

REVISIÓN

Impact of Mercury Poisoning in Rivers: A Bibliometric Review of Human Health Effects

Impacto del envenenamiento por mercurio en ríos: una revisión bibliométrica de las afectaciones a la salud humana

Ana María Chaves Cano¹  

¹Fundación Universitaria Juan N. Corpas. Bogotá, Colombia.

Citar como: Chaves Cano AM. Impact of Mercury Poisoning in Rivers: A Bibliometric Review of Human Health Effects. Environmental Research and Ecotoxicity. 2025; 4:172. <https://doi.org/10.56294/ere2025172>

Enviado: 17-05-2024

Revisado: 28-11-2024

Aceptado: 03-04-2025

Publicado: 04-04-2025

Editor: Manickam Sivakumar 

Autor para la correspondencia: Ana María Chaves Cano 

ABSTRACT

Mercury poisoning in rivers poses a serious threat to aquatic ecosystems and human health, particularly for communities reliant on these resources. This article presents a bibliometric review of scientific literature (2015-2025) to analyze the impact of mercury in rivers and its health effects, identifying research trends and gaps. The methodology involved a Scopus search using key terms such as “mercury poisoning,” “rivers,” and “human health,” selecting 1,194 articles analyzed through bibliometric indicators and content analysis with Bibliometrix. Results revealed a progressive increase in publications, peaking in 2023-2024, reflecting growing global concern. Four main thematic areas were identified: (1) toxicity mechanisms and bioaccumulation of methylmercury, (2) health effects, particularly in vulnerable groups, (3) risk assessment and monitoring methodologies, and (4) mitigation and remediation strategies. Key findings highlighted disparities in artisanal mining regions, advances in detection technologies, and challenges in implementing policies like the Minamata Convention. The study concludes that while robust evidence exists on mercury risks, gaps persist in harmonizing methods and applying sustainable solutions.

Keywords: Mercury; Rivers; Human Health; Bibliometrics; Methylmercury; Pollution.

RESUMEN

El envenenamiento por mercurio en ríos representa una grave amenaza para los ecosistemas acuáticos y la salud humana, especialmente en comunidades que dependen de estos recursos. Este artículo presenta una revisión bibliométrica de la literatura científica (2015-2025) para analizar el impacto del mercurio en ríos y sus afectaciones a la salud, identificando tendencias y vacíos de investigación. La metodología se basó en una búsqueda en Scopus utilizando términos clave como “mercury poisoning”, “rivers” y “human health”, seleccionando 1,194 artículos que fueron analizados mediante indicadores bibliométricos y análisis de contenido con Bibliometrix. Los resultados mostraron un aumento progresivo de publicaciones, con un pico en 2023-2024, reflejando la creciente preocupación global. Se identificaron cuatro ejes temáticos principales: (1) mecanismos de toxicidad y bioacumulación del metilmercurio, (2) efectos en la salud, particularmente en grupos vulnerables, (3) metodologías de monitoreo y evaluación de riesgo, y (4) estrategias de mitigación y remediación. Destacaron las disparidades en regiones con minería artesanal, los avances en tecnologías de detección y los desafíos en la implementación de políticas como el Convenio de Minamata. El estudio concluye que, aunque existe un sólido cuerpo de evidencia sobre los riesgos del mercurio, persisten brechas en la armonización de métodos y la aplicación de soluciones sostenibles.

Palabras clave: Mercurio; Ríos; Salud Humana; Bibliometría; Metilmercurio; Contaminación.

INTRODUCCIÓN

El envenenamiento por mercurio se ha convertido en un importante problema ambiental y de salud pública en las últimas décadas.^(1,2) El mercurio es un metal pesado que representa un riesgo significativo para el medioambiente y la salud en los ecosistemas acuáticos, particularmente en su forma metilada.⁽³⁾ La principal fuente de contaminación del suelo, como señala Teng et al.⁽⁴⁾ proviene de la liberación natural, pero las actividades humanas también contribuyen al problema, especialmente cerca de las zonas de extracción de mercurio.

Los ríos, como sistemas hídricos fundamentales, están particularmente expuestos a la contaminación por mercurio.⁽⁵⁾ Este metal ingresa a los cuerpos de agua a través de sedimentos, macrófitos y peces, como indican Gutierrez-Mosquera et al.⁽⁶⁾, con mayor biodisponibilidad en los peces y posibles riesgos para la salud de los carnívoros. La metilación del mercurio en ambientes acuáticos provoca la formación de metilmercurio, este compuesto, advierte Jeong et al.⁽⁷⁾, plantea importantes riesgos de toxicidad para los organismos acuáticos a través de bioacumulación y biomagnificación, lo que produce efectos negativos incluso en concentraciones bajas.

La exposición al metilmercurio se ha asociado con diversas afecciones a la salud, incluyendo trastornos neurológicos⁽⁸⁾, efectos en el desarrollo cognitivo en niños⁽⁹⁾, y disfunciones motoras.⁽¹⁰⁾ Las poblaciones más vulnerables, como las comunidades indígenas que dependen de la pesca como fuente primaria de alimento, están en riesgo elevado de acuerdo a Martoredjo et al.⁽¹¹⁾ Dada la complejidad del problema y su impacto en la salud pública, es fundamental realizar un análisis exhaustivo de la literatura existente que aborde la relación entre la contaminación por mercurio en ríos y sus efectos en la salud humana.^(12,13)

A pesar de los avances en la investigación sobre los impactos del mercurio, persisten importantes vacíos de conocimiento, particularmente en lo que respecta a las diferencias regionales en la exposición, los efectos sinérgicos con otros contaminantes y las estrategias más efectivas para su mitigación.⁽¹⁴⁾ Este artículo tiene como objetivo presentar una revisión bibliométrica que sintetice la información disponible sobre el impacto del envenenamiento por mercurio en ríos, enfocándose en las afectaciones a la salud humana.

