

Mercurio en peces y el riesgo ecotoxicológico para peces y aves piscívoras de Madre de Dios, Amazonía peruana

Resumen de Investigación N° 03 | Marzo 2023

Palabras clave: Minería de oro, mercurio, bioacumulación, riesgo ecotoxicológico, peces, aves piscívoras.



Puntos clave

- Los peces de áreas impactadas por minería, especialmente los carnívoros, presentaron niveles de mercurio que implican un mayor riesgo de exposición para la fauna acuática y pueden alterar el desarrollo normal de las aves piscívoras y los mismos peces.
- Los niveles de mercurio estuvieron correlacionados con el tamaño de los individuos en los peces carnívoros, sugiriendo que los peces adultos contienen más mercurio que los juveniles.
- Los peces carnívoros presentaron los niveles más altos de mercurio, por tanto podrían ser buenas especies indicadoras para el monitoreo de la contaminación por mercurio en ríos de Madre de Dios.
- Los estudios o monitoreos de concentraciones de mercurio en fauna deben considerar criterios estadísticos, como un tamaño de muestra que sea representativo y robusto; criterios fisiológicos, como el tamaño de pez; y criterios ecológicos, como el nivel trófico. La aplicación de criterios uniformes facilitará la comparación o complementación entre estudios de la zona.
- Es necesario establecer programas de monitoreo de las concentraciones de mercurio en áreas afectadas por la actividad minera, para la gestión del riesgo ecológico y de salud pública.

Introducción

La Minería Artesanal y de Pequeña Escala (MAPE) de oro es reconocida como la principal fuente antropogénica de mercurio (Hg) a nivel global (AMAP/ UN Environment, 2019). En esta actividad, el mercurio es usado para extraer las partículas de oro de los suelos y sedimentos aluviales por amalgamación. Durante el proceso, el mercurio puede ser vertido directamente al ambiente o liberado durante la quema de amalgama para la obtención del oro. El comportamiento del mercurio en el medio ambiente es complejo, pues puede convertirse en metilmercurio (MeHg) cuando ingresa a un ecosistema acuático. El metilmercurio es un compuesto orgánico, altamente tóxico, y capaz de ser absorbido por los organismos vivos y entrar a la cadena alimenticia. Asimismo, se biomagnifica, es decir, incrementa su concentración a lo largo de la cadena, pudiendo alcanzar niveles elevados y potencialmente tóxicos en los organismos que se encuentran en el tope de la red trófica.

Más del 70% del mercurio total en peces está presente en la forma de metilmercurio (Bastos *et al.*, 2015). Consecuentemente, las comunidades humanas y de fauna silvestre que se alimentan de peces predadores (carnívoros) tienen un mayor riesgo de exposición a mercurio (Chételat *et al.*, 2020; Hacon *et al.*, 2020). La exposición crónica al metilmercurio puede afectar negativamente la reproducción de animales (ej. reducción de fertilidad, bajo éxito de nacimiento de crías y reducción de la tasa de eclosión de huevos). También puede causar problemas de comportamiento y desarrollo (ej. letargia y bajo índice de crecimiento) (Chételat *et al.*, 2020).

El monitoreo de concentraciones de mercurio en peces es una herramienta útil para evaluar el grado de exposición y el riesgo toxicológico en poblaciones humanas y en la vida silvestre, incluyendo a los mismos peces (Dutton & Fisher, 2011). A pesar de que la mayoría de los estudios de

mercurio en peces se han enfocado en evaluar la exposición en poblaciones humanas, también hay estudios que han evaluado el riesgo a la salud de la fauna debido al consumo de peces con niveles de mercurio, como es el caso de aves piscívoras. Asimismo, se han evaluado las concentraciones de mercurio que pueden causar efectos subletales en diferentes especies, y se han determinado valores de referencia de riesgo a la salud de la fauna piscívora (Fuchsman *et al.*, 2017).

El departamento de Madre de Dios, ubicado en la Amazonía sudeste del Perú, es conocido por su alta biodiversidad de especies y endemismo. Asimismo, es la región que concentra la mayor producción de oro por MAPE del país, y se estima que es responsable de la mitad del total de emisiones de mercurio asociadas a dicha actividad a nivel nacional. Se estima que la MAPE libera anualmente aproximadamente 181 toneladas de mercurio al medio ambiente (Arana & Montoya, 2017). A la fecha, algunos estudios han determinado los niveles de mercurio en diferentes especies de peces, incluyendo especies comerciales y de consumo humano. No obstante, aún se desconoce si dichos niveles de mercurio tienen un efecto tóxico para los peces mismos y los animales que los consumen (fauna piscívora).

