



Mercurio total (Hg-T) en ictiofauna de mayor consumo en San Marcos - Sucre, Colombia

Daniel Romero-Suárez¹ ; Liseth Pérez-Flórez² ; Adolfo Consuegra-Solorzano² ;
Jhon Vidal-Durango³ ; Jorge Buelvas-Soto^{4*} ; José Marrugo-Negrete⁴ 

¹Universidad del Magdalena, Facultad de ciencias de la salud, Programa de medicina, Santa Marta, Colombia.

²Universidad de Sucre, Grupo de investigación Conservación del Recurso Hídrico y Alimentos (CRHIA), Sincelejo, Colombia

³Universidad de la Costa, Barranquilla, Colombia

⁴Universidad de Córdoba, Grupo de investigación Aguas, Química aplicada y Ambiental, Montería, Colombia

*Correspondence: jorge.buelvas.soto@gmail.com

Recibido: Noviembre 2021; Aceptado: Julio 2022; Publicado: Septiembre 2022.

RESUMEN

Objetivo. Se cuantificó el Hg en músculo dorsal de las 11 especies de peces más consumidas en San Marcos, localizado en la región de la Mojana. **Materiales y métodos.** Se tomaron muestras del músculo dorsal de las especies ícticas, cuantificando las concentraciones de Hg-T mediante espectrofotometría de absorción atómica por vapor frío (CVAAS). **Resultados.** Las especies que presentaron los más altos valores de Hg-T fueron las de hábitos alimenticios carnívoros: *Pseudoplatystoma magdaleniatum* ($0.44 \pm 0.09 \mu\text{g/g}$), *Plagioscion surinamensis* ($0.42 \pm 0.14 \mu\text{g/g}$) y *Hoplias malabaricus* ($0.39 \pm 0.11 \mu\text{g/g}$). No obstante, la máxima cantidad recomendable de Hg en peces ($0.5 \mu\text{g/g}$) fijado por la Unión Europea, no fue superada por ninguna de las especies estudiadas. **Conclusiones.** Se concluye que la ictiofauna comercial de la Mojana está contaminada por Hg, resultado de las actividades mineras que se desarrollan en los cauces de los ríos que descargan en esta región. El consumo persistente de pescado proveniente de las zonas evaluadas por parte de sus pobladores representa un alto riesgo, debido a la alta toxicidad del Hg, el cual presenta efectos adversos en la salud humana aun cuando es consumido en dosis bajas durante periodos de tiempo prolongados.

Palabras clave: Humedales; metales pesados; minería; pesca; seguridad alimentaria; toxicología ambiental (*Fuentes: FAO, Tesoro ambiental para Colombia*).

ABSTRACT

Objective. Hg was quantified in the dorsal muscle of the 11 species of fish most consumed in San Marcos, located in the region of La Mojana. **Materials and methods.** Dorsal muscle samples were taken from the fish species, T-Hg concentrations were quantified using cold vapor atomic absorption spectrophotometry (CVAAS). **Results.** The species with the highest T-Hg values were those with carnivorous eating habits: *Pseudoplatystoma magdaleniatum* ($0.44 \pm 0.09 \mu\text{g/g}$), *Plagioscion surinamensis* ($0.42 \pm 0.14 \mu\text{g/g}$) and *Hoplias malabaricus* ($0.39 \pm 0.11 \mu\text{g/g}$). However, the maximum recommended amount of Hg in fish ($0.5 \mu\text{g/g}$) set by the European Union, was not exceeded by any of the species studied. **Conclusions.** It is concluded that the commercial ichthyofauna of La Mojana

Como citar (Vancouver).

Romero-Suárez D, Pérez-Flórez L, Consuegra-Solorzano A, Vidal-Durango J, Buelvas-Soto J, Marrugo-Negrete J. Mercurio total (Hg-T) en ictiofauna de mayor consumo en San Marcos - Sucre, Colombia. Rev MVZ Córdoba. 2022; 27(3):e2488. <https://doi.org/10.21897/rmvz.2488>



©El (los) autor (es) 2022. Este artículo se distribuye bajo los términos de la licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>), que permite a otros distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir de su obra de modo no comercial, siempre y cuando den crédito y licencien sus nuevas creaciones bajo las mismas condiciones.

is contaminated by Hg, a result of the mining activities that take place in the channels of the rivers that discharge in this region. The persistent consumption of fish from the evaluated areas by its inhabitants represents a high risk, due to the high toxicity of Hg, which presents adverse effects on human health even when it is consumed in low doses for prolonged periods of time.

Keywords: Environmental toxicology; fishing; food safety; heavy metals; mining; wetlands (*Sources: FAO, Environmental Thesaurus for Colombia*)

INTRODUCCIÓN

El mercurio (Hg) es un metal neurotóxico cada día más presente en el ambiente debido a las actividades humanas (1). El manejo inadecuado del Hg en las zonas de explotación aurífera ha generado graves procesos de contaminación en los suelos y los ecosistemas acuáticos (2), lo que incrementa exponencialmente el riesgo de exposición en las personas a través de productos alimenticios contaminados (3). Aunque existen muchas formas de exposición al Hg, la inhalación directa de las emisiones antropogénicas y el consumo de pescado constituyen las principales vías de exposición humana (4). Incluso cuando las concentraciones de Hg son bajas en los ecosistemas acuáticos, estas pueden alcanzar niveles peligrosamente altos en la biota de estos medios, particularmente en los peces, debido a la acumulación de este contaminante a través de la red trófica (5).

