

EL LEGADO DEL ARSÉNICO Y MERCURIO EN EL COMPLEJO CENAGOSO RAMSAR DE AYAPEL, (CÓRDOBA, COLOMBIA): APROXIMACIÓN A LA MACROCUCIENCA MAGDALENA-CAUCA

The legacy of arsenic and mercury in the Ramsar Ayapel wetland complex (Córdoba, Colombia): An approach to the Magdalena-Cauca macro-basin

Mary Luz PEDRAZA¹, Adriana Janneth ESPINOSA-RAMÍREZ²*

1. Escuela de Biología, Facultad de Ciencias, Maestría en Ciencias Biológicas. Grupo de Investigación Unidad de Ecología en Sistemas Acuáticos UDESA. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja. Colombia.

2. Escuela de Biología, Facultad de Ciencias, Grupo de Investigación Unidad de Ecología en Sistemas Acuáticos UDESA. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Tunja. Colombia.

* **For correspondence** adriana.espinosa@uptc.edu.co

Received: 12th July 2020. **Returned for revision:** 24th May 2021. **Accepted:** 16th June 2021.

Associate Editor: Jaime Cantera Kintz

Citation/ citar este artículo como: Pedraza, M.L., y Espinosa-Ramírez, A.J. (2022). El legado del arsénico y mercurio en el Complejo Cenagoso Ramsar de Ayapel, (Córdoba, Colombia): aproximación a la macrocuenca Magdalena-Cauca. Acta Biológica Colombiana; 27 (2):164 - 176. <https://doi.org/10.15446/abc.v27n2.89084>

RESUMEN

Colombia, país localizado al norte de Suramérica, afronta diferentes conflictos socioambientales y es uno de los más contaminados por mercurio en el mundo, situación que amenaza la riqueza natural y la biodiversidad del neotrópico, reconocida por sus altos niveles de endemismos. El complejo de humedales de Ayapel (Sitio Ramsar) ubicado al norte del país, reporta el desembarco del 23 % de la producción pesquera de la macrocuenca Magdalena-Cauca y a su vez sufre alta presión por minería de aluvión. Este trabajo evaluó la presencia de dos disruptores endocrinos, mercurio (Hg) y arsénico (As), en peces de consumo humano, agua y sedimentos, colectados en las ciénagas central de Ayapel, Escobillas y Paticos. En el sedimento y en el agua se registraron concentraciones de arsénico no reportadas previamente, y al ser un cancerígeno, es un hallazgo relevante ya que también puede estar presente en los cultivos de arroz, lo que aumenta el riesgo toxicológico para los pobladores de la región. Adicionalmente, el 96 % de los peces presentaron simultáneamente Hg y As con diferencias estadísticamente significativas entre las especies. El blanquillo (*Sorubim cuspicaudus*) fue el más contaminado por ambos polutantes y el bocachico (*Prochilodus magdalenae*) registró el nivel más alto de Hg en los últimos 15 años para la zona. Los niveles de Hg en la ictiofauna de la macrocuenca (1993-2020) alertan sobre los impactos no monitoreados en las redes tróficas y la urgencia de acciones intersectoriales para proteger la biodiversidad y la salud humana.

Palabras Clave: Bioacumulación, ecotoxicología, ictiofauna, minería, salud ambiental.

ABSTRACT

Located in the northern extreme of South America, Colombia is one of the most mercury contaminated countries in the world, a situation that threatens its natural wealth and highly endemic neotropical biodiversity and adds to its multiple environmental and social conflicts. Internationally designated as a Ramsar site, the Ayapel wetland complex registers the catching of 23 % of the fish production of the Magdalena-Cauca macro-basin, while at the same time is under intense alluvial mining pressure. Exposure to two endocrine disruptors [mercury (Hg) and arsenic (As)] was traced in fish for human consumption, water and sediments collected in the central marshes of Ayapel, Escobillas and Paticos. Previously unreported concentrations of arsenic were found in sediments and water. This is quite a relevant finding, since it is a carcinogen and because local rice crops are supplied by the water of the marsh system, which may increase toxicological risk for the people of the region. In addition, 96 % of the fish registered statistically significant contents of both Hg and As. The fish blanquillo (*Sorubim cuspicaudus*) was found to contain the highest levels of both pollutants, while the bocachico (*Prochilodus magdalenae*) registered the highest level of Hg in the last 15 years for the studied area. Framed in mercury variation in the macro-basin's ichthyofauna (1993-2020), a warning is issued about unmonitored impacts on food webs and the urgency of intersectoral actions to protect biodiversity and human health.

Keywords: Bioaccumulation, ecotoxicology, environmental health, ichthyofauna, mining.

INTRODUCCIÓN

El informe de la Plataforma Intergubernamental sobre biodiversidad y servicios ecosistémicos (*Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*, -IPBS) describe la biodiversidad como factor indispensable en el bienestar humano y el desarrollo sostenible. América Latina contribuye con la seguridad ecológica que requiere el planeta (IPBES, 2019) debido a la riqueza de ecosistemas y reservas hídricas que posee. Por tanto, la reducción en el uso, la remediación, la eliminación y la prevención de la circulación de sustancias tóxicas en las redes tróficas es inaplazable dada la importancia de mantener la integridad de la biodiversidad y además por los nexos estrechos entre el agua, la alimentación y la salud humana (IPBES, 2019). A nivel global la deforestación, el crecimiento de la frontera agrícola y ganadera, la erosión, la introducción de especies exóticas, la urbanización y la explotación minera se reconocen como factores humanos que amenazan a la biodiversidad (Jiménez-Segura et al., 2016), pero las afectaciones por contaminación química de metales, plaguicidas, hidrocarburos, medicamentos, y micro plásticos es incipiente.

Los disruptores endocrinos (DE) son compuestos exógenos presentes en el ambiente que interfieren y alteran la producción, liberación, transporte, metabolismo, unión o eliminación de las hormonas responsables de la homeostasis y la regulación del desarrollo en animales; además, pueden modificar procesos fisiológicos esenciales que inciden en el crecimiento, la respuesta al estrés y en consecuencia en la reproducción del organismo y sus poblaciones (Vos et al., 2000). El mercurio y el arsénico son declarados DE, con reconocido potencial de bioacumulación, a los que son susceptibles los humanos, en especial los niños y adolescentes (Zhu et al., 2000; Bergman et al., 2013; Sun et al., 2016) y otros animales incluidos los peces (Crump y Trudeau, 2009).

La actividad humana global incrementó las concentraciones atmosféricas totales de mercurio a un 450 % respecto del nivel natural, este aumento procedente de antiguas fuentes que aún circulan en la biosfera se denomina el «legado del mercurio», porque las emisiones de finales del siglo XIX contribuyen en su presencia actual, en comparación con las fuentes industriales del siglo XX. Por tal razón existe regulación y prohibición del uso del mercurio ya que es contaminante persistente, neurotóxico, bioacumulable, biomagnificable y de importancia para la salud ambiental (United Nations Environment Programme [UNEP], 2019).

América del Sur emite el 18 % del Hg del mundo ([UNEP], 2019), Colombia es el tercer país con mayores consumos, después de China y Tailandia, con importaciones legales de 101,3 Ton /año, con uso de hasta el 75 % en la explotación de oro (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM], 2015); plata y platino. 296 municipios y 19 departamentos colombianos (Ministerio

de Minas y Energía et al., 2016) explotaban oro para 2012 y el 81 % de estos estaba concentrado en la macrocuenca Magdalena-Cauca (Ministerio de Minas y Energía et al., 2016). El 86,7 % de las unidades de extracción eran informales, con uso de mercurio como amalgamante, lo que genera impactos ambientales severos a los ecosistemas acuáticos (IDEAM y Corporación Autónoma Regional del Río Grande de la Magdalena-Cormagdalena, 2001) y debido a la bioacumulación en peces, es uno de los mayores problemas de inocuidad alimentaria y de salud pública. El Estudio Nacional de Agua 2018 (IDEAM, 2019) reconoció el vertimiento de 183 toneladas de Hg al agua y a los suelos en 157 municipios en el 2016, es decir, en cerca de la mitad de aquellos dedicados a la actividad minera. Esta contaminación química impacta la macrocuenca Magdalena-Cauca, una de las más complejas desde el punto de vista ecosistémico, ya que alberga 22 de las 24 zonas de vida identificadas para Colombia (IDEAM y Cormagdalena, 2001) y se generaría exposición potencial para la biota acuática y terrestre que allí habita.

La presencia de arsénico en el agua subterránea, sedimentos, alimentos y pobladores se verificó en Latinoamérica en al menos 14 países (Bundschuh et al., 2012). En México, Chile, Brasil y Argentina se reconoce el hidroarsenicismo crónico regional endémico (Teixeira et al., 2020; Villamil, 2015). Sin embargo, el conocimiento en Colombia, de la circulación y bioacumulación de otros metales y metaloides como el arsénico, es reducido y solo se detectó en peces carnívoros en puntos de comercialización en Bogotá (López Barrera y Barragán, 2016). También, en aguas de la cuenca alta del río Suratá (Santander, Colombia) se demostró enriquecimiento, que alertan sobre el arsénico en agua superficial de zonas de influencia de minería de oro (Alonso et al., 2020).

