



**Metales pesados en músculo de caquetaia kraussii, sorubim
cuspicaudus, cyphocharax magdalenae y prochilodus magdalenae y
métodos de cocción: una mirada eco toxicológica en el norte de
Colombia**

Maira Discuviche

mdiscuviche@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-5875-9218>

Grupo de Investigación Conservación de Recursos Hídricos y Alimentos.
Universidad de Sucre, Sincelejo Colombia

Luty Gomezcaeres

Lutygo@hotmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-9409-4009>

Grupo de Investigación Simulación de Tecnología
para Procesos Industriales, Corporación Universitaria del Caribe (CECAR),
Sincelejo, Sucre- Colombia

Carlos Vergara

carlosvergara.ambiental@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-7166-861X>

Grupo de Investigación Conservación de Recursos Hídricos y Alimentos.
Universidad de Sucre, Sincelejo Colombia

Karen De Hoyos

karen.deHoyos@cecar.edu.co

<https://orcid.org/0000-0002-2865-2137>

Grupo de Investigación Simulación de Tecnología
para Procesos Industriales, Corporación Universitaria del Caribe (CECAR),
Sincelejo, Sucre- Colombia

RESUMEN

Se cuantificaron las concentraciones de Hg, Zn, Cd, Pb y Cu en el músculo de cuatro especies de pescado en función de los métodos de cocción; identificando riesgos potenciales a la salud de las poblaciones de La Mojana. Mediante amalgamación y espectroscopias de absorción atómica, de llama y en horno de grafito. Los metales más acumulados fueron Zn y Cu. La especie *Cyphocharax magdalenae* mostró las mayores concentraciones medias de Zn ($8,79 \pm 1,70 \mu\text{g/g-1}$), *Prochilodus magdalenae* acumuló más Cd ($0,067 \pm 0,082 \mu\text{g/g-1}$) y Pb ($0,621 \pm 0,577 \mu\text{g/g-1}$), *Caquetaia kraussii* y *Sorubim cuspicaudus* presentaron las mayores concentraciones medias de Hg ($0,388 \pm 0,519 \mu\text{g/g-1}$) y Cu ($5,55 \pm 5,49 \mu\text{g/g-1}$). Los métodos de cocción guisado y frito para Hg y Zn en *S. cuspicaudus*, *C. magdalenae* y *P. magdalenae* mostraron diferencias significativas en las concentraciones finales. El análisis multivariable de PCA y CA jerárquico en los métodos de cocción sugiere dos grandes agrupaciones en el comportamiento y patrones de acumulación de metales: Hg y subgrupos (Cd-Pb) - (Cu-Zn). Los índices HI para el conjunto de métodos de cocción y especies mostraron un alto riesgo para la salud de la población debido a la exposición a Hg, Cd, Zn, Pb y Cu, por consumo de las especies estudiadas.

palabras claves: peces neotropicales; salud pública; humedales; toxicología ambiental

Correspondencia: mdiscuviche@gmail.com.

Artículo recibido 25 noviembre 2022 Aceptado para publicación: 25 diciembre 2022

Conflictos de Interés: Ninguna que declarar

Todo el contenido de **Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar**, publicados en este sitio están disponibles bajo

Licencia [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) 

Cómo citar: Discuviche, M., Gomezaceres, L., Vergara, C., & De Hoyos, K. (2023). Metales pesados en músculo de caquetaia kraussii, sorubim cuspicaudus, cyphocharax magdalenae y prochilodus magdalenae y métodos de cocción: una mirada eco toxicológica en el norte de Colombia. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 6(6), 11349-11377. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i6.4204

Heavy metals in muscle of *caquetaia kraussii*, *sorubim cuspicaudus*, *cyphocharax magdalenae* and *prochilodus magdalenae* and cooking methods: an ecotoxicological insight at northern Colombia

