



Mercurio en la Cuenca del Río Madre de Dios - Un examen crítico de los niveles de contaminación y sus posibles causas y consecuencias

Documento de Trabajo # 18
Bruce Forsberg
Fecha: Junio 2013

La dinámica del mercurio es bien conocida en la región amazónica, donde es importante mencionar que la presencia del mercurio en los sistemas fluviales se origina tanto a partir de fuentes naturales como antrópicas. La mayor parte de este mercurio proviene de los suelos de las terrazas no inundables del llano amazónico, zonas excepcionalmente ricas en mercurio de origen natural (Roulet et al. 1998; Zeidemann 1999; Fostier 1999; Lechler et al. 2000; Fadini and Jardim 2001). Otra parte del mercurio se deriva de la deposición directa desde la atmósfera, conociéndose que a nivel global este aporte está en proporción de 1:2 con relación a los aportes de las fuentes naturales y antrópicas (Mason et al. 2004). La liberación de mercurio gaseoso y líquido por la minería aurífera es la principal fuente antrópica de mercurio en la cuenca amazónica, y en las zonas mineras es la principal fuente de mercurio que va a dar a los sistemas fluviales. Es importante considerar también que la erosión generada por la minería aurífera puede aumentar la cantidad de mercurio que llega a los sistemas fluviales, ya que este metal está unido a los suelos removidos, al punto que en algunas zonas de intensa extracción, la erosión puede considerarse como la principal fuente de mercurio a los ríos y quebradas (Temler et al. 2006). En las últimas dos décadas las actividades mineras auríferas se han incrementado considerablemente en la cuenca del río Madre de Dios, particularmente en las subcuencas de los ríos Inambari y Colorado. Las grandes entradas de mercurio en los sistemas fluviales impactados por estas actividades han producido inquietud con respecto a los niveles de contaminación presentes en la región y los riesgos inherentes para la salud humana (Brack et al 2011). Los informes preliminares sobre la contaminación de mercurio en los ríos, poblaciones de peces y humanas locales contribuyen a esta inquietud (Deza-Arroyo 1996, MINSA 2010, ANA 2010, Brack et al 2011, Ashe 2012). En este documento se revisa de manera crítica la evidencia existente de la contaminación de mercurio en la cuenca del río Madre de Dios y se analizan las posibles consecuencias para la salud humana.

EXPLOTACIÓN DE ORO

La actividad aurífera en la cuenca del río Madre de Dios se realiza predominantemente a lo largo del canal principal Madre de Dios y en las subcuencas de los ríos Inambari, Colorado, Tambopata y Malinowski (Brack et al 2011), donde están explotando principalmente las arenas gruesas en los yacimientos aluviales o yacimientos de tipo placer. Las operaciones mineras en las estribaciones, como aquellas a lo largo de los ríos Caychive y Huaypethue, se centran en yacimientos de playa aluviales gruesos, en tanto que aquellas en grandes tributarios en tierras bajas como el ramal principal del río Madre de Dios, están explotando el material del fondo del río y tierras inundables aluviales (Kuramoto 2001). Todos los métodos empleados para extraer el oro involucran la

pre-concentración gravimétrica de minerales más densos seguida por la amalgamación con mercurio metálico. Las tecnologías empleadas fluctúan desde métodos manuales rudimentarios hasta operaciones semi-mecánicas y mecánicas, utilizando cargadores frontales, volquetes, bombas de succión de flotación (tracas, chupaderas) y dragas hidráulicas (Brack et al 2011, Kuramoto 2001).

LIBERACIÓN DE MERCURIO AL MEDIO AMBIENTE

El mercurio metálico se libera al medio ambiente durante tres etapas distintas del proceso de explotación aurífera. Durante el proceso de amalgamación, el mercurio líquido se mezcla con arena densa pre-concentrada y agua en un balde abierto. Parte de este mercurio forma una amalgama con oro y es reservado para seguir con la producción. Por lo general, el mercurio restante contenido en la mezcla de arena y agua residual es descartado en un medio fluvial cerca del emplazamiento minero. Luego se calienta la amalgama de oro-mercurio para purificar el oro. Esto se realiza en un ambiente abierto en donde todo el mercurio presente en la amalgama se libera a la atmósfera como gas $Hg(0)$ o en una retorta, dispositivo donde parte del mercurio se condensa y recicla. Con frecuencia el oro se vuelve a amalgamar con mercurio y se quema por segunda vez cuando se vende con el fin de garantizar su pureza. Usualmente esto se realiza en un ambiente cerrado, que puede producir concentraciones elevadas de mercurio gaseoso y graves riesgos para la salud de las personas involucradas (MINSa 2010). Se calcula que actualmente se producen 16 toneladas métricas de oro anuales en la región Madre de Dios y que 44.8 toneladas de mercurio se usan anualmente en el proceso de extracción (Brack et al 2011). Tanto la producción de oro como el uso del mercurio han aumentado con el paso de los años y la liberación acumulada de mercurio al medio fluvial durante este periodo fue potencialmente muy grande (Figura 1).