Los humedales neotropicales son hábitats para el mantenimiento de la integridad funcional y la biodiversidad; el 27 % del área colombiana está cubierta por ellos (Ricaurte et al., 2019), aquellos ubicados en el norte del país son sitios estratégicos para la regulación de los caudales de los ríos Magdalena, Cauca y San Jorge, dada la alta heterogeneidad influenciada por el pulso hidro-sedimentológico estacional (Álvarez, 2010). Estos hábitats reciben la contaminación de la minería que se desarrolla en la cuenca, generalmente, sin monitoreo de sustancias tóxicas; aun así, son paso obligado para las aves migratorias e invernantes a lo largo de la ruta de movilidad entre el sur y el norte del continente americano, almacenan nutrientes, materia orgánica, y son zonas de reproducción y anidación de reptiles, anfibios, mamíferos, aves, peces y flora adaptada a las condiciones de inundación.

Este trabajo tiene como objetivos la evaluación multi-compartimiento (sedimento, agua y biota) de mercurio y arsénico, y determinar el riesgo de exposición por consumo humano, de dos especies ícticas endémicas, migratorias en la Cuenca Magdalena Cauca, con un grado de amenaza

vulnerable y de interés comercial: como lo son el blanquillo (*S.cuspicaudus*) (Littmann et al., 2000) y el bocachico (*P.magdalenae*) (Steindachner, 1879), en la Ciénaga de Ayapel. Este es un trabajo pionero que valida la hipótesis de la presencia multi-compartimiento de arsénico y mercurio en zonas mineras, y actualiza los registros de mercurio en la ictiofauna de la cuenca entre 1993 a 2020, con el fin de alertar sobre las amenazas por presencia de disruptores endocrinos en la biota y en los sistemas acuáticos de esta macrocuenca neotropical.

MATERIALES Y MÉTODOS

Análisis local-área de estudio

Este estudio se realizó al sur de la ecoregión de la Mojana, al sur-oriental del departamento de Córdoba (Colombia, Sur América), específicamente en el sistema cenagoso de Ayapel, que cuenta con una superficie aproximada de 145 km² y se reconoce como un sitio Ramsar. Las precipitaciones locales y el patrón hidrológico de los afluentes contribuyen con altas variaciones temporales en la profundidad y la superficie inundada del espejo de agua. El régimen de lluvias monomodal se presenta desde abril a noviembre, mientras la temporada seca inicia en diciembre y se extiende hasta marzo (Puerta et al., 2016).

Estaciones de muestreo

Se eligieron con base en el mapa de peligrosidad geoquímica por mercurio del sistema cenagoso, y lugares de interés para la pesca (Rúa et al., 2013), como el cuerpo principal de la ciénaga de Ayapel (8 °19 '48.06 "N -75 °6 '23.66 "W) y dos de sus ciénagas satélites: Paticos (8 °20 '45.99 "N-75 °8 '22.78 "W) y Escobillas (8 °17 '16.06 "N-75 °5 '16.98 "W). Estos lugares se visitaron en dos periodos hidroclimáticos (enero = época seca o aguas bajas y mayo = época de lluvia o aguas altas) de 2019, donde se recolectaron muestras de peces, agua y sedimentos con enfoque multicompartmento (Material Suplementario 1).

Presencia Hg y As

Peces: se realizó mediante un diseño no probabilístico intencional, de manera que el tejido muscular provino únicamente de individuos de blanquillo (*S.cuspicaudus*, n= 24) y de bocachico (*P.magdalenae*, n= 24) capturados en los sitios de interés, por parte de pescadores de la zona con métodos tradicionales (atarraya, chinchorro, empalizada elegidas según la época); la colecta incluyó todas las tallas que los pescadores y compradores destinan para consumo. Se registraron datos de longitud y peso y se extrajeron 200 g del músculo dorsal de cada individuo, transportados bajo refrigeración hasta el laboratorio para su análisis (Marrugo-Negrete et al., 2008).

Agua: en cada estación de muestreo *in situ* se tomaron datos de temperatura, oxígeno disuelto, pH y potencial de oxidoreducción con sonda multiparamétrica HANNA HI98196. En una botella Van Dorn se colectaron aguas en diferentes profundidades (superficial, 1 y 2 m), que luego fueron integradas en una sola muestra en recipientes, y en condiciones adecuadas se remitieron al laboratorio acreditado Chemilab S.A.S., para los análisis físicos y químicos de: alcalinidad, cloruros, DBO5, DQO, dureza, fósforo, nitratos, nitrógeno amoniacal, nitrógeno total, ortofosfatos, sólidos suspendidos totales, sulfatos y turbiedad (Datos no mostrados)

Sedimentos: se tomaron tres submuestras en cada punto mediante una draga Eckman para reducir el error asociado a la posible heterogeneidad de los metales, donde se tomó solo la parte central de cada una. Posteriormente, se integró y transportó en bolsas plásticas, previamente lavadas con ácido nítrico al 10 % y enjuagadas con agua destilada y desionizada según metodologías de Marrugo-Negrete et al. (2010). Para los análisis de materia orgánica, humedad, pH y carbono orgánico total (Datos no mostrados), las muestras fueron almacenadas en bolsas plásticas y transportadas bajo refrigeración hasta el laboratorio Chemilab S.A.S.

Las mediciones de mercurio y arsénico total en todas las matrices, se llevaron a cabo bajo los métodos estandarizados y validados en el Laboratorio de Toxicología y Contaminación Ambiental de la Universidad de Córdoba-Colombia (Marrugo-Negrete et al., 2010). Se incluyeron las técnicas y niveles de detección según la matriz evaluada (Material Suplementario 2).

VALORACIÓN DE LA EXPOSICIÓN HUMANA

Encuestas a la Comunidad

A las comunidades asociadas a los principales lugares de captura y desembarco (Las Escobillas y Centro urbano de Ayapel) se aplicaron encuestas, separados en dos grupos etarios (< 14 y > 14 años) (Gracia et al., 2010), con el fin de establecer el consumo de peces en la zona, se abordaron cuatro apartados: identificación, aspectos laborales, hábitos tóxicos y hábitos dietarios (fuentes de agua y alimento). La encuesta en mención fue avalada previamente por el comité de ética de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

Análisis de datos

Se analizaron las variables respuesta (mercurio y arsénico en cada una de las matrices: sedimento, agua y tejido muscular) mediante el software R, se verificó la normalidad y homocedasticidad de los datos mediante las pruebas de Shapiro Wilk y Bartlett respectivamente (Rúa et al., 2013). Luego de verificar estos supuestos, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) o Kruskal Wallis, con fin el de establecer relaciones entre los factores (época, especies y ciénaga) (Marrugo-Negrete et al., 2008; Gracia

et al., 2010). Adicionalmente, se realizaron modelos lineales para establecer correlaciones entre el peso, longitud y las concentraciones de metales, para cuya validación se corroboraron los supuestos de normalidad, homocedasticidad y autocorrelación, en los casos en los que estos no se cumplieran se realizó la prueba de Spearman (Carranza-Lopez et al., 2019).

Para el análisis de los sedimentos se calculó el índice de geo acumulación – I_{geo} y así evaluar la contaminación a través de la relación de la concentración determinada en la muestra y los valores de fondo (concentración geoquímica del metal), a través de la ecuación: $I_{geo} = \log_2 (X_c/1,5 X_B)$, donde X_c corresponde a la concentración del metal de la muestra analizada, 1,5 es un factor de corrección de efectos litogénicos y X_B es el valor de fondo para Hg= 0,05 mg/kg y para As= 2,1 mg/kg según Alonso et al. (2020)

Determinación del Riesgo de Exposición a Hg y As

Con base en la información de las concentraciones de Hg y As en la ictiofauna, junto con la información recopilada a través de las encuestas (peso, frecuencia de consumo de peces, y tamaño de la porción) se determinó el riesgo de exposición por consumo de las dos especies de peces, a través de la estimación de ingesta diaria de contaminante, el cálculo de los índices, HQ (*Hazard Quotient*) y el MPI (*Metal Pollution Index*). Para el cálculo del HQ, se usaron dosis de referencia oral para el As (0,3 µg/kg-d) y el Hg (0,1 µg/kg-d) tomadas de Agency for Toxic Substances and Disease Registry [ATSDR] (2007) y United States Environmental Protection Agency [USEPA] (2000), respectivamente. Los datos fueron transformados a valores teóricos de metil mercurio (MeHg = 90 % de HgT) y para el arsénico inorgánico equivalente al 2 % del As T. Las ecuaciones aplicadas (Material Suplementario 3) y el fundamento de las mismas siguen lo propuesto por la *Guidance for assessing chemical contaminant data for use in fish advisories* (USEPA, 2000) y (López-Barrera y Barragán-Gonzales, 2016; Carranza-Lopez et al., 2019; Pinzón-Bedoya et al., 2020).

