

Distribución y transporte del mercurio en la cuenca Madre de Dios, Amazonía peruana: influencia de los sedimentos y la hidrodinámica

Resumen de Investigación N° 05 | Marzo 2023

Palabras clave: Carga de mercurio, hidrodinámica, transporte de sedimentos, minería de oro, MAPE.



Puntos clave

- Este estudio ofrece la primera estimación cuantitativa de la influencia que ejercen la hidrodinámica y los sedimentos en el transporte de mercurio en un río amazónico para un tramo de más de 200 km, afectado por actividades de minería aurífera aluvial.
- Se estima que el río Madre de Dios moviliza en torno a 12 t de mercurio al año en el tramo bajo del corredor minero que atraviesa. Este transporte de mercurio está asociado al transporte de sedimentos, que a su vez depende del régimen hidrológico y la presencia de actividades mineras.
- Los sedimentos en el río Madre de Dios y sus tributarios Colorado e Inambari se transportan primariamente en la fase suspendida, la cual se compone de sedimento cohesivo (limos y arcillas) en un 64% y no cohesivo (arenas) en un 32%.
- Las concentraciones de mercurio en sedimentos suspendidos fueron más altas en las localidades mineras (60-626 ppb) respecto a las no mineras (41-67 ppb), evidenciando los impactos antrópicos, principalmente el de la minería.
- El tributario Inambari, que acumula el mayor número de operaciones mineras aguas arriba, presentó los valores más altos de carga de sedimentos suspendidos totales (~10 mill t/año) y de mercurio (~2 t/año). Este tributario supone un aumento en las aguas del 70% en la concentración de sedimentos y del 40% en mercurio, al ingresar en el río Madre de Dios.

Introducción

La minería artesanal y de pequeña escala (MAPE) de oro es la mayor fuente antropogénica de contaminación por mercurio (Hg) (UNEP, 2019). En la región amazónica de Madre de Dios (MDD), sudeste peruano, la minería es predominantemente aluvial, es decir, se lleva a cabo en las llanuras, terrazas y cauces de los ríos. Solo en los últimos 30 años, la MAPE en MDD ha deforestado aproximadamente de 100 000 ha de bosque amazónico (Caballero Espejo *et al.* 2018). Los mineros utilizan el mercurio metálico para extraer las partículas de oro de los suelos y sedimentos por amalgamación. No obstante, al ser la MAPE una actividad poco controlada por el Estado peruano, se desconoce con exactitud cuánto mercurio se utiliza o libera al medio ambiente, así como el destino final de este. En la Amazonía; sin embargo, la MAPE no es la única fuente de mercurio. Los suelos amazónicos contienen naturalmente este elemento y pueden también representar una importante fuente para los sistemas acuáticos aledaños (De Oliveira *et al.*, 2001). Por ello, la deforestación y otras actividades vinculadas a la MAPE que aumentan la erosión de paisajes, como la construcción de carreteras, la agricultura y la expansión urbana, pueden contribuir a la carga de mercurio en los sistemas acuáticos (Wantzen & Mol, 2013).

Otro impacto importante de la minería son los cambios hidrogeomorfológicos, físico-químicos y biológicos en los ríos (Goulding, 2003; Montaña, 2021). La minería aluvial acelera las tasas de erosión, lo que a su vez aumenta la cantidad de partículas de sedimentos en el agua, generando un desbalance en los procesos naturales de erosión y deposición que tienen los ríos. Por otro lado, el incremento de sedimentos genera el aumento en la turbidez del agua, reduciendo la transmisión de luz y alterando el hábitat de plantas y animales acuáticos (Barthem & Goulding, 2007). La dinámica del agua y los sedimentos, la composición geoquímica y la granulometría de los sedimentos son factores que ejercen

un importante control sobre la distribución y el transporte de mercurio en ríos tropicales afectados por MAPE (Moreno-Brush, 2020).

Frente a esta grave problemática ambiental, 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 mediciones hidrodinámicas, de transporte de sedimentos y concentración de mercurio en el departamento de Madre de Dios, Perú, con el objetivo de proporcionar información sobre la dinámica del mercurio en los sistemas fluviales amazónicos afectados por la MAPE. 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

Área de estudio

Este estudio se desarrolló en una sección de aproximadamente 240 km del río Madre de Dios (MDD), desde la confluencia con el río Chilive, sin presencia histórica de minería, hasta aguas abajo del centro poblado Laberinto, con presencia activa de minería. Un total de 19 puntos de muestreo fueron ubicados a lo largo del río MDD en las áreas de desfogue de las microcuencas comprendidas en el área de estudio (Figura 1). También se incluyeron en el muestreo los ríos tributarios Colorado e Inambari que drenan las zonas con mayor minería en la región. Para fines de análisis y discusión, el área de estudio se dividió en tres tramos:

- **Tramo Alto:** Parte alta del río MDD, aguas arriba del afluente río Colorado (puntos de muestreo MDD07 y MDD08). Tramo con menor área deforestada por minería y considerado como área de referencia.

- **Tramo Medio:** Parte media del río MDD, entre los afluentes Colorado e Inambari (puntos MDD03, MDD04, MDD05, MDD06). Incluye el río Colorado y su tributario Puquiri en la zona minera Delta 3 y Huepetuhe (puntos de muestreo Q01, Q02, BC01, BC02, BC03).

- **Tramo Bajo:** Parte baja del río MDD, aguas abajo del afluente Inambari (puntos MDD01 y MDD02). También incluye el río Inambari en la quebrada Caychihue (puntos de muestreo IB01, IB02, IB03, IB04).