ABSTRACT

The concentrations of Hg, Zn, Cd, Pb and Cu in the muscle of four fish species were quantified in function of the cooking methods; identifying potential health risks to the populations of La Mojana. Through amalgamation and atomic absorption spectroscopy, flame atomic absorption spectroscopy and graphite furnace atomic absorption spectroscopy. The most accumulated metals were Zn and Cu. The species *Cyphocharax magdalenae* showed the highest mean concentrations of Zn ($8.79 \pm 1.70 \mu\text{g/g-1}$), *Prochilodus magdalenae* accumulated more Cd ($0.067 \pm 0.082 \mu\text{g/g-1}$) and Pb ($0,621 \pm 0.577 \mu\text{g/g-1}$), *Caquetaia kraussii* and *Sorubim cuspicaudus* presented the highest mean concentrations of Hg ($0.388 \pm 0.519 \mu\text{g/g-1}$) and Cu ($5.55 \pm 5.49 \mu\text{g/g-1}$). The stewing and frying cooking methods for Hg and Zn in *S. cuspicaudus*, *C. magdalenae* and *P. magdalenae* exhibited significant differences in the final concentrations. Multivariate analysis of PCA and hierarchical CA in the cooking methods suggests two major groupings in the behavior and accumulation patterns of metals: Hg and (Cd-Pb)-(Cu-Zn) subgroups. The HI indices for overall cooking methods and species showed a high risk to the health of the population due to exposure to Hg, Cd, Zn, Pb and Cu, by consumption of the species studied.

Keywords: neotropical fishes; public health; wetlands; environmental toxicology

INTRODUCCIÓN

La contaminación con metales pesados en los ecosistemas acuáticos del neotrópico es un fenómeno que se encuentra altamente asociado a actividades antropogénicas que representan fuentes significativas de emisión hacia los sustratos ambientales (Paschoalini & Bazzoli, 2021). Así, la minería en general, las actividades agrícolas e industriales, la producción de energía y las descargas urbanas hacia los cuerpos de agua están entre las mayores fuentes de emisión reportadas (Ríos-Touma & Ramírez, 2019). Entre este grupo de elementos, el mercurio (Hg), el zinc (Zn), el cadmio (Cd), el plomo (Pb) y el cobre (Cu) ocupan un lugar primario en la escala de contaminación debido a su elevado uso y frecuencia de emisión, así como a su capacidad de distribución en los ecosistemas acuáticos (Mendoza-Carranza et al., 2016). En Colombia, la región fisiográfica de La Mojana se constituye como la mayor llanura aluvial del país, la cual está conformada por un vasto sistema de humedales interconectados que se nutren de los cauces de grandes ríos como el Cauca y el Magdalena, así como también del influjo de ríos menores como el Sinú y el San Jorge (Marrugo-Negrete et al., 2020). Este vasto complejo de ecosistemas acuáticos se compone de una alta diversidad de taxones adaptados eficientemente a las condiciones y variables particulares de sus macrohábitats y microhábitats (Linares-Arias et al., 2018a), estando entre los más numerosos en composición de vertebrados como: peces, aves, reptiles, anfibios y mamíferos, así como también macroinvertebrados acuáticos y artrópodos en general (Linares-Arias et al., 2018b); entre los que destacan especies ícticas de gran relevancia ecológica y alimenticia como *Caquetaia kraussii*, *Sorubim cuspicaudus*, *Cyphocharax magdalenae* y *Prochilodus magdalenae*, las cuales se constituyen como bioindicadores dada su elevada sensibilidad a la contaminación con metales pesados (de Paula-Gutiérrez & Ruiz-Agudelo, 2020). Así, elementos como el Hg y el Pb tienden a generar alteraciones en el sistema enzimático, hematológico, nervioso, generación de estrés oxidativo, cambios a nivel etológico, disminución en la respuesta inmune y la actitud reproductiva de los peces que contaminan (Javed & Usmani, 2014; Javed & Usmani, 2017), en tanto que el Cd, el Cu y el Zn generalmente originan desnaturalización de las cadenas peptídicas en proteínas estructurales y de transporte, peroxidación celular, graves alteraciones en el tejido branquial y la osmorregulación, así como apoptosis (Garai et al., 2021).