Frente a esta problemática, el Centro de Investigación y Tecnología del Agua de la Universidad de Ingeniería y Tecnología (CITA-UTEC), junto con el Centro de Innovación Científica Amazónica (CINCIA) y su Programa de Mercurio, y en colaboración con el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), llevaron a cabo una evaluación rápida del impacto de la MAPE en el riesgo ecotoxicológico, por exposición a mercurio, de los peces y las aves piscívoras que habitan el río Madre de Dios. El estudio se realizó en el marco del proyecto "River Mining: impactos de la minería aluvial en la cuenca del Río Madre de Dios - efectos físicos y planeamiento para su mitigación", ejecutado en el periodo 2020-2022.

Metodología

Colecta de peces

La colecta de muestras de peces se realizó en noviembre del 2020 siguiendo el protocolo de CINCIA “Método de muestreo acuático en pozas abandonadas por minería en la Amazonía peruana” (CINCIA, 2020a), adaptado a un ambiente ribereño. Brevemente, se realizaron pescas con malla de arrastre y agallera o de nylon, buscando muestrear todos los tipos de orilla presentes en cada punto de muestreo considerado. Se muestrearon seis puntos, tres en el cauce principal del río Madre de Dios (nombrados Tramo Bajo, Tramo Medio y Tramo Alto) y uno en cada tributario (Chilive, Colorado e Inambari). Se refirió al estudio de Caballero Espejo *et al.* (2018) para definir las áreas impactadas por la minería a lo largo del río Madre de Dios. Según la distribución de deforestación por MAPE

registrada en ese estudio, se consideraron como sitios no afectados por la MAPE (sin minería) aquellos ubicados en el río Chilive y aguas arriba de su confluencia con el río Madre de Dios (Tramo Alto). Por el contrario, tanto los sitios ubicados en el río Colorado y aguas arriba de su confluencia con el Madre de Dios (Tramo Medio) como los ubicados en el río Inambari y aguas arriba de su confluencia con el Madre de Dios (Tramo Bajo), se consideraron afectados por la MAPE (con minería) (Figura 1).

Análisis de mercurio

El análisis de mercurio total en las muestras se llevó a cabo en el Laboratorio de Mercurio y Química Ambiental (LAMQA) ubicado en el Centro de Investigación Roger Beuzeville Zumaeta del Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana (IIAP) en Puerto

