

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

ESCUELA DE CIENCIAS QUÍMICAS

**Contenido de Mercurio en Carne de Atún Consumida en
Latinoamérica: Implicaciones en la Salud Pública y
Métodos de Cuantificación**

**Monografía previa a la obtención del título de Química (Licenciado
en Ciencias Químicas)**

IWO ETZEQUIEL GARCIA JIMENEZ

Quito, 2025

Certifico que la Monografía de (la carrera, según el caso), del Sr./Sra./Srta Iwo Etzequiel García Jiménez ha sido concluida de conformidad con las normas establecidas; por lo tanto, puede ser presentada para la calificación correspondiente.

A handwritten signature in blue ink, reading "Luis M. Fernández". The signature is fluid and cursive, with a large initial 'L' and 'F'.

Firma del tutor de la monografía

Tutor (a) de la monografía

Quito, 8 de abril de 2025

Dedicatoria

La presente monografía es muestra del esfuerzo de toda una carrera, del interés por la ciencia, el cuidado de los ecosistemas y el bienestar del planeta. Sin embargo, detrás de todo este recorrido hay muchas personas cuyo apoyo ha sido fundamental.

Quisiera comenzar agradeciendo a mis padres, Maggy Jiménez e Iwo García, cuya dedicación hacia sus hijos ha sido clave para lograr todo lo que soy y he alcanzado hasta ahora. A mi hermana Joselyn García, a quien agradezco por sus consejos y constante preocupación; a mis abuelas Gladys Trujillo y Celia Aguilar, a María Isabel Trujillo y Marlene Trujillo, mujeres que me enseñaron a enfrentar las dificultades con la frente en alto, con cariño y, sobre todo, con respeto.

Agradezco también a mi tutora, la Dra. Lenys Fernández, por su apoyo constante y las oportunidades brindadas para colaborar a su lado; al Dr. Patricio Espinoza, por abrirme las puertas del Grupo de Electroquímica Fundamental y Aplicada, y a todos sus integrantes, quienes han sido un pilar de enseñanza constante.

Además, quiero agradecer a las personas que han sido un apoyo emocional incondicional, que me han permitido aprender de ellas y compartir su amistad: Eliana Velastegui, Viviana Simbaña, Samantha Sosa y Romina Buitrón, mujeres brillantes, cuya fuerza y constancia han sido un gran ejemplo y fuente de felicidad.

A todas las personas que llevo en mi corazón y que no he podido mencionar en esta dedicatoria, gracias por todas las experiencias compartidas. En especial, a Claudia Vasconez, por ser una gran persona y haber vivido esta etapa a mi lado.

Finalmente, agradezco a Dios por darme la oportunidad de ser cada día mejor persona y por bendecirme con esta gran experiencia.

Tabla de contenidos

1.	RESUMEN	4
2.	ABSTRACT.....	5
3.	INTRODUCCIÓN	6
4.	OBJETIVOS	8
	4.1 OBJETIVO GENERAL.....	8
	4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	8
5.	DESARROLLO TEÓRICO.....	9
	5.1. METILACIÓN DE MERCURIO	9
	5.2. AFECCIONES A LA SALUD	9
	5.3. TÉCNICAS INSTRUMENTALES PARA LA CUANTIFICACIÓN DE MERCURIO EN ATÚN.....	11
	5.3.1. Espectroscopia de absorción atómica acoplada a generador de hidruros	11
	5.3.2. Espectroscopia de absorción atómica de vapor frío.....	11
	5.3.3. Espectroscopia de fluorescencia atómica de vapor frío	0
	5.3.4. Espectroscopia de absorción atómica por descomposición térmica	0
	5.3.5. Analizador directo de mercurio	0
	5.3.6. Voltamperometría de barrido anódico por pulso diferencial	0
6.	CONCLUSIONES	1
7.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	3