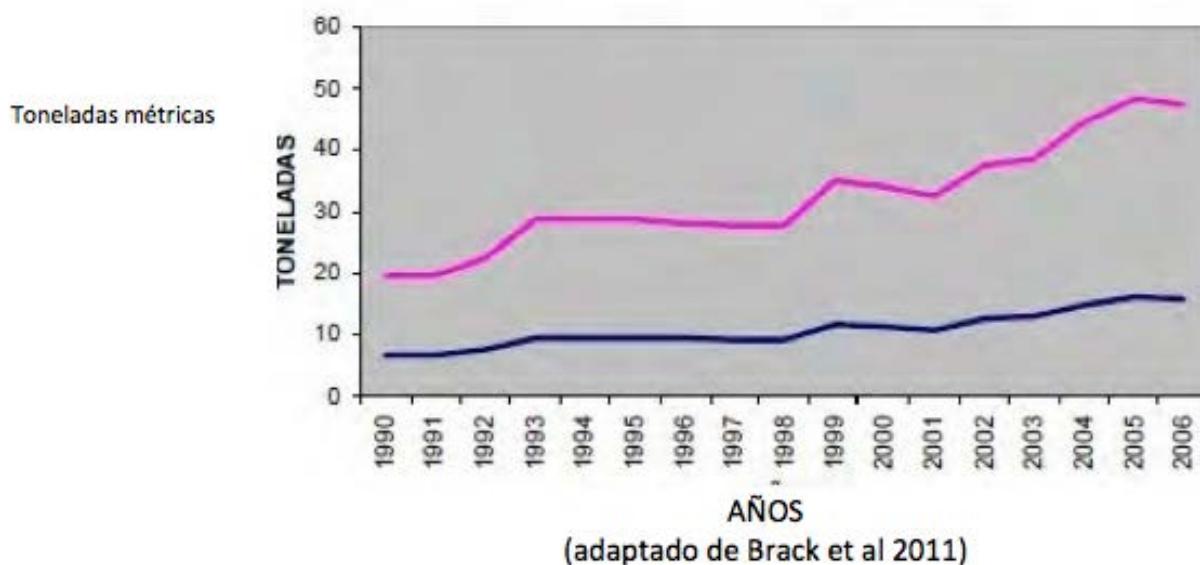


Figura 1. Variación en la producción de oro y uso de mercurio en la cuenca del río Madre de Dios con el paso del tiempo.

El arrastre y la erosión que ocurren en forma extensa en las áreas de explotación de la región Madre de Dios, también transportan grandes cantidades de materiales provenientes tanto de tierras inundables como de tierra firme hacia el sistema fluvial, que puede contaminarse con mercurio procedente tanto de actividades mineras como de fuentes naturales (Nriagu et al 1992, Roulet et al. 1998a, b, Zeidemann 1999, Fostier 1999, Lechler

et al 2000 y Fadini y Jardim 2001). La intensidad de la erosión se evidencia en las altas concentraciones de sedimentos totales encontradas en los ríos Caychive y Dos de Mayo y su correlación con las actividades de explotación (Figura 2).

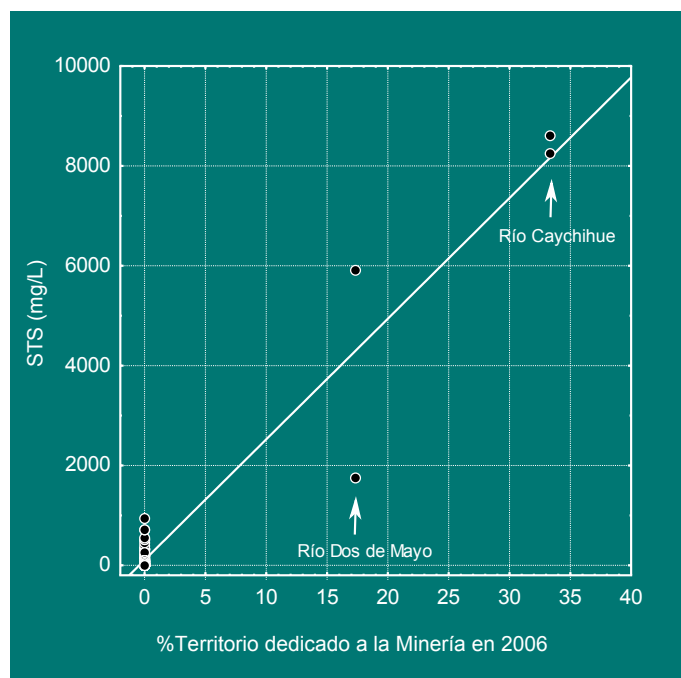


Figura 2. Influencia de las actividades mineras aguas arriba sobre las concentraciones de sedimentos totales suspendidos (TSS) en tributarios del río Inambari.

