

Entregable 5

Análisis de la bioacumulación de mercurio y otros metales pesados en comunidades ubicadas alrededor de la cuenca del río Putumayo

Patrick Venail, consultor en Perú

Lima, 17 de diciembre de 2025
(actualizado el 31 de enero de 2026)

Tabla de Contenido

Resumen.....	2
1. Introducción	2
2. Marco conceptual sobre bioacumulación y biomagnificación del mercurio	3
3. Contexto ambiental y socioeconómico del Putumayo peruano.....	3
4. Evidencia disponible de bioacumulación en el Putumayo peruano	4
4.1. En peces	4
4.2. En personas	6
5. Evidencia regional comparada y extrapolación al Putumayo	8
6. Implicancias sanitarias y ambientales.....	9
7. Limitaciones y vacíos de información	9
8. Conclusiones	11
9. Bibliografía	12

Resumen

El presente documento analiza la bioacumulación de mercurio y otros metales pesados en comunidades ubicadas en el tramo peruano de la cuenca del río Putumayo, con mención a los riesgos ambientales y sanitarios asociados a la exposición crónica por consumo de pescado. El estudio se basa en una revisión sistemática de información secundaria disponible, integrando resultados recientes de estudios locales, principalmente el trabajo conjunto de CINCIA y FCDS (2024), con evidencia científica consolidada de otras cuencas amazónicas afectadas por minería aurífera. Los resultados muestran que, si bien la información específica para el Putumayo peruano es limitada, existe evidencia contundente de bioacumulación de mercurio en peces, especialmente en especies carnívoras, cuyas concentraciones promedio alcanzan valores cercanos a 0.9 µg/g y superan ampliamente el límite de consumo seguro recomendado por la OMS (0.5 µg/g). Las especies con mayores concentraciones corresponden a peces de alto nivel trófico que forman parte habitual de la dieta local, lo que incrementa el riesgo de exposición humana. En contraste, los peces herbívoros y detritívoros presentan concentraciones menores, confirmando un patrón trófico consistente con otras regiones amazónicas. El análisis de mercurio en cabello humano revela una exposición crónica severa en las comunidades del Bajo Putumayo peruano, superando en promedio los umbrales de referencia internacionales de 2.2 µg/g, con valores medios cercanos a 15.7 µg/g y registros extremos superiores a 50 µg/g. Los grupos más vulnerables son las mujeres en edad reproductiva y los niños pequeños, lo que implica riesgos significativos para la salud materno-infantil y el desarrollo neurológico. La mayor frecuencia de consumo de pescado y la preferencia por especies carnívoras explican, en gran medida, los niveles elevados observados en comparación con otras cuencas amazónicas peruanas. La evidencia regional comparada confirma que estos resultados no constituyen un caso aislado, sino que responden a procesos ampliamente documentados de bioacumulación y biomagnificación del mercurio en ecosistemas amazónicos, particularmente intensos en sistemas lénticos y planicies de inundación. En este contexto, la ausencia de monitoreo sistemático en el Putumayo peruano debe considerarse como un vacío crítico de información. El informe concluye que existe una situación de riesgo ambiental y sanitario significativo que requiere atención prioritaria, recomendando la implementación urgente de programas integrados de monitoreo ambiental, biomonitoreo humano, cooperación transfronteriza y estrategias de comunicación del riesgo culturalmente adecuadas, orientadas a reducir la exposición sin comprometer la seguridad alimentaria de las comunidades ribereñas.

1. Introducción

El mercurio es uno de los contaminantes de mayor relevancia ambiental y sanitaria en la Amazonía, debido a su persistencia, capacidad de transformación a metilmercurio (MeHg) y elevada toxicidad para los organismos vivos. En regiones donde se desarrolla minería aurífera artesanal y de pequeña escala, el uso de mercurio metálico en procesos de amalgamación constituye una fuente dominante de emisiones al ambiente, afectando aire, suelos, sedimentos, cuerpos de agua y redes tróficas acuáticas.

En la cuenca del río Putumayo, compartida por Perú, Colombia, Ecuador y Brasil, las preocupaciones sobre contaminación por mercurio se han intensificado en los últimos años debido a la expansión de actividades mineras legales e ilegales y a la alta dependencia de las comunidades ribereñas del recurso pesquero como principal fuente de proteína. En el tramo peruano, la evidencia disponible es aún escasa, lo que dificulta una evaluación integral del riesgo ambiental y sanitario.

