

SERIE DE RESUMENES DE INVESTIGACIÓN

BOSQUES AMAZÓNICOS CERCANOS A LA ACTIVIDAD MINERA DE ORO ARTESANAL Y DE PEQUEÑA ESCALA CAPTURAN ALTOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA POR MERCURIO

Resumen de investigación No. 8 | Febrero 2022

Palabras clave: Minería de oro artesanal, contaminación de suelos por mercurio, bosques prístinos



Puntos clave:

- ⇒ Los suelos de bosques primarios próximos a la actividad de minería de oro artesanal y en pequeña escala (MAPE) reciben gran cantidad de mercurio por medio de la lluvia que atraviesa el dosel (trascolación) y la caída de hojarasca. Estos valores son superiores a los que se encuentran en suelos de áreas deforestadas y en los de bosques primarios remotos.
- ⇒ Así como en los suelos, el mercurio también se acumula en la fauna silvestre de los bosques primarios próximos a la MAPE, que no se alimentan de ecosistemas acuáticos, como es el caso de las aves que consumen insectos, arañas, frutos y semillas de los bosques.
- ⇒ Debido a la gran cantidad de mercurio proveniente de la MAPE, la concentración de metilmercurio, sustancia altamente tóxica y biodisponible, es también elevada en los suelos de los bosques cercanos.
- ⇒ La conservación en pie de bosques primarios próximos a la MAPE contribuye principalmente a la captación de mercurio en sus suelos, evitando que pasen a cuerpos de agua donde la transformación a metilmercurio es mucho más eficiente, llegando a altas concentraciones en los peces y representando un riesgo de exposición para las personas y para la fauna.