MERCURIO EN EL AGUA

El mercurio es relativamente inofensivo en el medio acuático hasta que se metila. Las concentraciones de mercurio totales (THg) son bastante bajas en la mayor parte de aguas naturales, incluso en aquellas impactadas por la contaminación industrial. Los niveles de THg en los ríos de la Amazonía Central, incluyendo aquellos en donde se realizan intensamente actividades de explotación de oro como los ríos Madeira y Tapajós, fluctúan entre 2.9 y 33 ng/L (Nriagu et al 1992, Roulet et al 1998b, Fadini y Jardim 2001) y están considerablemente por debajo del límite estándar recomendado para el agua potable segura (2000 ng/L, USEPA (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos)). Los niveles excepcionalmente altos de THg reportados por ANA (2010) para tributarios del río Madre de Dios son poco confiables dentro de este contexto. En este caso, los valores altos se pueden atribuir a la metodología inadecuada empleada para calcular el THg. La metodología empleada en este estudio (método 245.2 de EPA) tiene un límite de detección aproximado de 200 ng/l y por ende, es incapaz de calcular los niveles comúnmente hallados en aguas naturales. Asimismo, se sabe que los protocolos de muestreo y conservación utilizados en este método contaminan las muestras naturales, produciendo valores de mercurio artificialmente altos. Así, en tanto que el estudio de ANA identificó varios tributarios con niveles de HgT por encima de los estándares recomendados, es probable que los niveles se acerquen mucho más a los valores relativamente bajos para los ríos de la Amazonía Central.

METILACIÓN DE MERCURIO

El mercurio, en los niveles comúnmente hallados en los ríos de la Amazonía, sólo representa un grave riesgo

para la salud cuando se transforma en metil-mercurio, la única forma de mercurio que se bioacumula y biomagnifica de manera eficiente a través de la cadena alimenticia acuática. La metilación de mercurio es un proceso bacteriamente mediado que ocurre principalmente en medios acuáticos anóxicos con altos niveles de carbono orgánico disuelto (COD) y pH bajo. Afortunadamente estas condiciones son relativamente raras en la cuenca del río Madre de Dios. Las tierras inundables del río Madre de Dios (MAD) y sus tributarios principales se inundan por breves periodos y la profundidad del agua es por lo general insuficiente como para promover una estratificación térmica permanente y anoxia (Roach et al 2013). Estos medios también son generalmente demasiado bajos en COD y altos en pH como para promover la metilación (Barthem et al 2003, Guyot y Wasson 1994). Los únicos hábitats con condiciones favorables para la metilación de mercurio son humedales como los aguajales, pantanos de aguas negras permanentemente inundados, restringidos a áreas limitadas a lo largo de bordes altos de la tierra inundable del río Madre de Dios central y lagos tipo prado, medios de aguas negras “tipo bofedal” en las zonas altoandinas. Así, a pesar de la entrada considerable de mercurio en el sistema fluvial de MAD, la cantidad de mercurio que ha sido metilada y bioacumulada en la cadena alimenticia acuática es probablemente baja, con relación a aquella encontrada en tributarios del río Amazonas en las zonas bajas con densidades más altas de humedales anóxicos.

BIOACUMULACIÓN DE MERCURIO (PECES)

Los mejores bioindicadores de contaminación de mercurio en cadenas alimenticias acuáticas locales son los depredadores acuáticos sedentarios como el *Hoplias malabaricus* (traira, fasaco, huasaco), que se encuentran en todo el sistema del río Amazonas y biomagnifican los efectos de la contaminación local (Belger y Forsberg 2006). Los niveles de mercurio en *Hoplias* y otros peces predatorios tienden a elevarse con el tamaño y peso del individuo. Con el fin de comparar los niveles de contaminación entre regiones o en la misma región a través del tiempo, es necesario estandarizar por peso o comparar las regresiones de Hg versus peso. La mayor parte de información existente sobre los niveles de mercurio en peces de la cuenca del río MAD (IRENAIANO 2003, PRODUCE 2008, MINSa 2010, CAMEP 2013, Roach et al 2013) no está estandarizada por tamaño, y la mayor parte de peces depredadores capturados y examinados pertenecen a especies migratorias que no siempre reflejan los niveles de contaminación de las cadenas alimenticias locales. La mayoría de datos consistentes establecidos para evaluar los efectos de la contaminación de mercurio en la biota acuática son los resultados de Deza-Arroyo (1996) para *Hoplias malabaricus*. Este autor reportó niveles de mercurio para el rango de tamaño completo de *Hoplias*, los muestreos se hicieron en dos lugares de la cuenca del río MAD, en la región del Manu, aguas arriba de las operaciones mineras, y en Puerto Maldonado aguas abajo de las más grandes operaciones mineras auríferas. Al comparar las regresiones de Hg con el peso de los individuos para estos dos lugares, se observó que los peces en Puerto Maldonado tuvieron niveles ligeramente más altos de mercurio que aquellos del sitio del Manu menos impactado (Figura 3). Además, ambos sitios tenían niveles de mercurio mucho más bajos que aquellos observados en *Hoplias malabaricus* de la cuenca superior del río Negro en la Amazonia Central del Brasil (Belger y Forsberg 2006), un tributario sin actividad minera aurífera significativa (Fig. 3). Los niveles de mercurio más altos, en este caso, reflejan las mejores condiciones para la metilación presentes en esta cuenca. El río Negro tiene aguas negras con altas concentraciones de COD, un pH bajo y una de las densidades más altas de ambientes de humedales anóxicos en la Amazonía Central.