MÉTODO

Diseño de la Investigación

Este estudio se basa en un enfoque bibliométrico^(15,16) para analizar la producción científica relacionada con el impacto del envenenamiento por mercurio en ríos y sus efectos en la salud humana. La bibliometría permite cuantificar y evaluar tendencias en la literatura académica mediante indicadores de productividad, impacto y colaboración.^(17,18,19) Para garantizar una revisión sistemática y reproducible, se siguieron las etapas propuestas por metodologías estandarizadas.⁽²⁰⁾

Fuente de Datos y Estrategia de Búsqueda

La recolección de datos se realizó en Scopus, una de las bases de datos bibliográficas más exhaustivas y utilizadas en revisiones científicas debido a su amplia cobertura de revistas indexadas. La fórmula de búsqueda se construyó mediante operadores booleanos y términos clave en inglés, dado que es el idioma predominante en la literatura científica. La consulta aplicada fue: *(TITLE-ABS-KEY ("mercury poisoning" OR "mercury contamination" OR "methylmercury") AND TITLE-ABS-KEY ("rivers" OR "aquatic ecosystems" OR "freshwater") AND TITLE-ABS-KEY ("human health" OR "public health" OR "neurotoxicity" OR "health effects")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE, "re"))*

Esta ecuación aseguró la recuperación de artículos originales y revisiones, excluyendo otros tipos de documentos como conferencias o editoriales. Además, se aplicaron filtros temporales para abarcar estudios publicados entre 2015 y 2025, con el fin de analizar la evolución reciente del conocimiento en este campo.

Criterios de Selección y Procesamiento de Datos

Los registros obtenidos fueron depurados mediante un proceso de selección en dos fases: primero, se eliminaron duplicados y documentos no relevantes mediante revisión de títulos y resúmenes; posteriormente, se evaluó la pertinencia de los artículos restantes mediante lectura crítica del texto completo. Solo se incluyeron investigaciones que abordaran explícitamente la relación entre la contaminación por mercurio en ríos y sus afectaciones a la salud humana. Los datos extraídos se organizaron en una matriz que incluyó variables como año de publicación, país de origen, y red de co-ocurrencias de palabras clave. Esta información fue procesada mediante Bibliometrix (en R).

Análisis Bibliométrico

El estudio combinó métricas de desempeño e impacto científico con análisis cualitativos. Entre los indicadores cuantitativos se consideraron:

- Productividad anual: Evolución temporal del número de publicaciones.

- Redes de colaboración: Análisis de coautorías para identificar grupos de investigación influyentes.
- Mapas de co-palabras: Agrupación de términos clave para detectar líneas de investigación dominantes.

Adicionalmente, se realizó un análisis de contenido para categorizar los hallazgos en ejes temáticos. Este enfoque mixto permitió no solo cuantificar la producción académica, sino también interpretar su significado en el contexto de la salud ambiental.

Limitaciones

Si bien este método garantiza una revisión sistemática, se reconocen ciertas limitaciones, como la posible exclusión de estudios relevantes indexados en otras bases de datos (Web of Science, PubMed) o publicados en idiomas distintos al inglés. Asimismo, el sesgo inherente a los algoritmos de recuperación de Scopus podría afectar la exhaustividad de los resultados. No obstante, la rigurosidad en la estrategia de búsqueda y el uso de herramientas validadas minimizan estos riesgos, asegurando una aproximación robusta al estado del arte.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La fórmula de búsqueda de información empleada arrojó un total de 1194 documentos distribuidos por año de publicación en la figura 1. El pico más amplio de publicaciones por año se observó en 2023 con 156 estudios, muy cercano a lo obtenido en 2024 (155 estudios). A lo largo del presente año 2025 se observa la publicación de 50 estudios, casi 1/3 con respecto al año anterior.