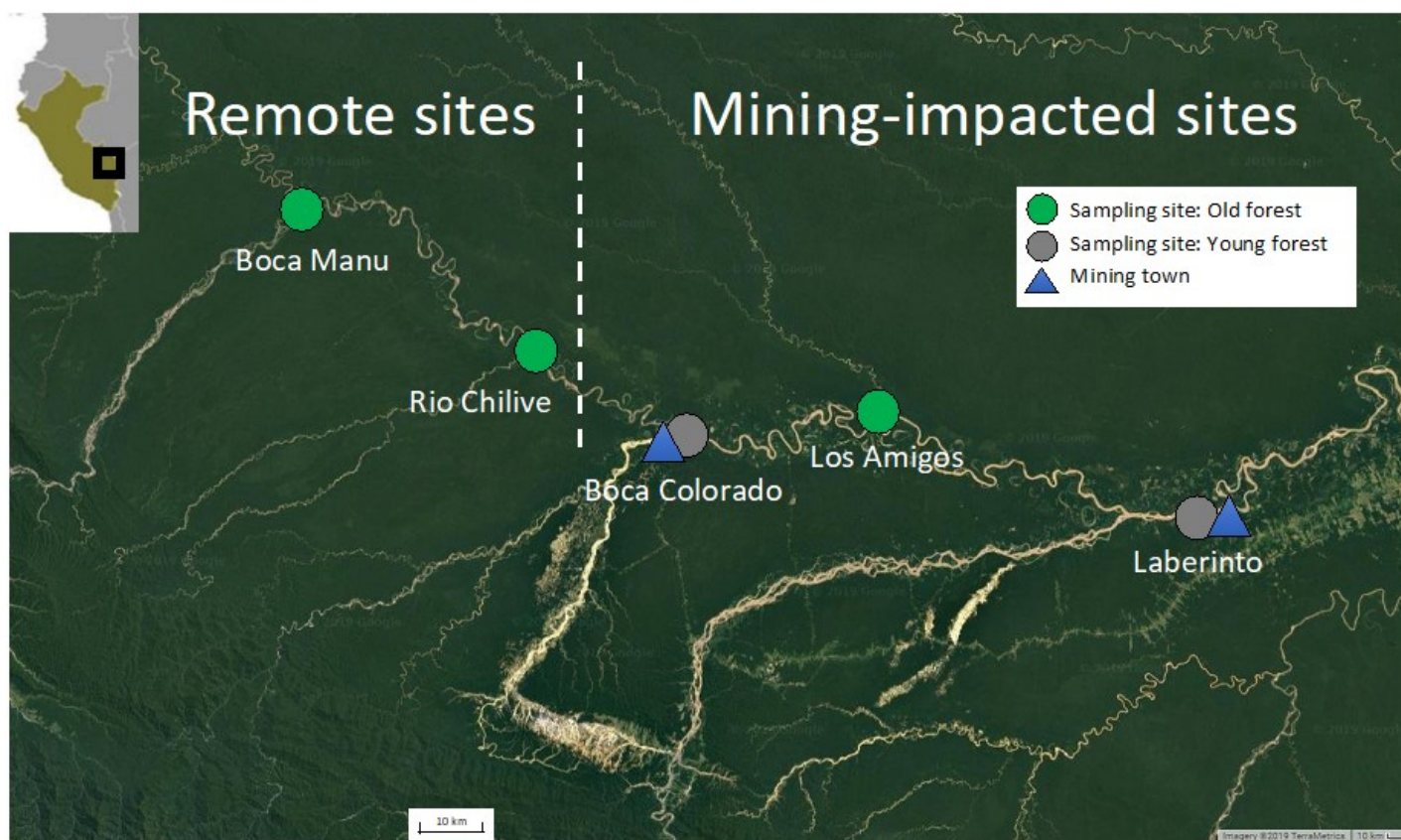


Figura 1: Mapa de los cinco puntos de muestreo, divididos en sitios remotos y sitios afectados por la minería. Los sitios que contienen bosques prístinos se muestran en verde. Los sitios que contienen bosques jóvenes en sitios perturbados se muestran en gris. Las ubicaciones de los pueblos mineros donde se queman las amalgamas de Hg-oro se muestran en los triángulos azules.

INTRODUCCIÓN

El mercurio (Hg) es una potente neurotoxina que puede tener efectos adversos en seres vivos, tanto en las personas¹ como en la vida silvestre². La mayor fuente antropogénica de contaminación atmosférica por mercurio a nivel mundial es el desarrollo de la actividad minera de oro artesanal y de pequeña escala (MAPE)³. Esta actividad también deforesta extensas zonas⁴, dejando a su paso miles de pozas de agua⁵ y pérdida de biodiversidad⁶. Según un informe de Artisanal Gold Council reciente se estima que se han emitido 180 toneladas de Hg por año, producto de la tala de más de 100,000 hectáreas de bosques en los últimos 35 años en Madre de Dios, una región de la Amazonía peruana⁷.

Para la extracción de oro, los mineros remueven sedimentos de los ríos, lagos y llanuras aluviales donde se encuentra el

oro, haciendo uso de maquinaria pesada y sistemas de succión (dragas y similares). Luego agregan mercurio al concentrado, para que de esta forma se una selectivamente al oro, fusionándose en una amalgama fácilmente separada del resto del sustrato. Durante este proceso, el exceso de Hg es vertido en cuerpos de agua y en los suelos. Posteriormente, se obtiene el oro al quemar la amalgama, liberando grandes cantidades de Hg a la atmósfera.

Una vez en la atmósfera el Hg retorna al ecosistema de tres formas. La primera, el Hg se adhiere a las hojas de los árboles a través de pequeñas partículas suspendidas en el aire, para luego ingresar al suelo del bosque por trascolación; es decir, por medio de la lluvia que pasa a través del dosel. La segunda, el Hg suspendido en el aire es absorbido por la vegetación, para luego ingresar al suelo del bosque cuando las hojas caen ("caída de hojarasca"). Finalmente, el Hg en suspensión, se



Figura 2. Colecta de muestra de suelos.

precipita en gotas de lluvia, depositándose en los bosques, áreas deforestadas y cuerpos de agua cuando llueve (“deposición húmeda”).

Este resumen de investigación examina 1) cómo la proximidad de actividades de la MAPE influye en la cantidad de Hg que ingresa al ecosistema, y cómo ésta difiere entre áreas boscosas y deforestadas; 2) la relación entre las entradas de Hg al ecosistema y su almacenamiento en el suelo; y 3) si el Hg producto de la MAPE está ingresando en la fauna que habita estos bosques.