1. RESUMEN

La presente monografía aborda la problemática del mercurio (Hg) en el atún consumido en Latinoamérica, destacando su impacto en la salud pública y la necesidad de control alimentario. El objetivo principal fue comparar las concentraciones de Hg en distintas especies de atún mediante estudios previos, evaluando su cumplimiento con las normativas internacionales. El desarrollo incluyó un análisis de los procesos de metilación del Hg en ambientes acuáticos, los efectos tóxicos del metilmercurio ($\text{CH}_3\text{-Hg}$) en la salud humana (especialmente en poblaciones vulnerables), y la revisión de técnicas instrumentales empleadas para la cuantificación del metal, como espectrometría de absorción atómica, espectroscopia de fluorescencia atómica, ICP-MS, voltamperometría, entre otros. Los resultados evidencian una variabilidad significativa en los niveles de Hg según especie, país y método empleado. En Ecuador, las concentraciones oscilaron entre 0,022 y 0,60 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; en México, entre 0,06 y 0,15 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; en Chile, entre 0,048 y 0,048 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; en Brasil, entre 0,044 y 1,748 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; y en Colombia, entre 0,35 y 3,1 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Se constató que especies grandes y longevas, como *Thunnus obesus*, presentan mayores niveles de acumulación de Hg que especies pequeñas como *Katsuwonus pelamis*. Si bien la mayoría de las muestras se encuentran dentro del límite internacional de 1,2 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (FAO/OMS), se identificaron casos que lo superan, lo que representa riesgos para consumidores frecuentes. Las conclusiones destacan la necesidad de mejorar el monitoreo, la especificación taxonómica del atún analizado, y la estandarización de métodos de análisis. Además, se recomienda establecer campañas de concienciación y etiquetado claro, con un enfoque en la protección de grupos vulnerables y el fortalecimiento del control alimentario regional.

Palabras clave: análisis instrumental, atún, bioacumulación, mercurio, salud pública

2. ABSTRACT

This monograph addresses the issue of mercury (Hg) contamination in tuna consumed in Latin America, emphasizing its impact on public health and the need for food control. The main objective was to compare Hg concentrations in different tuna species based on previous studies, assessing their compliance with international standards. The study includes an analysis of environmental mercury methylation processes, the toxic effects of methylmercury (CH₃-Hg) on human health (especially in vulnerable populations) and a review of instrumental techniques used for Hg quantification, such as atomic absorption spectroscopy, atomic fluorescence spectroscopy, ICP-MS, voltammetry, and others. Results showed significant variability in Hg levels depending on species, country, and method. In Ecuador, concentrations ranged from 0,022 to 0,60 mg·kg⁻¹; in Mexico, from 0,06 to 0,15 mg·kg⁻¹; in Chile, around 0,048 mg·kg⁻¹; in Brazil, from 0,044 to 1,748 mg·kg⁻¹; and in Colombia, from 0,35 to 3,1 mg·kg⁻¹. Larger and longer-lived species, such as *Thunnus obesus*, had higher Hg accumulation than smaller ones like *Katsuwonus pelamis*. While most samples were within the FAO/WHO limit of 1,2 mg·kg⁻¹, some exceeded this threshold, posing health risks for frequent consumers. The conclusions highlight the need for improved monitoring, taxonomic specification of analyzed tuna, and standardization of analytical methods. Public awareness campaigns and clear labeling are recommended, with a focus on protecting vulnerable populations and strengthening regional food safety control.

Keywords: bioaccumulation, instrumental analysis, mercury, public health, tuna

3. INTRODUCCIÓN

La contaminación de cuerpos de agua es un problema a nivel mundial (Baird & Cann, 2014); específicamente por contaminantes de origen químico como pesticidas, nitratos, fosfatos, percloratos, compuestos procedentes de la extracción de petróleo, fármacos y metales pesados. En ambientes marinos, metales pesados como el mercurio (Hg) se convierten en un gran problema (Baird & Cann, 2014).

El Hg es liberado al medio ambiente por actividades humanas, como la minería y la quema de combustibles fósiles, y puede transformarse en metilmercurio ($\text{CH}_3\text{-Hg}$) por acción de microorganismos acuáticos. El $\text{CH}_3\text{-Hg}$ se absorbe casi por completo en el torrente sanguíneo por vía dietética o inhalación, convirtiéndose en Hg inorgánico tanto en animales como en seres humanos, en la flora intestinal y macrófagos. Este compuesto tóxico se bioacumula en la cadena trófica marina, alcanzando altas concentraciones en especies como los atunes (Baird & Cann, 2014), afectando a la biodiversidad marina y por ende a la salud humana, ya que el consumo de pescado contaminado puede causar efectos neurológicos y daños en el sistema nervioso, especialmente en poblaciones vulnerables como niños y mujeres embarazadas.