La actividad que más contribuye en Colombia a la contaminación por Hg es la minería del oro (6), siendo el norte de Antioquia y sur de Bolívar las zonas con mayor explotación de este metal (7). Gran parte de esta zona de explotación aurífera se circunscribe a La Mojana, una extensa región de ciénagas y tierras inundables en la que drenan sus aguas los ríos: Cauca, San Jorge y Magdalena (8). El departamento de Sucre ocupa una zona de la región de la Mojana, la cual se sitúa en el sur y en ella se localiza el municipio de San Marcos, que cuenta con numerosos cuerpos de agua (9), los cuales son reservorios de una enorme diversidad de fauna acuática que desempeña un rol ecológico fundamental (10), y a su vez representa una importante fuente alimenticia para los pobladores de este territorio. Los suelos y aguas de San Marcos han sido contaminados a través de las aguas del río San Jorge, que recibe agua y sedimentos contaminados con metales pesados de los otros ríos que circundan a la Mojana, en cuyas cuencas se da la explotación de ferroníquel y oro (11).

Diversos estudios por contaminación con Hg se han realizado en el área en distintos compartimentos ambientales. En un estudio Pinedo-Hernández et al (6), determinaron la presencia de mercurio en sedimentos, registrando concentraciones de Hg-T entre 196.2 y 1187.6 ng/g y una media de 524.2 ± 256.8 ng/g (6). Otra investigación registró valores medios de Hg-T en peces de 0.223 ± 0.027 µg/g, en cabello un rango de concentración entre 0.17 – 8.8 µg/g y en sedimentos de 0.097 ± 0.049 µg/g (7). Buelvas-Soto et al (8) determinaron los niveles de Hg en 47 muestras de sangre y plumas del pato *Dendrocygna autumnalis*, registrándose altos valores de Hg en estas aves que residen en los humedales de la Mojana. Marrugo-Negrete et al (12) determinaron concentraciones de mercurio y metilmercurio (MeHg) en las 10 especies ícticas más consumidas en 11 municipios de la Mojana, obteniendo rangos de concentración entre 0.22-0.58 µg/g en los peces carnívoros. Marrugo-Negrete et al (13) determinó concentraciones de Hg-T en peces, siendo la más alta en el carnívoro *Pseudoplatystoma fasciatum*, y la más baja en el no carnívoro *Prochilodus magdalenae* (13).

Por esta razón, la actual investigación se enfoca en el estudio de la presencia de Hg en la ictiofauna de la Mojana y los impactos más relevantes sobre la salud de los pobladores de la zona.

La finalidad de esta investigación fue determinar las concentraciones de Hg-T en las once especies ícticas más consumidas en el Municipio de San Marcos - Sucre.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio. Los muestreos se realizaron en seis cuerpos de agua de los alrededores de San Marcos (latitud $8^{\circ} 35' 06''$ N- Longitud, $75^{\circ} 07' 16.39''$ O), en la Mojana Sucreña. Las áreas de muestreo fueron la Ciénaga de San Marcos, Caño Carate, Caño Viloría, río San Jorge, Ciénaga de Belén y la Ciénaga de Palo Alto. San Marcos

se encuentra en la ecorregión de la Mojana, una zona altamente biodiversa localizada en la Costa Caribe de Colombia que sirve como área de drenaje de tres grandes ríos colombianos: Magdalena, Cauca, San Jorge. Estos tres ríos transportan a través de sus cuencas, metales y otros contaminantes productos de la actividad minera y agrícola. Los humedales de la Mojana son reservorio de una gran biodiversidad y prestan servicios ecosistémicos fundamentales (7)(Figura 1).

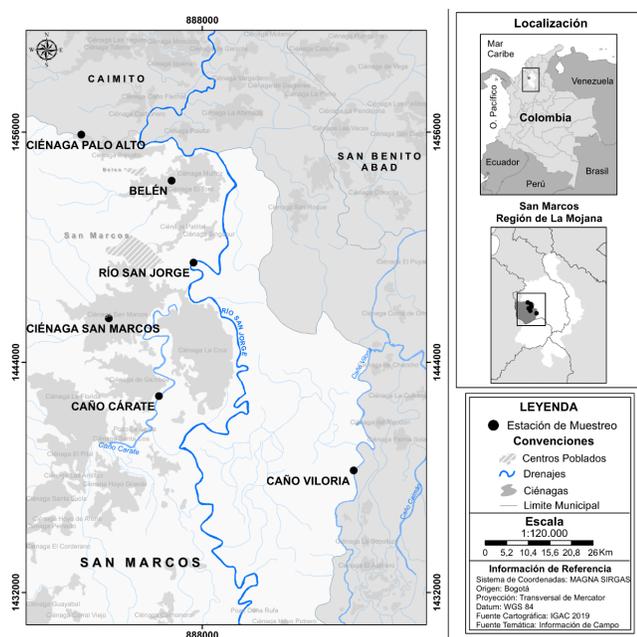


Figura 1. Mojana Sucreña. Puntos de muestreo 1. Ciénaga de Palo Alto 2. Ciénaga de Belén. 3. Río San Jorge 4. Ciénaga de San Marcos 5. Caño Carate. 6. Caño Viloria.