MÉTODOS

Este estudio estableció cinco puntos de muestreo a lo largo del río Madre de Dios, cada uno aproximadamente a 50 km de distancia (Figura 1). Tres puntos de muestreo en localidades designadas como “sitios mineros” ubicados dentro de la zona de aptitud minera en Boca Colorado, Los Amigos y Laberinto. Mientras los puntos de muestreo adicionales designadas como “sitios remotos” sin actividad minera sirvieron como zonas de control en Boca Manu y Chilive, aproximadamente 100 km y 50 km de la extracción de oro, respectivamente. En la vegetación de las zonas de Boca Colorado y Laberinto predominan los

bosques perturbados y en recuperación, con árboles generalmente más jóvenes y un dosel menos denso en comparación con los bosques primarios de Los Amigos y Boca Manu. Cabe resaltar que la zona de Los Amigos, a pesar de estar cerca de la actividad minera, se encuentra dentro de una Concesión de Conservación. En cada una de estas zonas, se recolectaron muestras bajo el dosel del bosque y en los claros o en áreas deforestadas completamente, desprovistas de plantas leñosas, para comparar las áreas donde el agua de la lluvia se escurre del dosel al suelo, de aquellas donde la lluvia cae directamente al suelo.

Las muestras se tomaron en la estación seca y húmeda del 2018, así como en la estación seca del 2019. En cada parcela, se recolectó lluvia (agua de lluvia) en el claro (n=3 por temporada por sitio). Asimismo, agua de lluvia que pasa a través del dosel (transcolación; n=4 por temporada por sitio); en hojas (n=8 tipos de hojas por temporada por sitio); y en suelo (n=3 por estación por sitio). De otra parte se colocaron muestradores (colectores) pasivos de aire en claros de cada uno de los puntos de muestreo para recolectar Hg elemental gaseoso (MEG) presente en la atmósfera (n=1 en la estación seca, n=2 en la estación húmeda por sitio). En la estación seca del 2019, se recolectó caída de agua de seis parcelas boscosas adicionales

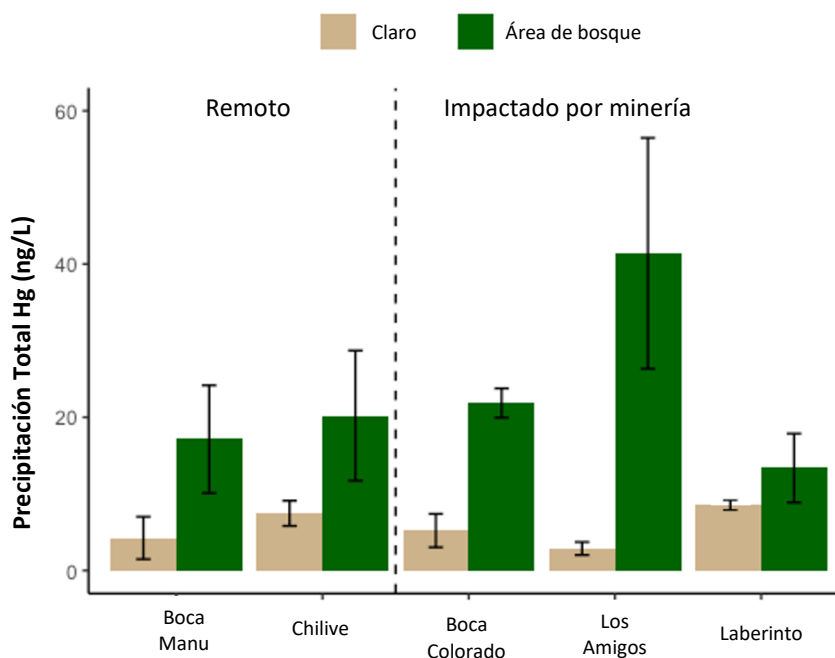


Figura 3A): Concentraciones totales de Hg en la lluvia en los dos sitios remotos y tres sitios afectados por la minería. Los valores presentados representan el promedio y el error estándar. Las barras café representan el agua de lluvia de los claros. Las barras verdes representan la precipitación directa (lluvia que pasa a través del dosel) en áreas boscosas. Los aportes de Hg a través de la caída directa de lluvia fueron más altas en el área boscosa de la Concesión de Conservación Los Amigos. No hubo diferencia en los aportes de Hg a través del agua de lluvia en los claros.

(n=4 por parcela) en el sitio de Los Amigos. También se recolectó datos LIDAR para la estimación del índice de área foliar utilizando el Laboratorio Volador Deshabitado GatorEye. Adicionalmente, se recolectaron plumas de aves en el sitio Los Amigos y en la Estación Biológica Cocha Cashu (un sitio remoto) en la estación seca del 2019.