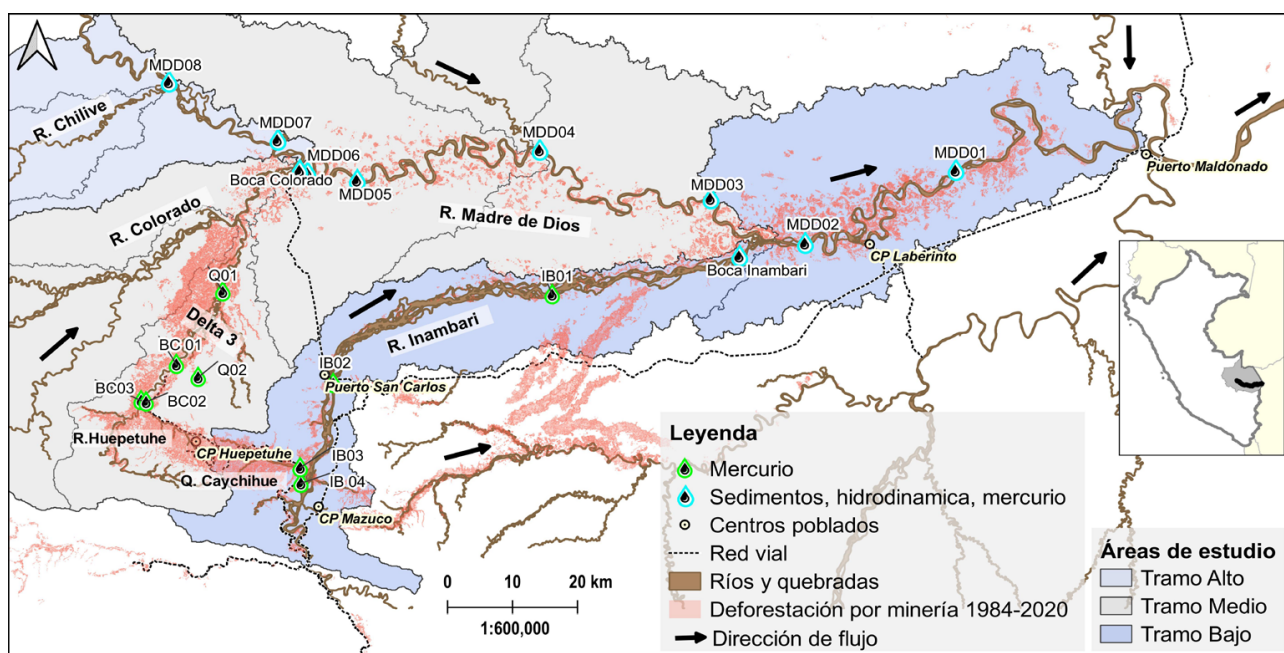


Figura 1. Mapa con las 19 estaciones de muestreo a lo largo del río Madre de Dios. Las gotas verdes indican el muestreo de sedimentos para la determinación de mercurio, mientras que las gotas celestes indican las secciones donde se hicieron mediciones de sedimentos, hidrodinámica y mercurio. Las áreas en color rojo indican las zonas deforestadas por minería entre los años 1984 y 2020.

Mediciones y colecta de muestras

El trabajo de campo se realizó en noviembre del 2020 (época de transición a temporada de lluvia, vaciante-creciente) en 19 puntos distribuidos en el área de estudio (Figura 1). La distribución de mercurio en sedimentos se evaluó en todos los puntos, mientras que el transporte de sedimentos y mercurio se investigó sólo a lo largo del cauce principal del río MDD.

Mediciones hidrodinámicas e hidrosedimentológicas: Las mediciones hidrodinámicas e hidrosedimentológicas

consistieron en la medición del caudal y la colecta de muestras de sedimento para calcular la concentración y la carga de los sedimentos (suspendidos y de fondo) en los diferentes puntos. Todas las mediciones y colectas en el río principal se realizaron siguiendo la *Guía Ríos Danzantes: guías metodológicas para el desarrollo de una línea de base física de los ríos Andes y Amazonía* (CITA-UTEC, 2021). En cada punto de estudio se tomó registro de la forma de la sección transversal y se midió la distribución de caudales con un equipo acústico RiverRay ADCP 600 kHz. Para determinar la concentración de sedimentos

suspendidos en la sección transversal de cada punto de muestreo se colectó un volumen de agua conocido (1.5 L) en tres columnas de agua y a seis profundidades ubicadas en los centroides de las áreas del 10, 50 y 90% del incremento de caudal medidos por el ADCP (OSW-USGS, 2021) (Figura 2). De cada muestra, se separaron los sedimentos no-cohesivos ($>63 \mu\text{m}$, grava

y arena) de los cohesivos ($1.2-63 \mu\text{m}$, limos y arcillas) mediante filtración *in situ*. También se colectaron sedimentos de fondo al 50% de la distribución del caudal con una draga manual. Todas las muestras fueron conservadas en bolsas ziplock y a temperatura ambiente hasta su arribo al Centro de Investigación y Tecnología del Agua de UTEC (CITA-UTEC) en Lima, Perú.

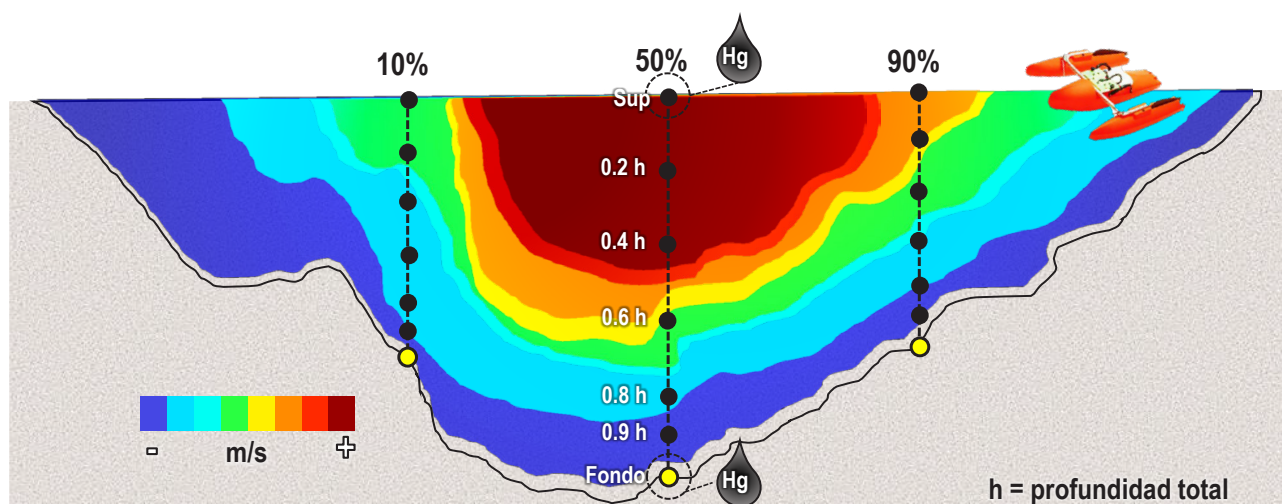


Figura 2. Diagrama de la hidrodinámica del río, donde los colores de azul a rojo representan la velocidad de flujo en la sección medida por el ADCP. El muestreo se realizó a 10, 50 y 90% del caudal y a 6 profundidades en la columna de agua (puntos negros), las muestras para la determinación de mercurio se colectaron al 50% de distribución del caudal en la parte superficial y de fondo (gotas negras).

Colecta de sedimentos para análisis de mercurio:

Las muestras de sedimento para el análisis de mercurio se colectaron al 50% de la distribución del caudal en los mismos puntos donde se realizaron las mediciones hidrodinámicas e hidrosedimentológicas (puntos celestes en Figura 1). Se colectaron sedimentos suspendidos manualmente usando una botella de plástico HDPE de 1 litro previamente esterilizada mediante luz UVC. El sedimento suspendido se recuperó pasando el agua por filtros de $63 \mu\text{m}$ y $0.45 \mu\text{m}$, mientras que el sedimento de fondo se colectó con una draga manual. También se colectaron sedimentos suspendidos a lo largo de los tributarios Colorado e Inambari y en las zonas mineras Delta-3 y Huepetuhe (puntos verdes en Figura 1).

Todas las muestras para análisis de mercurio fueron conservadas selladas al vacío, en frío y en oscuridad hasta su arribo al Laboratorio de Mercurio y Química Ambiental (LAMQA) cogestionado por el Centro de Innovación Científica Amazónica (CINCIA) y el Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana (IIAP) ubicado en la Estación Roger Beuzeville Zumaeta, en el km 20 de la carretera Interoceánica en Puerto Maldonado.