Colecta de muestras. Los muestreos se desarrollaron durante el mes de junio de 2017. Para determinar las especies ícticas de mayor consumo en el municipio, se aplicaron encuestas a los pobladores sobre sus hábitos de consumo y posteriormente se llevó a cabo la captura de las especies en los cuerpos de agua de la cabecera municipal y en la zona rural de San Marcos con la ayuda de pescadores de la zona ($n = 110$), 10 individuos por especie. Las especies de interés fijadas para este estudio fueron: *Pseudoplatystoma magdaleniatum*, *Plagioscion surinamensis*, *Hoplias malabaricus*, *Sorubim cuspicaudus*, *Ageneiosus pardalis*, *Petenia kraussi*, *Leporinus muyscorum*, *Triportheus magdalenae*, *Prochilodus magdalenae*, *Pimelodus clarias* y *Curimata magdalenae*. Las capturas se realizaron con la ayuda de pescadores locales

en los hábitats de las especies estudiadas, utilizando sus instrumentos tradicionales de pesca. A los peces capturados se les extrajeron sus vísceras, empacándolos individualmente en bolsas plásticas etiquetadas, las cuales fueron transportadas en cadena de frío, hasta el laboratorio de Aguas, Química Aplicada y Ambiental de la Universidad de Córdoba. El Hg-T se cuantificó en muestras tomadas del músculo dorsal de los peces capturados. Las especies de peces estudiadas se identificaron utilizando las claves taxonómicas del Libro Rojo de Peces dulciacuícolas de Colombia (14).

Análisis de muestras. Usando espectrofotometría de absorción atómica con vapor frío (CVAAS) se cuantificaron los niveles de Hg-T en el músculo dorsal de los peces mediante un sistema de determinación de mercurio DMA-80 Milestone (15). Las muestras extraídas fueron digeridas utilizando una mezcla de $H_2SO_4 - HNO_3$ 2:1 v/v a una temperatura de $100^\circ C$ durante 3 horas, utilizando en el proceso 0,5 gr para el análisis de Hg-T. El límite de detección fue de $0.001 \mu g/g$, calculado como la media más tres veces la desviación estándar (SD). El control de calidad del método se hizo con material de referencia certificado para peces (IAEA-407; $0.222 \pm 0.6 \mu g/g$). El porcentaje de recuperación fue de $98.6 \pm 0.35\%$. Los resultados de Hg-T fueron expresados en $\mu g/g$.

Tratamiento estadístico. El tratamiento estadístico se realizó a partir del cálculo de las concentraciones medias (\pm la desviación estándar) de Hg-T en el músculo de cada especie estudiada. De esta forma, mediante el test de Kolmogorov-Smirnov se verificó la normalidad de la distribución de los niveles de Hg-T. Posteriormente, se evaluó la homogeneidad de las varianzas muestrales mediante el Test de Bartlett y se realizó un ANOVA utilizando la prueba de Tukey para determinar si existían o no diferencias significativas en la distribución de Hg-T en el músculo de los peces estudiados, siempre usando un nivel de significancia del 95% ($p < 0.05$). El tratamiento de los datos fue desarrollado con los paquetes estadísticos Statgraphics centurión versión 15.2.06 e Infostat3.

RESULTADOS

Los valores medios de Hg-T en las 11 especies estudiadas se registran en la Tabla 1. En este sentido, *Pseudoplatystoma magdaleniatum* presentó los mayores niveles medios de

Hg en el tejido evaluado, mientras que *Curimata magdalanae*, presentó las menores concentraciones de Hg. En lo relativo al consumo de las especies estudiadas, la especie más consumida por la población objeto de estudio fue *Prochilodus magdalanae*, mientras que la especie menos consumida fue *Ageneiosus pardalis*. Respecto a los hábitos alimenticios de las especies estudiadas, las especies con hábitos carnívoros fueron las que más bioacumulaban Hg

($0.44 \pm 0.09 \mu\text{g/g}$) en tanto que las especies no carnívoras, presentaron concentraciones medias de este metal que fueron relativamente inferiores ($0.19 \pm 0.04 \mu\text{g/g}$).

En las Figuras 2, 3 y 4 se ilustran las diferencias de las distribuciones de los valores medios de Hg-T en los peces estudiados por especie, de acuerdo con sus hábitos alimenticios y niveles tróficos, respectivamente.

Tabla 1. Valores medios de Hg-T ($\mu\text{g/g}$) en los peces de mayor consumo en San Marcos con el nivel trófico, hábitos alimenticios, tipo de migración y consumo promedio semanal (g/sem).