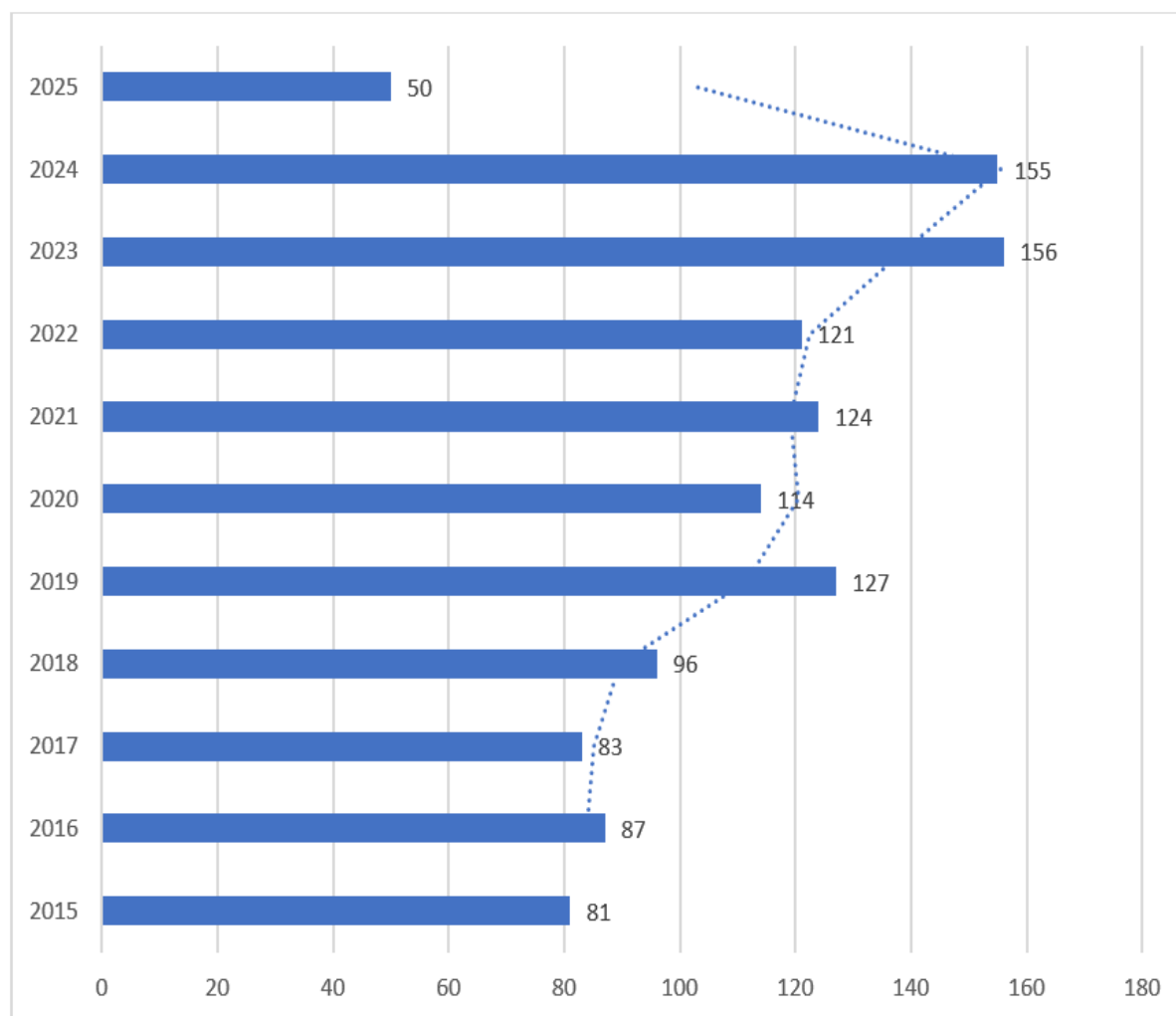


Figura 1. Documentos distribuidos por año de publicación

El análisis de redes de colaboración identificó que los autores más prominentes en el campo de estudio centran sus investigaciones principalmente en el análisis de los efectos y consecuencias del mercurio y el

metilmercurio. Otras colaboraciones se observan en el estudio de sus efectos en la vida vegetal y animal y los riesgos para la salud (figura 2).

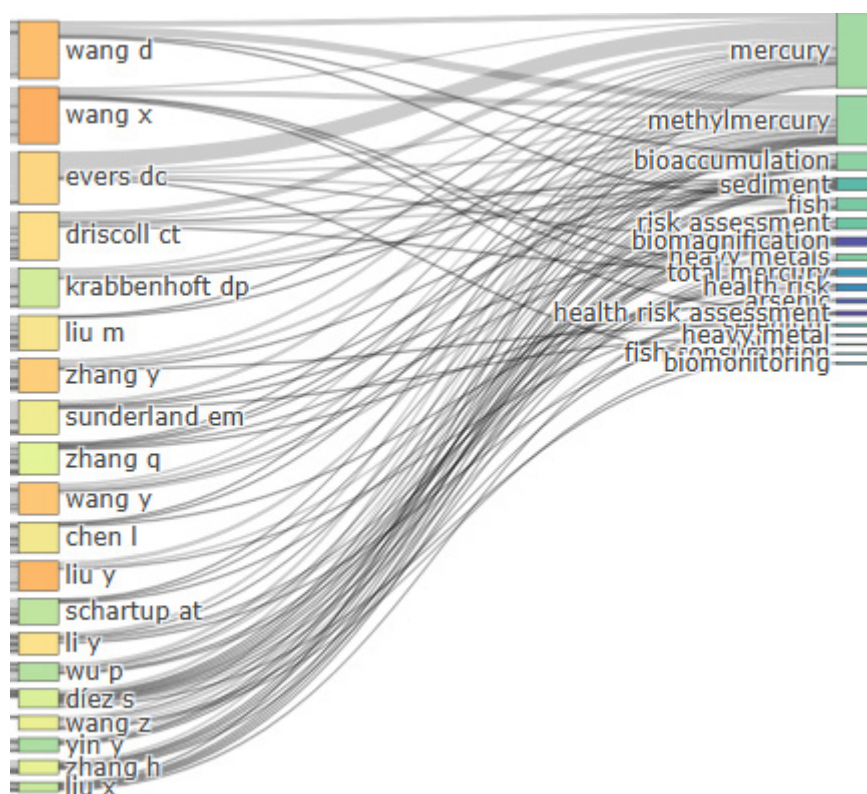


Figura 2. Redes de colaboración entre autores

El análisis de ejes temáticos que se presenta en la Figura 3 se puede englobar en cuatro ejes temáticos emergentes: (1) mecanismos de toxicidad y bioacumulación del metilmercurio, (2) efectos en la salud poblacional, especialmente en grupos vulnerables, (3) metodologías de monitoreo y evaluación de riesgo, y (4) estrategias de mitigación y remediación ambiental.