Análisis Regional Exploratorio

Se revisó la información secundaria, para identificar lugares pertenecientes a la cuenca Magdalena – Cauca que reportaran mercurio en peces en el periodo 1993 -2020. Los datos se organizaron por valores promedio o valores medios del rango reportado, se conformó una base de datos con georreferenciación, para construir una capa cartográfica por departamento y mediante graficas se indicaron las concentraciones de acuerdo a seis rangos propuestos en relación a la distribución del total de los datos, (cada 0,5 mg/kg), siendo seguros aquellos en color verde (0,5 mg/kg) (ATSDR, 1999), y en escala ascendente de colores cálidos según mayor peligrosidad. Con el fin de identificar las áreas ambientales especiales potencialmente expuestas al Hg se

hizo superposición de capas como los sitios Ramsar, áreas importantes para la conservación de las aves (AICAS), humedales y áreas del Registro único de áreas protegidas (RUNAP), contenidas en la base del Sistema de Información Ambiental de Colombia-SIAC.

La búsqueda fue con las palabras clave: peces, contaminación, mercurio, metilmercurio, metales. Magdalena, Cauca. Se revisaron bases como Science Direct, Web of Science e información en revistas nacionales.

RESULTADOS

Bioacumulación de Hg y As

El Hg T en el tejido muscular de *S.cuspicaudus* ($0,8 \pm 0,4$ mg/kg) fue significativamente mayor al encontrado en *P. magdalena* ($0,19 \pm 0,09$ mg/kg), con un nivel de significancia de $p < 0,05$; pero al realizar la comparación para las dos épocas climáticas y los tres lugares de muestreo no se obtuvieron diferencias estadísticamente significativas, sin embargo, las mayores concentraciones se presentaron predominantemente durante la época de lluvias. En cuanto a las ciénagas pueden ordenarse de forma decreciente de acuerdo con el contenido de Hg T así: Escobillas > Ayapel central > Paticos (Material Suplementario 4).

Los valores de As T presentaron un comportamiento similar al observado para el Hg T, ya que *S.cuspicaudus* ($0,11 \pm 0,11$ mg/kg) demostró concentraciones mayores que *P.magdalena* ($0,08 \pm 0,12$ mg/kg) con un nivel de significancia de $p < 0,1$. En la comparación de las mediciones en las dos épocas climáticas no hubo diferencias significativas ni por lugares de muestreo, aun así, se observa cómo las mayores concentraciones de As se presentaron en especímenes provenientes de la ciénaga de Paticos, seguido por Escobillas y por último los de ciénaga de Ayapel central.

La relación del peso de los especímenes y la concentración de los contaminantes (Material Suplementario 7) se evaluó a través de la correlación de Spearman, encontrándose que existe una correlación positiva significativa ($p < 0,05$) entre el peso de los especímenes y la concentración de Hg T, con un $\rho = 0,70$. La correlación entre el peso de los especímenes y la concentración de As T no fue significativa (Tabla 1).

La longitud estándar promedio (LE) fue de 23,5 cm para *P. magdalena* y de 38,7 cm para *S. cuspicaudus* (Material Suplementario 5), lo cual demuestra la sobrepesca de estas especies, pues los peces capturados para consumo en la zona, no cumplen con la talla mínima legal requeridas de 25 cm y de 45 cm, respectivamente (Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca [AUNAP] Universidad del Magdalena [UniMagdalena], 2013). La correlación de Spearman fue estadísticamente significativa con un $p < 0,05$, entre la LE y la concentración de mercurio total con un $\rho = 0,755$. Los valores para las mediciones de Hg y As en tejido muscular (Tabla 1), junto con los promedios de peso y tallas.

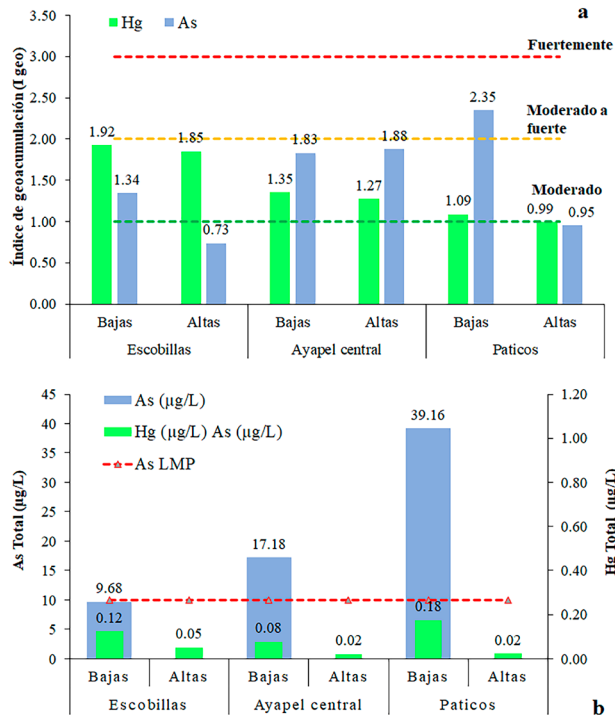


Figura 1. Variación temporal niveles de Hg T y As T en las ciénagas de interés. **a)** Niveles de contaminación en los sedimentos según categorías del índice de geo-acumulación. **b)** Contaminación en el agua. Línea roja máximo nivel permisible As en agua según OMS.

Mercurio y arsénico en aguas y sedimentos 2019

A partir del índice de contaminación *I_{geo}* se compararon los niveles basales de mercurio y arsénico en sedimentos y lo encontrado para las tres ciénagas del complejo de humedales de Ayapel. Los sedimentos presentan una contaminación moderada por mercurio, mientras que los niveles por arsénico oscilan en no contaminado para agua altas en Escobillas y Paticos, en aguas bajas-Escobillas y Ayapel una contaminación moderada, y en Paticos osciló entre moderada a fuertemente contaminada en agua bajas (Fig. 1a). Los valores de Hg y As en sedimentos se muestran en el Material Suplementario 6.

Las concentraciones de Hg T en las aguas de las ciénagas en ninguna temporada superaron los límites sugeridos por el Decreto 1594 de 1984 para uso pecuario (0,01 mg/L), o para el consumo humano o doméstico previo tratamiento (0,002 mg/L) (IDEAM, 2019). La concentración de As T en la época de aguas bajas en las ciénagas de Ayapel centro y Paticos (Fig. 1b), sobrepasó el límite permitido por OMS para agua potabilizada (10 µg/L), la ciénaga abastece el acueducto de Ayapel, por lo cual es necesario que los operadores busquen eliminarlo por el riesgo que representaría. Las variables físicas y químicas del agua no muestran mayores alteraciones comparadas con lo previamente conocido para el complejo cenagoso; el potencial de óxido-reducción estuvo entre 129,2 y 277 mV para el periodo de estudio, siendo ligeramente mayor en Escobillas en época de aguas altas; el pH fue circumneutral (6,9 unidades de pH).

Tabla 1. Mercurio y Arsénico en músculo de dos especies ícticas del complejo cenagoso de Ayapel 2019.

Especie	Ciénaga	Época hidrológica	Concentración (mg/kg) peso húmedo		Peso (g)	Longitud Estándar (cm)	
			Hg T	As T			
<i>P. magdalenae</i> *	Escobillas	bajas (n=4)	0,09-0,34	0,01-0,03	184-233	21,2-23,1	
		altas (n=4)	0,18- 0,40	0,05- 0,29	215-318	20-24,7	
	Ayapel	bajas (n=4)	0,09- 0,15	0,01 - 0,07	226-420	22,3-29	
		altas (n=4)	0,13- 0,4	0,002- 0,69	212-475	21,9-30,6	
	Paticos	bajas (n=4)	0,06- 0,15	0,07- 0,11	191-242	21,7-23,9	
		altas (n=4)	0,12-0,24	0,002- 0,55	244-444	22,8-27,4	
			Promedio	0,19	0,08	272,146	23,59
			DS	0,0097	0,12	85,85	2,53
			CV (%)	52	155	31,5	10,7
	<i>S. cuspidatus</i> *	Escobillas	bajas (n=4)	0,46-2,2	0,13-0,19	297-541	35,7-42,1
			altas (n=4)	0,6- 1,7	0,02-0,10	884-2115	44,6-56,4
		Ayapel	bajas (n=4)	0,4- 0,8	0,09 -0,15	517-981	40,3-52,1
altas (n=4)			0,4- 0,69	0,02- 0,07	345-722	34,3-41,9	
Paticos		bajas (n=4)	0,42- 0,58	0,008- 0,06	235-457	30,8-38,1	
		altas (n=4)	0,44- 1,14	0,02-0,4	338-693	24,4-30,3	
			Promedio	0,80	0,11	621,42	38,77
			DS	0,48	0,11	412,79	8,34
			CV (%)	60	95	66,4	21,5

*Existen diferencias significativas en las concentraciones de mercurio entre las dos especies ($p < 0.05$) en las dos épocas climáticas.