Un análisis de regresión lineal múltiple de THg en peces frente al peso de los peces, pH, COD y densidad porcentual de humedales aguas arriba del sitio de muestreo mostró efectos significativos de las cuatro variables independientes sobre la cantidad de mercurio en los peces. Así, aunque un efecto ligero de la explotación aurífera se evidenció al comparar los niveles de mercurio entre peces de Manu y Puerto Maldonado, los niveles de contaminación en ambos sitios son bajos cuando se comparan con aquellos del río Negro, debido al bajo potencial de metilación del mercurio en la cuenca del río MAD. Esto no significa que no hay peces contaminados en la cuenca del río MAD. Muchos depredadores migratorios grandes tienen niveles de mercurio por encima de aquellos recomendados por la EPA (0.3 ppm = 300 ug/kg) y la Organización Mundial de la Salud (0.5 ppm = 500 ug/kg) para el consumo seguro (CAMEP 2013) (Figura 4) y se deberá tomar precauciones para evitar el consumo de estas especies, especialmente por parte de niños pequeños y mujeres embarazadas, que son especialmente sensibles a los efectos tóxicos del mercurio. Esta información solo significa que no podemos atribuir inequívocamente estos niveles elevados a la contaminación local causada por las operaciones mineras auríferas. Muchas de estas especies emigran cientos o incluso miles de millas para alimentarse o desovar. Mientras viajan, consumen peces de muchos lugares, acumulando la contaminación de mercurio de una diversidad de redes tróficas. Este patrón de alimentación geográficamente complejo dificulta asociar su contaminación por mercurio observada con una fuente de contaminación particular.

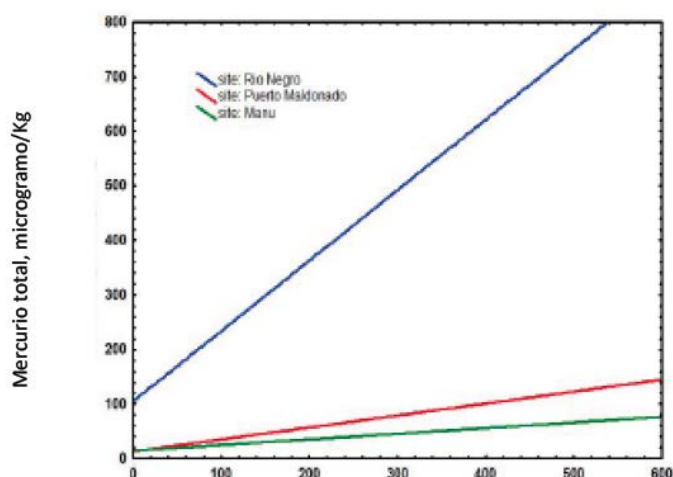


Figura 3. Relaciones de regresión entre el mercurio en los peces y el peso de los peces para *Hoplias malabaricus* del río Negro, Puerto Maldonado y Manu (datos de Deza-Arroyo 1997, Belger y Forsberg 2006)

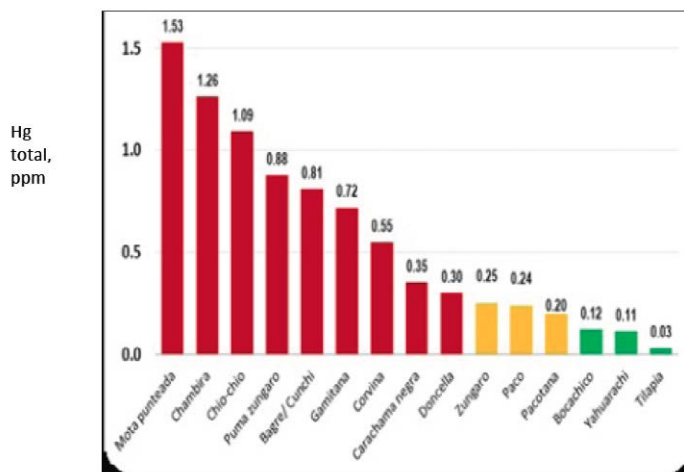


Figura 4. Niveles de mercurio promedio encontrados en peces de Puerto Maldonado. (Datos de CAMEP 2013)