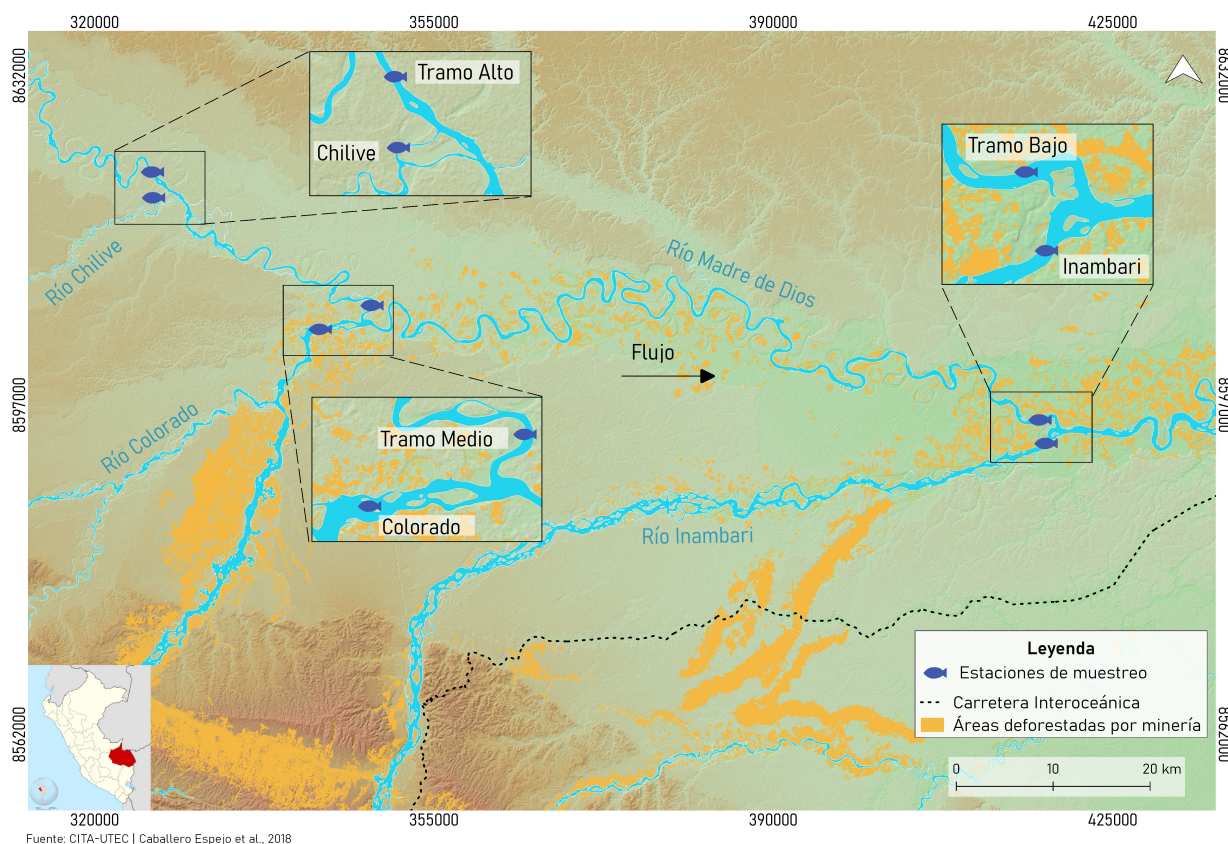


Figura 1. Estaciones de muestreo. El Tramo Alto del río Madre de Dios y el afluente Chilive fueron considerados como áreas sin minería. El Tramo Medio y Tramo Bajo del río Madre de Dios y los afluentes Colorado e Inambari se consideraron como áreas con minería.

Maldonado. Las muestras fueron liofilizadas, homogeneizadas y posteriormente analizadas aplicando el analizador directo de mercurio (Milestone DMA-80 Direct Mercury Analyzer) usando el Método EPA 7473 (U.S. EPA, 1998) de acuerdo al protocolo de CINCIA “Análisis de mercurio total en músculo de pescado” (CINCIA, 2020b). Los resultados de las concentraciones de mercurio se reportan por peso húmedo en las unidades de microgramos (μg) de Hg por gramo (g) de pez, lo cual corresponde a partes por millón (ppm).

Valores de Referencia de Toxicidad

La evaluación rápida del riesgo ecotoxicológico que representan los niveles de mercurio en peces, para los mismos peces y para las aves que los consumen, se realizó utilizando Valores de Referencia de Toxicidad (TRV por sus siglas en inglés) reportados en la literatura. Los TRV se utilizan para calificar o cuantificar el riesgo para la vida silvestre debido a la exposición a un elemento o producto químico; permiten identificar la concentración mínima de un contaminante en la que una especie puede

Tabla 1. Valor de Referencia de Toxicidad (TRV) para mercurio (Hg) en peces

Siglas	Hg (ppm*) peso húmedo en músculo de peces	Efecto adverso	Fuente
TRV-Peces	0.20	Efectos adversos, de baja magnitud, en la reproducción y supervivencia. Valor utilizado como umbral de protección.	Dillon <i>et al.</i> , 2010

Tabla 2. Valores de Referencia de Toxicidad (TRVs) para mercurio (Hg) en tejido muscular de peces, asociados al deterioro reproductivo en aves que consumen peces (piscívoras) clasificadas en Aves Pequeñas y Medianas (Aves.PM), y Aves Grandes (Aves.G).

Siglas	Hg (ppm*) peso húmedo en músculo de peces	Efecto adverso	Fuente
TRV-Aves.PM	0.16	Efectos adversos sobre el éxito reproductivo de aves pequeñas y medianas (12 - 423 g).	Fuchsman <i>et al.</i> , 2017
TRV-Aves.G	0.45	Efectos adversos sobre el éxito reproductivo de aves grandes (794 - 5500 g).	

* ppm = μg de Hg / g de músculo de pez

verse afectada negativamente y orientar la implementación de medidas de protección. Los TRV utilizados para la interpretación de los resultados de este estudio se detallan en las Tablas 1 y 2. Ambos valores son basados en la concentración del músculo de pescado, en los

peces esto refleja la exposición a mercurio; en el caso de las aves, este valor está referido a la dosis de exposición de mercurio a través del consumo de los peces.

Los TRV presentados en las Tablas 1 y 2 son valores a partir de los cuales se reportan efectos adversos subletales (que no llegan a ocasionar la muerte) en peces y aves, respectivamente. En la Tabla 1, el TRV-Peces indica el valor mínimo a partir del cual se han observado efectos negativos en la supervivencia, el éxito reproductivo o el normal desarrollo de los peces; este TRV es un valor donde los efectos se ven a baja magnitud. En la Tabla 2, los TRV-Aves.PM y TRV-Aves.G indican niveles de mercurio en la dieta de aves piscívoras (que consumen peces) que podrían ocasionar efectos adversos en su reproducción (fertilidad y éxito en el nacimiento de las crías) (Fuchsman *et al.*, 2017). Debido a que las aves tienen un metabolismo diferenciado en base a su tamaño (a menor tamaño usualmente mayor sensibilidad al mercurio), se consideraron dos TRV: uno para aves grandes (794- 5500 g), y otro para aves pequeñas a medianas (12- 423 g) (Fuchsman *et al.*, 2017). Cabe recalcar que los TRV de las Tablas 1 y 2 se han generado sobre la base de estudios realizados principalmente en el hemisferio norte en peces y aves que no son de áreas tropicales, por lo tanto, los umbrales no necesariamente son representativos para las especies que habitan la Amazonía; sin embargo, esta información sirve como referencia ante la ausencia de estudios más puntuales en esta región.

