adolescents from the Colombian Caribbean. *Environmental Science and Pollution Research International*, 27(12), 14216–14227. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-07738-z>
- Marshall, B. G., Veiga, M. M., da Silva, H. A. M. y Guimarães, J. R. D. (2020). Cyanide Contamination of the Puyango-Tumbes River Caused by Artisanal Gold Mining in Portovelo-Zaruma, Ecuador. *Current Environmental Health Reports*, 7(3), 303–310. <https://doi.org/10.1007/s40572-020-00276-3>
- Mirlean, N., Ferraz, A. H., Seus-Arrache, E. R., Andrade, C. F. F., Costa, L. P. y Johannesson, K. H. (2019). Mercury and selenium in the Brazilian subtropical marine products: Food composition and safety. *Journal of Food Composition and Analysis*, 84, 103310. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2019.103310>
- Nakamura, M., Hachiya, N., Murata, K.-y., Nakanishi, I., Kondo, T., Yasutake, A., Miyamoto, K.-i., Ser, P. H., Omi, S., Furusawa, H., Watanabe, C., Usuki, F. y Sakamoto, M. (2014). Methylmercury exposure and neurological outcomes in Taiji residents accustomed to consuming whale meat. *Environment International*, 68, 25–32. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.03.005>
- Narváez, D. M., Groot, H., Diaz, S. M., Palma, R. M., Muñoz, N., Cros, M.-P. y Hernández-Vargas, H. (2017). Oxidative stress and repetitive element methylation changes in artisanal gold miners occupationally exposed to mercury. *Heliyon*, 3(9). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2017.e00400>
- Organización Mundial de la Salud. (2017). *Riesgos para la salud relacionados con el trabajo y el medioambiente asociados a la extracción de oro artesanal o a pequeña escala*.
- Palacios-Torres, Y., Caballero-Gallardo, K. y Olivero-Verbel, J. (2018). Mercury pollution by gold mining in a global biodiversity hotspot, the Choco biogeographic region, Colombia. *Chemosphere*, 193, 421–430. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.10.160>
- Pardo, O., Beser, M. I. y Yusà, V. (2014). Probabilistic risk assessment of the exposure to polybrominated diphenyl ethers via fish and seafood consumption in the Region of Valencia (Spain). *Chemosphere*, 104, 7–14. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.12.084>
- Pavilonis, B., Grassman, J., Johnson, G., Diaz, Y. y Caravanos, J. (2017). Characterization and risk of exposure to elements from artisanal gold mining operations in the Bolivian Andes. *Environmental Research*, 154, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.12.010>
- Pinzón-Bedoya, C. H., Pinzón-Bedoya, M. L., Pinedo-Hernández, J., Urango-Cardenas, I. y Marrugo-Negrete, J. (2020). Assessment of Potential Health Risks Associated with the Intake of Heavy Metals in Fish Harvested from the Largest Estuary in Colombia. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(8). <https://doi.org/10.3390/ijerph17082921>
- Ralston, N. V. C. y Raymond, L. J. (2018). Mercury's neurotoxicity is characterized by its disruption of selenium biochemistry. *Biochimica Et Biophysica Acta. General Subjects*, 1862(11), 2405–2416. <https://doi.org/10.1016/j.bbagen.2018.05.009>

- Reichelt-Brushett, A. J., Stone, J., Howe, P., Thomas, B., Clark, M., Male, Y., Nanlohy, A. y Butcher, P. (2017). Geochemistry and mercury contamination in receiving environments of artisanal mining wastes and identified concerns for food safety. *Environmental Research*, 152, 407–418. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.07.007>
- Riaz, A., Khan, S., Muhammad, S., Liu, C., Shah, M. T. y Tariq, M. (2018). Mercury contamination in selected foodstuffs and potential health risk assessment along the artisanal gold mining, Gilgit-Baltistan, Pakistan. *Environmental Geochemistry and Health*, 40(2), 625–635. <https://doi.org/10.1007/s10653-017-0007-6>
- Souza Vieira, J. C., Oliveira, G. de, Pereira Braga, C., da Silva Fernandes, M., Martin de Moraes, P., Rabelo Buzalaf, M. A., Silva de Oliveira, Lincoln Carlos y Magalhães Padilha, P. de (2020). Parvalbumin and Ubiquitin as Potential Biomarkers of Mercury Contamination of Amazonian Brazilian Fish. *Biological Trace Element Research*, 197(2), 667–675. <https://doi.org/10.1007/s12011-020-02026-w>
- Stackelberg, K. von, Li, M. y Sunderland, E. (2017). Results of a national survey of high-frequency fish consumers in the United States. *Environmental Research*, 158, 126–136. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.05.042>
- Subhavana, K. L., Qureshi, A. y Roy, A. (2019). Mercury levels in human hair in South India: Baseline, artisanal goldsmiths and coal-fired power plants. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 29(5), 697–705. <https://doi.org/10.1038/s41370-018-0107-0>
- Vargas Licona, S. P. y Marrugo Negrete, J. L. (2019). Mercurio, metilmercurio y otros metales pesados en peces de Colombia: riesgo por ingesta. *Acta Biológica Colombiana*, 24(2), 232–242. <https://doi.org/10.15446/abc.v24n2.74128>
- Vianna, A. D. S., Matos, E. P. de, Jesus, I. M. de, Asmus, C. I. R. F. y Câmara, V. d. M. (2019). Human exposure to mercury and its hematological effects: A systematic review. *Cadernos De Saude Publica*, 35(2), e00091618. <https://doi.org/10.1590/0102-311x00091618>
- Weinhouse, C., Gallis, J. A., Ortiz, E., Berky, A. J., Morales, A. M., Diringer, S. E., Harrington, J., Bullins, P., Rogers, L., Hare-Grogg, J., Hsu-Kim, H. y Pan, W. K. (2021). A population-based mercury exposure assessment near an artisanal and small-scale gold mining site in the Peruvian Amazon. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 31(1), 126–136. <https://doi.org/10.1038/s41370-020-0234-2>
- Wyatt, L., Ortiz, E. J., Feingold, B., Berky, A., Diringer, S., Morales, A. M., Jurado, E. R., Hsu-Kim, H. y Pan, W. (2017). Spatial, Temporal, and Dietary Variables Associated with Elevated Mercury Exposure in Peruvian Riverine Communities Upstream and Downstream of Artisanal and Small-Scale Gold Mining. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(12). <https://doi.org/10.3390/ijerph14121582>
- Zambrano, R., González, L., Arangure, F., Ortega, J., Paredes, J. y Espinosa, M. (2017). El mercurio y sus consecuencias en la salud. *Revista Fuente Nueva Época*, 5(17).

Zamora-Arellano, N.-Y., Betancourt-Lozano, M., Ilizaliturri-Hernández, C., García-Hernández, J., Jara-Marini, M., Chávez-Sánchez, C. y Ruelas-Inzunza, J. R. (2018). Mercury Levels and Risk Implications Through Fish Consumption on the Sinaloa Coasts (Gulf of California, Northwest Mexico). *Risk Analysis: An Official Publication of the Society for Risk Analysis*, 38(12), 2646–2658. <https://doi.org/10.1111/risa.13185>