Tabla 2. Exposición a mercurio y arsénico por consumo de dos especies ícticas del complejo cenagoso de Ayapel 2019

	<i>P. magdalenae</i>				<i>S. cuspidatus</i>			
	≤14 años (n=33)		>14 años (n=176)		≤14 años (n=32)		>14 años (n=176)	
	Mujeres	Hombres	Mujeres	Hombres	Mujeres	Hombres	Mujeres	Hombres
Consumo semanal (porción promedio)	3	3	5	5	2	2	3	3
Porción (kg)	0,18	0,17	0,23	0,242	0,13	0,15	0,27	0,3
Ingesta Diaria MeHg (mg)	0,015	0,014	0,029	0,031	0,030	0,04	0,10	0,11
Ingesta Diaria MeHg (mg/kg)	0,0005	0,0004	0,0005	0,0004	0,001	0,001	0,0016	0,0016
Ingesta sugerida Hg (mg/kg-día) EPA/OMS*	0,0002*	0,0002*	0,0005	0,0005	0,0002*	0,0002*	0,0005	0,0005
HQ (MeHg)	10,18	8,29	6,15	5,82	29,23	31,30	31,27	30,84
HQ (2% AsT)	0,30	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03
MPI (Promedio Hg T y AsT)			0,12				0,3	
MPI (Máximos Hg T y AsT)			0,48				1,03	
MPI (MeHg y 2% AsT)			0,02				0,22	

Los valores en negrillas indican niveles inseguros para consumo humano. HQ (*Hazard Quotient*) > 1 indica que pueden ocurrir efectos sistémicos. MPI (*Metal Pollution Index*). Los datos fueron transformados a valores teóricos de Metil Hg (90 % de HgT) y para el arsénico inorgánico equivalente al 2 % del As T. Las ecuaciones aplicadas y el fundamento de estas siguen lo propuesto por (López y Barragán, 2016; Carranza et al., 2019; Pinzón et al., 2020).

Valoración de la Exposición humana

A partir de las encuestas a pobladores (n = 209) se conformaron dos grupos, uno de ≤ 14 años (n = 33) y el otro de > 14 años (n = 176), los promedios de edad fueron de 8,9 y 41,5 años, respectivamente. Las personas encuestadas pertenecen al casco urbano de Ayapel y la vereda Escobillas; las ocupaciones de los mayores de 14 años fueron: amas de casa (31,8 %), oficios varios (23,9 %), pesca (12,5 %), estudiante (8,5 %), técnicos y profesionales (7,9 %), comercio (7,9 %), mototaxismo (3,8 %), actividades agropecuarias (1,7 %) y construcción (1,7 %).

En la Tabla 2, se observa que *P. magdalenae* es la especie con mayores frecuencias de consumo con hasta cinco ocasiones semanales en promedio. El peso de las porciones declaradas para los niños fue de 178 g y para los adultos 233 g de bocachico, con ligeras diferencias para el blanquillo con 138 y 285 g, respectivamente; valores relativamente similares a la porción estándar para adultos (230 g) reportada por Carranza-López et al. (2019) y aplicados en trabajos de toxicología. La ingesta diaria, fue calculada con el MeHg para evitar sobreestimaciones (Instituto Nacional de Salud [INS] y Grupo de Evaluación de Riesgos en Inocuidad de Alimentos [ERIA], 2015), se encontró que para *P. magdalenae* está muy cercano o en el límite de ingesta segura de Hg sugerida por la EPA, y supera el límite sugerido para las poblaciones vulnerables (niños menores de 15 años y mujeres embarazadas) de 0,2 mg/kg de MeHg (Gracia et al., 2010). Para *S. cuspidatus*, la ingesta diaria de Hg para todos los grupos etarios, se encuentra por encima de la sugerida como segura (Tabla 2), mientras que para As, no reviste atención ya que las formas orgánicas como la arsenobetaína presente en los peces se considera

de baja toxicidad (World Health Organization [WHO] y International Agency for Research on Cancer [IARC], 2004).

Se resalta que los valores de HQ en todos los grupos etarios son superiores a uno (1), lo que indica que existe la posibilidad de que las poblaciones expuestas experimenten efectos sistémicos, en particular los menores de 14 años consumidores de ambas especies con los valores de HQ altos (Tabla 2). El metal index pollution (MPI) se calculó con los valores promedio y con ajustes a las fracciones tóxicas de los metales para estimar con menor incertidumbre el nivel de contaminación que tienen las especies evaluadas, siendo para *S. cuspidatus* entre 2.1 a 11 veces mayores a los obtenidos en *P. magdalenae*.

Análisis Regional Exploratorio

En total se espacializaron 230 reportes de Hg en el periodo analizado (1993-2020) recopilados a partir de la revisión de artículos en revistas nacionales e internacionales, luego se organizaron de acuerdo a la fecha de colecta de los peces o fecha de publicación del estudio, se incluyeron los valores promedio que es lo que usualmente se reporta; lo que podría mostrar una subestimación de las concentraciones al no contar en todos los casos con el rango (Fig. 2). En la cuenca Magdalena-Cauca se registraron 47 especies de peces colectadas en 12 departamentos y 34 municipios, se evidencia que solo en el 14 % de los municipios potencialmente afectados cuentan con algún grado de seguimiento de la contaminación de la ictiofauna. El departamento de Bolívar obtuvo el mayor número de reportes (81), seguido por Sucre (38) y Montería (34). Aunque Antioquia es el departamento con más municipios mineros, tan solo cuenta con diez registros con las concentraciones más altas de Hg

de toda la cuenca, con rango de 3 a 3,5 mg/kg en *Leporinus muyscorum* (Steindachner, 1900). Este análisis advierte sobre la problemática que allí se concentra y el subregistro de la misma.

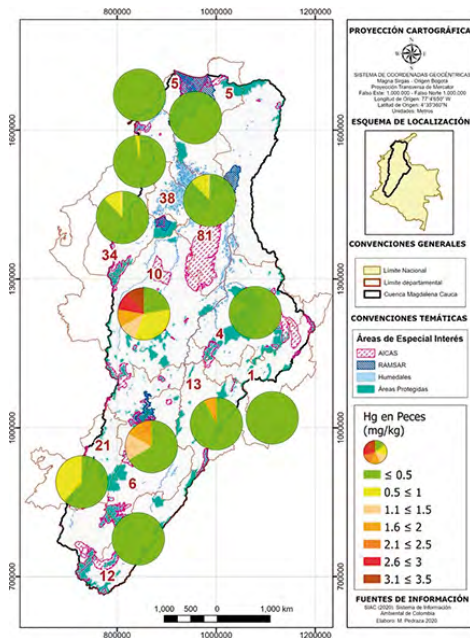


Figura 2. Niveles de mercurio en tejidos de peces de la cuenca Magdalena-Cauca (1993-2020). Registros espacializados por departamento y por concentración, color rojo se considera seguro, mientras los colores cálidos indican niveles ascendentes de peligrosidad. En negrita se incluyen el número de reportes con los cuales se construyó el gráfico de pastel.

En la zona alta de la cuenca, los registros del Valle (21) y Tolima (6) muestran como la contaminación por mercurio también toma valores relevantes por encima del límite recomendado para peces de consumo humano (0,5 mg/kg), siendo de gran interés para la salud pública, al considerar que 40 % de las especies para consumo de la macrocuenca tienen registro de mercurio en tejido muscular, esto indica que no se cuenta con diagnóstico de inocuidad alimentaria en el 60 % de las especies de interés pesquero y comercial de la cuenca. También se advierte el riesgo a nivel ecosistémico y de poblaciones de peces, al determinar que 19 % de las especies con registros de mercurio para la cuenca son migratorias, muchas de las cuales son migrantes medios como *P. magdalenae*, que pueden realizar recorridos de hasta 410 km en búsqueda de áreas de reproducción (Zapata y Usma, 2013).

Como resultado del análisis espacial se observa que en la macrocuenca Magdalena- Cauca, el 70 % de municipios del país con sus pobladores se abastecen de los sistemas acuáticos y posiblemente consumen la biodiversidad íctica. Esta zona alberga el 66 % de las áreas protegidas del RUNAP, el 64 % de las AICAS, el 50 % de los sitios Ramsar y 38 %

de los humedales, dando cuenta de la gran riqueza hídrica, ecosistémica y potencial de biodiversidad que podría estar posiblemente expuesta a la contaminación por mercurio.