Resultados

Se colectaron un total de 76 peces pertenecientes a 31 especies, que se agruparon por hábito alimenticio en tres niveles tróficos: herbívoros (n=16), omnívoros (n=8) y carnívoros (n=52). Las concentraciones de mercurio en peces presentaron una amplia distribución que fue de 0.01 a 2.6 partes por millón (ppm) con una mediana de 0.10 ppm y una media de 0.28 ppm.

Al estudiar los niveles de mercurio en peces por grupo alimenticio (nivel trófico), se observó

La concentración de mercurio en peces depende de su hábito alimenticio

que los valores promedio - tanto en zonas sin minería como con minería - fueron más bajos en los peces herbívoros (0.08 ± 0.11 ppm), seguido por los omnívoros (0.21 ± 0.17 ppm) y los carnívoros (0.35 ± 0.48 ppm) (Figura 3). Esto indica que el metilmercurio se biomagnifica en la cadena alimenticia del área de estudio y coincide con estudios previos de mercurio en peces de la región amazónica, los cuales también encontraron mayores niveles de mercurio en peces carnívoros o depredadores (Diringer *et al.*, 2015; Bastos *et al.*, 2015; Vega *et al.*, 2018).

En peces carnívoros, a mayor tamaño, mayor concentración de mercurio

Retirando del grupo de datos la concentración más alta de mercurio (2.6 ppm), se encontró una correlación positiva y significativa ($R^2=0.494$) entre la concentración de mercurio y el tamaño del pez (Figura 2). Al separar los datos por grupos alimenticios, sólo se observó una relación significativa ($R^2=0.632$) en los peces carnívoros, indicando que a mayor tamaño, estos peces acumulan una mayor cantidad de mercurio en sus tejidos. El tamaño (longitud estándar) del individuo se utiliza como indicador de longevidad, que correlaciona con mayores niveles de este metal tóxico. Considerando esto, se podría decir que los peces adultos tienden a tener más mercurio que los peces juveniles, evidenciando la bioacumulación del mercurio en los peces a través del tiempo.

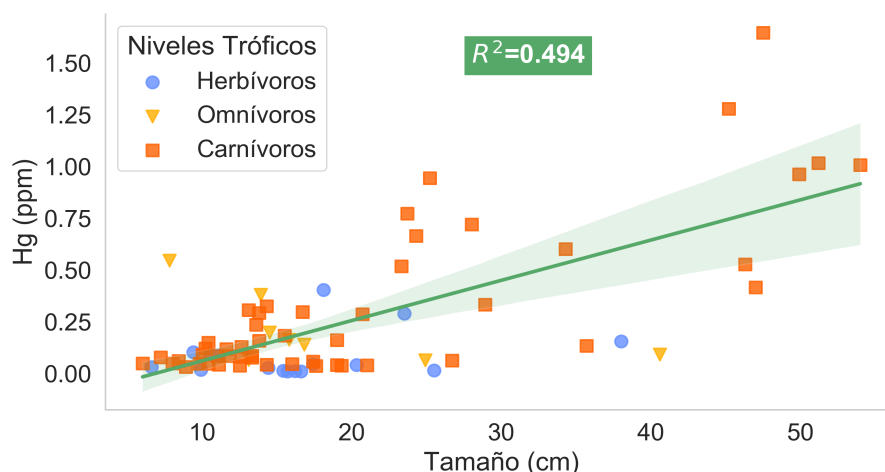


Figura 2. Correlación entre la concentración de mercurio (Hg) y el tamaño del pez. No se incluyó el valor máximo de concentración de mercurio de 2.6 ppm (encontrado en un pez carnívoro) para reducir la dispersión de los datos.

Los peces de áreas con minería contienen más mercurio que aquellos colectados en áreas sin minería

La concentración promedio de mercurio en peces fue más alta en las localidades con minería (0.34 ± 0.48 ppm, $n=41$), que aquellas sin minería (0.21 ± 0.34 ppm, $n=35$) (Figura 3). Los valores más altos del estudio se detectaron en dos peces carnívoros, en un maparate (*Ageneiosus ucayalensis*) con 2.6 ppm y en un machete

(*Rhaphiodon vulpinus*) con 1.6 ppm, ambos colectados en los dos afluentes impactados por MAPE: Inambari y Colorado, respectivamente (Figura 3). Estos resultados concuerdan con un estudio realizado entre el 2013 y el 2015 en el río Madre de Dios (Diringer *et al.*, 2015), que también reportó mayores concentraciones de mercurio tanto en peces de áreas con minería como en peces carnívoros.