Análisis de laboratorio

Análisis de mercurio: Todas las muestras de sedimento (suspendidos y de fondo) fueron liofilizadas y analizadas para la determinación de mercurio total mediante la técnica de descomposición térmica y espectrofotometría

de absorción atómica utilizando un analizador directo de mercurio, Milestone DMA-80 Direct Mercury Analyzer usando el método EPA 7374 (USEPA, 2007). Los sedimentos de fondo se analizaron sin fraccionar (sin tamizar) y fraccionados (pasados por tamiz de $<60 \mu\text{m}$) para examinar la distribución de mercurio en el sedimento cohesivo (limo y arcilla) y no cohesivo (arenas). Los resultados de las concentraciones de mercurio se reportan sobre la base de peso seco y en las unidades de partes por billón (ppb) que corresponde a microgramos (μg) de mercurio por kilogramo (kg) de sedimento.

Concentración de sedimentos suspendidos cohesivos y no cohesivos [SSc y SSnc]: La concentración de las muestras de sedimentos suspendidos previamente tamizadas en campo para separar la fracción cohesiva ($\leq 63 \mu\text{m}$) de la no cohesiva ($\geq 63 \mu\text{m}$), se determinó siguiendo el método 2540 D (APHA, 1995). Este consiste en secar las muestras en una estufa a 105°C por 24 horas y luego incinerarlas en una mufla a 500°C por una hora para eliminar los residuos volátiles. La concentración de cada fracción se calculó por diferencia de pesos y con el dato del volumen de agua recolectado en campo. La concentración total de sedimentos suspendidos [SS] se obtuvo de la suma de [SSc] y [SSnc].

Análisis de datos

Cálculo de carga de sedimentos suspendidos [Carga-SS]: La carga de sedimentos suspendidos [Carga-SS] (t/día) se calculó sumando la carga de sedimentos cohesivos [Carga-SSc] y no cohesivos [Carga-SSnc]. La [Carga-SSc] se obtuvo multiplicando la concentración de sedimentos suspendidos cohesivos [SSc] (mg/L) promedio por el caudal instantáneo total (m^3/s) de la sección, mientras que la carga de sedimentos suspendidos no cohesivos [Carga-SSnc] se obtuvo multiplicando la suma de promedios ponderados de [SSnc] en las tres columnas de agua por su respectivo caudal parcial.

Cálculo de la carga de mercurio [Carga-SSHg]:

La carga de mercurio [Carga-SSHg] se calculó multiplicando los valores de carga de sedimentos suspendidos cohesivos [Carga-SSc] por la concentración de mercurio [Hg], debido a que el mercurio se transporta predominantemente en las partículas de sedimento cohesivo.

Interpretación de los niveles de mercurio:

Debido a que el Perú no tiene un Estándar de Calidad Ambiental (ECA) para mercurio en sedimentos, los resultados aquí reportados se contrastaron con los dos límites permisibles para mercurio en sedimentos establecidos por la norma canadiense: 170 ppb según *La Guía Provisional de Calidad del Sedimento* (ISQG, por sus siglas en inglés), que representa la concentración por debajo de la cual no se espera que ocurran efectos biológicos adversos en la fauna acuática; y 486 ppb según el *Nivel de Efecto Probable* (PEL, por sus siglas en inglés), que es la concentración sobre la cual frecuentemente se registran efectos biológicos adversos (CCME-CEPA, 2001).

Resultados

Hidrodinámica e hidrosedimentología en el río Madre de Dios

El río Inambari aporta 5 veces más agua, 7 veces más sedimento suspendido y 10 veces más sedimento de fondo que el río Colorado al río Madre de Dios.

La Figura 3 presenta los resultados del caudal y el transporte de sedimentos a lo largo del cauce principal del río MDD y en las confluencias con los tributarios Colorado e Inambari. El caudal del río Madre de Dios durante las mediciones realizadas en noviembre de 2020 varió desde $464 \pm 0.4 \text{ m}^3/\text{s}$ en Tramo Alto hasta $3161 \pm 2.6 \text{ m}^3/\text{s}$ en Tramo Bajo, con contribuciones de $109 \pm 0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ y $554 \pm 0.6 \text{ m}^3/\text{s}$ de los tributarios Colorado e Inambari, respectivamente. Las mediciones se realizaron durante la época de

transición vaciante - creciente. El transporte o la carga total de sedimentos en el río MDD, así como en las confluencias con los tributarios Colorado e Inambari estuvo compuesto en promedio por un 99.99% de sedimentos suspendidos [Carga-SS] y un 0.01% de sedimentos de fondo [Carga-SF], lo que concuerda con los valores reportados para otros ríos amazónicos del Perú (Armijos et al. 2013; CITA-UTEC 2021; Guerrero *et al.* 2023) y significa que la mayor parte del sedimento que transporta el río está en la fase suspendida.

La carga de sedimentos suspendidos [Carga-SS] (suma de carga de sedimentos suspendidos cohesivos [Carga-SSc] y no cohesivos [Carga-SSnc]) mostró un aumento en dirección aguas abajo en el río MDD. Los valores obtenidos en los puntos de aforo de las secciones aumentó de Tramo Alto (MDD07 = 12 024 t/día), Tramo medio (MDD03 = 71 212 t/día) a Tramo Bajo (MDD01 = 470 432 t/día), lo que se atribuye principalmente al aporte de los afluentes Colorado e Inambari, pero también al aumento de deforestación (por minería u otras actividades humanas) en Tramo Medio y Tramo Bajo. La ausencia de cobertura vegetal generaría un aumento en la escorrentía superficial, la cual está relacionada al proceso de erosión pluvial, que es la remoción de partículas del suelo y la producción de sedimentos que pueden ser transportados hasta los cursos de agua principales. La [Carga-SF] varió pero sin presentar una tendencia espacial evidente.

De acuerdo al análisis sedimentológico, la [Carga-SS] estuvo compuesta en promedio por un 66% de sedimento cohesivo y un 34% sedimento no cohesivo, alcanzando este último valores de hasta 55% en la localidad MDD06. Esto indica una alta capacidad erosiva del río (Wantzen & Mol, 2013), lo cual podría corresponder a las actividades de dragado

asociadas a la minería que se lleva a cabo en las orillas del río.

Las mediciones realizadas muestran que el tributario Inambari aporta al río MDD casi 6 veces más sedimento suspendido (Inambari = 28 560 t/día, Colorado = 4462 t/día) y 10 veces más sedimento de fondo que el río Colorado (Inambari = 10 t/día, Colorado = <1 t/día). Considerando que el impacto por minería sobre las áreas de drenaje de ambas microcuencas es similar y las concentraciones de sedimento suspendido en el río Colorado: $5 \times 10^{-4} \text{ g/m}^3$ y en el río Inambari: $6 \times 10^{-4} \text{ g/m}^3$, la mayor carga de sedimentos del río Inambari podría explicarse por el hecho de que la microcuenca del río Inambari tiene un mayor tamaño que la del río Colorado (1814 vs. 6 856 km², respectivamente). Esto se evidencia al comparar las dimensiones de profundidad y área de la sección transversal de los ríos, ya que el río Inambari es más profundo y más ancho que el Colorado. En la desembocadura del río Inambari se registraron 4 m y 410 m² de profundidad y área de sección transversal respectivamente, a diferencia del río Colorado que se obtuvo 2 m y 104 m² en la desembocadura.