Se ha reportado que el $\text{CH}_3\text{-Hg}$ se desplaza fácilmente a través de la placenta y se encuentran concentraciones más altas en la sangre del cordón umbilical que en la sangre materna, presencia de complejos de glutatión y péptidos sulfhidrilo en la bilis, se distribuye rápidamente a todos los tejidos y se acumula en altas concentraciones en el cerebro (Gad, 2014). Aunque los adultos pueden experimentar efectos neurológicos al exponerse a altas concentraciones de $\text{CH}_3\text{-Hg}$, las advertencias han surgido principalmente debido a la creciente preocupación por los efectos del $\text{CH}_3\text{-Hg}$ en el sistema nervioso en desarrollo de los fetos y los niños en crecimiento. Si bien la barrera placentaria puede retener muchos elementos tóxicos, el $\text{CH}_3\text{-Hg}$ es una excepción, ya que no solo atraviesa la placenta, sino que se acumula en concentraciones más altas en el feto que en la madre (Iyengar & Rapp, 2001).

La vía fecal es responsable del 90 % de la eliminación total de Hg tras la exposición; ya que la mayor parte del $\text{CH}_3\text{-Hg}$, resultante de la secreción biliar, es desmetilado por la flora intestinal y eliminado en las heces como Hg inorgánico. El $\text{CH}_3\text{-Hg}$ restante puede entrar en la circulación enterohepática, mientras que un pequeño porcentaje de mercurio inorgánico se absorbe y se distribuye a los tejidos. Se estima que la vida media del $\text{CH}_3\text{-Hg}$ en los seres humanos que comen pescado es de entre 39 y 70 días (Gad, 2014).

La intoxicación por $\text{CH}_3\text{-Hg}$ ha sido de gran impacto por lo que se han buscado medidas para evitar el envenenamiento. El Hg y el azufre (S) al unirse forman complejos, siendo esta propiedad de unión la base de la terapia quelante utilizada como tratamiento en casos de intoxicación aguda por Hg. Sin embargo, los complejos entre Hg y selenio (Se) son menos conocidos, pero son los que mejor afinidad presentan. Fisiológicamente, el S es mucho más abundante que el Se; sin embargo, debido a la mayor afinidad del Se, el Hg se une selectivamente para formar seleniuros de mercurio insolubles, por lo que asume que esta interacción tiene un efecto protector, ya que previene los efectos negativos por la intoxicación con Hg (Raymond & Ralston, 2020).

Dado el impacto del Hg en la salud pública y el ecosistema marino, resulta esencial evaluar las concentraciones de este metal en productos de consumo como el atún, una de las especies más afectadas por la bioacumulación de $\text{CH}_3\text{-Hg}$. En este contexto, mediante la presente monografía se persigue consolidar datos comparativos sobre los niveles de Hg en diferentes especies de atún consumidas en Latinoamérica, así como analizar los métodos de cuantificación empleados y sus limitaciones. Además, se examinarán los riesgos asociados al consumo de este metal que alerten a establecer estrategias que contribuyan al fortalecimiento del control alimentario y la seguridad sanitaria en Ecuador y la región.

4. OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Comparar las concentraciones de Hg en distintas especies de atún consumidas en Latinoamérica, a partir de estudios previos, con el propósito de evaluar el cumplimiento de las normativas de control alimentario y sus implicaciones para la salud pública.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Comparar las concentraciones de Hg reportadas en diferentes especies de atún consumidas en Latinoamérica, considerando variaciones geográficas y ambientales.
- Analizar los métodos empleados para la detección y cuantificación de Hg en atún, evaluando su sensibilidad, precisión y cumplimiento con estándares internacionales.
- Examinar los efectos del consumo de atún con altos niveles de Hg en la salud humana, con énfasis en poblaciones vulnerables, y su relación con la normativa de seguridad alimentaria.