Figura 4. Niveles de mercurio promedio encontrados en peces de Puerto Maldonado. (Datos de CAMEP 2013)

MERCURIO EN EL CABELLO HUMANO

Las poblaciones humanas también pueden ser excelentes bioindicadores de la contaminación por mercurio local. Esto es particularmente cierto en poblaciones ribereñas sedentarias cuya proteína proviene en gran parte del consumo de peces locales y así, son una parte integral de la cadena alimenticia acuática local. El nivel de mercurio en el cabello humano es uno de los mejores indicadores de exposición a largo plazo a la contaminación por ingesta de mercurio. Dos estudios recientes de niveles de mercurio en el cabello de la población de Puerto Maldonado, en la cuenca del río MAD (Ashe 2012, CAMEP 2013) encontraron concentraciones de THg promedio para la población general que fluctúan entre 1.96 y 2.7 ppm y un nivel promedio para mujeres en edad fértil de 3.0 ppm. Un estudio similar de poblaciones en áreas mineras en la cuenca del río MAD halló un valor de mercurio promedio en el cabello de 2.67 ppm. Estos niveles son considerados altos en relación con algunos límites de referencia internacionales (por ejemplo, 1 ppm, USEPA 2001) y normales a ligeramente contaminados por otros (ejemplo, 2.86 ppm, Comisión de Seguridad Alimentaria de Japón 2005). Sin embargo, todos son bastante bajos cuando se comparan con aquellos encontrados en poblaciones que consumen pescado de la cuenca amazónica baja (Tabla 1). En tanto que algunos de estos valores de la Amazonía baja provienen de áreas mineras auríferas, los valores más altos se hallan en tributarios aislados en la parte alta del río Negro, lejos de actividades mineras importantes (Silva-Forsberg et al 1999). La variación observada entre tributarios parece no tener ninguna relación con el nivel de actividades mineras auríferas, si no más bien, refleja diferencias en características ambientales, tales como pH del río y COD, que afectan las tasas de metilación del mercurio. Las concentraciones promedio de mercurio en el cabello varían inversamente al pH del río y directamente con la concentración de carbono orgánico disuelto (Silva-Forsberg et al 1999), con concentraciones más altas que ocurren en los ríos de aguas negras, como el Negro, con un COD alto, pH bajo y densidades altas de humedales anóxicos, condiciones óptimas para la metilación de mercurio. El río Madre de Dios (Puerto Maldonado) se encuentra en el otro extremo de este continuo con un pH alto, densidades bajas de humedales anóxicos y un potencial muy bajo para la metilación. En consecuencia, tiene uno de los niveles de mercurio más bajos en el cabello registrados en la cuenca amazónica.

Tabla 1. Concentraciones de mercurio en el cabello de la población que consume pescado en la Cuenca Amazónica

Lugar	n	THg medio, ppm	Rango ppm	Referencia
Río Madeira	169	8.98	0.22-71	Malm et al 1996
Río Madeira	242	17.2	303	Barbosa et al. 1995, Boischio et al. 1995
Río Tapajos	432	16.76	0.7-176	Malm et al 1996, Akagi et al. 1995
Río Tapajos	96	13.2	1.0-142	Lebel et al. 1997
Río Negro	154	75.5	5.7-171.2	Forsberg et al 1995, Silva-Forsberg et al 1999
Puerto Maldonado	226	2.7	0.02-27.4	CAMEP 2013
Puerto Maldonado	104	1.96	0.15-13.22	Ashe 2012
Sitios mineros de MAD	100	2.67	0.36-20.26	Ashe 2012

IMPACTOS POTENCIALES DEL CAMBIO DEL USO DE LA TIERRA

A pesar de tener fuentes antrópicas significativas de mercurio en la cuenca del río MAD, los niveles de contaminación en las poblaciones humanas locales y las poblaciones de peces residentes aún son relativamente bajos, debido principalmente a la escasa capacidad para la metilación y bioacumulación de mercurio en la mayoría de medios acuáticos. No obstante, aún existe la posibilidad de un problema mayor, que no debe subestimarse. Se deberá tener cuidado en restringir las actividades mineras auríferas cerca de aguajales, lagos tipo prado y otros ambientes de humedales con un alto potencial para la metilación de mercurio. La operación minera en la región Guacamayo ya está impactando algunos humedales del tipo conocido como aguajales. Asimismo, hay planes para construir varias centrales hidroeléctricas en la cuenca del río MAD, cuyos reservorios podrían alterar significativamente la dinámica del mercurio en la región.