Nombre común	Nombre científico	Nivel trófico	Hábitos alimenticios	Tipo de migración	Consumo promedio (g/sem ⁻¹)	Concentración media \pm SD ($\mu\text{g/g}^{-1}$)
Bagre pintado	<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>	CS	C-P	MM	97.92	0.44 ± 0.09
Pacora	<i>Plagioscion surinamensis</i>	CS	C-P	MM	49.85	0.42 ± 0.14
Moncholo	<i>Hoplias malabaricus</i>	CS	C-P	NM	101.39	0.39 ± 0.11
Bagre blanquillo	<i>Sorubim cuspicaudus</i>	CS	C-P	MM	131.81	0.37 ± 0.07
Doncella	<i>Ageneiosus pardalis</i>	CS	C-P	MC	14.32	0.35 ± 0.04
Mojarra Amarilla	<i>Petenia kraussii</i>	CS	C-P	NM	59.64	0.19 ± 0.04
Comelón	<i>Leporinus muyscorum</i>	CP	NC-O	MC	82.92	0.13 ± 0.01
Arenca	<i>Triportheus magdalanae</i>	CS	C-Z	NM	35.002	0.11 ± 0.01
Bocachico	<i>Prochilodus magdalanae</i>	CP	NC-D	MM	504.57	0.11 ± 0.01
Barbudo	<i>Pimelodus clarias</i>	CS	NC-O	MG	47.93	0.10 ± 0.02
Viejito	<i>Curimata magdalanae</i>	CP	NC-D	MC	78.43	0.07 ± 0.01

CS: Consumidor secundario. CP: Consumidor primario. C-P: Carnívoro piscívoro. C-Z: Carnívoro zooplanctófago. NC-O: No carnívoro omnívoro. NC-D: No carnívoro detritívoro. MC: migración corta. MM: Migración mediana MG: Migración grande. NM: No migratoria.

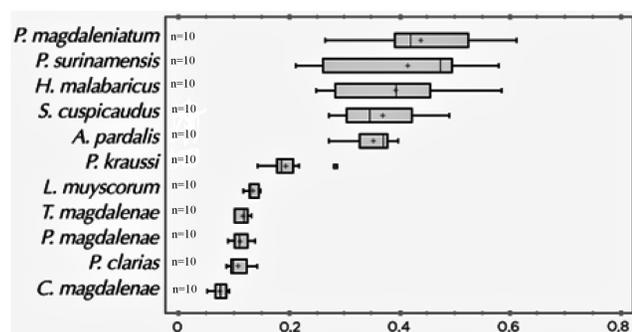


Figura 2. Distribución de los niveles medios de Hg-T ($\mu\text{g/g}$) en las especies icticas estudiadas.

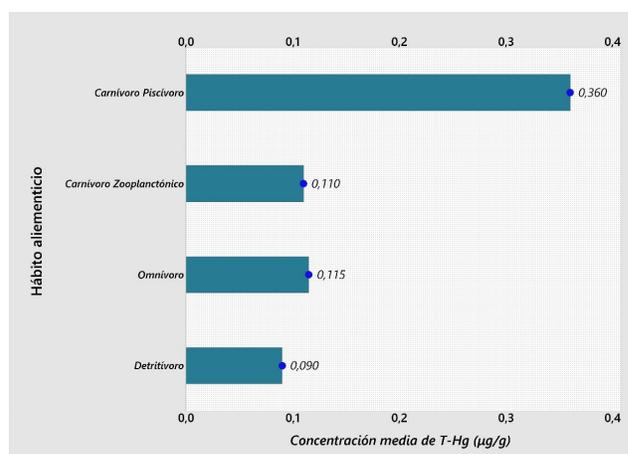


Figura 3. Variabilidad de las concentraciones medias de Hg-T ($\mu\text{g/g}$) de acuerdo con los hábitos alimenticios de las especies icticas consumidas en el municipio de San Marcos.

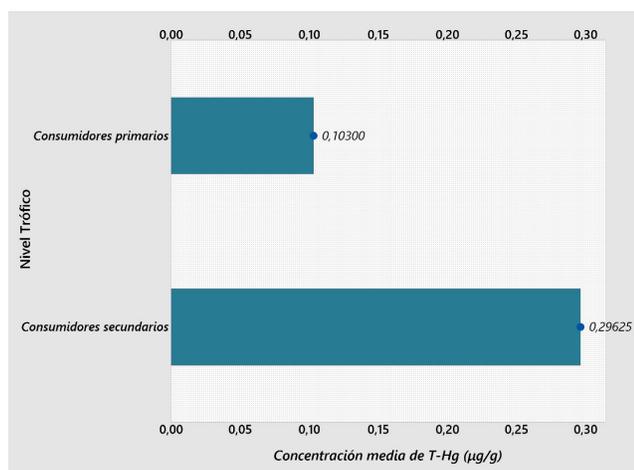


Figura 4. Variabilidad de las concentraciones medias de Hg-T (µg/g) de acuerdo con los niveles tróficos de las especies ícticas consumidas en el municipio de San Marcos.