5. DESARROLLO TEÓRICO

5.1. METILACIÓN DE MERCURIO

En el medio ambiente, el $\text{CH}_3\text{-Hg}$ se produce principalmente a través de la metilación del Hg inorgánico divalente, Hg (II), un proceso facilitado por microorganismos con genes “hgc” (hgcA y hgcB), que codifican una proteína corrinoide y ferredoxina. Estos microorganismos prosperan en ambientes con poco oxígeno, como arrozales, humedales, sedimentos y aguas anóxicas, donde las condiciones redox regulan su actividad y la disponibilidad de Hg (II). Además, de bacterias reductoras de sulfato, se han identificado otros metiladores de Hg (II), incluidas bacterias reductoras de hierro, metanógenos, fermentadores y sintróficos, lo que muestra la diversidad de organismos involucrados en la metilación (Capo et al., 2022).

5.2. AFECCIONES A LA SALUD

Los estudios sobre afecciones en la salud provocadas por $\text{CH}_3\text{-Hg}$ se relacionan con hechos catastróficos de envenenamiento por exposición en Minamata e Irak. En donde el resultado de la exposición extremadamente alta causó daños neurológicos e incluso la muerte. Además, se determinó que el feto es propenso a sufrir afecciones en su crecimiento, la migración de neuronas y daño en el sistema nervioso central, esto debido a la alta afinidad del Hg por la hemoglobina fetal (National Research Council (US) Committee on the Toxicological Effects of Methylmercury, 2000). Por otra parte, el consumo de pescado contaminado con $\text{CH}_3\text{-Hg}$ se relaciona con el riesgo de infarto agudo de miocardio. Los efectos cardiovasculares del $\text{CH}_3\text{-Hg}$ podrían deberse a la capacidad del Hg de mejorar la peroxidación lipídica a través de una reacción de tipo Fenton (Salonen et al., 1995).

5.2.1. LÍMITES DE CONSUMO EN HUMANOS

Las organizaciones internacionales han establecido límites específicos para la concentración de Hg en alimentos para consumo humano, especialmente en pescados y

mariscos, debido a los riesgos que este metal pesado representa para la salud los cuales se muestran en la Tabla 1. Ecuador por su parte se rige, como miembro de la Comisión del Codex Alimentarius desde 1970, a esta normativa alimentaria (Ministerio de Salud Pública del Ecuador, 2025).

Tabla 1. Medidas regulatorias de contenido de mercurio total en atún

Agente regulador	Valor límite (mg/kg)	Referencia
Codex Alimentarius (FAO/OMS)	1,2	(FAO/OMS, 2024)
Unión Europea	1,0	(AGRINFO, 2022)
ARCSA	1,2	-

5.2.3. AFINIDAD DE CH₃-Hg CON SELENIO

Hace aproximadamente 40 años, el Se se consideraba como un veneno, ahora se sabe que es esencial para el funcionamiento normal de muchos sistemas del cuerpo y que su deficiencia puede tener consecuencias adversas en estos (Raymond & Ralston, 2020).

El Se puede actuar como agente de crecimiento; tiene potentes propiedades antioxidantes y anticancerígenas; y contribuye a la homeostasis normal de la hormona tiroidea, la inmunidad y la fertilidad. Dos de los 22 aminoácidos primarios se distinguen por su posesión de Se: la selenometionina y la selenocisteína. La constante de afinidad por el Se y el Hg de la selenocisteína es de $\sim 10^{-22}$, y los seleniuros libres que se forman durante cada ciclo de síntesis de selenocisteína tienen afinidad muy alta por el Hg: 10^{-45} . Por otro lado, los precipitados de seleniuro de Hg presentan una solubilidad (Kps) extremadamente baja, que oscila entre 10^{-58} y 10^{-65} ; por lo tanto, se cree que son metabólicamente inertes. No solo el Se influye en la biodisponibilidad del Hg, sino que el Hg también podría influir en la biodisponibilidad del Se. Por lo tanto, la comprensión del efecto protector del Se contra la exposición al Hg podría estar equivocada. La propensión del Hg a secuestrar Se en el cerebro y los tejidos endocrinos podría inhibir la formación de proteínas esenciales dependientes del Se (Raymond & Ralston, 2020).