Este informe tiene como objetivo analizar, según la información disponible, la bioacumulación de mercurio y otros metales pesados en comunidades ubicadas alrededor de la cuenca del río Putumayo en territorio peruano, integrando la información empírica existente con el conocimiento científico generado en otras regiones amazónicas comparables. El documento no constituye un estudio de monitoreo directo, sino una aproximación diagnóstica basada en revisión documental, orientada a identificar patrones, riesgos y vacíos críticos de información que deben ser abordados en futuras fases de investigación y gestión.

2. Marco conceptual sobre bioacumulación y biomagnificación del mercurio

La bioacumulación se refiere a la incorporación progresiva de un contaminante en los tejidos de un organismo a lo largo del tiempo, mientras que la biomagnificación describe el incremento de la concentración de dicho contaminante a medida que se asciende en los niveles tróficos de una red alimentaria. En ecosistemas acuáticos amazónicos, el mercurio liberado al ambiente puede transformarse en metilmercurio bajo condiciones anóxicas y ricas en materia orgánica, especialmente en lagos de inundación, cochas y pozas mineras (Crespo-Lopez *et al.* 2021).

La literatura científica es consistente en demostrar que el metilmercurio se transfiere eficientemente desde el plancton hacia peces herbívoros, omnívoros y, con mayor intensidad, hacia peces carnívoros y piscívoros (Basta *et al.* 2021, Vasconcellos *et al.* 2022). Estos últimos suelen presentar concentraciones de mercurio que exceden los límites de consumo seguro ($0.5 \mu\text{g/g}^*$, Roach *et al.* 2013, Vasconcellos *et al.* 2021), convirtiéndose en la principal vía de exposición para poblaciones humanas que dependen del pescado como alimento básico. Estudios realizados en diversas cuencas amazónicas muestran que este proceso conduce a una exposición crónica generalizada en comunidades indígenas y ribereñas, frecuentemente por encima de los valores de referencia internacionales (Hacon *et al.* 2020, Basta *et al.* 2021, Vasconcellos *et al.* 2022).

*(*En algunos documentos, la unidad equivalente a $\mu\text{g/g}$ utilizada es mg/kg , estas dos unidades son equivalentes).*

Los umbrales utilizados para la interpretación del riesgo asociado a la exposición al mercurio se basan en los estándares internacionales establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y el Comité Mixto FAO/OMS de Expertos en Aditivos Alimentarios (JECFA). En particular, el JECFA definió una Ingesta Semanal Tolerable Provisional (PTWI) de $1,6 \mu\text{g}$ de metilmercurio por kilogramo de peso corporal, orientada a proteger a la población general y, de manera prioritaria, a los grupos más vulnerables como fetos, niños y mujeres en edad reproductiva. Asimismo, en el marco del Codex Alimentarius, la FAO y la OMS establecen valores guía de $0,5 \mu\text{g/g}$ de mercurio total para la mayoría de especies de pescado y $1,0 \mu\text{g/g}$ para peces predadores, los cuales constituyen referencias ampliamente aceptadas para la evaluación de la seguridad alimentaria y del riesgo sanitario por consumo de pescado.

3. Contexto ambiental y socioeconómico del Putumayo peruano

El tramo peruano del río Putumayo se caracteriza por una alta conectividad hidrológica, extensas planicies de inundación y una fuerte dependencia de los recursos acuáticos por parte de las comunidades locales. La pesca artesanal constituye un componente central de la seguridad alimentaria y de las prácticas culturales, lo que incrementa la vulnerabilidad frente a contaminantes que se bioacumulan en la biota acuática. Si bien la minería aurífera aluvial no se desarrolla de manera tan intensiva como en otras cuencas amazónicas peruanas, la proximidad