Mercurio en el área de estudio

La concentración de mercurio en sedimentos de fondo del río Madre de Dios es más alta en las fracciones finas limo-arcilla que en las arenas.

Se colectaron un total de 10 muestras de sedimento de fondo a lo largo del río MDD (Figura 1). Las concentraciones de mercurio fueron determinadas en sedimentos de fondo sin tamizar (muestra completa) y tamizados por una malla de 60 μm (fracción limo-arcilla). Las concentraciones de mercurio en casi todas las muestras fueron más elevadas (hasta en un 60%) en las fracciones <60 μm (limo-arcilla) que las

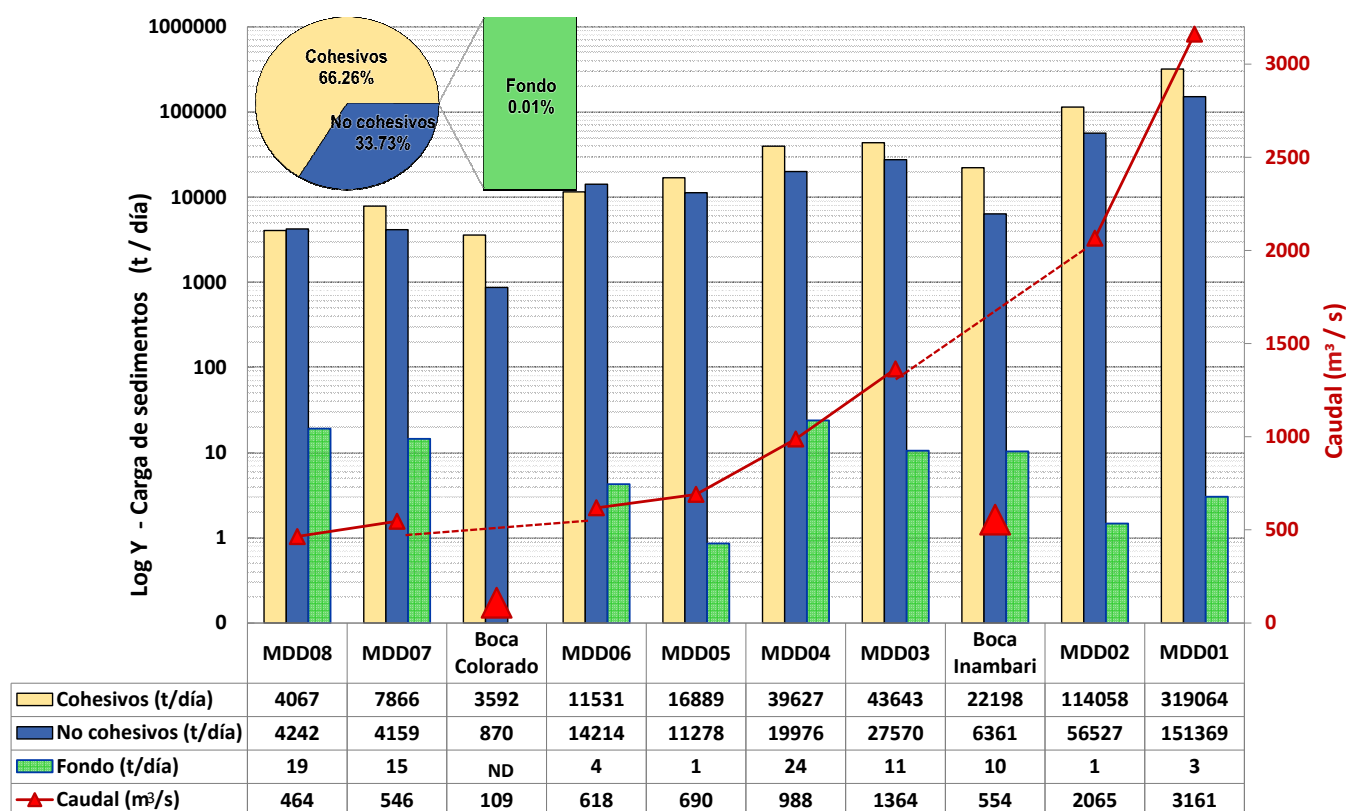


Figura 3. Valores de caudal y transporte de sedimentos a lo largo del río Madre de Dios y en las confluencias con los tributarios Colorado e Inambari. Se muestran los valores del transporte de sedimentos de fondo (barras verdes (Callan & De la Cruz, 2021), sedimentos suspendidos divididos en sedimentos cohesivos (barras crema) y no cohesivos (barras azul oscuro). ND indica no detectado. El gráfico circular indica la proporción de sedimentos cohesivos, no cohesivos y de fondo en el transporte total de sedimentos promedio del cauce principal del río Madre de Dios.

muestras sin tamizar (Figura 4), confirmando la afinidad del mercurio para adherirse a la fracción fina de los sedimentos. Las concentraciones de mercurio en todas las muestras, tanto sin tamizar como tamizadas, aumentaron en dirección aguas abajo del río MDD (Tramo Alto < Tramo Medio < Tramo Bajo) (Figura 4), lo que podría relacionarse con el aumento e intensificación de la minería a lo largo del canal principal del río MDD.

Las concentraciones promedio de Hg en las muestras tamizadas <60 µm aumentaron de 5.9 ppb en Tramo Alto (sin presencia histórica de minería) a 9.7 ppb en Tramo Medio (moderada

presencia de minería) y a 22.5 ppb en Tramo Bajo (alta presencia de minería) (clasificación de intensidad de actividad minera según Estrada *et al.*, 2023). La concentración más alta de mercurio encontrada fue 27.8 ppb en Tramo Bajo, en la desembocadura del afluente Inambari. Los valores reportados en este estudio están en el rango de resultados previos reportados para el río MDD (Diringer *et al.*, 2015) y otros ríos de la región afectados por minería (Moreno-Brush, 2016) y por debajo de los límites permisibles para mercurio en sedimentos según la norma canadiense (ISQG 170 y PEL 486 ppb).