5.3. TÉCNICAS INSTRUMENTALES PARA LA CUANTIFICACIÓN DE MERCURIO EN ATÚN

Es importante identificar las técnicas instrumentales utilizadas en el análisis y determinación de Hg en atún las cuales se especifican en la Tabla 2, donde, además, se menciona los límites de detección que presenta cada metodología, la especie de atún analizado, el país donde se analizó el atún y las concentraciones encontradas en los respectivos estudios realizados.

5.3.1. Espectroscopia de absorción atómica acoplada a generador de hidruros

La espectroscopia de absorción atómica (AAS, por sus siglas en inglés) es una técnica instrumental que se utiliza en la determinación de metales, como Hg, en una muestra. Esta mide la absorción de luz de átomos libres en estado gaseoso. En la generación de hidruro, el analito se convierte en un hidruro volátil mediante un agente reductor. A continuación, la muestra se atomiza mediante una llama, por la cual se pasa un haz de luz a una longitud de onda específica. Dando como resultado la cantidad de luz absorbida proporcional a la concentración del metal en la muestra (Lalanguí-López et al., 2017; Ordiano-Flores et al., 2012).

5.3.2. Espectroscopia de absorción atómica de vapor frío

La espectroscopia de absorción atómica de vapor frío (CV, por sus siglas en inglés-AAS) es una técnica especializada de AAS que se utiliza específicamente para la detección de Hg, donde el Hg se reduce a su forma elemental (vapor frío) y luego se mide mediante AAS. El vapor de mercurio absorbe la luz ultravioleta a una longitud de onda específica, lo que permite su cuantificación (Lacerda et al., 2017).

Tabla 2. Técnicas instrumentales, límites de detección, especies de atún, países de recolección de muestras en el análisis de mercurio en atún , concentraciones halladas en las muestras y referencias de donde se tomó los datos.

Técnica	Límite de detección ($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Especie de atún	País	Concentración de Hg ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Referencias
Espectrometría de absorción atómica por descomposición térmica y amalgama	0,5	Atún en lata sin especie a especificar	Brasil	0,071–1,06	(de Paiva et al., 2017)
Espectrometría de absorción atómica de vapor frío	0,03	<i>Thunnus albacares</i> , <i>Thunnus obesus</i>	Brasil	0,048–0,500 0,095–1,748	(Alva et al., 2020)
Analizador directo de mercurio	94	Atún en lata sin especie a especificar	Brasil	0,044–0,460	(Lacerda et al., 2017b)
Espectrofotometría de fluorescencia atómica de vapor frío	3	Atún sin especie a especificar	Chile	0,048	(Muñoz et al., 2005)
Analizador directo de mercurio	0,001	Atún en lata sin especie a especificar	Colombia	0,35-0,84	(Alcala-Orozco et al., 2017)
Espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente	0,15	Atún en lata sin especie a especificar	Colombia	N/A-3,1	(Alcala-Orozco et al., 2021)
Espectrofotometría de absorción atómica acoplada a un generador de hidruros	N/A	Atún en lata sin especie a especificar	Ecuador	0,022-0,093	(Lalangui-López et al., 2017)
Espectrofotometría de fluorescencia atómica de vapor frío	0,10	<i>Thunnus albacares</i> , <i>Thunnus obesus</i> , <i>Katsuwonus pelamis</i>	Ecuador	0,14-0,41	(Aguilar-Miranda et al., 2024)
Voltamperometría de barrido anódico por pulsos diferenciales	3,9781	Atún en lata sin especie a especificar	Ecuador	0,34-0,60	(Vásquez-Velarde et al., 2023)
Espectrofotometría de absorción atómica acoplada a un generador de hidruros	N/A	<i>Thunnus albacares</i>	México	0,06-0,15	(Ordiano-Flores et al., 2012)

5.3.3. Espectroscopia de fluorescencia atómica de vapor frío

La espectroscopia de fluorescencia atómica (AFS, por sus siglas en inglés) de vapor frío es similar a CV-AAS, pero en lugar de medir la absorción mide la fluorescencia emitida por los átomos de Hg cuando son excitados por la luz ultravioleta. El vapor de Hg se genera al reducir los compuestos de Hg a Hg elemental, que luego es excitado por la luz ultravioleta y se mide la fluorescencia emitida (Aguilar-Miranda et al., 2024; Muñoz et al., 2005).