DISCUSIÓN

La mayor parte de la literatura sobre sustancias tóxicas en el país se ha enfocado en los registros de contenido de HgT y/o MeHg en ictiofauna consumida dentro de la dieta humana (Mancera-Rodriguez y Álvarez-León, 2006; Marrugo-Negrete et al., 2008; INS y ERIA, 2015; Gutiérrez y Ruiz, 2020). Estos estudios mencionan que las especies carnívoras presentan los mayores niveles del metal como es el caso de *Sorubim cuspicaudus*, mientras que se reconoce a *P. magdalenae* como la especie con menores contenidos de Hg por su nivel trófico (ilíofago), lo cual es acorde con lo reportado en este estudio, lo que evidencia un proceso de biomagnificación en *S. cuspicaudus* asociado a su dieta.

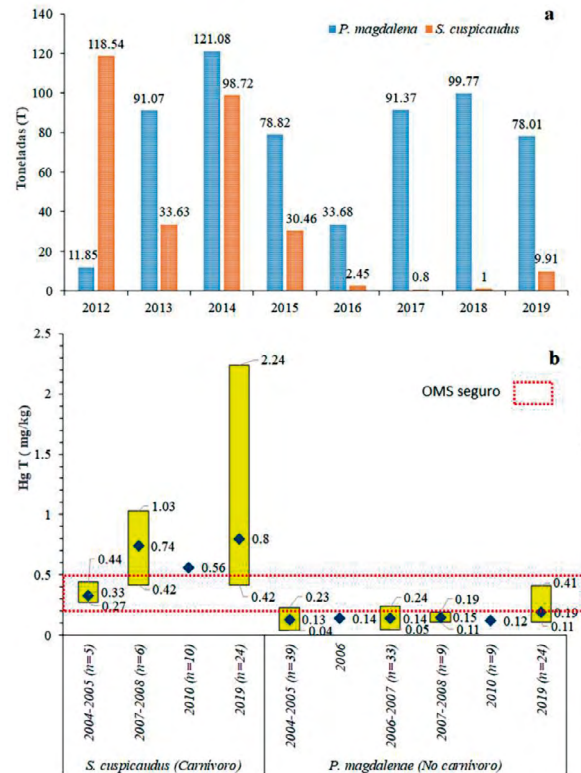


Fig 3. ICTIOFAUNA de interés *P. magdalenae* y *S. cuspicaudus* del Complejo Cenagoso de Ayapel 2019. a) Captura entre 2012-2019según sistema SEPEC de AUNAP. b) Variación histórica de Hg T en tejido muscular. Cajilla roja rango de niveles considerados seguro para mercurio por OMS para mujeres embarazadas (0,2 mg/kg) y niños y población en general(0,5 mg/kg).

El seguimiento histórico de los niveles de mercurio para las dos especies (2004 al 2019) en el complejo cenagoso (Marrugo-Negrete et al., 2008; Gracia et al., 2010; Marrugo-Negrete et al., 2010; Marrugo-Negrete et al., 2018) señala que el Hg ha aumentado de manera gradual (Fig. 3). En

este trabajo se registra el mayor nivel de Hg T (2,24 mg/kg) para la zona en 15 años en un blanquillo de 40,2 cm de LE; mientras en el bocachico se aprecia la misma tendencia con registros muy cercanos (0,41 mg/kg) a lo considerado seguro por OMS y muy por encima del límite para población vulnerable (0,2 mg/kg) (Fig. 3b); por lo tanto se sugiere considerar fuentes proteicas alternativas para evitar la exposición de mujeres embarazadas y niños al metilmercurio ya que se registra que cerca del 95 % del MeHg presente en los alimentos es absorbido por el tracto digestivo. De consumirse, las personas podrían mostrar efectos neurotóxicos debido a la capacidad de traspasar la barrera placentaria y hematoencefálica, acumulándose en el cerebelo y corteza cerebral, siendo el sistema nervioso central el más afectado. En el caso de niños y fetos expuestos, se observaron cuadros clínicos semejantes a la parálisis cerebral, caracterizados por microcefalia, discapacidad mental y trastornos motrices ocasionalmente asociados a ceguera o sordera; en los adultos los síntomas son inespecíficos, como malestar, visión borrosa, pérdida de audición, ataxia, alteraciones psicopatológicas y en ocasiones ha provocado estados de coma y la muerte (INS y ERIA, 2015).

Para el arsénico en ictiofauna no se cuenta con información para la zona, siendo este el primer reporte para especies de agua dulce con alta movilidad en la cuenca y con concentraciones similares a los hallados en la Ciénaga Grande de Santa Marta -CGSM, para peces estuarinos (Pinzón et al., 2020). Varios autores manifiestan el bajo interés toxicológico por la acumulación de arsénico en peces de agua dulce, ya que indican que bioacumulan formas orgánicas de As como la arsenobetaína, usualmente encontrada en tejidos musculares y fácilmente excretada por los humanos (WHO y IARC, 2004; Taylor et al., 2017). Sin embargo, al llegar al agua y al sedimento son susceptibles de ser transformada a las formas inorgánicas como el ácido trioxoarsenito H_3AsO_3 , y el arsenato las cuales si son carcinogénicas (WHO y IARC, 2004).

En este trabajo se encuentran concentraciones de As T en las dos especies y las dos épocas hidrológicas evaluadas, lo que indica la disponibilidad de arsénico y el riesgo toxicológico latente no identificado previamente, ya que en el mapa geoquímico del metaloide tampoco esta referenciado (Servicio Geológico Colombiano [SGC], 2016). La ciénaga de Paticos y las dos especies ícticas capturadas allí, contienen las mayores concentraciones de As T, lo cual contrasta con los resultados hallados para el caso del mercurio, cuyas mayores concentraciones se observaron en la ciénaga de Escobillas. El origen de este patrón se desconoce, pero podría estar asociado a las características particulares de los suelos y sedimentos de las cuencas que abastecen estos cuerpos lénticos, las cuales están expuestas a diferentes tensionantes que alteran el contenido de sustancias y contaminantes que transportan aguas abajo, otro factor a considerar es el vertimiento de las aguas residuales del casco urbano de Ayapel en la ciénaga de Paticos.

Los coeficientes de variación para las mediciones de mercurio y arsénico en este trabajo confirman una alta variabilidad, debido a la influencia de la geoquímica de la zona, el transporte desde áreas remotas (Obriest et al., 2018), la especiación en agua y en sedimentos, en la edad, en la talla, en la tasa metabólica y los hábitos alimentarios de cada especie íctica (INS y ERIA, 2015) (Tabla 1). Además, se considera la influencia de los patrones de movilidad de las especies migratorias en toda la cuenca y no solo en el complejo cenagoso, pues estarían expuestos a diferentes cargas contaminantes a lo largo de sus recorridos.

El HQ calculado para *S. cuspidatus* osciló entre 3 a 3,3 veces más de lo encontrado por Carranza-Lopez et al. (2019), así mismo en *P. magdalenae* varió entre 3,3 a 5,7 veces a lo hallado en el mayor complejo minero del sur del departamento de Bolívar en los municipios de Montecristo, Achí, Norosí, Santa Rosa del Sur, Arenal y Morales. Este cociente con valores superiores a uno advierte sobre posibles afectaciones a la salud humana por el consumo de peces contaminados con metales (Pinzón-Bedoya et al., 2020). En este trabajo los valores de ingesta calculados de MeHg sobrepasan y doblan las dosis sugeridas como seguras por la EPA, con tan solo ingestas de dos y tres veces por semana de *S. cuspidatus*. El consumo de *P. magdalenae*, se encuentra cerca a la dosis límite segura para adultos, con una frecuencia de cinco veces a la semana, que puede ser superada por su buena palatabilidad, ya que en épocas de subienda su consumo puede ascender hasta 11 veces por semana en promedio. De manera que la mayor vulnerabilidad por exposición en pobladores de Ayapel (Tabla 2) se determinó para aquellos que consumen *S. cuspidatus*, (Gracia et al., 2010) especie en la cual el Hg se ha duplicado en comparación con lo reportado para el 2004 por Marrugo-Negrete et al. (2008).

Al considerar la baja disponibilidad de tierras para la producción de alimentos que complementen los ingresos económicos y alimenticios de las comunidades pesqueras aumenta la demanda y dependencia de la diversidad íctica para suplir el autoconsumo, lo cual indicaría mayores exposiciones a agentes neurotóxicos como el mercurio. Los MPI's que se calculan ajustados a la fracción tóxica para las dos especies de interés indican que *S. cuspidatus* (0,22) presenta una contaminación por metales 13,8 veces mayor que *P. magdalenae*, siendo este valor relevante al considerar que el mayor MPI hallado en la Ciénaga Grande de Santa Marta-CGSM fue de 0,18 para una especie estuarina carnívora reportada por Pinzón-Bedoya et al. (2020). Lo anterior sumado a las prácticas de comercialización de estas especies, donde los ejemplares pequeños se destinan al autoconsumo de los pobladores de Ayapel, mientras que los ejemplares de mayores dimensiones se distribuyen a municipios de Antioquia, Bolívar y Sucre; demuestran que la exposición a estos contaminantes no tiene límites geográficos y la vigilancia de la inocuidad alimentaria no reconoce esta problemática con consecuencias interdepartamentales.