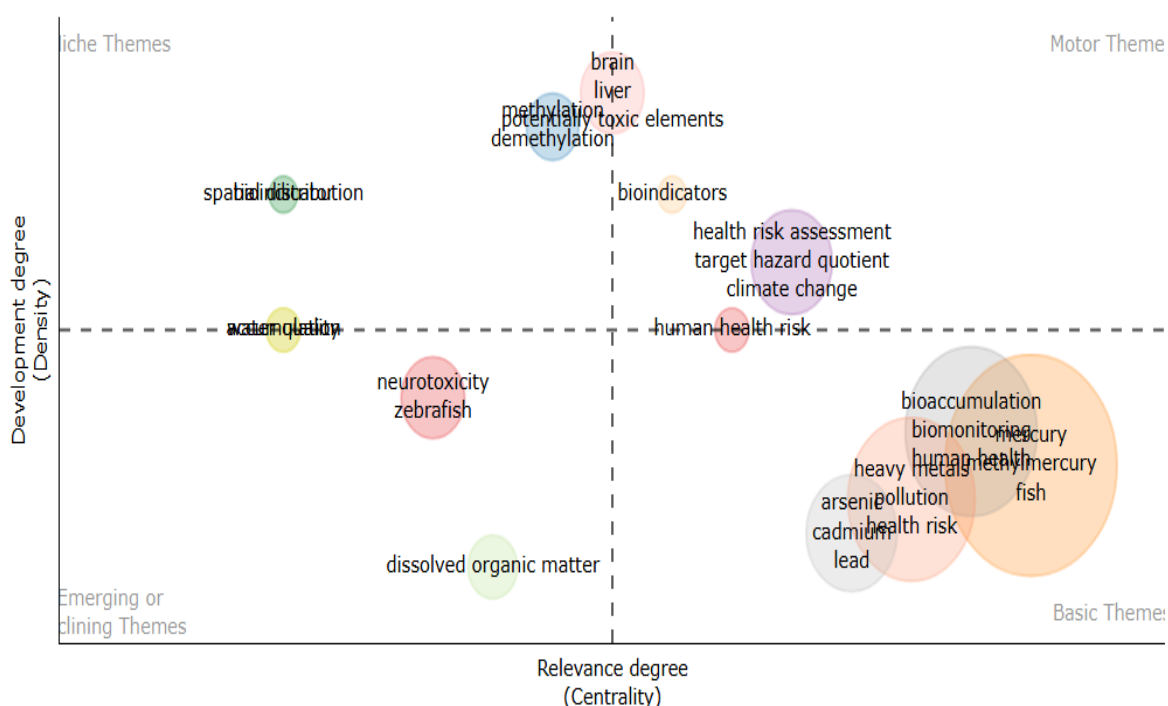


Figura 3. Análisis de ejes temáticos identificados en la literatura

A partir de este análisis bibliométrico, se identificaron patrones clave en la producción científica sobre el impacto del mercurio en ríos y la salud humana, los cuales permitieron delimitar los cuatro ejes temáticos centrales que estructuran el conocimiento en este campo. Estos ejes sintetizan las prioridades de investigación identificadas en la literatura, a la par que destacan la interdisciplinariedad del tema, vinculando la toxicología, la epidemiología y la gestión ambiental.

Mecanismos de Toxicidad y Bioacumulación del Metilmercurio

El primer eje temático aborda los procesos biogeoquímicos que determinan la transformación, dispersión y bioacumulación del mercurio en ecosistemas acuáticos. Una vez depositado en ríos, el mercurio inorgánico (Hg^{2+}) es metilado por microorganismos anaerobios, convirtiéndose en metilmercurio (MeHg), su forma más tóxica y biodisponible.⁽²¹⁾ En este sentido, señalan De Moura Meneses et al.⁽²²⁾ que la exposición al Hg es mayor en la población ribeña (90 %) que en las zonas urbanas (57,1 %).

Además, el MeHg se biomagnifica a lo largo de la cadena alimentaria, desde el suelo hasta los organismos, lo que según Du et al.⁽²³⁾ supone un riesgo potencialmente mayor para los residentes locales que consumen productos acuíferos. Investigaciones han demostrado que las altas concentraciones de mercurio en los peces de las llanuras aluviales de la Amazonía, con un 70 % por encima de las pautas recomendadas para el consumo humano, plantean riesgos para la salud de las poblaciones humanas de la región.⁽²⁴⁾ Este fenómeno no solo evidencia la persistencia del contaminante, sino también su capacidad para afectar a poblaciones distantes de las fuentes de emisión originales. En este sentido, señalan Eissa & Younes⁽²⁵⁾ que los productos pesqueros denunciados con mayor frecuencia son el atún, el pez espada, el salmón, la caballa y los tiburones, siendo los metales pesados, los microorganismos patógenos, los controles deficientes y la infestación parasitaria los principales peligros.