5.3.4. Espectroscopia de absorción atómica por descomposición térmica

Espectroscopia de absorción atómica por descomposición térmica y amalgama (TDA AAS, por sus siglas en inglés) es una técnica implica la descomposición térmica de la muestra para liberar Hg, que luego queda atrapado en un amalgamador de oro. El Hg se libera posteriormente calentando el amalgamador y se mide mediante AAS (de Paiva et al., 2017).

5.3.5. Analizador directo de mercurio

El analizador directo de mercurio (DMA, por sus siglas en inglés) es un instrumento automatizado que combina descomposición térmica, conversión catalítica, amalgamación y AAS. La muestra se descompone térmicamente en un entorno rico en oxígeno, liberando Hg en estado gaseoso. Luego, el Hg queda atrapado en un amalgamador de oro, que posteriormente se calienta para liberar el mercurio para su detección mediante espectrometría de absorción atómica (Alcala-Orozco et al., 2017; Alva et al., 2020). Además, después de la descomposición térmica, al liberar mercurio se puede detectar mediante espectroscopia de absorción atómica (Alcala-Orozco et al., 2021).

5.3.6. Voltamperometría de barrido anódico por pulso diferencial

La voltamperometría de barrido anódico por pulso diferencial (DPASV, por sus siglas en inglés) es una técnica electroquímica que se utiliza para detectar trazas de metales. Implica dos pasos: preconcentración, en la que los iones metálicos se reducen y se depositan sobre un electrodo, y redisolución, en la que los metales depositados se oxidan nuevamente a solución, lo que produce una corriente proporcional a la concentración del metal (Vásquez-Velarde et al., 2023).

6. CONCLUSIONES

Los estudios en esta monografía emplearon diversos métodos (espectrometría de absorción atómica de vapor frío, analizadores directos de mercurio, ICP-MS), con límites de detección que oscilan entre 0,001 y 94 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. Si bien la mayoría de las técnicas son altamente sensibles (analyzer directo de mercurio a 0,001 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$), algunos métodos (voltamperometría) pueden subestimar las concentraciones mínimas (Tabla 2).

Los niveles de Hg varían significativamente entre países, en Chile (0,044–0,460 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) y en Ecuador (0,022–0,093 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), principalmente en especies no especificadas o pequeñas, como *Katsuwonus pelamis*. Presentan valores mínimos de concentración de Hg en atún. Al otro extremo, países como Brasil (hasta 1,748 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) y Colombia (hasta 3,1 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), presentan valores muy elevados de Hg en las especies, a menudo en especies más grandes, como *Thunnus obesus* o el atún en lata no especificado. Las especies más grandes y longevas (*Thunnus obesus*) muestran sistemáticamente concentraciones de Hg más altas que las más pequeñas (*Katsuwonus pelamis*), lo que coincide con la dinámica de bioacumulación y biomagnificación de mercurio en peces depredadores.

Brasil y Colombia reportan los niveles más altos de Hg, posiblemente relacionados con la contaminación industrial o la dinámica del mercurio oceánico. En contraste, Ecuador y México muestran concentraciones más bajas, posiblemente debido a la selección de especies, predominio del atún aleta amarilla (*Thunnus albacares*) o a ambientes marinos más limpios. La mayoría de las muestras se encuentran dentro de los límites de la FAO/OMS de 1,2 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ para Hg en pescado. Sin embargo, valores atípicos, como en Brasil (1,748 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) y Colombia (3,1 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) superan este umbral, lo que representa posibles riesgos para la salud si se consumen con frecuencia. Si bien los niveles medios de Hg generalmente se encuentran por debajo de los límites de seguridad, los grupos vulnerables (mujeres embarazadas, niños) deben limitar el consumo de atún de alto riesgo (atún en lata proveniente de regiones con alto contenido de Hg o especies grandes). Además, existen brechas críticas en las regiones de alto riesgo, lo que distorsiona el estudio de esta problemática. Perú, a pesar de la grave contaminación por Hg causada por la minería artesanal carece de estudios específicos sobre el atún (Biffi et al., 2020). Esta omisión es alarmante dado el papel de Perú en la pesca mundial. Además, en este estudio no se encontró investigaciones relevantes en donde se mencione la metodología utilizada, límites de cuantificación y especies de atún en países como Argentina y Venezuela, por lo que dicha información no se tomó en cuenta.