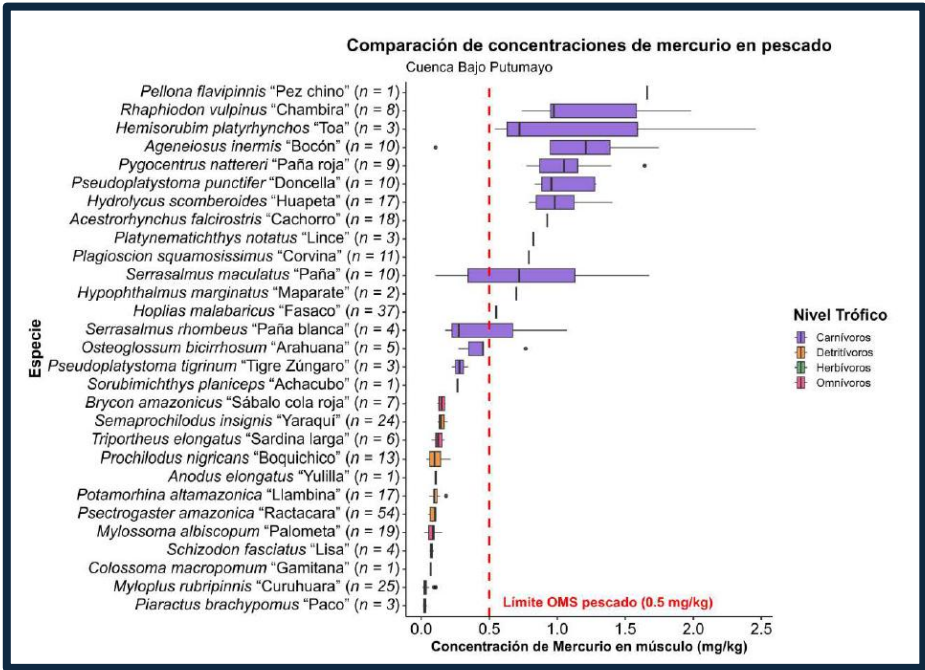
con zonas de minería activa en el lado colombiano y la naturaleza transfronteriza del río favorecen el transporte regional de mercurio, tanto por vía fluvial como atmosférica. Este contexto refuerza la necesidad de analizar la problemática desde una perspectiva de cuenca y no exclusivamente local.

4. Evidencia disponible de bioacumulación en el Putumayo peruano

La revisión de información existente y reciente para el Putumayo peruano muestra una marcada escasez de estudios sistemáticos sobre mercurio y otros metales pesados (Entregable 4). Los datos disponibles de bioacumulación de metales para la cuenca en el sector peruano se limitan principalmente a datos sobre mercurio total en peces y humanos.

4.1. En peces

Los estudios sobre mercurio total en peces indican que los peces carnívoros presentan concentraciones promedio de 0.9 µg/g, superando el umbral de consumo seguro recomendado por la OMS. Los resultados del estudio CINCIA-FCDS (Vega *et al.* 2024) en tres localidades del Bajo Putumayo peruano muestran una clara relación trófica en la bioacumulación de mercurio. Peces carnívoros tienen promedios de 0.9 µg/g, superando el límite de consumo seguro (0.5 µg/g, OMS, Figura 1). En perspectiva, los peces carnívoros de la cuenca del río Nanay-Pintuyacu presentaron concentraciones promedio de mercurio de 0.41 µg/g, es decir menos de la mitad que en el Bajo Putumayo y sin superar el límite de la OMS. Peces carnívoros colectados en ocho mercados tenían un promedio de 0.31 µg/g de mercurio en su músculo.



A modo referencial, un estudio previo realizados en la región de Madre de Dios en Perú reportó valores de mercurio en peces que variaron entre 0.035 y 1.351 $\mu\text{g/g}$ (Roach *et al.* 2013). En otro estudio más reciente, el valor más alto de mercurio reportado en un pez fue de 1.45 $\mu\text{g/g}$ (Marchese *et al.* 2024). Estos antecedentes ubican a los peces carnívoros del Bajo Putumayo peruano en la parte alta de concentraciones de mercurio.

Dentro de los peces carnívoros con mayores concentraciones de mercurio y por encima del límite de la OMS muestreados en 2024 en el Bajo Putumayo peruano aparecen:

Pellona flavipinnis (pez chino)



Rhaphiodon vulpinus (chambira)



Hemisorubim platyrhynchos (toa)



Ageneiosus inermis (bocón)



Pygocentrus nattereri (paña roja)



Pseudoplatystoma unctifer (doncella)



Hydrolycus scomberoides (huapeta)



Las especies con mayores concentraciones tales como *Pellona flavipinnis*, *Rhaphiodon vulpinus* y *Hemisorubim platyrhynchos* son altamente consumidas por comunidades ribereñas, lo que aumenta el riesgo de exposición humana. Estos resultados confirman un patrón consistente con otras cuencas amazónicas peruanas (Nanay, Madre de Dios), donde la dieta basada en peces carnívoros constituye la principal vía de ingreso de mercurio a la población.