Por lo anterior, se hace necesario considerar aspectos fundamentales en las dinámicas de movilidad, distribución y especiación de estos contaminantes en las diversas matrices ecosistémicas en las que se diseminan (Sun et al., 2019), puntualmente en los ecosistemas acuáticos puesto que estos procesos determinan sus impactos en la diversidad y viabilidad de dichos hábitats (Ye et al., 2013), dado el potencial toxicológico y disruptivo que poseen los metales pesados sobre la biota de los ecosistemas acuáticos, especialmente en la ictiofauna. Generando a partir de esto desequilibrios y alteraciones en los organismos y sus ciclos de vida, en la composición y las dinámicas ecológicas de sus poblaciones y comunidades, y, por tanto, en el potencial biológico de estos ecosistemas (Intamat et al., 2016). Así, la contaminación con metales pesados como el Hg, Zn, Cd, Pb y Cu en los peces de La Mojana y sus compartimentos ambientales es un fenómeno que ha sido reportado y descrito en diferentes estudios (Marrugo-Negerete et al., 2017a; Marrugo-Negerete et al., 2019; Vargas-Licona & Marrugo-Negerete, 2019), el cual deriva de manera directa en afectaciones a la salud en la población humana de esta región, pues tiene el potencial para generar cuadros de toxicidad sistémica y alteraciones graves en los distintos sustratos metabólicos, genéticos y celulares del organismo (Calao & Marrugo-Negerete, 2015); debido a que el consumo de las especies estudiadas representa la mayor fuente de proteína animal para estas poblaciones (Vargas-Licona & Marrugo-Negerete, 2019). Así, a través del presente estudio, se evalúan las concentraciones de Hg, Zn, Cd, Pb y Cu en el músculo de *Caquetaia kraussii*, *Sorubim cuspicaudus*, *Cyphocharax magdalenae* y *Prochilodus magdalenae*, sus relaciones y sus variaciones en función de la posición trófica y los métodos de cocción implementados para su consumo; con el propósito de caracterizar riesgos potenciales a la salud de las poblaciones humanas de La Mojana.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

La región fisiográfica de La Mojana está constituida por un gran ensamblaje de ecosistemas acuáticos diversos en los que predominan los humedales, ocupando un área estimada de 500.000 hectáreas y una geolocalización comprendida entre las coordenadas 8°00' - 9°30' de latitud norte y 75°15' - 73°45' de longitud oeste en el cuadrante noroccidental de Colombia (Terán et al., 1998). De esta manera, la zona de estudio de la presente investigación se circunscribe a los municipios de Guaranda,

Majagual, Sucre, San Benito y San Marcos en el Departamento de Sucre (Figura 1). Estos municipios presentan en sus territorios una composición de numerosos cuerpos de agua, los cuales están originados y delimitados por la irrigación de los ríos Cauca, Magdalena, San Jorge y Sinú, cuyos cauces movilizan aguas abajo altas concentraciones de contaminantes producto de las actividades humanas de producción y explotación, como los metales pesados objeto de estudio (Hg, Zn, Cd, Pb y Cu) (Rúa-Cardona et al., 2013; Díaz et al., 2018). Sumado a lo anterior, en La Mojana se desarrollan actividades antropogénicas *in situ* (minerías y agrícolas principalmente) que representan fuentes significativas de emisión y distribución espacial de metales pesados en sus ecosistemas acuáticos (Marrugo-Negrete et al., 2019).

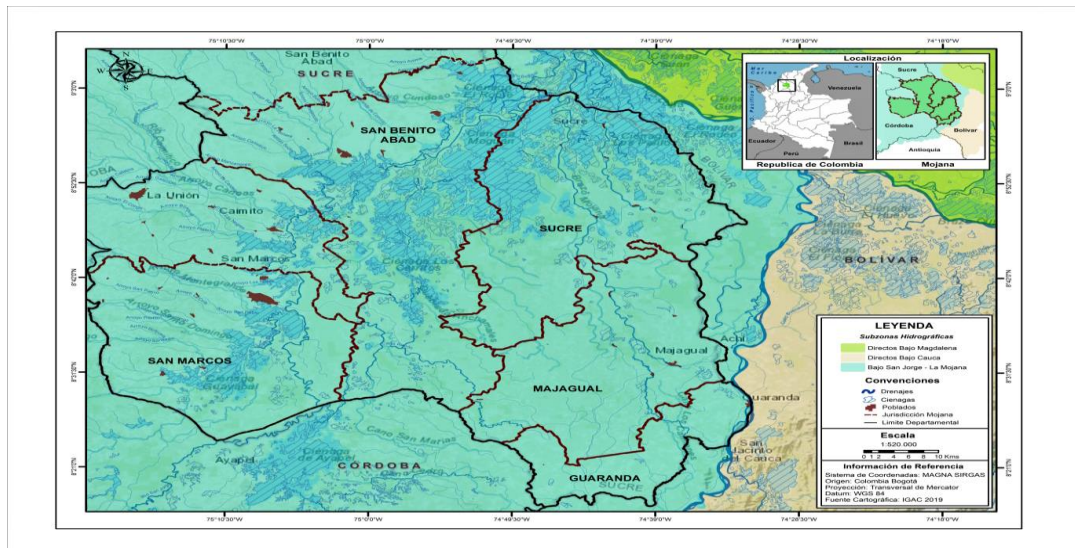


Figura 1. Geolocalización de los municipios de Guaranda, Majagual, Sucre, San Benito y San Marcos en La Mojana