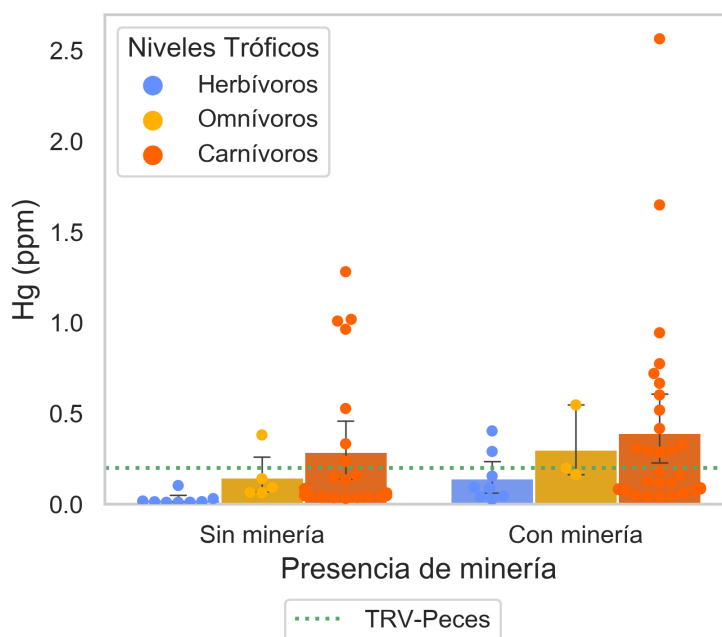


Figura 3. Concentraciones de mercurio en peces por grupo alimenticio en sitios con o sin minería. Las barras indican la concentración promedio de mercurio para cada categoría. Los puntos representan el resultado de cada muestra analizada. La línea verde indica el TRV-Peces (0.20 ppm).

Al comparar los niveles de mercurio con el estudio previo más reciente que ha publicado niveles de mercurio en peces del río Madre de Dios (Diringer *et al.* 2015), encontramos que de las 12 especies de peces reportadas en común por el presente estudio y el de Diringer *et al.* (2015), 4 especies carnívoras (*Pimelodus sp.*, *Plagioscion squamosissimus*, *Sorubim lima* y *Pseudoplatystoma punctifer*) mostraron concentraciones de Hg más elevadas (en más de un 50%) en el estudio de Diringer *et al.* (2015); sin embargo, dichas especies fueron, en promedio, considerablemente más grandes en tamaño (1.5 a 2 veces). Por otro lado, a pesar de presentar una longitud similar o menor, 4 especies carnívoras (*Ageniosia sp.*, *Megalonema sp.*, *Serrasalmus sp.*, *Zungaro zungaro*) y 2 especies omnívoras (*Cynopotamus amazonus* y *Triportheus angulatus*) presentaron concentraciones de mercurio más elevadas o similares en el presente estudio. Debido al efecto de la bioacumulación explicado en la Figura 2, de normalizarse las concentraciones de mercurio con el tamaño de los peces, posiblemente se observaría un aumento considerable en la acumulación de mercurio desde el 2013 al 2020. Por tanto, este análisis comparativo resalta la importancia de reportar el tamaño de los individuos analizados. Los casos en los que se observa un posible incremento de mercurio en el 2020 podrían responder al crecimiento de la actividad de la MAPE en el área de estudio. Sin embargo, tanto en el presente estudio como en el de Diringer *et al.* (2015), el número de individuos en ciertas especies fue muy bajo para realizar una comparación representativa. Es así, que se evidencia la importancia de diseñar y aplicar estrategias de monitoreo con protocolos de muestreo estandarizados, donde se requiera de un número mínimo de individuos por especie para realizar un análisis estadístico robusto.

Para facilitar la comparación de los datos de los niveles de mercurio en cuerpos de agua

a través del tiempo y el espacio, el muestreo debe estar, idealmente, enfocado a nivel de especie o hábito alimenticio (por ejemplo, peces carnívoros), considerando individuos de un rango de tamaño similar, e indicando la presencia o ausencia de actividad minera. Además, el monitoreo debe ser realizado periódicamente para evidenciar los cambios en los niveles de mercurio a través del tiempo.

La presencia de MAPE aumenta el riesgo en la salud de los peces y las aves piscívoras

Riesgo de la exposición a mercurio en las poblaciones de peces.

Las concentraciones promedio de mercurio en peces de las localidades con minería (0.34 ppm), como sin minería (0.21 ppm), superaron el valor umbral de referencia de toxicidad para peces (TRV-Peces; 0.20 ppm). En las localidades con minería, el 41% de los peces estudiados superó el TRV-Peces (25% de los herbívoros, 33% de los omnívoros y 47% de los carnívoros), mientras que en las localidades sin minería, sólo el 23% de peces superaron el TRV-Peces (ningún herbívoro, 20% de los omnívoros y 32% de los carnívoros).

Los resultados indicarían que, de forma general, el 40% de los peces carnívoros muestreados (en sitios con y sin minería) están en riesgo de presentar efectos negativos asociados a supervivencia, éxito reproductivo u anomalías letales del desarrollo. El riesgo tiene la posibilidad de incrementar en localidades impactadas por la actividad minera. Este TRV-Peces se escogió siguiendo el principio de precaución, ya que existe la posibilidad de que los peces desarrollen daños reproductivos a largo plazo.

Riesgo de la exposición a mercurio en poblaciones de aves piscívoras.