Los estudios reportados en la literatura revisada, a menudo no especifican la especie de atún, lo que complica las evaluaciones de riesgo. Las investigaciones futuras deberían priorizar la

identificación y el muestreo de especies de diversas zonas de pesca y estandarizar los métodos de detección de Hg para mejorar la repetibilidad y reproducibilidad de los estudios.

La contaminación por Hg en el atún consumido en Latinoamérica, refleja una compleja interacción entre la biología de las especies, factores geográficos y metodologías analíticas. Si bien la mayoría de las muestras cumplen con las normas internacionales de seguridad, la presencia de niveles elevados de Hg en ciertas regiones y especies resalta la necesidad de un monitoreo específico, un etiquetado transparente y la concienciación pública para mitigar los riesgos para la salud. La colaboración entre investigadores, legisladores y la industria pesquera es esencial para garantizar un consumo sostenible y seguro de atún.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- AGRINFO. (2022). *Mercury maximum levels - AGRINFO Platform*.
https://agrinfo.eu/book-of-reports/mercury-maximum-levels/?utm_source=chatgpt.com
- Aguilar-Miranda, A., Fernández, L., Yáñez-Jácome, G. S., Alcoser-Pinto, B., Zambrano, H., Paz-Suconota, F., & Espinoza-Montero, P. (2024). Total mercury exposure through canned tuna in water sold in Quito, Ecuador. *Scientific Reports* 2024 14:1, 14(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-79430-y>
- Alcala-Orozco, M., Balcom, P. H., Sunderland, E. M., Olivero-Verbel, J., & Caballero-Gallardo, K. (2021). Essential and toxic elements in sardines and tuna on the Colombian market. *Food Additives & Contaminants: Part B*, 14(3), 206–218. <https://doi.org/10.1080/19393210.2021.1926547>
- Alcala-Orozco, M., Morillo-Garcia, Y., Caballero-Gallardo, K., & Olivero-Verbel, J. (2017). Mercury in canned tuna marketed in Cartagena, Colombia, and estimation of human exposure. *Food Additives and Contaminants: Part B Surveillance*, 10(4), 241–247. <https://doi.org/10.1080/19393210.2017.1323803>
- Alva, C. V., Mársico, E. T., Ribeiro, R. de O. R., Carneiro, C. da S., Simões, J. S., & Ferreira, M. da S. (2020). Concentrations and health risk assessment of total mercury in canned tuna marketed in Southeast Brazil. *Journal of Food Composition and Analysis*, 88, 103357. <https://doi.org/10.1016/J.JFCA.2019.103357>
- Baird, C., & Cann, M. (2014). *Química ambiental* (Segunda edición, pp. 521–522). Editorial Reverté.
- Biffi, D., López-Mobilia, A., Kelez, S., Williams, D. A., Chumchal, M. M., & Weinburgh, M. (2020). Mislabelling and high mercury content hampers the efforts of market-based seafood initiatives in Peru. *Scientific Reports* 2020 10:1, 10(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-77338-x>
- Capo, E., Feng, C., Bravo, A. G., Bertilsson, S., Soerensen, A. L., Pinhassi, J., Buck, M., Karlsson, C., Hawkes, J., & Björn, E. (2022). Expression Levels of hgcAB Genes and Mercury Availability Jointly Explain Methylmercury Formation in Stratified Brackish Waters. *Environmental Science and Technology*, 56(18), 13119–13130. https://doi.org/10.1021/ACS.EST.2C03784/ASSET/IMAGES/LARGE/ES2C03784_0005.JPEG