En el análisis del desembarco de estas dos especies comerciales entre 2012 y 2020 (Fig. 3a), disponible en el Sistema Estadístico Pesquero Colombiano -SEPEC del 2020, se aprecia una disminución gradual de captura de blanquillo (*S. cuspidatus*) siendo apenas en 2019 solo el 8 % de lo reportado en 2012, mientras que para el bocachico (*P. magdalena*) aumentó ocho veces más con promedios de 84,8 toneladas por año (Fig. 3a). Los pescadores también señalan la reducción considerable del volumen de pesca en el complejo cenagoso; estas observaciones pueden reflejar la posible afectación derivada de la exposición crónica a los DE como mercurio y arsénico, ya que los efectos adversos incluyen la reducción de la motilidad, afectación de la viabilidad de los espermatozoides, descenso en la producción de huevos, que en términos generales afectaría la reproducción y por ende el tamaño de sus poblaciones (Crump y Trudeau, 2009). Lo anterior, debe interpretarse a la luz de la Política Integral para el desarrollo de la pesca sostenible en Colombia, que advertía que para 2013 la captura desembarcada de la cuenca había disminuido en un 48% respecto a los desembarcos de 2004 (Programa de Pesca y Acuicultura [PPA], 2015).

Uno de los hallazgos más relevante en arsénico se observó en agua, puesto que las mediciones indican que en dos de las ciénagas evaluadas (Ayapel central y Paticos) del complejo cenagoso, durante la época de agua bajas, se superaron los niveles considerados seguros para agua de consumo humano, lo que configura un riesgo, aun cuando las concentraciones son menores a las reportadas por Alonso et al. (2020) en aguas con influencia minera del páramo de Santurbán, donde se encuentran valores entre 1,1 – 52,3 µg/L. Estos trabajos contribuyen en la recopilación de evidencias sobre el posible hidroarsenicismo en Colombia, ya que este metaloide se encuentra disponible geológicamente y puede ser movilizado a través de las explotaciones mineras del oro a las fuentes acuáticas de consumo humano.

La mayoría de los pobladores de la zona de estudio que conocen de la presencia del mercurio en el agua superficial perforan pozos o aljibes para aprovisionarse de agua subterránea, y debido a la cercanía del nivel freático a la superficie (Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y San Jorge [CVS] et al., 2007) la conectividad hídrica es posible, esto junto con el pH y potencial redox del agua registrado en las ciénagas evaluadas, permite inferir que buena parte del As T registrado se encuentra como ácido trioxoarsenito H_3AsO_3 , siendo esta una de las formas tóxicas del arsénico (Rangel et al., 2015).

La evaluación multicompartimiento aquí desarrollada, alerta sobre posibles riesgos de exposición al arsénico inorgánico en el agua y además advierte sobre la posible translocación al arroz, producto insigne del departamento de Córdoba y base principal de la dieta. Lo que toma relevancia al considerar que entre el 67 y 90 % de la ingesta

de arsénico en Brasil se dan por consumo de arroz (Batista et al., 2011) y frijoles (Teixeira et al., 2020), por lo que se propone como punto de atención en futuras investigaciones, ya que se reconoce la alta toxicidad del arsénico inorgánico para los humanos (Bergman et al., 2013; Rintala et al., 2014; Khan et al., 2020).

El *I geo* en sedimentos es utilizado para conocer la contaminación por actividad humana, en el caso del arsénico, este índice varió entre moderado para Escobillas en aguas bajas, hasta fuertemente contaminado en Paticos en la misma época, lo cual puede estar influenciado por variables como la reducción de la tabla de agua y aumento de la temperatura. Los valores de *I geo* hallados son comparables a los encontrados por Alonso et al. (2020), en la Quebrada Agua Blanca en la zona minera de Santurbán, se sugiere este sea un punto de partida para la evaluación de la presencia de este metaloide, sus efectos y manejo en poblaciones humanas y comunidades biológicas en el departamento de Córdoba.

Adicionalmente, los valores de *I geo* confirman el legado del mercurio en la zona, ya que los datos de Hg T en sedimentos señalan un nivel de contaminación moderado en todos los sitios de muestreo y en las dos épocas hidrológicas evaluadas. El conocimiento actualizado sobre la presencia y la química de Hg II, especialmente en la troposfera, sugiere una fuente de Hg global para los trópicos (Obriest et al., 2018), ya que las corrientes de aire lo transportan y está siendo depositado en las zonas tropicales, lo que haría mucho más preocupante la situación para los sistemas acuáticos y la salud de los pobladores que consumen productos hidrobiológicos.

Por último, en el análisis regional de la macrocuenca Magdalena-Cauca se evidencia el riesgo potencial de contaminación por Hg en hábitats acuáticos, zonas ribereñas y planicies de inundación, lo que atenta contra la riqueza natural del país. La literatura actual sobre Hg en ictiofauna puede estar subrepresentada, teniendo en cuenta que en Antioquia el consumo de mercurio por minería en el 2014 fue de 129, 2 toneladas anuales, seguidos por Cauca con 16,8 t, Bolívar con 15,7 t y Córdoba con 1,9 t (Ministerio de Minas y Energía et al., 2016), de las cuales cerca del 75 % se destinó a la extracción de oro. Se considera además que existen elementos para configurar escenarios de riesgo compartido con el arsénico, puesto que en Colombia este metaloide se presenta típicamente en forma de arsenopirita asociada con minerales de oro (Alonso et al., 2014; 2020).

Así mismo, se requiere reconocer las influencias aditivas de las cargas regionales, producto de la movilización por corrientes de aire y de las cargas globales de Hg (Obriest et al., 2018), las cuales sumadas a la problemática local en Colombia, exigen un diagnóstico amplio sobre los efectos que el metilmercurio y el arsénico podría causar en la

biodiversidad en el corto y mediano plazo, no solo por efecto tóxicos sino también por la disrupción endocrina.

Mediante el análisis regional (Fig. 2), se registraron las especies con reporte de Hg en la cuenca Magdalena-Cauca, aquellas con niveles superiores al límite considerado seguro (0,5 mg/kg), corresponden al 36 %, mientras que ascendería al 46 % si se toma en cuenta el valor seguro (0,2 mg/kg) para niños y mujeres en gestación (Gracia et al., 2010); situación que requiere acciones e intervenciones desde la salud pública.

En el neotrópico se presenta una mayor diversificación de especies bióticas comparado con lo que se encuentra en los polos o en las zonas templadas, y se aumenta la complejidad estructural, por lo cual es necesario desarrollar una ecotoxicología tropical (da Silva y Soares, 2010) que en el caso del Hg señala patrones de biometilación diferenciales en estas latitudes, por la actividad de microbiota asociada a macrófitas enraizadas, lo que aumentaría el flujo de metilmercurio en las redes tróficas, hasta 30 veces más que en los sedimentos superficiales y en la interfase con la columna de agua, algo poco contemplado en trabajos de biogeoquímica. Se espera que nuevas investigaciones incluyan el papel de los microorganismos y del perifiton (Lázaro et al., 2019) en procesos de metilación-demetilación y biovolatilización (Mestrot et al., 2013) para ampliar el conocimiento sobre la biogeoquímica de metales y metaloides de interés en salud ambiental en zonas neotropicales y en especial en sitios de conservación.

CONCLUSIONES

La biomagnificación y bioacumulación de mercurio a lo largo de las redes tróficas acuáticas es un tema de interés prioritario para la salud ambiental debido al subregistro del mismo, ya que el principal interés se ha centrado en algunos peces de consumo humano, sin mayor cuestionamiento de las afectaciones sobre la estructura y función de las redes tróficas del trópico. Se requiere aumentar la investigación sobre la disrupción endocrina provocada en peces por agentes como el Hg y As y sus efectos a nivel poblacional. Los pobladores humanos de la zona tienen escenarios de exposición múltiple a Hg y As en sus formas más tóxicas: metilmercurio en peces y arsénico inorgánico en agua. La evaluación de multicompartimiento permite alertar sobre el posible riesgo en los cultivos de arroz de la región, debido a que el As inorgánico se transloca fácilmente desde suelos y sedimentos al grano, por lo tanto, se requiere aumentar los esfuerzos en vigilancia en salud pública sobre ese metaloide. Se visibilizan los conflictos entre los usos humanos del mercurio, la posible movilización del As por la minería del oro y el legado de los mismo sobre la biodiversidad, siendo necesario entender los flujos del Hg y As en los complejos de humedales del norte del país, pues numerosos

sistemas lóticos y lénticos, lugares de anidamiento, sitios Ramsar, áreas de protección, AICAS y su macrofauna asociada, pueden estar amenazados en la macrocuenca del Magdalena Cauca, investigación que debe adelantarse en trabajos futuros. A pesar de que Colombia se adhirió a la Convención de Minamata para proteger la salud humana y del ecosistema de los efectos adversos del mercurio y sus compuestos, y promulgó la Ley 1658 de 2013 que prohibía su uso en la minería de oro en 2018 y de la industria y otros procesos productivos para el 2023, con este estudio se evidencia la inoperancia de este y los retos que el legado de metales y metaloides supone para la conservación de biodiversidad y la seguridad alimentaria a nivel regional.