Se analizó el contenido total de Hg en las muestras de agua de lluvia mediante el método 1631 revisión E de la EPA, en un analizador automático de mercurio total Tekran 2600. Asimismo, se analizó el contenido total de Hg en muestras de hojas, suelo y plumas de aves utilizando el método 7473 de la EPA, en un analizador de mercurio Milestone Direct. Los muestreadores pasivos de aire (UofT-PAS) se analizaron para determinar el contenido total de Hg utilizando el método espectrometría de absorción atómica de vapor (CV-AAS, método USEPA 7473). Finalmente, analizamos muestras de agua de lluvia y caída de agua de las tres estaciones, muestras de hojas de la estación seca del 2018 y muestras de suelo de las tres estaciones para detectar metil mercurio, sustancia altamente tóxica que ingresa

a la cadena alimenticia (se bioacumula) utilizando el método EPA 1630 en un espectrómetro Tekran 2500.

RESULTADOS

Las concentraciones atmosféricas de Hg están asociadas a la proximidad con actividades de MAPE.

Las concentraciones de mercurio elemental gaseoso (MEG) fueron de 2 a 14 veces más altas en los sitios mineros en comparación con los sitios remotos. Las concentraciones de MEG fueron más altas en los dos sitios cercanos a los pueblos mineros (Boca Colorado, Laberinto) con valores de hasta 10.9 ng/m³. Los valores de mercurio en los sitios mineros estaban por encima de la concentración promedio del Hemisferio Sur y eran similares a las concentraciones encontradas en zonas urbanas e industriales de los Estados Unidos, China y Corea del Sur, y en ocasiones superiores a los valores encontrados en zonas que reciben aportes de Hg provenientes de la combustión del carbón, en China. En contraste, las concentraciones de MEG en las

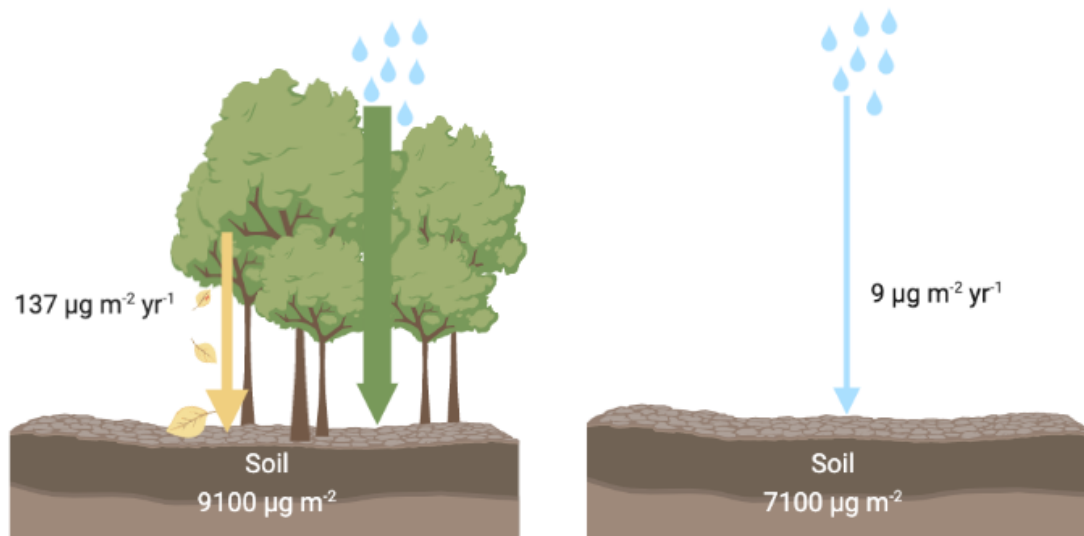


Figura 3B): Aportes totales de Hg y almacenamiento en un área boscosa y en un claro en la Concesión de Conservación Los Amigos, un bosque intacto protegido ubicado cerca de la MAPE. En áreas boscosas, el Hg ingresa al suelo del bosque y al suelo a través de la precipitación (lluvia que pasa a través del dosel) y la caída de las hojas. En los claros, el Hg ingresa al suelo a través del agua de lluvia. Los aportes y el almacenamiento de Hg en el suelo fueron mucho mayores en el área boscosa que en el claro.

dos ubicaciones remotas fueron bajas con valores por debajo de la concentración promedio observado en estudios en el Hemisferio Sur. Por lo tanto, es probable que la quema de amalgamas de Hg-oro sea la principal fuente de concentraciones elevadas de Hg atmosférico en Madre de Dios.