DISCUSIÓN

Dentro de las especies ícticas estudiadas, *P. magdalenae*, *S. cuspidus* y *H. malabaricus*, son las de mayor consumo en la zona (12). *P. magdalenae* y *S. cuspidus* son endémicas de Colombia y de gran aceptación y valor comercial. *P. magdalenae*, es de pesca y consumo constante a lo largo del año (16), y desde hace unas décadas se ejerce una alta presión en dicha especie debido a su explotación excesiva, siendo actualmente la principal especie en la pesca artesanal del municipio (12). Por otro lado, *S. cuspidus* es un pez reofilico que recorre grandes distancias en cardúmenes, realizando anualmente dos migraciones, una reproductiva o subienda, y otra trófica o bajanza (17), dentro de su género es considerada la especie de mayor tamaño, llegando a alcanzar hasta 80 cm de longitud estándar, lo que la hace idónea para el consumo humano (18). Por su parte, *H. malabaricus* es un pez neotropical que tiene una amplia distribución geográfica, presente en casi todas las cuencas hidrográficas de América del Sur, exceptuando el área transandina de los ríos de la Patagonia (19), esta especie tiene la capacidad de adaptarse a distintos ecosistemas acuáticos, incluyendo los estuarinos, lo que la convierte en un valioso recurso de pesquería (20).

Los niveles más altos de Hg-T fueron cuantificados en las especies con hábitos carnívoros, lo que puede deberse a que se alimentan de peces más pequeños y a que estas especies ocupan eslabones altos en las redes tróficas de los cuerpos de agua que habitan (7), lo que propicia

que metales pesados como el mercurio se bioacumulen y biomagnifiquen de forma más eficiente y significativa (21,22). Por otra parte, los niveles más bajos de Hg-T se registraron en peces detritívoros presentando hábitos fitoplanctónicos indirectos, lo cual podría explicar la menor tasa de bioacumulación de mercurio en el músculo dorsal (23). Particularmente, especies como *L. muyscorum* presenta hábitos alimenticios omnívoros con tendencia herbívora (24). Por otra parte, *T. magdalenae*, posee un tipo de alimentación carnívora-zooplanctónica(25); por lo cual, es posible que la permanente interacción con los sedimentos, en los que generalmente se depositan y acumulan altas concentraciones de mercurio (26), sea la causa de la contaminación mercurial en esta importante especie, que es consumida por su gran abundancia, facilidad en la captura y bajo costo comercial (27).

Los análisis de varianza realizados demuestran una variabilidad significativa ($p < 0.05$) en las tasas de bioacumulación y distribución del mercurio en las especies estudiadas y sus diferentes nichos y hábitats. A partir de ello se muestra que los peces carnívoros acumulan mayores concentraciones de Hg, lo cual está en concordancia con lo reportado por Marrugo et al. (28), en un estudio realizado en el embalse de Urrá (Córdoba), en el que la especie carnívora *Hoplias malabaricus* presentó los mayores valores de mercurio ($1.39 \pm 0.69 \mu\text{g/g}$), en tanto que la especie no carnívora-detritívora *Curimata magdalenae*, al igual que en esta investigación, presentó las menores concentraciones de Hg ($0.15 \pm 0.02 \mu\text{g/g}$). En un estudio realizado en la ciénaga de Ayapel (13), los mayores valores de mercurio los presentó la especie carnívora *Pseudoplatystoma fasciatum* ($0.432 \pm 0.107 \mu\text{g/g}$), mientras que la especie no carnívora *P. magdalenae*, presentó la concentración más baja ($0.143 \pm 0.053 \mu\text{g/g}$). Otro estudio realizado en 11 municipios de la Mojana evaluó los niveles de mercurio y MeHg en las 10 especies ícticas más consumidas, determinando que los mayores valores de mercurio y MeHg se registraron en especies carnívoras, tales como *C. kraussii*, *S. cuspidus* y *A. pardalis* (12).

En este punto, se hace necesario entender los regímenes de movilidad y desplazamiento de las especies estudiadas para entender los procesos de acumulación, contaminación y toxicidad por mercurio en los ecosistemas acuáticos (29). Se catalogan como especies migratorias a *P. magdaleniatum*, *S. cuspidus* y *Plagioscion surinamensis*. Los hábitos reproductivos de

estas, las inducen a realizar recorridos en la búsqueda de lugares idóneos para llevar a cabo esta función vital (30). Se ha registrado que, en los sitios de procedencia de estas especies, existen lugares donde se presentan considerables concentraciones de Hg en diferentes matrices ambientales (7), particularmente en el caño Viloría, donde la contaminación es relativamente elevada (31). Por su parte, el segundo grupo, en el que se catalogan a *T. magdalenae* y *C. magdalenae*, como especies que realizan sus funciones vitales mayoritariamente en las ciénagas, poseen un menor régimen de movilidad relativo y en consecuencia menor probabilidad de presentar variaciones significativas en los procesos de contaminación con Hg (32).

Existen dos excepciones que se deben tener en cuenta, la primera corresponde a *P. clarias* y *P. magdalenae* que son especies migratorias, no obstante, los análisis arrojaron bajas concentraciones y variabilidad en los procesos de acumulación de Hg; y la segunda, corresponde a *H. malabaricus*, que es una especie no migratoria, pero que presentan alta concentración y variabilidad de Hg. Estos casos particulares pueden presentarse debido a que, además de la posición trófica y el régimen de movilidad de la especie, existen otros factores que determinan los procesos de bioacumulación y biomagnificación del Hg, tales como el tipo de tejido en el que se acumula, la especie, la edad, el sexo, el peso, la longitud, temperatura, actividad de la biomasa microbiana, salinidad, pH y potencial de oxidación - reducción de la masa de agua (33).