La dinámica del mercurio en los reservorios ha sido estudiada de manera extensa en las regiones templadas del norte pero es relativamente desconocida en sistemas tropicales. La vegetación terrestre sumergida por un reservorio generalmente muere y empieza a descomponerse inmediatamente después del embalse, produciendo un incremento significativo de los niveles de COD y disminución de los niveles de pH y oxígeno disuelto, en comparación con aquellos hallados originalmente en el río. Por lo general estas condiciones causan un incremento dramático en el metil-mercurio, el cual se acumula progresivamente en la cadena alimenticia acuática (Bodaly et al. 1996, St. Louis et al. 2004). Los niveles de mercurio en peces depredadores tienden a incrementarse durante los primeros 10 años después del embalse, y luego progresivamente disminuyen a los niveles de pre-embalse (Bodaly et al. 1996). Las tendencias históricas en la contaminación de mercurio sólo están disponibles para un embalse amazónico, reservorio Balbina, cerca de Manaus, Brasil (Forsberg, datos no publicados; Weisser 2001). Los niveles de mercurio en *Cichla* spp., el principal pez depredador en el reservorio, se elevaron en los primeros 10 años luego del embalse y luego disminuyeron, siguiendo una tendencia similar a aquella descrita para los sistemas templados del norte (Fig. 6a).

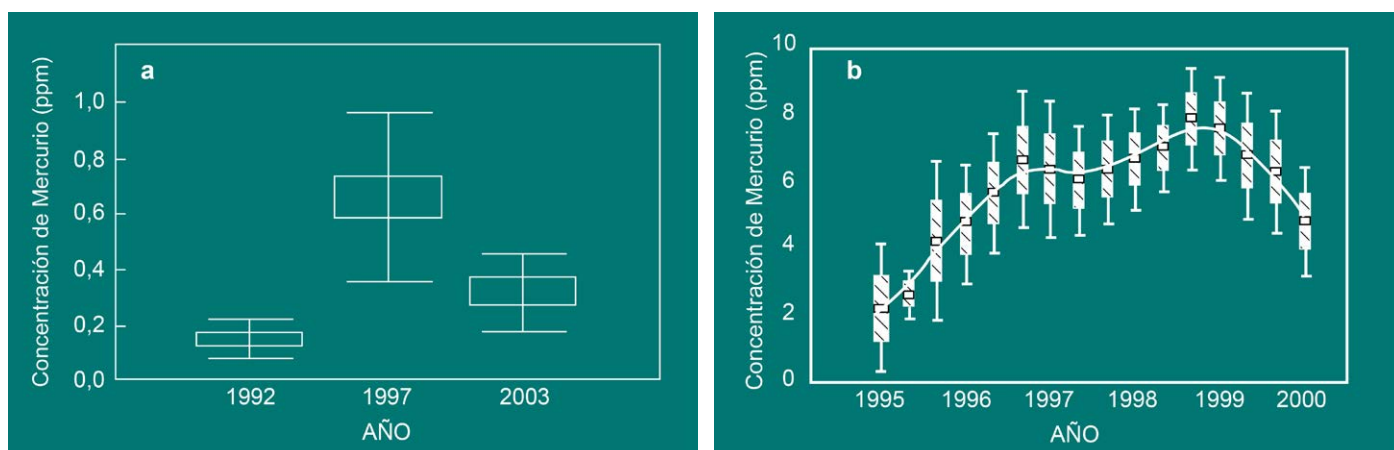


Figura 6. Variaciones históricas en niveles de mercurio promedio en a) pez depredador (*Cichla* spp) y b) cabello humano para el Reservorio Balbina. Datos de Forsberg, no publicados y Weisser 2001, respectivamente.

Grandes comunidades humanas se establecen cerca de la mayoría de reservorios de la Amazonía para explotar las existencias de peces que generalmente aumentan luego del embalse. En vista que gran parte de la proteína de estas comunidades proviene de peces del reservorio, sus niveles de mercurio tienden a elevarse y posteriormente a caer junto con aquellos de los peces. Esta tendencia se reflejó claramente en los niveles

de mercurio en el cabello humano recogido de las esposas de pescadores en el reservorio Balbina (Fig. 6b, Weisser et al. 2001).

Se prevé un patrón similar de la dinámica de mercurio en los reservorios planificados para la cuenca del río MAD. Se prevé que la vegetación terrestre sumergida por estos reservorios muera y se descomponga, causando un incremento considerable de los niveles de COD y disminución de los niveles de pH y oxígeno disuelto, en comparación con los valores del pre-embalse. La estratificación térmica aislará eficazmente la porción inferior de los reservorios, creando hipolimnios anóxicos profundos y casi permanentes, con condiciones ideales para la metilación de mercurio. Se prevé que esto cause un incremento dramático de las concentraciones de metil-mercurio a medida que las grandes existencias de mercurio inorgánico almacenadas en áreas mineras inundadas se movilicen y metilen. El metil-mercurio generado en este proceso se acumulará gradualmente en la cadena alimenticia. Se prevé que los niveles de mercurio en los peces depredadores y en las poblaciones humanas que consumen pescado alrededor del reservorio se incrementen gradualmente durante los primeros 10 años después del embalse y luego caigan gradualmente a sus niveles de pre-embalse. Considerando las grandes cantidades de mercurio de origen antrópico actualmente presentes en la cuenca del río MAD, se estima que las concentraciones de mercurio en peces y en el cabello humano después del embalse se eleven incluso a niveles más altos que aquellos encontrados en el reservorio Balbina (Fig. 6a y b), representando un riesgo grave para la salud de las poblaciones que viven cerca de estos reservorios.