Las concentraciones de Hg total por trascolación dependen tanto de la proximidad a la actividad minería como de la presencia de bosques prístinos maduros primarios.

Las concentraciones más altas de Hg se encontraron en los bosques primarios cercanos a la zona minera en el sitio Los Amigos (Figura 3A). Se midieron las concentraciones totales de Hg por trascolación en el bosque de Los Amigos encontrándose los niveles más altos jamás reportados en el mundo (rango: 18-61 ng L⁻¹). Estas concentraciones se encuentran al mismo nivel, y en ocasiones exceden las concentraciones reportadas en áreas altamente contaminadas por minas de mercurio y por la combustión industrial de carbón en China. Por el contrario, las concentraciones de Hg en lluvias en dos puntos de muestreo al interior de zonas mineras fueron las mismas que en las dos zonas remotas (rango: 8-31 ng/L). Cuando las concentraciones encontradas se utilizaron para estimar la cantidad total de Hg que ingresa al paisaje durante el año, resultó que Los Amigos presentó la tasa anual más altas de aportes de Hg reportadas a nivel mundial (71 µg m² /año).

Las concentraciones de Hg en el dosel fueron más altas en bosques cercanos a la MAPE

Los tres puntos de muestreo al interior de zonas mineras reportaron las concentraciones más altas de Hg total promedio (0.080-0.22 µg g⁻¹) en follaje. Dichas concentraciones excedieron los registros en sitios remotos, así como los de fuentes de Hg puntuales en América del Norte, Europa, Asia y de bosques amazónicos de América del Sur. Incluso fueron comparables a las concentraciones reportadas en bosques mixtos subtropicales de China. El mayor aporte anual de Hg a través de la hojarasca se registró en la Concesión de Conservación Los Amigos (66 µg m² /año), ya que sus bosques con la mayor cantidad anual de hojarasca sobre suelo se encuentran próximos a actividades MAPE. Estos resultados muestran que las hojas son un aporte importante de Hg en estos ecosistemas terrestres impactados por la minería artesanal de oro.

Las entradas de Hg total en áreas boscosas de la Concesión de Conservación Los Amigos cercana a actividad MAPE fueron más de 15 veces superiores que las áreas circundantes deforestadas.

Se encontró que los aportes atmosféricos (incluida la deposición tanto seca como húmeda) de Hg total a las áreas boscosas de la Concesión para la Conservación Los Amigos fueron de 137 µg Hg m²/año en comparación con 9 m²/ año en las áreas

deforestadas (Figura 3B). Este número supera los valores de América del Norte y Europa en lugares cerca de combustión de carbón y es similar a los niveles reportados en áreas industriales de China. También encontramos que, entre las seis parcelas medidas con LIDAR en Los Amigos, la extensión de dosel, (medida como índice de área foliar, se asoció con el aporte de Hg más elevados. Estos resultados muestran que el dosel de los bosques es importante para la captación del Hg atmosférico liberado por la MAPE y para la transferencia de este Hg atmosférico al suelo.

No hubo diferencia en los aportes de Hg en las áreas no boscosas (claros) en todos los puntos de muestreo, independientemente de la proximidad a la MAPE.

Las concentraciones totales de Hg en el agua de lluvia de la estación seca en todos los sitios no boscosos (claros) fueron comparables (1.5-9.1 ng/L). Todos los claros de los sitios presentaron concentraciones bajas de Hg, por debajo de las encontradas en áreas remotas de la Amazonía. Por lo tanto, aportes de Hg en el agua de lluvia en las áreas no boscosas, o claros, son uniformes en toda la región y no reflejan la actividad minera. No obstante, las áreas deforestadas por la MAPE aún podrían tener contaminación por mercurio que se origina en las liberaciones directas de Hg durante el proceso de amalgamación utilizado en la MAPE.

Los suelos superficiales (0-5 cm superiores) en el área boscosa de la Concesión para la Conservación Los Amigos presentan los niveles más altos de Hg total en nuestro estudio.