A nivel toxicológico, el MeHg interfiere con procesos celulares fundamentales. Experimentos in vitro e in vivo han corroborado que esta interacción provoca estrés oxidativo neuronal y dishomeostasis del glutamato sináptico, lo que conduce a la apoptosis neuronal.⁽²⁶⁾ Además, su exposición durante el embarazo puede producir resultados adversos, como aborto espontáneo y retraso del crecimiento intrauterino, al inhibir la viabilidad celular, alterar la submicroestructura celular e inducir la apoptosis y la capacidad de migración e invasión celular.⁽²⁷⁾ En conjunto, este eje subraya la necesidad de profundizar en los factores ambientales y moleculares que modulan la toxicidad del mercurio, ya que su comprensión es esencial para predecir riesgos y diseñar estrategias de intervención.

Efectos en la Salud Poblacional y Grupos Vulnerables

El segundo eje explora las consecuencias sanitarias de la exposición al mercurio, con énfasis en las disparidades que afectan a poblaciones en condiciones de vulnerabilidad. La evidencia epidemiológica indica que el consumo prolongado de pescado contaminado con MeHg está asociado a trastornos neurológicos, renales y cardiovasculares.^(28,29,30) Estos efectos son particularmente graves en comunidades indígenas y ribereñas, donde el pescado constituye hasta el 70 % de la dieta básica.⁽²⁴⁾

Las mujeres embarazadas y los fetos representan el grupo de mayor riesgo, ya que de acuerdo a Go et al.⁽³¹⁾ la exposición a niveles bajos de metilmercurio suprime significativamente el crecimiento de neuritas durante el desarrollo embrionario, lo que afecta la migración neuronal y la mielinización. Estudios han demostrado que la exposición prenatal al mercurio está relacionada con retrasos en el desarrollo, déficits neurocognitivos y afecciones como el trastorno del espectro autista.⁽³²⁾ Esto, en opinión de la autora, debe llevar a reevaluar los límites de exposición aceptables, especialmente en áreas endémicas donde las alternativas alimentarias son limitadas.^(33,34,35)

Además de los impactos neurológicos, investigaciones recientes han asociado el mercurio con alteraciones inmunológicas y endocrinas, como la disfunción tiroidea y la resistencia a la insulina.^(36,37) Sin embargo, persisten vacíos en la comprensión de los efectos a largo plazo y las interacciones sinérgicas con otros contaminantes, como el plomo o el arsénico, comunes en zonas mineras.

Metodologías de Monitoreo y Evaluación de Riesgo

El tercer eje se centra en las herramientas científicas y tecnológicas empleadas para cuantificar la presencia de mercurio en ríos y estimar su impacto en la salud humana. Tradicionalmente, el análisis de muestras de agua, sedimentos y tejidos biológicos mediante espectrometría de masas (ICP-MS) ha sido el método de referencia para determinar concentraciones de Hg y MeHg.⁽³⁸⁾ No obstante, se observan en la literatura avances recientes como el sistema automático de etilación-purga y trampa-GC-ICP-MS desarrollado por Liu et al.⁽³⁹⁾ y el método desarrollado por Kulomäki et al.⁽⁴⁰⁾ con impresión 3D basado en un eliminador de metales para la preconcentración y especiación de Hg.

Paralelamente, los modelos de evaluación de riesgo han evolucionado para integrar variables

socioambientales^(41,42) como los hábitos alimentarios locales y la percepción del riesgo en comunidades afectadas.⁽⁴³⁾ Estas metodologías son cruciales para superar las limitaciones de los enfoques tradicionales, que de acuerdo a Lim et al.⁽⁴⁴⁾.

A escala global, la iniciativa del Convenio de Minamata sobre el Mercurio es un marco normativo multidisciplinario que tiene como objetivo reducir la contaminación por mercurio, la exposición humana y la salud ambiental.⁽⁴⁵⁾ Sin embargo, desafíos como la falta de armonización entre países y la escasa representatividad de datos en regiones subdesarrolladas aún limitan la efectividad de estas herramientas.^(46,47) Futuras investigaciones deberían orientarse hacia la integración de tecnologías emergentes, como la inteligencia artificial para predecir zonas críticas de contaminación, o la teledetección satelital para mapear fuentes de emisión en tiempo real.⁽⁴⁸⁾

Estrategias de Mitigación y Remediación Ambiental

El cuarto eje analiza las intervenciones diseñadas para reducir la liberación de mercurio al medio ambiente y remediar ecosistemas ya contaminados. Aunque los niveles de mercurio en los suelos provenientes de desechos de minas de oro abandonadas en la Amazonía peruana son bajos, advierte Ramírez et al.⁽⁴⁹⁾ que reducir el uso de mercurio en las operaciones mineras es crucial para reducir los riesgos humanos y ambientales.

En cuanto a la remediación, la fitorremediación —uso de plantas acuáticas como el *P. miliaceum* y *S. oppositifolia*— puede reducir eficazmente la contaminación por metales en los suelos de las minas.⁽⁵⁰⁾ Además, el fitoplancton *Chlorella vulgaris* ha demostrado inhibir la metilación de mercurio por parte de las bacterias reductoras de hierro, pero la mejora por parte de las bacterias reductoras de sulfato, modulando potencialmente la producción de MeHg y bioacumulación en ambientes acuáticos.⁽⁵¹⁾

Finalmente, las políticas públicas juegan un papel clave en la articulación de estas estrategias.⁽⁵²⁾ El Convenio de Minamata requiere enfoques integrales de formalización de abajo hacia arriba y una importante financiación externa de los consumidores, las grandes corporaciones mineras y los gobiernos para reducir eficazmente las emisiones de mercurio.⁽⁵³⁾ Por lo que su éxito depende de la cooperación transnacional, el financiamiento continuo y la inclusión de las comunidades locales en la toma de decisiones. Este eje resalta la urgencia de adoptar enfoques integrales que combinen innovación tecnológica, gobernanza efectiva y educación ambiental, ya que la solución al problema del mercurio requiere tanto de avances científicos como de compromiso socio político.