SALUD HUMANA

Muchas especies de peces migratorios actualmente presentes en la cuenca del río MAD tienen niveles altos de mercurio (Fig. 4). El consumo de estas especies deberá restringirse, especialmente por niños pequeños y mujeres en edad fértil. Sin embargo, no se recomienda una restricción severa a todo consumo de pescado. Dependiendo del estándar internacional elegido, los niveles de mercurio en el cabello de poblaciones ribereñas de la cuenca del río MAD actualmente están cerca o ligeramente por encima de la concentración de referencia recomendada (1-2.86 ppm). Cabe señalar que estos niveles de referencia son 7-10 veces más bajos que las concentraciones que causan síntomas neurotoxicológicos significativos en la mayoría de poblaciones sensibles (IOMC 2008) y por lo tanto son extremadamente conservadores. Es así que en los niveles actuales, es improbable que síntomas neurológicos significativos se presenten en la población de MAD. Los peces son la principal fuente de proteínas para muchas comunidades ribereñas aisladas, y las restricciones severas en el consumo de pescado podrían tener un impacto negativo grave en el desarrollo neurológico temprano. Se recomienda un enfoque balanceado que considere los requisitos nutricionales, la disponibilidad de alimentos y los efectos combinados de todos los contaminantes ambientales, con el fin de optimizar los resultados en la salud de estas comunidades.

La contaminación de mercurio ocupacional también puede ocurrir en los emplazamientos mineros auríferos, ya que los vapores de mercurio liberados durante la quema de la amalgama son inhalados por los explotadores de oro, los compradores y sus familias. El mejor indicador de este tipo de contaminación es el nivel de mercurio en la orina. Los análisis de orina en las áreas de explotación de oro de la cuenca del río MAD han mostrado

niveles significativos de contaminación en algunas poblaciones (MINSA 2010). Los niveles más altos de contaminación en el aire y orina se hallaron alrededor de ambientes de quema de amalgama escasamente ventilados. Una mejor ventilación y el uso de retortas eficientes para reciclar el mercurio podrían reducir enormemente la contaminación en estas áreas.

LITERATURA CITADA

- ANA – Autoridad Nacional del Agua. 2010. Informe de las acciones de vigilancia y monitoreo de la calidad del agua en los ríos de Madre de Dios. INFORME TÉCNICO N° 0176 - 2010-ANA-DGCRH/BCT, manuscrito 26 pp.
- Ashe, K. 2012. Elevated Mercury Concentrations in Humans of Madre de Dios, Peru. PLoS ONE 7(3): e33305. doi:10.1371/journal.pone.0033305.
- Barthem, R., Goulding, M., Forsberg, B. R., Canas, C., Ortega, H, 2003. Aquatic Ecology of the Madre de Dios: Scientific Bases for Andes-Amazon Headwaters Conservation. Lima, Peru : Amazon Conservation Association, v.1. p.117.
- Brack A, Ipenza C, Brack J, Sotero V. 2011. Minería Aurífera en Madre de Dios y Contaminación con Mercurio - Una Bomba de Tiempo, Ministerio del Ambiente, Lima.
- Belger, L., Forsberg, B.R. 2006. Factors controlling mercury levels in two predatory fish species in the Negro river basin, Brazilian Amazon. *Science of the Total Environment* 367: 451-459.
- Bodaly, R. A.; St.Louis, V. L.; Paterson, M. J.; Fudge, R. J. P.; Hall, B. D.; Rosenberg, D. M.; Rudd, J. W. M.1995. In Mercury and its effects on the environment and biology, pp 259-287. In Sigel, A., Sigel H., Eds. Marcel Dekker: New York.
- CAMEP – Carnegie Amazon Mercury Ecosystem Project. 2013. Mercury in Madre de Dios: Mercury concentrations in fish and humans in Puerto Maldonado. Research Brief No. 1, 2p.
- Deza-Arroyo, N. E., 1996. Mercury accumulation in fish from Madre de Dios, a goldmining area in the Amazon basin, Peru. Oregon State University M.S. Thesis.39 pp.
- Fadini P.S., Jardim W.F. 2001. Is the Negro River Basin (Amazon) impacted by naturally occurring mercury? *Sci Total Environ* 275(1-3):71-82.
- Fostier, A.H., Oliveira, S.M.B., Guimarães, J.R.D., Forti, M.C., Melfi, A.J., Boulet, R., Favaro, D.I.T., Krug, F.J. 1999. Mercury accumulation in natural forested Amazonian soils. In: Proceedings of the Fifth International Conference on Mercury as a Global Pollutant. Rio de Janeiro, RJ, Brazil, 23-28 May 1999: p557.
- Guyot, J.L. and Wasson, J.G. 1994. Regional pattern of riverine dissolved organic carbon in the Amazon drainage basin of Bolivia. *Limnol. Oceanogr.*, 39(2): 452-458.
- INRENA-IANP, 2003. Plan maestro 2004-2008, Reserva Nacional Tambopata 1997.