En contraste, los peces herbívoros presentaron concentraciones de mercurio más bajas, con un promedio de 0.04 µg/g, mientras que los peces detritívoros y omnívoros mostraron valores intermedios de 0.13 µg/g y 0.10 µg/g, respectivamente. Ninguna de las especies de estos dos grupos tróficos superó el valor de referencia de 0.5 µg/g.

4.2. En personas

Las concentraciones de mercurio en cabello humano reportadas para las 166 personas muestreadas en las comunidades de Remanso, Tres Esquinas y El Álamo del Bajo Putumayo peruano alcanzan valores medios de 15.67 µg/g. Esto las ubica muy por encima del umbral de riesgo sanitario de 2.2 µg/g establecido por la OMS. Aunque se evidenciaron diferencias entre los niveles de mercurio de las personas de las tres comunidades (Figura 2), los promedios de las tres sobrepasaron los 2.2 µg/g referenciales de la OMS. Se reportan incluso casos extremos de personas con más de 30 µg/g de mercurio en muestras de cabello en la comunidad Remanso.

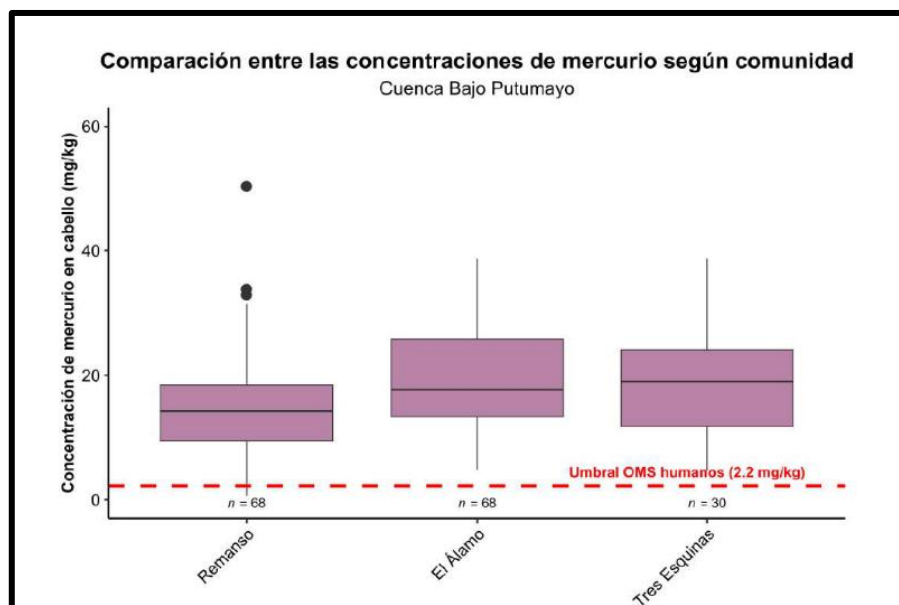


Figura 2: Concentraciones de mercurio en cabello humano (mg/kg*) medidas en las tres comunidades de la cuenca del Bajo Putumayo. La línea roja punteada indica el umbral establecido por la OMS para mercurio en cabello humano (2.2 mg/kg). Cada caja muestra el rango intercuartílico (50% central de la población), con la línea negra en medio representando la mediana. Los bigotes indican el rango de distribución de valores, y los puntos individuales representan casos con niveles atípicos. N = número de individuos (Fuente: Vega *et al.* 2024). *En algunos documentos, la unidad equivalente a mg/kg utilizada es µg/g.

A modo referencial, el mismo estudio reveló una concentración promedio mucho menor en la cuenca del río Nanay-Pintuyacu (8.41 µg/g), lo que sustenta una mayor exposición al mercurio por parte de las personas en el Bajo Putumayo. Vale recordar que la concentración de mercurio en los peces en el Bajo Putumayo era más de dos veces superior a la de los peces del Nanay-Pintuyacu (0.9 y 0.41 µg/g en peces carnívoros) respectivamente.