CONCLUSIONES

Esta revisión bibliométrica evidencia que el envenenamiento por mercurio en ríos constituye un desafío global con profundas implicaciones para la salud humana y los ecosistemas acuáticos. El análisis de la producción científica entre 2015 y 2025 reveló un crecimiento sostenido en la investigación, con un pico notable en 2023-2024, lo que refleja la creciente preocupación por los efectos de este contaminante. Los cuatro ejes temáticos identificados —mecanismos de toxicidad y bioacumulación, efectos en la salud poblacional, metodologías de monitoreo y estrategias de mitigación— destacan la complejidad interdisciplinaria del problema, así como la necesidad de abordarlo desde perspectivas complementarias. Futuros estudios deberían profundizar en las interacciones sinérgicas con otros contaminantes, los efectos a largo plazo en la salud y las estrategias de remediación adaptadas a contextos locales. Es a opinión de la autora que solo mediante acciones coordinadas —basadas en evidencia y con un compromiso equitativo— se podrá mitigar el impacto de este metal tóxico y proteger tanto los ecosistemas fluviales como la salud de las generaciones presentes y futuras.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Khan E, Abbas Z. A scoping review of sources of mercury and its health effects among Pakistan's most vulnerable population. *Reviews on Environmental Health*. 2020;36:39-45. <https://doi.org/10.1515/reveh-2019-0099>
2. González Vallejo R. La transversalidad del medioambiente: facetas y conceptos teóricos. *Región Científica*. 2023;2(2):202393. <https://doi.org/10.58763/rc202393>
3. Zhao W, Gan R, Xian B, Wu T, Wu G, Huang S, et al. Overview of Methylation and Demethylation Mechanisms and Influencing Factors of Mercury in Water. *Toxics*. 2024;12. <https://doi.org/10.3390/toxics12100715>
4. Teng D, Mao K, Ali W, Xu G, Huang G, Niazi N, et al. Describing the toxicity and sources and the remediation technologies for mercury-contaminated soil. *RSC Advances*. 2020;10:23221-32. <https://doi.org/10.1039/d0ra01507e>
5. Valencia-Celis AU, Patiño GR, Sánchez-Castillo V. Environmental Knowledge Management Proposals in

Education Systems. Bibliotecas. Anales de investigación. 2023;19(2). <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9027955>

6. Gutierrez-Mosquera H, Marrugo-Negrete J, Díez S, Morales-Mira G, Montoya-Jaramillo L, Jonathan M. Mercury distribution in different environmental matrices in aquatic systems of abandoned gold mines, Western Colombia: Focus on human health. *Journal of hazardous materials*. 2020;404 Pt A:124080. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2020.124080>

7. Jeong H, Ali W, Zinck P, Souissi S, Lee J. Toxicity of methylmercury in aquatic organisms and interaction with environmental factors and coexisting pollutants: A review. *The Science of the total environment*. 2024;173574. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173574>

8. Leal-Nazaré C, Arriano G, Lopes-Araújo A, Santos-Sacramento L, Barthelemy J, Soares-Silva I, et al. Methylmercury neurotoxicity: Beyond the neurocentric view. *The Science of the total environment*. 2024;170939. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170939>

9. Da Silva D, Bittencourt L, Baia-Da-Silva D, Chemelo V, Eiró-Quirino L, Nascimento P, et al. Methylmercury Causes Neurodegeneration and Downregulation of Myelin Basic Protein in the Spinal Cord of Offspring Rats after Maternal Exposure. *International Journal of Molecular Sciences*. 2022;23. <https://doi.org/10.3390/ijms23073777>

10. Eiró L, Ferreira M, Bittencourt L, Aragão W, De Souza M, Silva M, et al. Chronic methylmercury exposure causes spinal cord impairment: proteomic modulation and oxidative stress. *Food and chemical toxicology: an international journal published for the British Industrial Biological Research Association*. 2020;111772. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2020.111772>

11. Martoredjo I, Santos L, Vilhena J, Rodrigues A, De Almeida A, Passos C, et al. Trends in Mercury Contamination Distribution among Human and Animal Populations in the Amazon Region. *Toxics*. 2024;12. <https://doi.org/10.3390/toxics12030204>

12. Sánchez-Castillo V, Gómez-Cano CA, Pérez-Gamboa AJ. La Economía Azul en el contexto de los objetivos del desarrollo sostenible: una revisión mixta e integrada de la literatura en la base de datos Scopus. *AiBi Revista De Investigación, Administración E Ingeniería*. 2024;12(2):206-21. <https://doi.org/10.15649/2346030X.4028>

13. Pérez Gamboa AJ, Sánchez Castillo V. Derecho Educativo y desarrollo sostenible: un análisis de su relación y líneas de desarrollo futuro. *Revista Academia & Derecho*. 2024;17(28). <https://doi.org/10.18041/2215-8944/academia.28.11839>

14. Gómez Cano CA, Pérez Gamboa A, Sánchez Castillo V. Análisis de la producción científica entorno a ODS 11: Ciudades y Comunidades Sostenibles. *Mundo FESC*. 2024;14(28):118-36. <https://doi.org/10.61799/2216-0388.1585>