En lo que respecta a la toxicidad del Hg en las especies estudiadas, se han reportado una serie de efectos graves y agudos sobre la salud e integridad de los individuos contaminados (34,35). Dentro de los efectos adversos característicos de la intoxicación con Hg en peces, se encuentran alteraciones y disfunciones de tipo nervioso, motoras, comportamentales, reproductivas, hematológicas y metabólicas (36,37). En consecuencia, el consumo frecuente de peces contaminados con Hg genera alteraciones graves en la salud humana (12,38), dado que la gran mayoría del Hg que ingresa al cuerpo humano a través del consumo de especies icticas contaminadas, lo hace en forma de metilmercurio (MeHg) y dimetilmercurio (DMHg) (38), lo que

potencia y maximiza la capacidad toxicológica de este metal pesado en el organismo, ya que estas formas bioactivadas de Hg, poseen una elevada afinidad con el componente molecular y tisular del cuerpo humano, generando citotoxicidad y genotoxicidad (39), así como también, graves alteraciones neurológicas y hemáticas (40).

Aunque ninguna de las especies estudiadas presentó concentraciones medias de Hg por encima del valor máximo establecido por la OMS (0.5 µg/g), los hábitos de consumo de los pobladores encuestados del Municipio de San Marcos, representan un potencial riesgo a largo plazo, puesto que el Hg presenta una elevada toxicidad aun cuando es consumido en dosis bajas durante periodos de tiempo prolongados (41).

Se concluye que los peces de mayor consumo en San Marcos están contaminados con Hg, producto de la minería que se presenta aguas arriba, que descarga sus residuos en la Mojana. Esto, representa un riesgo para los ensambles de peces y los pobladores de la zona que se alimentan de ellos. Se recomiendan monitoreos constantes de los niveles de contaminación por Hg en la zona y políticas ambientales que eviten el desmedido vertimiento de metales pesados en esta región.

La alimentación con carne de pescado contaminada con mercurio es un riesgo para la salud pública de esta región, por lo cual es necesario educar a las poblaciones de la Mojana sobre el consumo de estos peces, a fin de proteger a mujeres en gestación, población infantil y adulta de los daños que puede causar el Hg.

Conflicto de interés

Ninguno de los autores presenta conflictos de interés.

Agradecimientos

Al Grupo de Química Aplicada y Ambiental del Agua de la Universidad de Córdoba, al Grupo de investigación Conservación del Recurso Hídrico y de Alimentos de la Universidad de Sucre y a la población de San Marcos, Sucre.

REFERENCIAS

1. Beckers F, Rinklebe J. Cycling of mercury in the environment: Sources, fate, and human health implications: A review. *Crit Rev Environ Sci Technol*. 2017; 47(9):693–794. <https://doi:10.1080/10643389.2017.1326277>
2. Niane B, Guédron S, Feder F, Legros S, Ngom PM, Moritz R. Impact of recent artisanal small-scale gold mining in Senegal: Mercury and methylmercury contamination of terrestrial and aquatic ecosystems. *Sci Total Environ*. 2019; 669:185–9. <https://doi:10.1016/j.scitotenv.2019.03.108>
3. Okpala COR, Sardo G, Vitale S, Bono G, Arukwe A. Hazardous properties and toxicological update of mercury: From fish food to human health safety perspective. *Crit Rev Food Sci Nutr*. 2018; 58(12):1986–2001. <https://doi:10.1080/10408398.2017.1291491>
4. P Li, Du B, Chan HM, Feng X. Human inorganic mercury exposure, renal effects and possible pathways in Wanshan mercury mining area, China. *Environ Res*. 2015; 140:198–204. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2015.03.033>
5. Lavoie RA, Jardine TD, Chumchal MM, Kidd KA, Campbell LM. Biomagnification of mercury in aquatic food webs: a worldwide meta-analysis. *Environ Sci Technol*. 2013; 47(23):13385–13394. <https://doi.org/10.1021/es403103t>
6. Pinedo-Hernández J, Marrugo-Negrete J, Díez S. Speciation and bioavailability of mercury in sediments impacted by gold mining in Colombia. *Chemosphere*. 2015; 119:1289–1295. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.09.044>
7. Marrugo Negrete J, Pinedo-Hernández J, Paternina-Uribe R, Quiroz-Aguas L, Pacheco-Florez S. Distribución espacial y evaluación de la contaminación ambiental por mercurio en la región de la Mojana, Colombia. *Rev MVZ Córdoba*. 2018; 23(S):7062–7075. <https://doi.org/10.21897/rmvz.1481>
8. Buelvas-Soto J, Marrugo-Madrid S, Marrugo-Negrete J. Bioacumulación de mercurio y plomo en el pato *Dendrocygna autumnalis* en la subregión de la Mojana, Colombia. *Rev MVZ Córdoba*. 2022; 27(1):e2337. <https://doi.org/10.21897/rmvz.2337>
9. Isaacs Cubides P. Rehabilitación del ecosistema de humedal en la región de la Mojana para mitigar efecto de las inundaciones. Colombia: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt; 2020. <http://repository.humboldt.org.co/handle/20.500.11761/35508>
10. Evenson GR, Golden HE, Lane CR, McLaughlin DL, D'Amico E. Depressional wetlands affect watershed hydrological, biogeochemical, and ecological functions. *Ecol Appl*. 2018; 28(4):953–966. <https://doi:10.1002/eap.1701>
11. Marrugo-Negrete J, Pinedo-Hernández J, Marrugo-Madrid S, Díez S. Assessment of trace element pollution and ecological risks in a river basin impacted by mining in Colombia. *Environ Sci Pollut Res Int*. 2021; 28(1):201–210. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10356-4>
12. Marrugo-Negrete J, Vargas-Licona S, Ruiz-Guzmán JA, Marrugo-Madrid S, Bravo AG, Díez S. Human health risk of methylmercury from fish consumption at the largest floodplain in Colombia. *Environ Res*. 2020; 182(109050):109050. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.109050>
13. Marrugo-Negrete J, Benítez LN, Olivero-Verbel J, Lans E, Vazquez Gutierrez F. Spatial and seasonal mercury distribution in the Ayapel Marsh, Mojana region, Colombia. *Int J Environ Health Res*. 2010; 20(6):451–459. <https://DOI:10.1080/09603123.2010.499451>
14. Mojica JI, Vélez JCC. Libro rojo de peces dulceacuícolas de Colombia. 1st ed. Bogotá: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt; 2012. <http://hdl.handle.net/20.500.11761/34197>
15. Sadiq M, Zaidi TH, Al-Mohana H. Sample