En las tres comunidades del Bajo Putumayo, el 81 % de las mujeres en edad reproductiva presenta niveles superiores a ese límite, con máximos de 33.65 µg/g, lo que implica riesgos neurológicos graves para la salud materno-infantil. Los niños de 0 a 4 años también registran valores elevados (media = 10.8 µg/g), lo que sugiere una exposición crónica y sostenida desde el nacimiento. Estos datos evidencian un impacto sanitario severo y apuntan a la cadena alimentaria acuática como principal vía de exposición.

Estos resultados sugieren una exposición crónica asociada principalmente al consumo de pescado con niveles altos de mercurio, en concordancia con resultados observados en otras regiones amazónicas. En el Bajo Putumayo, un porcentaje mayor de personas (66%) consume pescado todos los días que en las comunidades de Nanay - Pintuyacu (42%). Igualmente, el porcentaje de personas que consume pescado dos o menos veces a la semana es mayor en las comunidades del Nanay (29%) que en las del Bajo Putumayo (11%). Esta mayor frecuencia de ingesta de pescado, combinada con el consumo predominante de especies carnívoras con mayores concentraciones de mercurio, podría estar contribuyendo a una mayor acumulación de mercurio en las comunidades del bajo Putumayo.

5. Evidencia regional comparada y extrapolación al Putumayo

Dado el limitado número de estudios locales, resulta fundamental contextualizar la situación del Putumayo peruano a partir de la evidencia regional amazónica. Investigaciones realizadas en las cuencas de los ríos Tapajós, Madeira, Madre de Dios y Rio Branco demuestran de forma consistente que la minería aurífera incrementa la producción de metilmercurio en sistemas acuáticos, generando fuertes gradientes de biomagnificación en peces y elevadas concentraciones en poblaciones humanas (Wyatt *et al.* 2017, Basta *et al.* 2021, Vasconcellos *et al.* 2021, Vasconcellos *et al.* 2022).

La evidencia científica acumulada en ríos y planicies de inundación amazónicas muestra que el mercurio, presente mayoritariamente como metilmercurio en la biota, sigue gradientes tróficos claramente definidos, con concentraciones significativamente mayores en peces carnívoros y piscívoros, seguidos por especies omnívoras y, en menor medida, detritívoras y herbívoras (Hacon *et al.* 2020, Vasconcellos *et al.* 2022). La biomagnificación es particularmente intensa en sistemas lénticos y de inundación, como cochas, lagos de meandro y pozas mineras abandonadas, donde se han reportado algunas de las pendientes de magnificación trófica más elevadas para ecosistemas dulceacuícolas tropicales. En contraste, los canales principales de los ríos suelen presentar patrones de biomagnificación más débiles o variables, asociados a una mayor movilidad de los peces, la mezcla de fuentes alimentarias y menores tasas de metilación (Roach *et al.* 2013).

La evidencia científica acumulada en ríos y planicies de inundación amazónicas muestra que el mercurio, presente mayoritariamente como metilmercurio en la biota, sigue gradientes tróficos claramente definidos, con concentraciones significativamente mayores en peces carnívoros y piscívoros, seguidos por especies omnívoras y, en menor medida, detritívoras y herbívoras (Hacon *et al.* 2020, Vasconcellos *et al.* 2022). La biomagnificación es particularmente intensa en sistemas lénticos y de inundación, como cochas, lagos de meandro y pozas mineras abandonadas, donde se han reportado algunas de las pendientes de magnificación trófica más elevadas para ecosistemas dulceacuícolas tropicales. En contraste, los canales principales de los ríos suelen presentar patrones de biomagnificación más débiles o variables, asociados a una mayor movilidad de los peces, la mezcla de fuentes alimentarias y menores tasas de metilación (Roach *et al.* 2013).

Como consecuencia directa de estos procesos ecológicos, las comunidades indígenas y ribereñas presentan una sobreexposición crónica al mercurio a través del consumo de pescado, con concentraciones promedio de mercurio en cabello que comúnmente superan los 6-10 µg/g y valores máximos muy por encima de los niveles de referencia establecidos por la EPA y la OMS. La exposición humana está determinada principalmente por el tipo de especies consumidas, en particular grandes peces depredadores de géneros como *Cichla*, *Hoplias*, *Plagioscion* y grandes bagres, más que por la cantidad total de pescado ingerida. Evaluaciones de riesgo basadas en escenarios de consumo y en datos poblacionales coinciden en que las ingestas de mercurio exceden las dosis de referencia de la EPA y de la FAO/OMS por factores aproximados de 3 a 25 en mujeres y niños, sin que exista, bajo los patrones dietarios actuales, un nivel de consumo realista completamente exento de riesgo.