- de Paiva, E. L., Morgano, M. A., & Milani, R. F. (2017). Cadmium, lead, tin, total mercury, and methylmercury in canned tuna commercialised in São Paulo, Brazil. *Food Additives and Contaminants: Part B Surveillance*, 10(3), 185–191. <https://doi.org/10.1080/19393210.2017.1311379>
- FAO/OMS. (2024). *GENERAL STANDARD FOR CONTAMINANTS AND TOXINS IN FOOD AND FEED*.
- Gad, S. C. (2014). Methylmercury. En *Encyclopedia of Toxicology: Third Edition* (pp. 318–320). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386454-3.00881-2>
- Iyengar, G. V., & Rapp, A. (2001). Human placenta as a ‘dual’ biomarker for monitoring fetal and maternal environment with special reference to potentially toxic trace elements. Part 3: Toxic trace elements in placenta and placenta as a biomarker for these elements. *Science of The Total Environment*, 280(1–3), 221–238. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(01\)00827-0](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(01)00827-0)
- Lacerda, L. D., Goyanna, F., Bezerra, M. F., & Silva, G. B. (2017a). Mercury Concentrations in Tuna (*Thunnus albacares* and *Thunnus obesus*) from the Brazilian Equatorial Atlantic Ocean. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 98(2), 149–155. <https://doi.org/10.1007/S00128-016-2007-0>
- Lacerda, L. D., Goyanna, F., Bezerra, M. F., & Silva, G. B. (2017b). Mercury Concentrations in Tuna (*Thunnus albacares* and *Thunnus obesus*) from the Brazilian Equatorial Atlantic Ocean. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 98(2), 149–155. <https://doi.org/10.1007/S00128-016-2007-0>
- Lalangui-López, K. I., Lema-Chóez, E. A., García-Larreta, F. S., Mariscal-Santi, W. E., & Mariscal-García V Guayaquil, R. S. (2017). Determinación de Mercurio en atún enlatado por Espectrofotometría de Absorción Atómica. *Dominio de las Ciencias, ISSN-e 2477-8818, Vol. 3, N°. 4, 1, 2017, págs. 148-164*, 3(4), 148–164. <https://doi.org/10.23857/dom.cien.pocaip.2017.3.4.jul>
- Ministerio de Salud Pública del Ecuador. (2025). *Ecuador y el Codex Alimentarius: Un compromiso con la inocuidad de los alimentos – Ministerio de Salud Pública*. <https://www.salud.gob.ec/ecuador-y-el-codex-alimentarius-un-compromiso-con-la-inocuidad-de-los-alimentos/>
- Muñoz, O., Bastias, J. M., Araya, M., Morales, A., Orellana, C., Rebolledo, R., & Velez, D. (2005). Estimation of the dietary intake of cadmium, lead, mercury, and arsenic by the population of Santiago (Chile) using a Total Diet Study. *Food and Chemical Toxicology*, 43(11), 1647–1655. <https://doi.org/10.1016/J.FCT.2005.05.006>

- National Research Council (US) Committee on the Toxicological Effects of Methylmercury. (2000). Toxicological Effects of Methylmercury. En *Toxicological Effects of Methylmercury*. National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/9899>
- Ordiano-Flores, A., Rosiles-Martínez, R., & Galván-Magaña, F. (2012). Biomagnification of mercury and its antagonistic interaction with selenium in yellowfin tuna *Thunnus albacares* in the trophic web of Baja California Sur, Mexico. *Ecotoxicology and environmental safety*, *86*, 182–187. <https://doi.org/10.1016/J.ECOENV.2012.09.014>
- Raymond, L. J., & Ralston, N. V. C. (2020). Mercury: selenium interactions and health implications. *NeuroToxicology*, *81*, 294–299. <https://doi.org/10.1016/J.NEURO.2020.09.020>
- Salonen, J. T., Seppänen, K., Nyssönen, K., Korpela, H., Kauhanen, J., Kantola, M., Tuomilehto, J., Esterbauer, H., Tatzber, F., & Salonen, R. (1995). Intake of mercury from fish, lipid peroxidation, and the risk of myocardial infarction and coronary, cardiovascular, and any death in eastern Finnish men. *Circulation*, *91*(3), 645–655. <https://doi.org/10.1161/01.CIR.91.3.645>
- Vásquez-Velarde, M., Fernández, L., Bolaños-Méndez, D., Burbano-Erazo, H., Alvarez-Paguay, J., Carrera, P., & Espinoza-Montero, P. J. (2023). Evaluation of a gold-nanoparticle-modified carbon-fiber microelectrode to quantify mercury in canned tuna sold in Ecuador. *Chemosphere*, *338*, 139483. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2023.139483>