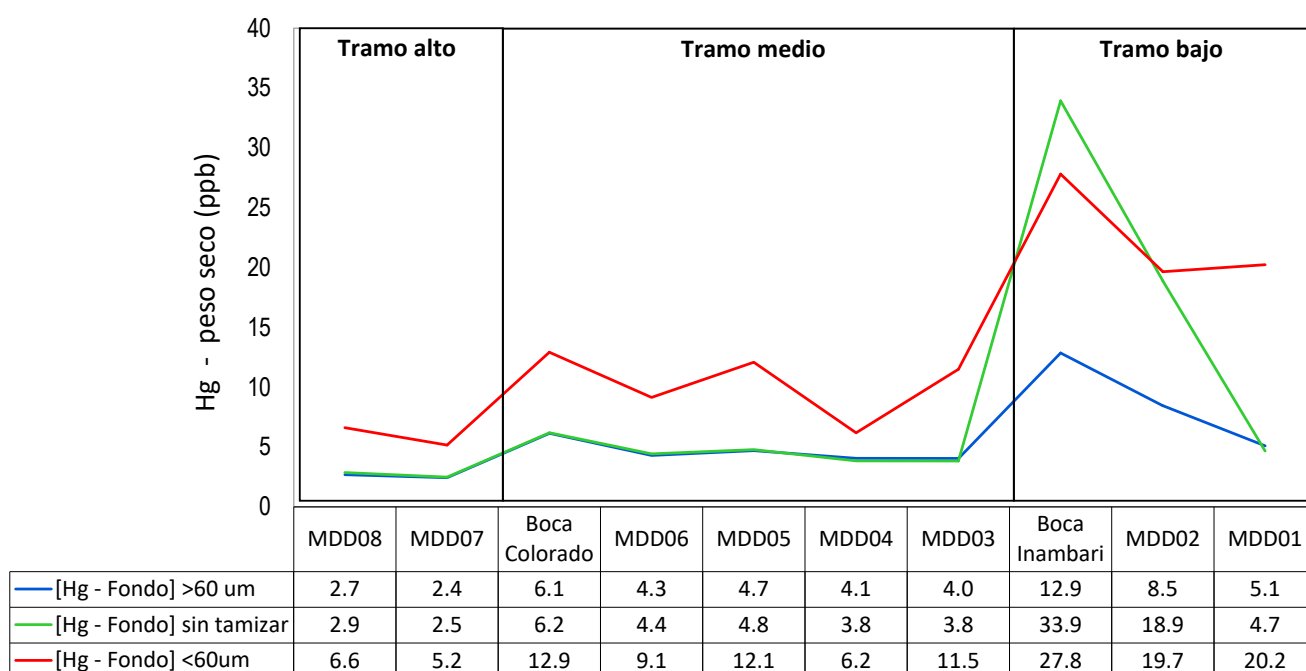


Figura 4. Concentraciones de mercurio (ppb de Hg) en sedimentos de fondo a lo largo del río Madre de Dios y en las desembocaduras de los ríos tributarios Colorado e Inambari.

Niveles de mercurio en sedimentos suspendidos. El río Inambari presentó las concentraciones más altas de mercurio en sedimentos suspendidos y es el principal contribuyente de mercurio al río Madre de Dios.

Las concentraciones de mercurio en el sedimento suspendido fueron en promedio 71% más altas que en las fracciones finas (<60 μm) de los sedimentos de fondo, confirmando que el mercurio en los ríos de estudio se transporta principalmente adherido al sedimento suspendido. El mercurio en sedimentos suspendidos aumentó en dirección aguas abajo a lo largo del cauce del río MDD, desde la sección control Tramo Alto (media 45 ± 4 ppb) hasta las secciones con presencia de minería, Tramo Medio (media 54 ± 0.5 ppb) y Tramo Bajo (media 144 ± 40 ppb) (Figura 5 y Figura 6). Los valores más altos se encontraron

a lo largo de los ríos afluentes Inambari (hasta 626 ppb) y Colorado (168 ppb), ambos fuertemente impactados por minería (Figura 5). Las bajas concentraciones encontradas en la zona minera Delta 3, a lo largo del río Puquiri (Q01 y Q02), posiblemente se deben a que las muestras no fueron colectadas en el cauce principal del río sino en quebradas afluentes sin presencia de minería.

De las 19 muestras de sedimento suspendido analizadas, 3 muestras (BI = 228 ppb, IBO2 = 220 ppb y IBO4 = 626 ppb), todas ubicadas a lo largo del río Inambari (Tramo Bajo), tuvieron concentraciones de mercurio que sobrepasan el límite de La Guía Provisional de Calidad del Sedimento canadiense de 170 ppb y podrían generar efectos biológicos adversos en la fauna acuática.

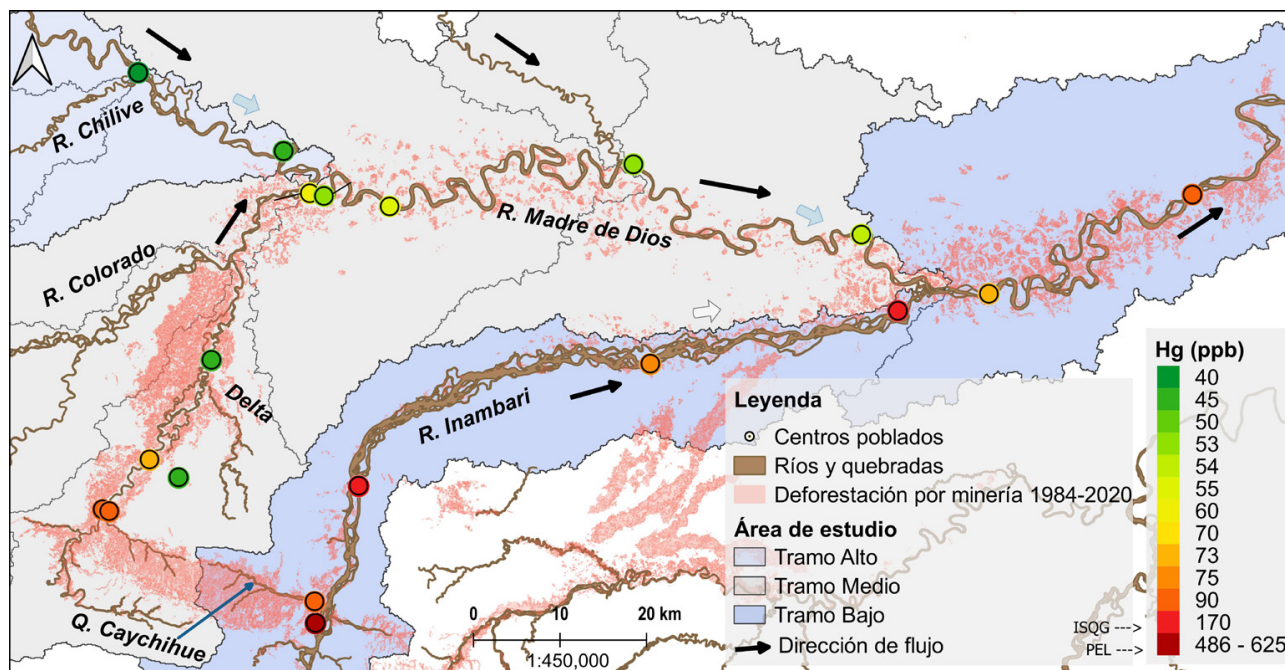


Figura 5. Concentración de mercurio (Hg) en sedimentos suspendidos.