- IOMC 2008. Guidance for Identifying Populations at Risk from Mercury Exposure. Geneva, UNEP DTIE Chemicals Branch and WHO Department of Food Safety, Zoonoses and Foodborne Diseases: 176.
- Kuramoto, J.R., 2001, Artisanal and informal mining in Peru: World Business Council for Sustainable Development and International Institute for Environment and Development, Mining, Minerals and Sustainable Development Project [Working Paper] 82, 53 p.
- Lechler, P.J., Miller, J.R., Lacerda, L.D., Vinson, D., Bonzongo, J.C., Lyons, W.B., Warwick, J.J., 2000. Elevated mercury concentrations in soils, sediments, water, and fish of the Madeira River Basin, Brazilian Amazon: a function of natural enrichment? *Sci.Total Environ.* 26: 87-96.
- Malm, O., Pfeiffer, W.C., Souza, C.M.M., Reuther, R. 1990. Mercury pollution due to gold mining the Madeira River Basin, Brazil. *Ambio* 19: 11-15.
- Malm, O., Castro, M.B., Bastos, W.R., Branches, F.J.P., Guimarães, J.R.D., Zuffo, C.E., Pfeiffer, W.C. 1995. An assessment of mercury pollution in different goldmining areas, Amazon Brazil. *Sci. Total Environ.* 175: 127-140.
- Malm, O. 1998. Gold mining as a source of mercury exposure in the Brazilian Amazon. *Environ. Res.* 77, 73-78.
- Mason, R.P., Fitzgerald, W.F., Morel, F.M.M. 1994. The biogeochemical cycling of elemental mercury - anthropogenic influences. *Geochim Cosmochim Acta* 58: 3191-3198 Roulet et al. 1998.
- MINSA - Ministerio de Salud 2010. Niveles de exposición a mercurio en población de Huepetuhe – Madre de Dios, y factores de riesgo de exposición. CENSOPAS, Centro nacional de Salud Ocupacional y Protección del Ambiente para la Salud – DIRESA Madre de Dios (83 pp.).
- Nriagu, J.O., Pfeiffer, W.C., Malm, O., Souza, C.M.M. and Mierle, G. 1992. Mercury pollution in Brazil. *Nature* 356, 389.
- PRODUCE 2008 Evaluación ambiental de la Cuenca del Río Madre de Dios. Ministerio de la Producción/ Viceministerio de Pesquería. Lima
- Roulet, M.; Lucotte, M.; Canuel, R.; Rheult, I.; de Freitas Gog, Y.G.; Farella, N.; Souza do Vale, R.; Souza Passos, C.J.; de Jesus da Silva, E.; Mergler, D. and Amorim, M. 1998a. Distribution and partition of total mercury in waters of the Tapajós River Basin, Brazilian Amazon. *The Science of Total Environment*, 231:203-211.

- Roulet, M., Lucotte, M., Saint-Aubin, A., Tran, S., Rhéault, I., Farella, N., Silva, E.J., Dezencourt, J., Sousa Passos, C.J., Guimarães, J.R.D., Mergler, D., Amorim, M., 1998b. The geochemistry of mercury in central Amazonian soils developed on the Alter-do-Chão formation of the lower Tapajos River Valley, Para State, Brazil. *The Science of the Total Environment* 223: 1–24.
- Silva-Forsberg, M.C., Forsberg, B.R., Zeidemann, V.K., 1999. Mercury contamination in humans linked to river chemistry in the Amazon Basin. *Ambio* 28: 519-521.
- St. Louis, V. et al 2006. The Rise and Fall of Mercury Methylation in an Experimental Reservoir. *Environ. Sci. Technol.* 2004, 38, 1348-1358.
- Telmer, V. et al.. 2006. The source and fate of sediment and mercury in the Tapajós River, Para, Brazilian Amazon: Ground- and space-based evidence *Journal of Environmental Management* 81: 101–113.
- Weisser, C.W. 2001. Investigation of the history of mercury contamination in the Balbina Reservoir, Amazon, Brazil. M. S. Thesis, Universität Konstanz, Konstanz, Alemanha.
- Zeidemann, V.K. 1998. A geoquímica de mercúrio em solos da bacia do rio Negro e sua influência no ciclo regional do mercúrio. Dissertação de Mestrado, Curso de Ecologia, INPA/UA.

Se sugiere citar:

Forsberg, B. 2013. “Mercurio en la Cuenca del Río Madre de Dios - Un examen crítico de los niveles de contaminación y sus posibles causas y consecuencias”. Documento de Trabajo # 18. Wildlife Conservation Society, Lima. Perú.