15. Sánchez Castillo V, Pérez Gamboa AJ, Gómez Cano CA. Trends and evolution of Scientometric and Bibliometric research in the SCOPUS database. *Bibliotecas. Anales de investigación*. 2024;20(1). <http://revistas.bnjm.sld.cu/index.php/BAI/article/view/834>

16. Ledesma F, Malave-González BE. Patrones de comunicación científica sobre E-commerce: un estudio bibliométrico en la base de datos Scopus. *Región Científica*. 2022;1(1):202214. <https://doi.org/10.58763/rc202214>

17. Gómez-Cano C, Sánchez-Castillo V, Clavijo-Gallego TA. Mapping the Landscape of Netnographic Research: A Bibliometric Study of Social Interactions and Digital Culture. *Data and Metadata*. 2023;2(25). <https://doi.org/10.56294/dm202325>

18. Gómez-Cano C, Sánchez-Castillo V. Systematic review on Augmented Reality in health education. *Gamification and Augmented Reality*. 2023;1:28. <https://doi.org/10.56294/gr202328>

19. Gómez Cano CA, Sánchez Castillo V, Pérez Gamboa A. El turismo como dinamizador del desarrollo económico: una revisión mixta de la producción científica. *Dictamen Libre*. 2024;35. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9027955>

es/servlet/articulo?codigo=9763789

20. Higuera Carrillo EL. Aspectos clave en agroproyectos con enfoque comercial: Una aproximación desde las concepciones epistemológicas sobre el problema rural agrario en Colombia. *Región Científica*. 2022;1(1):20224. <https://doi.org/10.58763/rc20224>

21. Zhang Y, Sun T, M, Wang X, Xie Q, Zhang C, Wang Y, et al. Distribution of mercury and methylmercury in river water and sediment of typical manganese mining area. *Journal of environmental sciences*. 2021;119:11-22. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2021.12.011>

22. De Moura Meneses H, Oliveira-Da-Costa M, Basta P, Morais C, Pereira R, De Souza S, et al. Mercury Contamination: A Growing Threat to Riverine and Urban Communities in the Brazilian Amazon. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022;19. <https://doi.org/10.3390/ijerph19052816>

23. Du H, Guo P, Wang T, M, Wang D. Significant bioaccumulation and biotransformation of methylmercury by organisms in rice paddy ecosystems: A potential health risk to humans. *Environmental pollution*. 2021;273:116431. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116431>

24. Nyholt K, Jardine T, Villamarín F, Jacobi C, Hawes J, Campos-Silva J, et al. High rates of mercury biomagnification in fish from Amazonian floodplain-lake food webs. *The Science of the total environment*. 2022;155161. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155161>

25. Eissa F, Younes A. Fish contamination: Analysis of the EU RASFF notifications over the last 23 years. *Food Control*. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2024.110404>

26. Yang T, Xu Z, Liu W, Xu B, Deng Y. Oxidative stress accelerates synaptic glutamate dyshomeostasis and NMDARs disorder during methylmercury-induced neuronal apoptosis in rat cerebral cortex. *Environmental Toxicology*. 2020;35:683-96. <https://doi.org/10.1002/tox.22904>

27. Liao Y, Peng S, He L, Wang Y, Li Y, Wang Y, et al. Methylmercury cytotoxicity and possible mechanisms in human trophoblastic HTR-8/SVneo cells. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2021;207:111520. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111520>

28. Sakamoto M, Marumoto M, Haraguchi K, Toyama T, Saito Y, Balogh S, et al. Assessing the role of selenium in Minamata disease through reanalysis of historical samples. *Environment International*. 2024;195:109242. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.109242>

29. Borges Machín AY, González Bravo YL. Educación comunitaria para un envejecimiento activo: experiencia en construcción desde el autodesarrollo. *Región Científica*. 2022;1(1):202212. <https://doi.org/10.58763/rc202213>

30. Chan P, Kwok K, Chan M, Li A, Chan I, Fok T, et al. Prenatal methylmercury exposure is associated with decreased heart rate variability in children. *Environmental Research*. 2021;111744. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111744>

31. Go S, Kurita H, Hatano M, Matsumoto K, Nogawa H, Fujimura M, et al. DNA methyltransferase- and histone deacetylase-mediated epigenetic alterations induced by low-level methylmercury exposure disrupt neuronal development. *Archives of Toxicology*. 2021;95:1227-39. <https://doi.org/10.1007/s00204-021-02984-7>

32. Escalante E, Semenova Y, Peana M, Bjørklund G. The Impact of Mercury from Dental Amalgams on Pregnancy and Childhood: A Health and Risk Assessment Evaluation. *Current Medicinal Chemistry*. 2025. <https://doi.org/10.2174/0109298673334663250101101006>

33. Vázquez-Vidal V, Martínez-Prats G. El desarrollo regional y su impacto en la sociedad mexicana. *Región Científica*. 2023;2(1):202336. <https://doi.org/10.58763/rc202336>

34. Sanabria Martínez MJ. Construir nuevos espacios sostenibles respetando la diversidad cultural desde el nivel local. *Región Científica*. 2022;1(1):20222. <https://doi.org/10.58763/rc20222>