AGRADECIMIENTOS

Las autoras agradecen a la División de Investigaciones de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia por la financiación recibida con la Convocatoria 009 de 2018 para el desarrollo de la tesis de maestría en Ciencias Biológicas “Diagnóstico de contaminación por mercurio y arsénico en Bocachico (*Prochilodus magdalenae*) y Bagre rayado (*Pseudoplatystoma magdaleniatum*) en la ciénaga de Ayapel y el riesgo de exposición asociado a su consumo”. Así mismo, al grupo de investigación Unidad de Ecología en Sistemas Acuáticos-UDESA y a las comunidades de pescadores del complejo cenagoso que participaron y colaboraron con las encuestas aplicadas en este trabajo. Por último, se agradece a los revisores del presente artículo, quienes contribuyeron en el mejoramiento y enfoque del escrito, mediante sus comentarios y observaciones.

CONFLICTO DE INTERESES

Las autoras declaran que no tienen conflicto de intereses.

REFERENCIAS

- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). (01 de enero de 2007). Toxicological Profile for Arsenic. <https://wwwn.cdc.gov/TSP/ToxProfiles/ToxProfiles.aspx?id=22&tid=3>
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). (01 de enero de 1999). Toxicological Profile for Mercury. Regulations and Advisories. <https://www.atsdr.cdc.gov/ToxProfiles/tp46-c7.pdf>
- Alonso, D., Latorre, S., Castillo, E. y Brandão, P. (2014). Environmental occurrence of arsenic in Colombia: A review. *Environmental Pollution*, 186, 272-281. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.12.009>
- Alonso, D., Pérez, R., Okio, C. y Castillo, E. (2020). Assessment of mining activity on arsenic contamination in surface water and sediments in southwestern area of

- Santurbán paramo, Colombia. *Journal of Environmental Management*, 264, 1-10.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110478>
- Álvarez, J. (2010). Caracterización limnológica de las ciénagas de Arcial, El Porro y Cintura (río San Jorge) y Bañó, Charco Pescao y Pantano Bonito (río Sinú), departamento de Córdoba. En J. Rangel (Ed.). *Colombia Diversidad Biótica IX. Ciénagas de Córdoba: Biodiversidad, ecología y manejo ambiental* (pp. 509-558). Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia. <https://issuu.com/diversidadbiotica/docs/dbix22-limnologia>
- Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca (AUNAP) y Universidad del Magdalena-UniMagdalena. (2013). *Tallas mínimas de captura para el aprovechamiento sostenible de las principales especies de peces, crustáceos y moluscos comerciales de Colombia*. Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca (AUNAP) y Universidad del Magdalena-UniMagdalena. [http://sepec.aunap.gov.co/Archivos/Cartilla%20-%20TALLAS%20MINIMAS_Digital%20\(2\).pdf](http://sepec.aunap.gov.co/Archivos/Cartilla%20-%20TALLAS%20MINIMAS_Digital%20(2).pdf)
- Batista, B., Souza, J. M. O., DeSouza, S. S. y Barbosa, F. (2011). Speciation of arsenic in rice and estimation of daily intake of different arsenic species by Brazilians through rice consumption. *Journal of Hazardous Materials*, 191, (1-3), 342-348. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.04.087>
- Bergman, A., Heindel, J., Jobling, S., Kidd, K. y Zoeller, R. (Eds.). (2013). *State of the Science of Endocrine Disrupting Chemicals 2012. Summary for Decision-Makers*. United Nations Environment Programme and the World Health Organization. https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/78102/WHO_HSE_PHE_IHE_2013.1_eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Bundsuh, J., Litter, M., Parvez, F., Román-Ross, G., Nicolli, H., Jean, J., Liu, C., López, D., Armienta, M., Guilherme, L., Gomez, A., Cornejo, L., Cumbal, L. y Toujaguez, R. (2012). One century of arsenic exposure in Latin America: A review of history and occurrence from 14 countries. *Science of the Total Environment*, 429, 2-35. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.06.024>
- Carranza-Lopez, L., Caballero-Gallardo, K., Cervantes-Ceballos, L., Turizo-Tapia, A. y Olivero-Verbel, J. (2019). Multicompartment mercury Contamination in Major Gold Mining Districts at the Department of Bolivar, Colombia. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 76, 640-649. <https://doi.org/10.1007/s00244-019-00609-w>
- Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y San Jorge, Grupo de Investigación en Gestión y Modelación Ambiental y Universidad de Antioquia. (2007). *Plan de manejo ambiental del complejo de humedales de Ayapel*. <http://www.planesmojana.com/documentos/estudios/11.Plan%20de%20manejo%20ambiental%20del%20complejo%20de%20humedales%20de%20AYAPEL.pdf>
- Crump, K. y Trudeau V. (2009). Mercury-induced reproductive impairment in fish. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 28(5), 895-907. <https://doi.org/10.1897/08-151.1>
- Da Silva E. y Soares, A. M. V. M. (2010). Is there a distinct tropical ecotoxicology? *Integrated Environmental Assessment and Management*, 6(2), 313-314. <https://doi.org/10.1002/ieam.45>
- Gracia, L., Marrugo, J., y Alvis, E. (2010). Contaminación por mercurio en humanos y peces en el municipio de Ayapel, Córdoba, Colombia, 2009. *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*, 28(2), 118-124. <https://revistas.udea.edu.co/index.php/fnsp/article/view/1753>
- Gutiérrez, B. F. y Ruiz Agudelo, C. A. (2020). Fish as bioindicators: coal and mercury pollution in Colombia's ecosystems. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 27541-27562. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09159-4>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2015). *Estudio Nacional del Agua 2014*. IDEAM. http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023080/ENA_2014.pdf
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2019). *Estudio Nacional del Agua 2018*. IDEAM.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales y Corporación Autónoma Regional del Río Grande de la Magdalena-Cormagdalena. (2001). *Estudio Ambiental de la Cuenca Magdalena-Cauca y elementos para su ordenamiento territorial*. <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/000051/EstudioAmbientaCMagdalena-Cauca.pdf>
- Instituto Nacional de Salud y Grupo de Evaluación de Riesgos en Inocuidad de Alimentos. (2015). *Documentos de Evaluación de Riesgos en Inocuidad de Alimentos. Evaluación de Riesgo de Mercurio en Peces de Aguas Continentales en Colombia*. <https://www.ins.gov.co/Direcciones/Vigilancia/Publicaciones%20ERIA%20y%20Plaguicidas/ER%20MERCURIO%20EN%20PECES.pdf>
- Jiménez-Segura, L., Ortega, H., Chuctaya, J., Jiménez, P., Carvajal-Vallejos, F., Rivadeneira J., Mojica, J., Mesa, L., Sánchez-Duarte, P., Maldonado-Ocampo, J., Correa, V., Chocano, L., Velásquez, M., Hidalgo, M., Usma, J., Lasso, C., Anderson, E., Villa-Navarro, F. y Tognelli, M. (2016). Estado de conservación y distribución de los peces de agua dulce de los Andes Tropicales. En M. Tognelli, C. Lasso, C. Bota-Sierra, L. Jiménez-Segura y N. Cox. (Eds.). *Estado de conservación y distribución de la biodiversidad de agua dulce en los Andes tropicales* (pp. 23-56). Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y de los Recursos Naturales (UICN). <https://www.iucn.org/es/content/estado-de-conservacion-y-distribucion-de-la-biodiversidad-de-agua-dulce-en-los-andes-tropicales>