- weight and digestion temperature as critical factors in mercury determination in fish. *Bull Environ Contam Toxicol.* 1991; 47(3):335–341. <https://doi.org/10.1007/BF01702191>
16. Atencio G V, Kerguelén D E, Naar E, Petro R. Desempeño reproductivo del bocachico *Prochilodus magdalenae* inducido dos veces en un mismo año. *Rev MVZ Cordoba.* 2013; 18(1):3304–3310. <https://doi.org/10.21897/rmvz.192>
 17. Jiménez-Segura LFF, Palacio J, López R. Características biológicas del blanquillo *Sorubim cuspicaudus littmanni*; Burr y Nass, 2000 y Bagre rayado *Pseudoplatystoma magnaleniati* Buitrago-Suárez y Burr, 2007 (Siluriformes: Pimelodidae). *Actual Biol.* 2009; 31(90):1–14. <https://revistas.udea.edu.co/index.php/actbio/article/view/4729>
 18. Buendía Lara D, Argumedo Díaz J, Olaya-Nieto C, Segura-Guevara F, Brú-Cordero S, Tordecilla-Petro G. Biología reproductiva del blanquillo (*Sorubim cuspicaudus* Littmann et al., 2000) en la cuenca del Río Sinú, Colombia. *Rev MVZ Cordoba.* 2006; 11(S):71–78. <https://doi.org/10.21897/rmvz.1046>
 19. Ibagón N, Maldonado-Ocampo JA, Cioffi M de B, Dergam JA. Chromosomal diversity of *Hoplias malabaricus* (Characiformes, erythrinidae) along the Magdalena river (Colombia—northern south America) and its significance for the neotropical region. *Zebrafish.* 2020; 17(3):211–219. <https://doi.org/10.1089/zeb.2019.1827>
 20. Guimarães CBS, Pflanzler Junior SB, Pinheiro HP, Mendes TMF, Ueta MT. Centesimal composition and meat yield of *Hoplias malabaricus*: association with intestinal parasites. *Braz J Vet Parasitol.* 2021; 30(1):e021120. <https://doi.org/10.1590/S1984-29612021020>
 21. Salazar-Camacho C, Salas-Moreno M, Paternina-Urbe R, Marrugo-Negrete J, Díez S. Mercury species in fish from a tropical river highly impacted by gold mining at the Colombian Pacific region. *Chemosphere.* 2021; 264(Pt 2):128478. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128478>
 22. Azevedo-Silva CE, Almeida R, Carvalho DP, Ometto JPHB, de Camargo PB, Dorneles PR, et al. Mercury biomagnification and the trophic structure of the ichthyofauna from a remote lake in the Brazilian Amazon. *Environ Res.* 2016; 151:286–296. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.07.035>
 23. Mille T, Bisch A, Caill-Milly N, Cresson P, Deborde J, Gueux A, et al. Distribution of mercury species in different tissues and trophic levels of commonly consumed fish species from the south Bay of Biscay (France). *Mar Pollut Bull.* 2021; 166(112172):112172. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112172>
 24. Segura-Guevara F, López-Corrales H, Medrano De La Hoz C, Olaya-Nieto CW. Biología reproductiva de Liseta *Leporinus muyscorum* Steindachner, 1901 en el río Sinú, Colombia. *Rev MVZ Cordoba.* 2017; 22(1):5728–5737. <https://doi.org/10.21897/rmvz.932>
 25. Morales J, García-Alzate CA. Ecología trófica y rasgos ecomorfológicos de *Triportheus magdalenae* (Characiformes: Triportheidae) en el embalse El Guájaró, cuenca baja del río Magdalena, Colombia. *Rev Biol Trop.* 2018; 66(3):1208. <https://doi.org/10.15517/rbt.v66i3.30621>
 26. Paranjape AR, Hall BD. Recent advances in the study of mercury methylation in aquatic systems. *Facets (Ott).* 2017; 2(1):85–119. <https://doi.org/10.1139/facets-2016-0027>
 27. Valdelamar Villegas JC. Apuntes sobre la importancia ecológica, ambiental y social de la arenca *Triportheus magdalenae* (Steindachner, 1878). Un ejemplo de endemismo invisibilizado. *Intropica.* 2018; 13(2):152–165. <https://doi.org/10.21676/23897864.2628>
 28. Marrugo-Negrete J, Navarro-Frómata A, Ruiz-Guzmán J. Total mercury concentrations in fish from Urrá reservoir (Sinú river, Colombia). Six years of monitoring. *Rev MVZ Cordoba.* 2015; 20(3):4754–4765. <https://doi.org/10.21897/rmvz.45>
 29. Qian Y, Cheng C, Feng H, Hong Z, Zhu Q,