Se obtuvo 140 ng/g de Hg total en el sitio boscoso de la concesión de Los Amigos, durante la estación seca. Adicionalmente, se observó que los niveles de Hg en suelos eran altos incluso en profundidad de hasta 45 cm. El único sitio que tuvo una mayor concentración de Hg en los suelos superficiales fue una muestra de Boca Colorado, que puede estar relacionada con la contaminación local durante el proceso de amalgama de Hg. En general, las concentraciones de Hg en el suelo superficial se correlacionaron con las concentraciones totales de Hg en la trascolación de sitios boscosos, lo que sugiere la participación de la lluvia que pasa a través del dosel en los aportes de Hg al suelo donde puede almacenarse.

Las concentraciones más altas de metilmercurio (MeHg), una de las formas más tóxica y biodisponible de Hg, se encontraron en suelos de los bosques cercanos a la MAPE.

La mayor parte de la investigación sobre Hg relacionadas a la MAPE se han centrado en la contaminación en los ecosistemas acuáticos, ya que el Hg se convierte más fácilmente en metilmercurio (MeHg) en estos entornos. Sin embargo, encontramos que los ecosistemas terrestres cercanos a la MAPE también presentaron concentraciones elevadas de Hg, lo que su-



Figura 4. Muestreo de hojas de dosel de los árboles usando una honda Notch Big Shot®



Figura 5. Colectores de agua de lluvia (tubos de PVC) y de aire (frascos azules).

giere que los impactos de la MAPE se extienden más allá de los cuerpos acuáticos (ríos y lagos). Observamos las concentraciones más altas de MeHg en suelo en dos de los puntos de muestreo al interior de zonas mineras. En Boca Colorado y Los Amigos; 1.4 y 1.1 ng MeHg/ g, respectivamente. También encontramos que el porcentaje de Hg presente como MeHg, calculado como concentración de MeHg/concentración total de Hg x 100 %, en estos dos sitios era comparable a otros sitios en todo el mundo, 1.4 % y 0.8 % de Hg como metilmercurio, respectivamente.

Estos hallazgos indican que las altas concentraciones de metilmercurio en estos suelos probablemente se deban a los altos aportes de Hg y que son almacenados en los suelos, y no a una conversión eficiente de Hg inorgánico a MeHg en el suelo. Si bien el Hg se convierte en MeHg en el suelo de los bosques cercanos a la minería de oro artesanal, es importante señalar que la eficiencia relativa de este proceso (el porcentaje de Hg presente como MeHg) sigue siendo mucho menor en los ecosistemas terrestres que en los ecosistemas acuáticos.

Los niveles de Hg en aves silvestres terrestres estudiadas cerca de MAPE fueron elevados en comparación con las evaluadas en los bosques remotos.

Se observó que las aves silvestres terrestres de la Concesión de Conservación Los Amigos, ubicada cerca de la MAPE, tenían

concentraciones de Hg hasta doce veces más altas que las aves de la Estación Biológica Cocha Cashu (sitio remoto) (Figura 6). Este patrón se observó en las tres especies de aves examinadas el insectívoro del sotobosque, hormiguerito de flanco blanco (*Myrmotherula axillaris*), el insectívoro seguidor de hormigas, ojo pelado de flanco negro (*Phlegopsis nigromaculata*) y el frugívoro saltarín de cola blanqueada (*Pipra fasciicauda*) independientemente de los hábitos de alimentación. Siete de diez individuos de *Phlegopsis nigromaculata* muestreados en Los Amigos tenían niveles de Hg por encima de los que afectan el éxito reproductivo, mientras que ninguno de Cocha Cashu tenía niveles que excedieran estos estándares. Estos resultados sugieren que el Hg de la MAPE está también entrando en la red alimentaria terrestre y puede tener un impacto negativo en el éxito reproductivo, y por lo tanto, en la viabilidad de las poblaciones de aves.