A la fecha, la mayoría de los estudios de mercurio en peces ha evaluado el riesgo de exposición en

poblaciones humanas como consecuencia del consumo de pescado; sin embargo, es necesario considerar que existe una gran diversidad de fauna silvestre, como las aves piscívoras, que también se alimentan de peces y, consecuentemente, pueden encontrarse expuestas a este contaminante y presentar efectos negativos en su comportamiento reproductivo (ver Tabla 2). Para comparar los resultados de este estudio con los TRV seleccionados, solo se consideraron los peces con un tamaño < 40 cm, el rango de tamaño de pez consumido por aves según Canham *et al.* (2021).

En este estudio, el 32% de los peces con un tamaño menor a 40 cm de largo sobrepasó el TRV para aves pequeñas y medianas (TRV-Aves.PM; 0.16ppm), mientras que el 12% sobrepasó

el TRV para aves grandes (TRV-Aves.G; 0.45 ppm) (Figura 4). En los sitios de muestreo con minería, un mayor porcentaje de peces presentó concentraciones de mercurio por encima de los TRV para mercurio en aves (49% por encima del TRV-Aves.PM y 28% por encima del TRV-Aves.G). En los sitios sin minería, sólo 10% de los peces sobrepasaron el TRV-Aves.PM y ningún pez superó el TRV-Aves.G, lo que sugiere que las aves piscívoras de las áreas mineras están expuestas a un mayor riesgo ecotoxicológico. Estos resultados son de vital importancia para Madre de Dios, considerando que 45% de las especies de aves peruanas se encuentran en esta región, y cuya salud podría verse afectada por los altos niveles de mercurio.

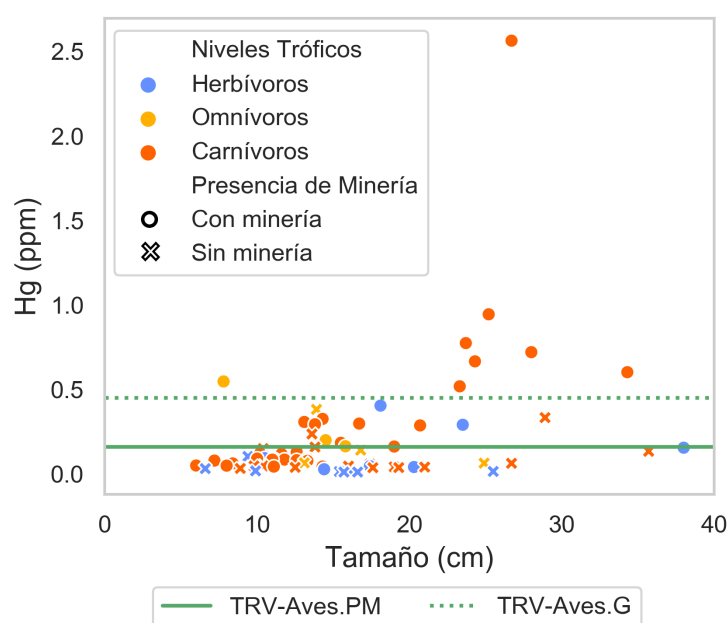


Figura 4. Relación entre la concentración de mercurio en peces y su tamaño, en sitios con o sin minería. Las líneas verdes indican los TRV de mercurio en peces asociados al deterioro reproductivo en aves piscívoras; la línea sólida se asocia a aves piscívoras pequeñas y medianas (TRV-AvesPM), la línea punteada aplica para las aves piscívoras grandes (TRV-AvesG).

Un incremento en las concentraciones de mercurio en peces por actividad MAPE puede afectar a sus depredadores y a la salud de los mismos peces

A pesar que los valores TRV reportados en la literatura no han sido determinados

específicamente para aves y peces amazónicos (Fuchsman *et al.*, 2017), los resultados del presente estudio indican que los niveles de mercurio en peces de áreas con minería representan un mayor riesgo en la fauna acuática (peces y aves piscívoras) que aquellos de las áreas sin minería.

En el caso de las aves piscívoras, debido a que el consumo de peces es la ruta primaria de exposición a mercurio, se debe considerar que los niveles de Hg reportados por este estudio, a pesar que los TRV aplicados no indican

efectos severos, pueden afectar el crecimiento de los individuos, su reproducción, o alterar el desarrollo de las crías debido a la transferencia de mercurio de la madre a los huevos (Chételat *et al.*, 2020).

Conclusiones

1. Los datos sugieren una posible tendencia de aumento en las concentraciones de mercurio en los peces de las áreas mineras.

Esta potencial contaminación debe ser monitoreada de forma sistemática a través del tiempo y comparada con datos de áreas no afectadas por la MAPE.

2. Los peces carnívoros presentan las concentraciones más altas de mercurio, sugiriendo que existe una biomagnificación en la cadena alimenticia local.

Dado que una considerable proporción de las concentraciones detectadas en peces carnívoros, especialmente en áreas mineras, superan los TRV para peces, los niveles de mercurio en peces carnívoros podrían afectar el desarrollo del pez y el de sus depredadores.