35. Hoyos Chavarro YA, Melo Zamudio JC, Sánchez Castillo V. Sistematización de la experiencia de circuito corto de comercialización estudio de caso Tibasosa, Boyacá. *Región Científica*. 2022;1(1):20228. <https://doi.org/10.58763/rc20228>
36. Bjorklund G, Peana M, Dadar M, Chirumbolo S, Aaseth J, Martins N. Mercury-induced autoimmunity: Drifting from micro to macro concerns on autoimmune disorders. *Clinical Immunology*. 2020:108352. <https://doi.org/10.1016/j.clim.2020.108352>
37. Ibañez A, Mills W, Bustamante P, Morales L, Torres D, Astek B, et al. Deleterious effects of mercury contamination on immunocompetence, liver function and egg volume in an antarctic seabird. *Chemosphere*. 2023:140630. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140630>
38. Krata A, Vassileva E. Simultaneous speciation analysis of mercury in marine origin samples by high performance liquid chromatography and species-specific isotope dilution inductively coupled plasma mass spectrometry. *Talanta*. 2020;217:121113. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2020.121113>
39. Liu Y, Guo X, Ju J, Gong H, Wang H, Chen L, et al. Determinations of methylmercury and mercury methylation/demethylation rate constants in environmental samples using isotope dilution/tracing methods by automatic ethylation-purge and trap-GC-ICP-MS. *Analytica Chimica Acta*. 2024;1323:343077. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2024.343077>
40. Kulomäki S, Lahtinen E, Perämäki S, Väisänen A. Preconcentration and speciation analysis of mercury: 3D printed metal scavenger-based solid-phase extraction followed by analysis with inductively coupled plasma mass spectrometry. *Talanta*. 2021;240:123163. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2021.123163>
41. Sánchez-Castillo V, Gómez-Cano C, Alape-Chaguala R. Dynamics of institutional rural social networks and their contribution to social capital in a collective of THEOBROMA CACAO L. PRODUCERS. FACE: Revista De La Facultad De Ciencias Económicas Y Empresariales. 2023;23(1). <https://doi.org/10.24054/face.v23i1.2475>
42. Sánchez-Castillo V, García-Rojas R, Gómez-Cano C. Redes Sociales Rurales y Capital social: El caso de los paneleros de Bellavista. *Universidad y Sociedad*. 2023;14(5):383-93. <https://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus/article/view/3991>
43. Higuera Carrillo EL. Aspectos clave en agroproyectos con enfoque comercial: Una aproximación desde las concepciones epistemológicas sobre el problema rural agrario en Colombia. *Región Científica*. 2022;1(1):20224. <https://doi.org/10.58763/rc20224>
44. Lim J, Kim T, Woo M. Trends in sensor development toward next-generation point-of-care testing for mercury. *Biosensors & Bioelectronics*. 2021;183:113228. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2021.113228>
45. Bank M. The mercury science-policy interface: History, evolution and progress of the Minamata Convention. *The Science of the Total Environment*. 2020;722:137832. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137832>
46. Guzmán DL, Gómez-Cano C, Sánchez-Castillo V. Construcción del Estado a partir de la participación Ciudadana. *Revista Academia & Derecho*. 2022;14(25). <https://doi.org/10.18041/2215-8944/academia.25.10601>
47. Pérez-Guedes N, Arufe-Padrón A. Perspectivas de transición energética en América Latina en el escenario pospandémico. *Región Científica*. 2023;2(1):202334. <https://doi.org/10.58763/rc202334>
48. Muñoz Bonilla HA, Menassa Garrido IS, Rojas Coronado L, Espinosa Rodríguez MA. La innovación en el sector servicios y su relación compleja con la supervivencia empresarial. *Región Científica*. 2024;3(1):2024214. <https://doi.org/10.58763/rc2024214>
49. Ramírez M, Ruiz C, Gomringer R, Pillaca M, Thomas E, Stewart P, et al. Mercury in soils impacted by alluvial gold mining in the Peruvian Amazon. *Journal of Environmental Management*. 2021;288:112364. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112364>
50. Azizi M, Faz Á, Zornoza R, Martínez-Martínez S, Acosta J. Phytoremediation Potential of Native Plant Species in Mine Soils Polluted by Metal(loid)s and Rare Earth Elements. *Plants*. 2023;12. <https://doi.org/10.3390/>

plants12061219

51. Yin X, Wang L, Liang X, Zhang L, Zhao J, Gu B. Contrary effects of phytoplankton *Chlorella vulgaris* and its exudates on mercury methylation by iron- and sulfate-reducing bacteria. *Journal of Hazardous Materials*. 2022;433:128835. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4014071>

52. Mogrovejo Andrade JM. Estrategias resilientes y mecanismos de las organizaciones para mitigar los efectos ocasionados por la pandemia a nivel internacional. *Región Científica*. 2022;1(1):202211. <https://doi.org/10.58763/rc202211>

53. Prescott G, Baird M, Geenen S, Nkuba B, Phelps J, Webb E. Formalizing artisanal and small-scale gold mining: A grand challenge of the Minamata Convention. *One Earth*. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2022.02.005>

FINANCIACIÓN

Ninguna.

CONFLICTO DE INTERESES

Ninguno.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Conceptualización: Ana María Chaves Cano.

Curación de datos: Ana María Chaves Cano.

Análisis formal: Ana María Chaves Cano.

Investigación: Ana María Chaves Cano.

Metodología: Ana María Chaves Cano.

Administración del proyecto: Ana María Chaves Cano.

Recursos: Ana María Chaves Cano.

Software: Ana María Chaves Cano.

Supervisión: Ana María Chaves Cano.

Validación: Ana María Chaves Cano.

Visualización: Ana María Chaves Cano.

Redacción - borrador original: Ana María Chaves Cano.

Redacción - revisión y edición: Ana María Chaves Cano.