CONCLUSIONES

Se observó que los aportes de mercurio al ecosistema terrestre se relacionan positivamente tanto con la proximidad a la MAPE como con dosel de los árboles. Se encontró que los bosques intactos y protegidos cerca de la MAPE tienen aportes más altos de mercurio. Las concentraciones de mercurio total y el

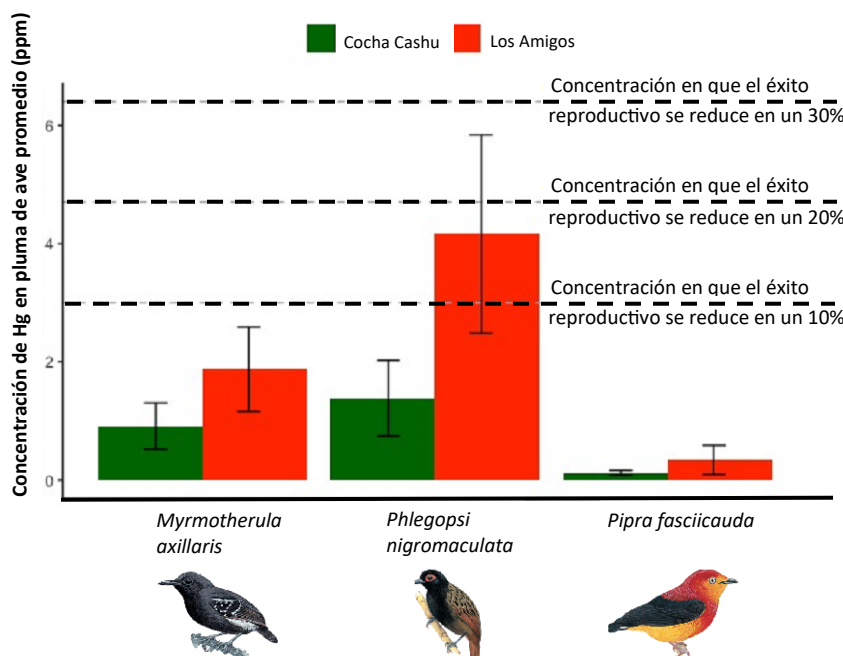


Figura 6: Concentración promedio de Hg total en plumas de aves en la Estación Biológica Cocha Cashu (un sitio remoto) y la Concesión de Conservación Los Amigos (un sitio afectado por la minería). Las concentraciones de Hg se midieron en *Myrmotherula axillaris* (un invertívoro del sotobosque), *Phlegopsis nigromaculata* (un invertívoro seguidor de hormigas) y *Pipra fasciicauda* (un frugívoro del sotobosque).

aporte anual de mercurio en las áreas boscosas de la Concesión de Conservación Los Amigos estuvieron entre las más altas jamás reportadas. Además, se evidenció el almacenamiento de mercurio en los suelos forestales, niveles apreciables del metilmercurio tóxico y biodisponible y niveles elevados de Hg total en pájaros cantores en bosques primarios cerca de la minería. Evidencia de que la MAPE represente un riesgo para la gran biodiversidad de animales que viven en estos bosques protegidos.

Estos resultados también muestran que la protección continua de los bosques prístinos y el aumento de áreas de amortiguamiento para estos bosques son un aspecto importante para gestionar la dinámica del mercurio en los ecosistemas amazónicos. Si estos bosques son talados o quemados para actividades mineras o agrícolas adicionales, el mercurio que actualmente está almacenado en estos suelos podría transportarse a cuerpos de agua cercanos, donde probablemente se convertirá de manera más eficiente en metilmercurio. Como consecuencia, el metilmercurio se incorporaría en la cadena alimenticia acuática, acumulándose en los peces y otros animales acuáticos, incrementando los riesgos para la salud de las poblaciones que consumen pescado.