3. Los resultados de este estudio sugieren que la implementación de un programa de monitoreo estandarizado de los niveles de mercurio en peces puede caracterizar el riesgo de exposición para las poblaciones de fauna acuática.

Estos estudios de monitoreo deben enfocarse en especies carnívoras, en áreas con y sin minería para evaluar este metal en peces a través del tiempo.

4. Se requiere de protocolos de muestreo estandarizados que consideren criterios mínimos de muestreo para estudios

multitemporales y multiespaciales de mercurio en peces.

Un muestreo estandarizado debe incluir criterios, como el tamaño y el número mínimo de individuos por nivel trófico. Esto permitirá garantizar un muestreo representativo con un análisis estadístico robusto y que sea comparable con otros estudios en la zona.

5. Nuestros resultados indican que el consumo de casi el 50% de los peces colectados (<40 cm) en sitios con minería podrían ocasionar un deterioro reproductivo en aves piscívoras pequeñas y medianas.

Considerando que 45% de las especies de aves peruanas se encuentran en Madre de Dios, es necesario prestar atención al posible riesgo ecotoxicológico que asumen las aves piscívoras de áreas impactadas por la minería.

6. Es imperativo realizar estudios ecotoxicológicos con aves, peces y especies endémicas para estimar de manera más acertada el riesgo que representa el mercurio para la fauna silvestre de esta región.

Este estudio es uno de los pocos que examinan el riesgo del mercurio en la fauna amazónica. Se necesita más investigación para fundamentar mejor los esfuerzos de conservación en las zonas de la Amazonia afectadas por la minería artesanal de oro.

Referencias bibliográficas

AMAP/UN Environment. (2019). Technical Background Report for the Global Mercury Assessment 2018. <https://www.amap.no/documents/doc/technical-background-report-for-the-global-mercury-assessment-2018/1815>

Arana, M., & Montoya, P. (2017). Reporte de Inventario: estimaciones de referencia del uso y consumo de mercurio en la minería de oro artesanal y de pequeña escala en Perú. Artisanal Gold Council.

Bastos, W. R., Dórea, J. G., Bernardi, J. V., Lauthartte, L. C., Mussu, M. H., Lacerda, L. D., & Malm, O. (2015). Mercury in fish of the Madeira river (temporal and spatial assessment), Brazilian Amazon. *Environmental research*, 140, 191-197. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2015.03.029>

Canham, R., González-Prieto, A. M., & Elliott, J. E. (2021). Mercury exposure and toxicological consequences in fish and fish-eating wildlife from anthropogenic activity in Latin America. *Integrated environmental assessment and management*, 17(1), 13-26.

Chételat, J., Ackerman, J. T., Eagles-Smith, C. A., & Hebert, C. E. (2020). Methylmercury exposure in wildlife: a review of the ecological and physiological processes affecting contaminant concentrations and their interpretation. *Science of the Total Environment*, 711, 135117.

Caballero Espejo, J., Messinger, M., Román-Dañobeytia, F., Ascorra, C., Fernandez, L. E., & Silman, M. (2018). Deforestation and forest degradation due to gold mining in the Peruvian Amazon: A 34-year perspective. *Remote Sensing*, 10(12), 1903. <https://doi.org/10.3390/RS10121903>

CINCIA (2020a). Muestreo acuático en pozas abandonadas por la minería en la Amazonía Peruana -muestreo de peces. CINCIA Protocolos de Métodos H-002. http://cincia.wfu.edu/wp-content/uploads/PROTOCOLO-Muestreo-Peces-H-002_F_25.08.20.pdf

CINCIA (2020b). Análisis de Mercurio Total en Músculo de Pescado. CINCIA Protocolos de Métodos M-007. http://cincia.wfu.edu/wp-content/uploads/PROTOCOLO-PROCESAMIENTO-Y-ANALISIS_M-007-PESCADO_FINAL.pdf

Dillon, T., Beckvar, N., & Kern, J. (2010). Residue-based mercury dose-response in fish: An analysis using lethality-equivalent test endpoints. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 29(11), 2559-2565. <https://doi.org/10.1002/etc.314>

Diringer, S. E., Feingold, B. J., Ortiz, E. J., Gallis, J. A., Araújo-Flores, J. M., Berky, A., Pan, W. K., & Hsu-Kim, H. (2015). River transport of mercury from artisanal and small-scale gold mining and risks for dietary mercury exposure in Madre de Dios, Peru. *Environmental science. Processes & impacts*, 17(2), 478-487. <https://doi.org/10.1039/c4em00567h>

Dutton, J., & Fisher, N. S. (2011). Bioaccumulation of As, Cd, Cr, Hg(II), and MeHg in killifish (*Fundulus heteroclitus*) from amphipod and worm prey. *Science of The Total Environment*, 409(18), 3438-3447.