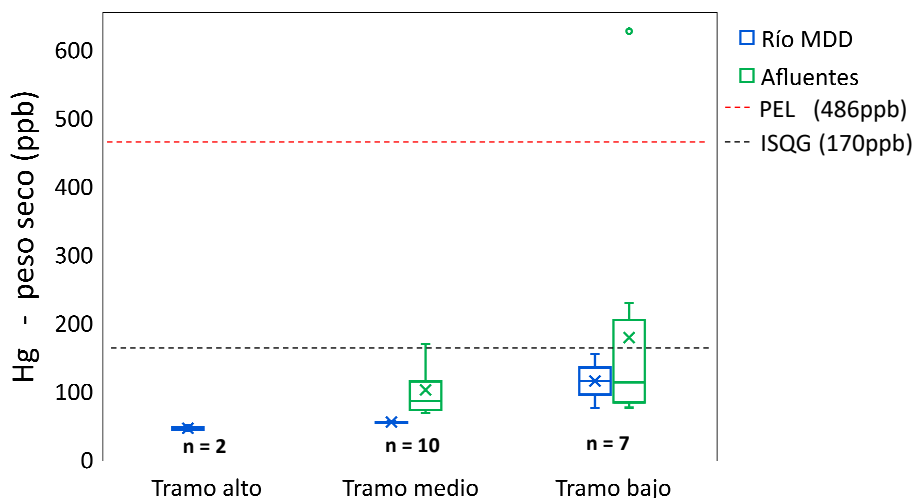


Figura 6. Concentraciones promedio de mercurio (ppb de Hg) en sedimentos suspendidos del área de estudio. Las líneas punteadas indican los dos límites permisibles para Hg en sedimentos según la norma canadiense (ISQG: 170 ppb y PEL: 486 ppb). El punto que sobrepasó ambos límites corresponde a la localidad IB01 en el afluente Inambari.

Relación entre dinámica del río y mercurio

Las Figura 3 y 7 muestran un resumen del conjunto de los datos resultantes de las mediciones hidrodinámicas, hidrosedimentológicas y de mercurio realizadas en el río Madre de Dios, y a partir de los cuales

se puede estimar cuantitativamente la carga de sedimentos y de mercurio en el río. La influencia de la hidrodinámica y los sedimentos en el transporte de contaminantes ha sido previamente reportada (Mali *et al.*, 2018; Moreno-Brush *et al.*, 2020). En el caso específico del río

Madre de Dios, por ejemplo, las altas velocidades de flujo en Tramo Medio y Tramo Bajo (500 - 2922 m³/s) probablemente impiden que el sedimento fino se deposite en el fondo del río, por lo que la carga de sedimentos suspendidos aumenta gradualmente durante el recorrido del cauce del río, distribuyéndose en la llanura de inundación. Esto último es muy relevante porque durante la época de creciente, el nivel del agua sube y el río se conecta con lagunas y meandros abandonados, incluso distantes de

las localidades donde se realiza minería. Debido a las bajas velocidades de flujo en los cuerpos de agua lénticos (<0.6 m/s), el sedimento que ingresa por la conectividad con el río, así como el mercurio adsorbido a dicho sedimento, pueden terminar depositados en el fondo de estos cuerpos de agua. Por ello, la importancia de considerar la composición y el transporte de los sedimentos, sin olvidar la hidrología, en los estudios de mercurio en cuerpos de agua.

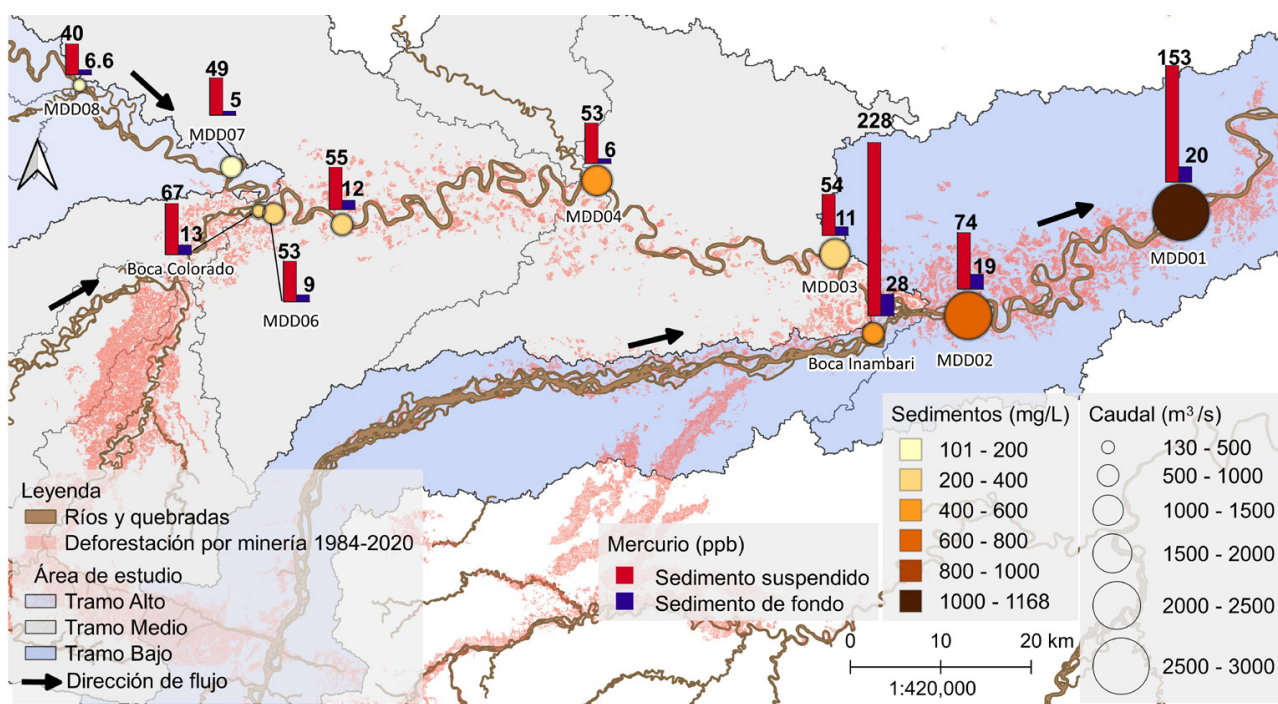


Figura 7. Concentraciones de mercurio (ppb de Hg) en sedimentos de fondo (barra azul) y suspendidos (barra roja), concentración de sedimentos cohesivos (mg/L) y caudal (m³/s).

Carga de mercurio en el río Madre de Dios

La carga de mercurio en el cauce principal del río MDD, calculada a partir de la carga y la concentración de mercurio en los sedimentos suspendidos cohesivos, aumentó en dirección aguas abajo de 0.09 t/año en Tramo Alto hasta 13.6 t/año en Tramo Bajo,

con aumentos importantes después de las confluencias con los tributarios Colorado e Inambari (Figura 8). El tributario Inambari, siendo el mayor contribuyente de sedimentos al río MDD, fue consecuentemente también el mayor contribuyente de mercurio al río con una carga anual de 1.83 toneladas. En Tramo Bajo, el aumento

de casi 11 t/año en la carga de mercurio del punto MDD02 al punto MDD01, una sección del río sin presencia de tributarios, podría relacionarse a la mayor presencia de minería en dicho tramo. Más minería significa más deforestación, más dragado y más puntos de amalgamación que,

consecuentemente, generan más erosión e ingreso de sedimentos con mercurio natural adherido y mercurio proveniente del proceso de amalgamación al río que, finalmente, aumentan la cantidad del metal transportado por el río.