REFERENCIAS

- 1) E. Ha, N. Basu, S. Bose-O'Reilly, J. G. Dorea, E. McSorley, M. Sakamoto, H. M. Chan, Current progress on understanding the impact of mercury on human health. *Environ. Res.* 152, 419–433 (2017).
- 2) A. M. Scheuhammer, M. W. Meyer, M. B. Sandheinrich, M. W. Murray, Effects of environmental methylmercury on the health of wild birds, mammals, and fish. *Ambio.* 36, 12–18 (2007).
- 3) UNEP, "Global mercury assessment" (Geneva, 2018).
- 4) J. C. Espejo, M. Messinger, F. Rom, C. Ascorra, L. Hernandez, M. Silman, Deforestation and forest degradation due to gold mining in the Peruvian Amazon: A 34-year perspective. *Remote Sens.* 10, 1–17 (2018).
- 5) J. R. Gerson, S. N. Topp, C. M. Vega, J. M. Gardner, X. Yang, L. E. Fernandez, E. S. Bernhardt, T. M. Pavelsky, Artificial lake expansion amplifies mercury pollution from gold mining. *Sci. Adv.* 6, eabd4953 (2020).
- 6) K. E. Markham, F. Sangermano, Evaluating wildlife vulnerability to mercury pollution from artisanal and small-scale gold mining in Madre de Dios, Peru. *Trop. Conserv. Sci.* 11 (2018), doi:10.1177/1940082918794320. small-scale gold mining in Madre de Dios, Peru. *Tropical Conservation Science*, 11.
- 7) M. A. Cardo, P. M. Vargas, "Proyecto: Plan nacional de acción sobre mercurio en el sector de la minería de oro artesanal y de pequeña escala en el Perú" (2017).

SERIE DE RESUMENES DE INVESTIGACIÓN

Los resúmenes de investigación de CINCIA contienen análisis, resultados y recomendaciones de investigación preliminares. Se distribuyen para estimular el debate oportuno y la retroalimentación crítica, y para influir en el debate en curso sobre cuestiones emergentes. El contenido de los resúmenes de investigación puede ser revisado y eventualmente publicarse en otros formatos.



AUTORES

Gideon Erkenwick, David C Evers, Luis E Fernández, Heileen Hsu-Kim, Giancarlo Inga, Kelsey Lansdale, Melissa J Marchese, Ari Martínez, Caroline Moore, William Pan, Miles Silman, Emily A. Ury, Claudia Vega, Mrinalini Watsa, Emily Bernhardt.

SOCIOS DE INVESTIGACIÓN

Universidad de Duke.

Universidad de Carolina del Norte en Chapel Hill.

CENTRO DE INNOVACIÓN CIENTÍFICA AMAZONICA

El Centro de Innovación Científica Amazónica (CINCIA) es una alianza entre la Universidad de Wake Forest y USAID. Fue creado en el año 2016 con el objetivo de generar capacidad científica para identificar, recuperar y mitigar las amenazas a los ecosistemas, la biodiversidad y la salud en Madre de Dios. CINCIA apunta a fortalecer la capacidad de investigación y mejorar la aplicación de los conocimientos científicos.

EXONERACIÓN DE RESPONSABILIDADES

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), Wake Forest University y el Centro de Innovación Científica Amazónica. Las opiniones aquí expresadas son las de los autores y no reflejan necesariamente la opinión de USAID ni del Gobierno de los Estados Unidos, ni del resto de instituciones que contribuyeron con la impresión de esta publicación.

AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer a las siguientes personas por sus contribuciones y ayuda en la realización de esta investigación: Ramiro Córdova Salas, Francisco Phuno Soncco, Bryan Huamantupa Rivera, Cecilio Huamantupa, Arianna Basto, Kelsey Lansdale, Melissa Marchese, Arabella Chen, Christian Lara, Annie Lee, Fernanda Machicao, Tatiana Manidis, Laura Naslund, Centro de Innovación Científica Amazónica (CINCIA), Conservación Amazónica (ACCA) y Concesión de Conservación Los Amigos por asistencia de campo; Brooke Hassett, Kim Hutchison, Gary Dwyer, Nelson Rivera, Faye Koenigsmark, Natalia Neal-Walthall, Austin Wadle, Rachel Coyte, Rand Alotaibi y Arianna Agostini por su asistencia en el laboratorio; y Jennifer Swenson por sus asesoramientos en teledetección.

Cita sugerida: Gerson J., Topp S., Vega C.M., Gardner J., Yang X., Fernández L.E., Bernhardt E., Pavelsky T. (2021) *Bosques amazónicos cercanos a la actividad minera de oro artesanal y de pequeña escala capturan altos niveles de contaminación atmosférica por mercurio*. (Resumen de investigación CINCIA #8) Puerto Maldonado, Perú: Centro de Innovación Científica Amazónica)FORESTALES

CINCIA | CENTRO DE INNOVACIÓN CIENTÍFICA AMAZÓNICA con el apoyo de:



Copyright 2022 Centro de Innovación Científica Amazónica. Este trabajo está licenciado bajo la licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivative 4.0. Para ver una copia de esta licencia, visite <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>