En conjunto, la literatura demuestra que los peces carnívoros pueden concentrar entre cinco y diez veces más mercurio que especies de niveles tróficos inferiores, y que las poblaciones que dependen regularmente de estas especies presentan las mayores cargas corporales de mercurio. Asimismo, se ha documentado de forma consistente que los niños y las mujeres en edad reproductiva constituyen los grupos más vulnerables, con riesgos potenciales para el desarrollo neurológico y la salud a largo plazo. Estos patrones son altamente pertinentes para el Putumayo

peruano, dadas las similitudes ecológicas, hidrológicas y socioculturales con otras cuencas amazónicas, lo que permite inferir un escenario de riesgo comparable aun en ausencia de monitoreo intensivo local.

6. Implicancias sanitarias y ambientales

La exposición crónica al mercurio (principalmente en forma de metilmercurio) está asociada a efectos adversos sobre el sistema nervioso, particularmente durante etapas tempranas del desarrollo. La evidencia amazónica indica asociaciones entre niveles elevados de mercurio en cabello y alteraciones neurocognitivas en niños, así como otros efectos subclínicos en adultos. Desde una perspectiva ambiental, la persistencia del mercurio en sedimentos y redes tróficas implica que los impactos pueden mantenerse durante décadas, incluso si las fuentes de emisión se reducen. En el Putumayo peruano, la combinación de alta dependencia del pescado, limitada diversificación en la dieta protéica y escaso acceso a información y servicios de salud amplifica el riesgo, reforzando la necesidad de intervenciones preventivas basadas en evidencia científica.

7. Limitaciones y vacíos de información

El análisis presentado en este documento se basa exclusivamente en información secundaria proveniente de estudios puntuales, reportes técnicos y literatura científica, lo que impone limitaciones estructurales relacionadas con la cobertura espacial, temporal y metodológica de los datos disponibles para el tramo peruano de la cuenca del río Putumayo. La ausencia de campañas de monitoreo sistemáticas y continuas impide evaluar con precisión la variabilidad estacional, interanual y espacial de las concentraciones de mercurio y otros metales pesados en los distintos compartimientos ambientales.

Uno de los principales vacíos identificados corresponde a la escasez de información sobre mercurio y otros metales pesados en el sector peruano del Putumayo. La falta de mediciones directas de estos limita la comprensión de las rutas de transporte, transformación y deposición, así como la identificación de fuentes activas y pasivas de contaminación. En consecuencia, el análisis se sustenta principalmente en evidencias indirectas y en la extrapolación de procesos documentados en cuencas amazónicas vecinas, lo que, si bien es científicamente consistente, introduce incertidumbres adicionales.

Asimismo, la información disponible sobre sedimentos y biota acuática es fragmentaria y se concentra en un número reducido de localidades y especies. No existen estudios que cubran de manera representativa los distintos tipos de hábitats presentes en la cuenca tales canales principales, planicies de inundación, cochas, quebradas y cuerpos de agua asociados a antiguas actividades mineras, a pesar de que la literatura indica que estos ambientes presentan dinámicas de metilación y biomagnificación muy contrastantes. Esta limitación restringe la identificación de hotspots de riesgo ambiental y dificulta el diseño de estrategias de monitoreo focalizadas.

En el ámbito del biomonitoreo humano, los datos disponibles corresponden a muestreos puntuales que no permiten evaluar tendencias temporales ni efectos acumulativos a largo plazo. No se cuenta con estudios longitudinales que permitan analizar la evolución de la exposición en función de cambios en la dieta, movilidad poblacional, variabilidad hidrológica o modificaciones en la intensidad de las actividades mineras. Adicionalmente, la información sobre exposición se centra casi exclusivamente en mercurio total en cabello, sin incluir de manera sistemática otros

biomarcadores relevantes ni la especiación química del mercurio, lo que limita la evaluación detallada de riesgos toxicológicos. Además del mercurio total en cabello, ampliamente utilizado como indicador de exposición crónica al metilmercurio por consumo de pescado, se suelen emplear biomarcadores como mercurio en orina para identificar exposiciones a mercurio inorgánico asociadas a actividades mineras, mercurio o plomo en sangre para evaluar exposiciones recientes, y cadmio o arsénico en orina para estimar cargas corporales derivadas de fuentes ambientales y alimentarias. El uso combinado de estos biomarcadores permite una evaluación más integral del riesgo sanitario en poblaciones ribereñas e indígenas, al distinguir fuentes, rutas y duración de la exposición a metales pesados.