- Khan, K., Chakraborty, R., Bundschuh, J., Bhattacharya, P. y Parvez, F. (2020). Health effects of arsenic exposure in Latin America: An overview of the past eight years of research. *Science of the Total Environment*, 710, 136071. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136071>
- Lázaro, W. L., Díez, S., Bravo, A. G., da Silva, C. J., Ignacio, Á. R. A. y Guimaraes, J. R. D. (2019). Cyanobacteria as regulators of methylmercury production in periphyton. *Science of the Total Environment*, 668, 723-729. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.233>.
- López-Barrera, E. A. y Barragán-Gonzales, R. G. (2016). Metals and Metalloid in Eight Fish Species Consumed by Citizens of Bogotá D. C., Colombia, and Potential Risk to Humans. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 79(5), 232-243. <https://doi.org/10.1080/15287394.2016.1149130>
- Mancera-Rodríguez, N. y Álvarez-León, R. (2006). Estado del conocimiento de las concentraciones de mercurio y otros metales pesados en peces dulceacuícolas de Colombia. *Acta Biológica Colombiana*, 11(1), 3-23. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/actabiol/article/view/27140>
- Marrugo-Negrete, J., Benítez L. N., Olivero-Verbel, J., Lans, E. y Vázquez F. (2010). Spatial and seasonal mercury distribution in the Ayapel Marsh, Mojana region, Colombia. *International Journal of Environmental Health Research*, 20(6), 451-459. <https://doi.org/10.1080/09603123.2010.499451>
- Marrugo-Negrete, J., Ruiz-Guzmán, J. y Ruiz-Fernández, A. (2018). Biomagnification of Mercury in Fish from Two Gold Mining-Impacted Tropical Marshes in Northern Colombia. *Archive of Environmental Contamination and Toxicology*, 74(1), 121-130. <https://doi.org/10.1007/s00244-017-0459-9>
- Marrugo-Negrete J., Olivero Verbel, J., Lans Ceballos, E. y Benitez, L. N. (2008). Total mercury and methylmercury concentrations in fish from the Mojana region of Colombia. *Environmental Geochemistry and Health*, 30, 21-30. <https://doi.org/10.1007/s10653-007-9104-2>
- Mestrot, A., Planer-Friedrich, B. y Feldmann, J. (2013). Biovolatilisation: a poorly studied pathway of the arsenic biogeochemical cycle. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 15(9), 1639-1784. <https://doi.org/10.1039/c3em00105a>
- Ministerio de Minas y Energía, Agencia Nacional de Minería (ANM), Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), Servicio Geológico Colombiano (SGC) y Gobernación de Antioquia. (2016). Plan estratégico sectorial para la eliminación del uso del mercurio. La ruta hacia un beneficio sostenible del oro. [https://www.minenergia.gov.co/documents/10180/0/PES+Eliminaci%C3%B3n+Mercurio+\(1\).pdf/e2774fb2-e2a3-4229-8103-2183e5a71e18](https://www.minenergia.gov.co/documents/10180/0/PES+Eliminaci%C3%B3n+Mercurio+(1).pdf/e2774fb2-e2a3-4229-8103-2183e5a71e18)
- Obrist, D., Kirk, J., Zhang, L., Sunderland, E., Jiskra, M., y Selin, N. (2018). A review of global environmental mercury processes in response to human and natural perturbations: Changes of emissions, climate, and land use. *Ambio*, 47, 116-140. <https://doi.org/10.1007/s13280-017-1004-9>
- Pinzón-Bedoya, C. H., Pinzón-Bedoya, M. L., Pinedo-Hernández, J., Urango-Cárdenas, I. y Marrugo-Negrete, J. (2020). Assessment of Potential Health Risks Associated with the Intake of Heavy Metals in Fish Harvested from the Largest Estuary in Colombia. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(8), 2921. <https://doi.org/10.3390/ijerph17082921>
- Plataforma Intergubernamental Científico-normativa sobre Diversidad Biológica y Servicios de los Ecosistemas (2019). Proyecto de informe del Plenario de la Plataforma Intergubernamental Científico-normativa sobre Diversidad Biológica y Servicios de los Ecosistemas sobre la labor realizada en su séptimo período de sesiones Adición Resumen para los encargados de la formulación de políticas del informe de la evaluación mundial de la diversidad biológica y los servicios de los ecosistemas de la Plataforma Intergubernamental Científico-normativa sobre Diversidad Biológica y Servicios de los Ecosistemas. https://ipbes.net/sites/default/files/ipbes_7_10_add.1_es.pdf <https://doi.org/10.21789/22561498.1616>
- Programa de Pesca y Acuicultura (PPA). (2015). Política Integral Para El Desarrollo de La Pesca Sostenible En Colombia. <https://www.aunap.gov.co/2018/politica-integral-para-el-desarrollo-de-la-pesca-sostenible-en-colombia.pdf>
- Puerta, Y., Aguirre, N. y Vélez, F. (2016). Sistema cenagoso de Ayapel como posible sitio Ramsar en Colombia. *Gestión y Ambiente*, 19 (1), 110-122. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=169446378007>
- Rangel, E., Montañez, L., Luévanos, M. y Balagurusamy, N. (2015). Impacto del arsénico en el ambiente y su transformación por microorganismos. *Terra Latinoamericana*, 33, 103-118. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57339210001>
- Ricarte, L. F., Patiño, J. E., Restrepo Zambrano, D. F., Arias-G, J. C., Acevedo, O., Aponte, C., Medina, R., González, M., Rojas, S., Flórez, C., Estupinan-Suarez, L. M., Jaramillo, U., Santos, A. C., Lasso, C. A., Duque Nivia, A. A., Restrepo Calle, S., Vélez, J. I., Caballero, J., Duque, S. R., ... y Junk, W. (2019). A Classification System for Colombian Wetlands: an Essential Step Forward in Open Environmental Policy-Making. *Wetlands*, 39, 971-990. <https://doi.org/10.1007/s13157-019-01149-8>
- Rintala, E.-M., Ekholm, P., Koivisto, P., Peltonen, K. y Venäläinen, E. (2014). The intake of inorganic arsenic from long grain rice and rice-based baby food in Finland – Low safety margin warrants follow up. *Food Chemistry*, 150, 199-205. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.10.155>
- Rúa, A., Flórez, M. y Palacio, J. (2013). Variación espacial y temporal en los contenidos de mercurio, plomo, cromo y

- materia orgánica en sedimento del complejo de humedales de Ayapel, Córdoba, noroccidente colombiano. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 69, 244-255. <https://revistas.udea.edu.co/index.php/ingenieria/issue/view/1655>
- Servicio Geológico Colombiano (SGC) (2016). *Atlas Geoquímico de Colombia. Versión 2016*. https://srvags.sgc.gov.co/Archivos_Geoportal/Recursos_Minerales/UNIDOS_ATLAS/Atlas_Geoquimico_de_Colombia_Version_2016.pdf
- Sun, H. -S., Xiang, P., Luo, J., Hong, H., Lin, H., Li, H. -B. y Ma, L. Q. (2016). Mechanisms of arsenic disruption on gonadal, adrenal and thyroid endocrine systems in humans: A review. *Environment International*, 95, 61-68. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.07.020>
- Taylor, V., Goodale, B., Raab, A., Schwerdtle, T., Reimer, K., Conklin, S., Karagas, M. R. y Francesconi, K. A. (2017). Human exposure to organic arsenic species from seafood. *Science of the Total Environment*, 580, 266-282. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.113>
- Teixeira, M. C., Caldeira Santos, A., Silva Fernandes, C. y Chakmeng, J. (2020). Arsenic contamination assessment in Brazil – past, present and future concerns: A historical and critical review. *Science of the Total Environment*, 730, 138-217. <https://doi:10.1016/j.scitotenv.2020.138217>
- United States Environmental Protection Agency (USEPA). (2000). *Guidance for Assessing Chemical Contaminant Data for Use in Fish Advisories. Volume 2: Risk Assessment and Fish Consumption Limits*. Third Edition. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2018-11/documents/guidance-assess-chemical-contaminant-vol2-third-edition.pdf>
- UN Environment (UNEP), (1 de enero de 2019). Global Mercury Assessment 2018. UN Environment Programme, Chemicals and Health Branch Geneva, Switzerland. <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/27579>
- Villamil, E. (2015). Hidroarsenicismo crónico regional endémico en Argentina. *Acta Bioquímica Clínica Latinoamericana*, 49(1), 83-104. <https://www.redalyc.org/pdf/535/53541285009.pdf>
- Vos, J., Dybing, E., Greim, H., Ladefoged, O., Lambré, C., Tarazona, J., Brandt, I. y Vethaak, D. (2000). Health Effects of Endocrine-Disrupting Chemicals on Wildlife, with Special Reference to the European Situation. *Critical Reviews in Toxicology*, 30(1), 71-133. <https://doi.org/10.1080/10408440091159176>
- World Health Organization (WHO) y International Agency for Research on Cancer (IARC). (2004). IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risk to Humans. Volume 84. Some drinking-water disinfectants and contaminants, including arsenic. <https://publications.iarc.fr/Book-And-Report-Series/Iarc-Monographs-On-The-Identification-Of-Carcinogenic-Hazards-To-Humans/Some-Drinking-Water-Disinfectants-And-Contaminants-Including-Arsenic-2004>
- Zapata, L. y Usma, J. (Eds.). (2013). *Guía de las especies Migratorias de la Biodiversidad en Colombia. Volumen 2. Peces*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. https://awsassets.panda.org/downloads/migratoriaspeces_42_web_final.pdf
- Zhu, X., Kusaka, Y., Sato, K. y Zhang, Q. (2000). The Endocrine Disruptive Effects of Mercury. *Environmental Health and Preventive Medicine*, 4(4), 174-183. <https://doi/10.1007/BF02931255>