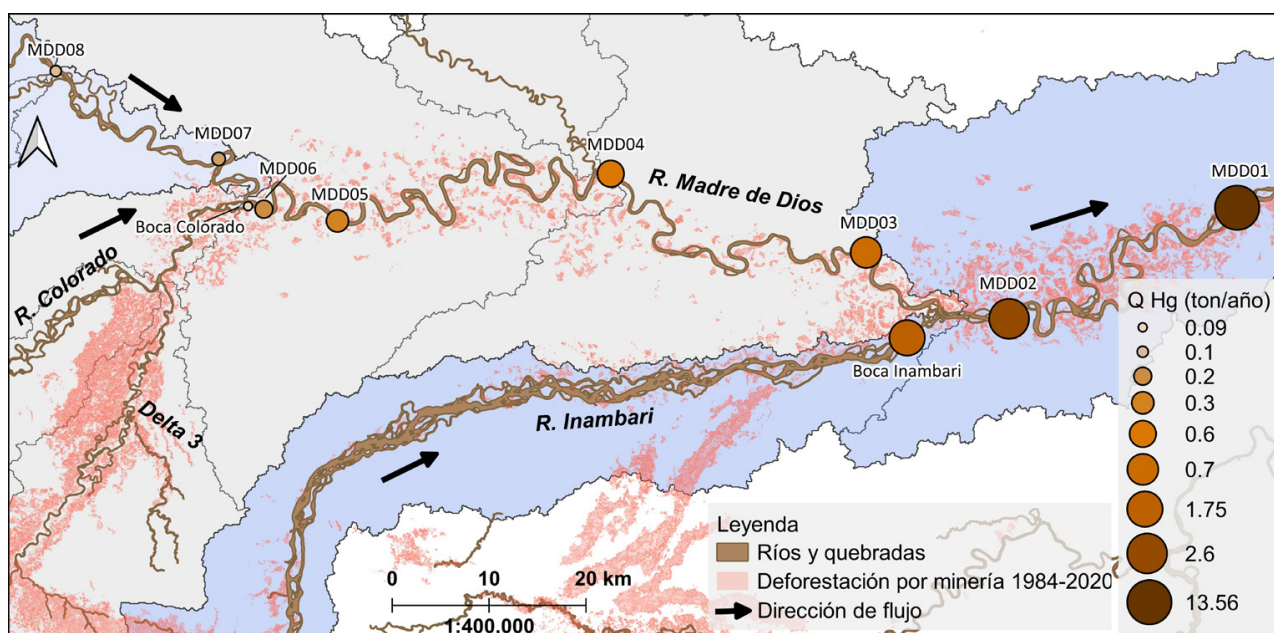


Figura 8. Carga de mercurio (t/año) en el río Madre de Dios



Campamento de minería aurífera artesanal en el valle de inundación de la confluencia del río Madre de Dios y río Inambari

Recomendaciones

Esta es una primera aproximación del transporte de sedimentos en el río MDD y la influencia que ejerce, junto con la hidrodinámica, en el comportamiento del mercurio fluvial. Una estimación más robusta requeriría repetir el muestreo en diferentes temporadas del ciclo hidrológico, considerando un mayor número de puntos de monitoreo. Esto brindaría mayor información sobre el comportamiento y el fenómeno de histéresis (relación de la carga de sedimentos suspendidos respecto al caudal) de la concentración de sedimento suspendido cohesivo en el ciclo hidrológico, lo que a su vez controla en gran medida la variabilidad temporal y espacial de la carga de mercurio en el río.

En este estudio se consideró solo una muestra de sedimentos suspendidos para el análisis de mercurio. Futuros estudios deben evaluar si la concentración de mercurio adherido al sedimento suspendido es uniforme tanto en la columna de agua como a lo largo de la sección transversal para confirmar que el muestreo es representativo. También es necesario investigar el control que ejerce el contenido de materia

orgánica y la composición geoquímica en la distribución del mercurio en los sedimentos (Meili *et al.*, 1991). Finalmente, incluir el análisis de isótopos de mercurio serviría para determinar el origen de este elemento en el área de estudio, es decir, si proviene de la descarga directa del proceso minero (amalgamación) o del cambio en el uso y la cobertura de suelos.

Una base de datos más detallada y completa permitirá conocer con más detalle el ciclo biogeoquímico del mercurio en ecosistemas tropicales, especialmente en ríos, así como el destino ambiental de las emisiones de este metal por parte de la minería. Este estudio estima que en la época de transición a la temporada de lluvia el río MDD transporta 13.6 toneladas de mercurio al año. Considerando el estimado de 180 t de mercurio emitidas por la MAPE en MDD anualmente, aún está pendiente determinar dónde se depositan las 168 toneladas restantes. Finalmente, toda esta información servirá para la correcta aplicación de modelos numéricos de predicción que generen información que ayude en la toma de decisiones para el manejo y la gestión de los impactos de la minería aluvial en los ríos de Madre de Dios.



Pre procesamiento en campo de las muestras de mercurio y sedimentos en el río Madre de Dios.

Conclusiones

- El mercurio en el río Madre de Dios se acumula en los sedimentos finos (limos y arcillas) y se transporta adherido a los sedimentos en suspensión. Esto sugiere que los estudios y programas de monitoreo de mercurio fluvial en esta cuenca deben enfocar sus esfuerzos de muestreo en los sedimentos en suspensión en lugar de los sedimentos de fondo.
- El río Madre de Dios transporta hasta 13.6 toneladas al año de mercurio en la parte baja de la cuenca en época de vaciante-creciente. La carga fluvial de mercurio está principalmente controlada por la carga de sedimentos, la cual, a su vez, depende del régimen hidrológico del río. Sin embargo, los resultados de este estudio indican que la actividad minera es un factor que posiblemente también influya en la carga de sedimentos y mercurio del río Madre de Dios.
- Entre los afluentes Inambari y Colorado, ambos con similar impacto de minería, se identificó al río Inambari como el mayor contribuyente de agua, sedimentos y mercurio al río Madre de Dios. Durante el muestreo, el río Inambari fue 5 veces más caudaloso que el río Colorado y se estima que aportó casi 7 veces más sedimento suspendido (28 560 t/día) y 10 veces más sedimento de fondo (10 t/día) al río Madre de Dios. La carga de mercurio del río Inambari se estimó en aproximadamente 2 t/año, aumentando la concentración de mercurio en el río Madre de Dios en un 40%.
- Este estudio demuestra la necesidad de combinar mediciones de diferentes disciplinas para una mejor comprensión y gestión de la dinámica de los ríos. Un monitoreo integral y continuo de la dinámica fluvial, es decir, de la hidrodinámica y los sedimentos, mejoraría la comprensión de la dispersión y el transporte de mercurio y otros contaminantes en sistemas fluviales amazónicos afectados por minería. Asimismo, se resalta la importancia de establecer protocolos estandarizados de muestreo y procesamiento de muestras que permitan generar información robusta y comparable a través del tiempo.



Río Madre de Dios.