Un vacío particularmente relevante es la ausencia de información sistemática sobre otros metales pesados potencialmente asociados a actividades extractivas y a procesos naturales de la cuenca, como cadmio, plomo, arsénico y otros elementos traza. La falta de estudios integrados que consideren múltiples contaminantes impide evaluar posibles efectos combinados o sinérgicos sobre la salud humana y los ecosistemas, lo que constituye una limitación importante para una gestión ambiental integral.

Adicionalmente, el análisis evidencia vacíos de información asociados a la ausencia o escasa documentación sobre otras actividades extractivas potencialmente relevantes en la cuenca del río Putumayo en su tramo peruano. En particular, no se registran actividades de exploración ni explotación de hidrocarburos en el sector peruano de la cuenca, ni existen reportes oficiales que indiquen la presencia de operaciones petroleras activas o históricas que puedan constituir una fuente directa de contaminación por hidrocarburos o metales asociados. Esta ausencia de actividad extractiva en territorio peruano contrasta con otras cuencas amazónicas y permite descartar, con la información disponible, a los hidrocarburos como una fuente relevante de presión ambiental directa en el ámbito de estudio.

En el tramo peruano de la cuenca del río Putumayo no existe, a la fecha, evidencia documentada ni registros oficiales que confirmen la presencia activa de cultivos ilícitos. Sin embargo, la naturaleza transfronteriza del sistema fluvial y la alta conectividad hidrológica y social de la cuenca obligan a considerar estas actividades como presiones potenciales indirectas, particularmente en un análisis de riesgo ambiental y sanitario. De acuerdo con la información general disponible, los cultivos ilícitos se concentran principalmente en el sector colombiano de la cuenca del Putumayo, aguas arriba del tramo peruano. Estas actividades suelen estar asociadas al uso intensivo de agroquímicos, deforestación localizada, remoción de suelos y vertimiento de residuos líquidos, los cuales pueden generar aportes difusos de contaminantes hacia el sistema fluvial. Aunque no se cuenta con información específica que permita cuantificar su influencia directa en territorio peruano, no puede descartarse una contribución indirecta a la carga de contaminantes transportados aguas abajo, especialmente durante periodos de creciente.

Asimismo, no existe información sistematizada sobre otras formas de minería legal o ilegal distintas a la minería aurífera, tales como la extracción de materiales de arrastre (arena, grava, piedra) o la explotación de minerales estratégicos como el coltán (tántalo-niobio). La falta de registros oficiales, estudios técnicos o reportes de monitoreo impide determinar si estas actividades están ausentes o simplemente no documentadas en el tramo peruano del Putumayo. En consecuencia, el análisis de contaminación por metales pesados se centra casi exclusivamente en el mercurio, dado que es el único contaminante para el cual existe información empírica

disponible, lo que limita una evaluación más amplia sobre la posible presencia de otros metales asociados a diferentes tipos de actividades extractivas.

Finalmente, se identifican vacíos en la integración de información socioambiental, incluyendo datos detallados sobre patrones de consumo de pescado por especie, frecuencia y estacionalidad, así como información sobre percepción del riesgo, prácticas culturales y acceso a alternativas alimentarias. La ausencia de este tipo de información limita la formulación de estrategias de comunicación del riesgo y de medidas de mitigación culturalmente apropiadas, que permitan reducir la exposición al mercurio sin afectar negativamente la seguridad alimentaria ni las prácticas tradicionales de las comunidades ribereñas.

En conjunto, estas limitaciones y vacíos de información refuerzan la necesidad de desarrollar programas de investigación y monitoreo integrados, con enfoques multidisciplinarios y de largo plazo, que articulen mediciones ambientales, biomonitoreo humano y análisis socioeconómicos. Abordar estos vacíos es una condición indispensable para avanzar desde un diagnóstico preliminar hacia una gestión efectiva del riesgo asociado al mercurio y otros metales pesados en la cuenca del río Putumayo.