- Kolenčik M, et al. Assessment of metal mobility in sediment, commercial fish accumulation and impact on human health risk in a large shallow plateau lake in southwest of China. *Ecotoxicol Environ Saf*. 2020; 194(110346):110346. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110346>
30. López-Casas S, Jiménez-Segura LF, Agostinho AA, Pérez CM. Potamodromous migrations in the Magdalena River basin: bimodal reproductive patterns in neotropical rivers: Potamodromous migrations in the magdalena river basin. *J Fish Biol*. 2016; 89(1):157–171. <https://doi.org/10.1111/jfb.12941>
 31. Argumedeo G, Marcela P, Vergara C, Vidal JV, Marrugo-Negrete J. Evaluación de la concentración de mercurio en arroz (*Oryza sativa*) crudo y cocido procedente del municipio de San Marcos- Sucre y zona aurífera del municipio de Ayapel – Córdoba. *Rev Univ Ind Santander*. 2015; 47(2):169-177. <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistasaluduis/article/view/4826>
 32. Zapata L, Usma J. Guía de las especies Migratorias de la Biodiversidad en Colombia. Peces. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible / WWF-Colombia. Bogotá, D.C. Colombia; 2013. https://wwflac.awsassets.panda.org/downloads/migratoriaspeces_42_web_final.pdf
 33. Li H, Zheng D, Yang J, Wu C, Zhang S, Li H, et al. Salinity and redox conditions affect the methyl mercury formation in sediment of Suaeda heteroptera wetlands of Liaoning province, Northeast China. *Mar Pollut Bull*. 2019; 142:537–543. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.03.066>
 34. Monteiro DA, Taylor EW, Rantin FT, Kalinin AL. Impact of waterborne and trophic mercury exposures on cardiac function of two ecologically distinct Neotropical freshwater fish *Brycon amazonicus* and *Hoplias malabaricus*. *Comp Biochem Physiol C Toxicol Pharmacol*. 2017; 201:26–34. <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2017.09.004>
 35. Morcillo P, Angeles Esteban M, Cuesta A. Mercury and its toxic effects on fish. *AIMS Environ Sci*. 2017; 4(3):386–402. <https://doi.org/10.3934/environsci.2017.3.386>
 36. Sun Y, Li Y, Rao J, Liu Z, Chen Q. Effects of inorganic mercury exposure on histological structure, antioxidant status and immune response of immune organs in yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*): Mercury induces oxidative stress and immune response in immune organs. *J Appl Toxicol*. 2018; 38(6):843–54. <https://doi.org/10.1002/jat.3592>
 37. Pereira P, Korbass M, Pereira V, Cappello T, Maisano M, Canário J, et al. A multidimensional concept for mercury neuronal and sensory toxicity in fish - From toxicokinetics and biochemistry to morphometry and behavior. *Biochim Biophys Acta Gen Subj*. 2019; 1863(12):129298. <https://doi.org/10.1016/j.bbagen.2019.01.020>
 38. Olivero-Verbel J, Carranza-Lopez L, Caballero-Gallardo K, Ripoll-Arboleda A, Muñoz-Sosa D. Human exposure and risk assessment associated with mercury pollution in the Caqueta River, Colombian Amazon. *Environ Sci Pollut Res Int*. 2016; 23(20):20761–20771. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7255-3>
 39. Calao CR, Marrugo JL. Efectos genotóxicos en población humana asociados a metales pesados en la región de La Mojana, Colombia, 2013. *Biomedica*. 2015; 35(S2). <https://doi.org/10.7705/biomedica.v35i0.2392>
 40. Rice KM, Walker EM Jr, Wu M, Gillette C, Blough ER. Environmental mercury and its toxic effects. *J Prev Med Public Health*. 2014; 47(2):74–83. <https://doi.org/10.3961/jpmph.2014.47.2.74>
 41. Oliveira LF, Rodrigues LD, Cardillo GM, Nejm MB, Guimarães-Marques M, Reyes-Garcia SZ, et al. Deleterious effects of chronic mercury exposure on in vitro LTP, memory process, and oxidative stress. *Environ Sci Pollut Res Int*. 2020; 27(7):7559–7569. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06625-6>