Referencias bibliográficas

APHA. (1995). Total and volatile solids (SM 2540G). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 58.

Armijos, E., Crave, A., Vauchel, P., Fraizy, P., Santini, W., Moquet, J.-S., ... Guyot, J.-L. (2013). Suspended sediment dynamics in the Amazon River of Peru. *Journal of South American Earth Sciences*, 44, 75–84. doi: 10.1016/j.jsames.2012.09.002

Barthem, R., & Goulding, M. (2007). Un ecosistema inesperado: la Amazonía revelada por la pesca. *Un Ecosistema Inesperado: La Amazonía Revelada Por La Pesca*.

Caballero Espejo, J., Messinger, M., Román-Dañobeytia, F., Ascorra, C., Fernandez, L., & Silman, M. (2018). Deforestation and Forest Degradation Due to Gold Mining in the Peruvian Amazon: A 34-Year Perspective. *Remote Sensing*, 10(12), 1903. doi: 10.3390/rs10121903

Callan, N., & De la Cruz, A. (2021). Impacto de la minería aluvial en el transporte de fondo del río Madre de Dios. Presented at the COREIC TACNA.

CCME-CEPA. (2001). Canadian sediment quality guidelines for the protection of aquatic life. Canadian Environmental Protection Act.

CITA-UTEC. (2021). RÍOS DANZANTES: Guías metodológicas para el desarrollo de la línea base física de los ríos en Andes-Amazonía (1st ed.). Perú.

De Oliveira, S. M. B., Melfi, A. J., Fostier, A. H., Forti, M. C., Favaro, D. I. T., & Boulet, R. (2001). Soils as an important sink for mercury in the Amazon. *Water, Air, and Soil Pollution*, 126(3), 321–337. doi.org/10.1023/A:1005239627632

Diringer, S. E., Feingold, B. J., Ortiz, E. J., Gallis, J. A., Araújo-Flores, J. M., Berký, A., ... 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. doi: 10.1039/c4em00567h

Estrada, Y., Portocarrero, E., García, M. P., Timaná, C., Quintana, I., Pillaca, M., ... Moreno, M. (2023). Influencia de la minería aurífera aluvial en la geodinámica fluvial del río Madre de Dios, Amazonía peruana, en el periodo 1984-2020 [Research Brief]. Centro de Innovación Científica Amazónica.

Goulding, M., Cañas, C. M., Barthem, R., & Forsberg, B. (2003). Las fuentes del Amazonas: Ríos, vida y conservación de la cuenca del Madre de Dios.

Guerrero, L., Abad, J. D., Ortals, C., Naito, K., Valverde, H., Estrada, Y., ... Canas-Alva, C. (2023). The Birthplace of the Amazon River, a confluence of anabranching and meandering rivers.

Mali, M., Malcangio, D., Dell'Anna, M. M., Damiani, L., & Mastorilli, P. (2018). Influence of hydrodynamic features in the transport and fate of hazard contaminants within touristic ports. Case study: Torre a Mare (Italy). *Heliyon*, 4(1), e00494.

Meili, M. (1991). The coupling of mercury and organic matter in the biogeochemical cycle – Towards a mechanistic model for the boreal forest zone. *Water Air & Soil Pollution*, 56(1), 333–347. doi:10.1007/BF00342281

Montaña, C. G., Liverpool, E., Taphorn, D. C., & Schalk, C. M. (2021). The cost of gold: Mercury contamination of fishes in a Neotropical river food web. *Neotropical Ichthyology*, 19(3). doi: 10.1590/1982-0224-2020-0155

Moreno-Brush, M., McLagan, D. S., & Biester, H. (2020). Fate of mercury from artisanal and small-scale gold mining in tropical rivers: Hydrological and biogeochemical controls. A critical review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 50(5), 437–475. doi: 10.1080/10643389.2019.1629793

Moreno-Brush, M., Rydberg, J., Gamboa, N., Storch, I., & Biester, H. (2016). Is mercury from small-scale gold mining prevalent in the southeastern Peruvian Amazon? *Environmental Pollution*, 218, 150–159. doi: 10.1016/j.envpol.2016.08.038

OSW-USGS. (2021, January 25). Equal Discharge Increment (EDI). Retrieved October 27, 2022, from <https://hydroacoustics.usgs.gov/movingboat/EDI1.shtml>

Thomas K. Edwards, G. Douglas Glysson. (1999). Field methods for measurement of fluvial sediment (2nd ed.). doi: 10.3133/twri03C2_1970

UNEP. (2019). Global Mercury Assessment 2018 | UNEP - UN Environment Programme.

USEPA, U. (2007). Method 7473: Mercury in solids and solutions by thermal decomposition, amalgamation, and atomic absorption spectrophotometry. United States Environmental Protection Agency Washington DC, US.

Wantzen, K., & Mol, J. (2013). Soil Erosion from Agriculture and Mining: A Threat to Tropical Stream Ecosystems. *Agriculture*, 3(4), 660–683. doi: 10.3390/agriculture3040660

Autores

Yulissa Estrada. Asistente de investigación y líder del grupo Sensoramiento Remoto del proyecto River Mining y Coordinadora del Laboratorio de Calidad de Agua y Sedimentos del Centro de Investigación y Tecnología del Agua de la Universidad de Ingeniería y Tecnología (CITA-UTEC).

Leo Guerrero. Investigador y Líder del Grupo de Hidrogeomorfología del proyecto River Mining en el Centro de Investigación y Tecnología del Agua de la Universidad de Ingeniería y Tecnología (CITA-UTEC). Estudiante de Doctorado en el Departamento de Geografía y Antropología en Louisiana State University (LSU).

Paula Sisniegas. Asistente de investigación del proyecto River Mining del Centro de Investigación y Tecnología del Agua de la Universidad de Ingeniería y Tecnología (CITA-UTEC). Asistente de laboratorio del Programa Mercurio del Centro de Innovación Científica Amazónica (CINCIA).

Grecia Valdivia. Asistente de investigación 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.

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) bajo el acuerdo de USAID AID-OAA-A-11-00012.

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 Wilder Satalaya, Jorge Condori y Bryan Santillan por su asistencia en el trabajo de campo para la realización de la investigación; a Maby Gavilán y Javier Reluz, miembros del Laboratorio de Calidad de Agua y Sedimentos de CITA UTEC, por el procesamiento de muestras de sedimentos; y a Jessica Pisconte, miembro del Laboratorio de Mercurio y Química Ambiental (LAMQA) en Puerto Maldonado, por el procesamiento de las muestras para análisis de mercurio.

Contacto

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



Cita (7a ed.) Estrada Terrel, Y., Guerrero, L., Sisniegas, P., Valdivia, G., Vega, C., Fernández, L. E., & Moreno Brush, M. (2023). *Distribución y transporte del mercurio en la cuenca Madre de Dios, Amazonía peruana: Influencia de los sedimentos y la hidrodinámica* (p. 16). Proyecto River Mining (PEER 8-235).

Título: Distribución y transporte del mercurio en la cuenca Madre de Dios, Amazonía peruana: influencia de los sedimentos y la hidrodinámica

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° 2023-02451