8. Conclusiones

La evidencia disponible, aunque aún limitada en términos de cobertura espacial y temporal, indica de manera consistente que las comunidades ubicadas en el tramo bajo del río Putumayo en territorio peruano enfrentan un riesgo ambiental y sanitario elevado asociado a la bioacumulación y biomagnificación del mercurio. Las concentraciones registradas en peces carnívoros superan ampliamente los límites internacionales de consumo seguro y se sitúan entre las más altas reportadas en cuencas amazónicas peruanas, confirmando que la red trófica acuática constituye el principal vector de transferencia del mercurio hacia la población humana.

Los resultados de biomonitoreo humano refuerzan esta conclusión, al evidenciar niveles de mercurio en cabello extremadamente elevados, muy por encima de los umbrales de referencia de la OMS, especialmente en mujeres en edad reproductiva y en niños pequeños. Esta situación revela una exposición crónica sostenida y desde la infancia, con potenciales consecuencias graves para la salud neurológica y el desarrollo infantil, y confirma que el consumo frecuente de peces de alto nivel trófico es el principal determinante de la carga corporal de mercurio, más allá de la cantidad total de pescado ingerido.

La comparación con otras cuencas amazónicas afectadas por minería aurífera demuestra que los patrones observados en el Putumayo peruano son coherentes con procesos ampliamente documentados de bioacumulación y biomagnificación del mercurio, particularmente intensos en sistemas lénticos y planicies de inundación. En este sentido, la relativa escasez de datos locales no debe interpretarse como una menor magnitud del problema, sino como un vacío crítico de información en una zona que presenta condiciones ecológicas, hidrológicas y sociales altamente favorables para la amplificación del riesgo.

En conjunto, los hallazgos permiten afirmar que el Putumayo peruano se encuentra en un escenario de riesgo comparable al de otras regiones amazónicas prioritarias, y que la inacción basada en la falta de monitoreo sistemático podría agravar los impactos a mediano y largo plazo. Resulta prioritario implementar programas integrados de monitoreo ambiental y biomonitoreo humano, con énfasis en peces de alto nivel trófico y poblaciones vulnerables, fortalecer la cooperación transfronteriza para la gestión de fuentes de contaminación, y desarrollar estrategias

de comunicación del riesgo culturalmente apropiadas que permitan reducir la exposición al mercurio sin comprometer la seguridad alimentaria ni las prácticas culturales de las comunidades ribereñas.

9. Bibliografía

- Basta *et al.* (2021) *Mercury exposure in Munduruku indigenous communities from Brazilian Amazon: methodological background and an overview of the principal results*. Int. J. Environ. Res. Public Health, 18(17), 9222.
- Crespo-Lopez *et al.* (2021) *Mercury: what can we learn from the Amazon?* Environ. Int., 146, 106223.
- Hacon *et al.* (2020) *Mercury exposure through fish consumption in traditional communities in the Brazilian Northern Amazon*. Int. J. Environ. Res. Public Health, 17(15), 5269.
- Marchese *et al.* (2024) *Diet choices determine mercury exposure risks for people living in gold mining regions of Peru*. Environ. Res.: Health 2 035001.
- Roach *et al.* (2013) *Gold mining and mercury bioaccumulation in a floodplain lake and main channel of the Tambopata River, Perú*. Journal of Environmental Protection, Vol.4 No.1.
- Vasconcellos *et al.* (2021) *Health risk assessment of mercury exposure from fish consumption in Munduruku indigenous communities in the Brazilian Amazon*. Int. J. Environ. Res. Public Health, 18, 7940.
- Vasconcellos *et al.* (2022) *Health risk assessment attributed to consumption of fish contaminated with mercury in the Rio Branco basin, Roraima, Amazon, Brazil*. Toxics, 10(9), 516.
- Vega *et al.* (2024) *Expansión de la minería aurífera en la Amazonía peruana: el riesgo del mercurio en Loreto*. Centro de Innovación Científica Amazónica (CINCIA) y Fundación para la Conservación y Desarrollo Sostenible (FCDS).
- Wyatt *et al.* (2017) *Spatial, temporal, and dietary variables associated with elevated mercury exposure in Peruvian riverine communities upstream and downstream of artisanal and small-scale gold mining*. Int. J. Environ. Res. Public Health, 14(12), 1582.