Fuchsman, P. C., Brown, L. E., Henning, M. H., Bock, M. J., & Magar, V. S. (2017). Toxicity reference values for methylmercury effects on avian reproduction: Critical review and analysis. *Environmental toxicology and chemistry*, 36(2), 294-319. <https://doi.org/10.1002/etc.3606>

Hacon, S. D. S., Oliveira-da-Costa, M., Gama, C. D. S., Ferreira, R., Basta, P. C., Schramm, A., & Yokota, D. (2020). Mercury exposure through fish consumption in traditional communities in the Brazilian Northern Amazon. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(15), 5269.

U.S. EPA. (1998). Method 7473 (SW-846): Mercury in Solids and Solutions by Thermal Decomposition, Amalgamation, and Atomic Absorption Spectrophotometry. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-07/documents/epa-7473.pdf>

Vega, C. M., Araujo, J., Román, F., & Fernandez, L. E. (2018). Mercurio en peces de pozas mineras en Madre de Dios. (Resumen de Investigación CINCIA #2). Centro de Innovación Científica Amazónica. <http://cincia.wfu.edu/wp-content/uploads/CINCIA-Research-Brief-2-v7.2-Mercurio-en-peces-de-pozas-mineras.pdf>

Autores

María Paz García Veramatus. Practicante Real Life Experience (RLE) del proyecto River Mining del Centro de Investigación y Tecnología del Agua de la Universidad de Ingeniería y Tecnología (CITA-UTEC).

Claudia Vega. Coordinadora del Programa Mercurio del Centro de Innovación Científica Amazónica (CINCIA).

Luis E. Fernandez. Director Ejecutivo del Centro de Innovación Científica Amazónica (CINCIA), Profesor de Investigación del departamento de Biología y el Centro de Energía, Ambiente y Sustentabilidad de Wake Forest University, y Co-Investigador Principal del proyecto River Mining.

Julio Araújo-Flores. Coordinador del Programa de Ecosistemas Acuáticos del Centro de Innovación Científica Amazónica (CINCIA). Director de la Colección Científica de Ictiología de la Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios (CCI-UNAMAD).

Mónica Moreno Brush. Coordinadora de Proyectos del Centro de Investigación y Tecnología del Agua de la Universidad de Ingeniería y Tecnología (CITA-UTEC). Investigadora Principal del Proyecto River Mining.

Proyecto River Mining (PEER 8 -235)

El estudio se realizó en el marco del proyecto "River Mining: impactos de la minería aluvial en la cuenca del río Madre de Dios - efectos físicos y planeamiento para su mitigación", ejecutado en el periodo 2020 - 2022 por el Centro de Investigación y Tecnología del Agua de la Universidad de Ingeniería y Tecnología (CITA-UTEC), y el Centro de Innovación Científica Amazónica (CINCIA), en colaboración con el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA); y financiado por el Programa Partnerships for Enhanced Engagement in Research (PEER) de

la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID) y la National Academy of Sciences (NAS).

Reconocimientos

Esta publicación ha sido posible gracias al apoyo del Pueblo de los Estados Unidos de América a través de la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID) con el Programa Partnerships for Enhanced Engagement in Research (PEER), y la National Academy of Sciences (NAS).

Partnerships for Enhanced Engagement in Research (PEER) es un programa de subvenciones internacionales que financia a científicos e ingenieros en los países socios de USAID que colaboran con investigadores financiados por el gobierno de los EE. UU. para abordar los desafíos del desarrollo global.

Las opiniones aquí expresadas son las de los autores y no reflejan necesariamente la opinión de USAID, la NAS, ni del Gobierno de los Estados Unidos.

Agradecimientos

Agradecemos a Paula Sisniegas, Yulissa Estrada, Miguel Macedo, Jorge Condori, Jefone Teves y Rony Sihuincha por su asistencia en el trabajo de campo para la realización de la investigación; a Miguel Macedo y Julissa Barrios, miembros de la Colección Científica de Ictiología (CCI-UNAMAD) en Puerto Maldonado, por la asistencia en la identificación de la ictiofauna; y Jessica Pisconte y Carol Michell por los valiosos aportes en la revisión del presente documento.

Contacto

- River mining - Google Sites
- <https://cincia.wfu.edu/>
- <https://cita.utec.edu.pe/>



Cita (7a ed.) García Veramatus, M. P., Vega, C., Fernández, L. E., Araújo-Flores, J., & Moreno Brush, M. (2023). *Mercurio en peces y el riesgo ecotoxicológico para peces y aves piscívoras de Madre de Dios, Amazonía peruana* (p. 16). Proyecto River Mining (PEER 8-235).

Título: Mercurio en peces y el riesgo ecotoxicológico para peces y aves piscívoras de Madre de Dios, Amazonía peruana

Editado por:
Universidad de Ingeniería y Tecnología (UTEC)
Jr. Medrano Silva No. 165 Barranco, Lima 04, Perú

Co-editado por:
Centro de Innovación Científica Amazónica (CINCIA)
Jr. Ucayali 750, Puerto Maldonado 17001, Perú

1a. edición - marzo 2023

Depósito Legal N° 2023-02442