Obtención y Tratamiento de las Muestras

Las especies ícticas estudiadas fueron seleccionadas por su gran abundancia en los ecosistemas acuáticos de La Mojana, por su importancia alimentaria y frecuencia de consumo en las poblaciones de esta zona, y por la diversidad en su composición trófica. Así, fueron adquiridos 20 especímenes de *Caquetaia kraussii*, 20 de *Sorubim cuspidatus*, 20 de *Cyphocharax magdalenae* y 20 de *Prochilodus magdalenae* para un total de 80 peces, en el centro de abastos del municipio de San Jorge en el mes de octubre año 2013. Así mismo, la identificación se realizó a partir de las descripciones en el libro de Peces Dulceacuícolas de Colombia del Instituto Humboldt (2012). Una vez identificados, los peces fueron empacados en bolsas individuales de polietileno y

refrigerados a -4°C hasta la realización del tratamiento con el Control (muestras de peces frescos) y los métodos de cocción estudiados, los cuales correspondieron al Guisado, la preparación en Viuda y al Freído de los mismos. Los métodos de cocción evaluados fueron desarrollados partiendo de las técnicas y las condiciones tradicionales de cocción de las especies evaluadas, por parte de los habitantes de La Mojana. En este sentido, los peces fueron descongelados durante 1 hora a temperatura ambiente (30°C) y posteriormente lavados con agua potable, y seccionados con un cuchillo plástico retirando las aletas, la cabeza, las escamas y las vísceras, conservando solo el tejido muscular y su porción del esqueleto. Se realizaron 5 repeticiones (1 individuo por repetición) para el Control y cada uno de los 3 métodos de cocción (Guisado, Viuda y Frito) en las cuatro especies objeto de estudio, resultando en total ($n=80$) observaciones. Las especies estudiadas se clasificaron en 3 niveles tróficos en función de sus hábitos alimenticios conocidos, siendo *Caquetaia kraussii* y *Sorubim cuspicaudus* de hábitos alimenticios carnívoros, en tanto que *Prochilodus magdalenae* presenta hábitos omnívoros (mayoritariamente detritívoros) y *Cyphocharax magdalenae* posee una alimentación hervívora (predominantemente compuesta de fitoplancton y detritos) (Gámez-Barrera et al., 2014; de Paula-Gutiérrez & Ruiz-Agudelo, 2020; Marrugo-Negrete et al., 2020

De esta forma en la realización de cada método de cocción evaluado, fueron recreadas las técnicas de preparación de Viuda, Guisado y de Freído descritas por Morales-Bedoya, (2010). De esta manera, el proceso de Freído se realizó añadiendo 5g de sal refinada (NaCl) a cada uno de los peces que posteriormente fueron cocidos en aceite vegetal a 160°C . Por su parte, la preparación del Guisado se realizó mediante la combinación de cada pescado con ají, cebolla, ajo, limón y 5g de sal refinada (NaCl) en agua hirviendo (100°C). Para la realización de la técnica de cocción en Viuda se agregaron 5g de sal refinada (NaCl) a cada pescado y luego se procedió a realizar su cocción en agua hirviendo (100°C). Los tres métodos de cocción fueron realizados para cada una de las repeticiones durante un tiempo estándar de 20 min. Posterior a los tratamientos, las muestras fueron enviadas al Laboratorio de Toxicología y Gestión Ambiental de la Universidad de Córdoba, para la cuantificación de las concentraciones de Hg, Zn, Cd, Pb y Cu en el tejido muscular.

Cuantificación de las concentraciones de Hg, Zn, Cd, Pb y Cu en el músculo de *Caquetaia kraussii*, *Sorubim cuspicaudus*, *Cyphocharax magdalenae* y *Prochilodus magdalenae*

La determinación de las concentraciones de Hg en el tejido muscular se realizó añadiendo 0,5g de muestra (de cada repetición) previamente liofilizadas y homogenizadas a un analizador directo de mercurio DMA-80 TRICELL de MILESTONE. De este modo, las concentraciones de este elemento fueron medidas mediante descomposición térmica, amalgamación y espectroscopia de absorción atómica – método EPA-7473. En lo referente al control de calidad de estas determinaciones, fue utilizado el material certificado DORM-4 del NIST en músculo de *Squalus acanthias* ($0,412 \pm 0,036 \mu\text{g/g}^{-1}$). El porcentaje de recuperación para Hg mediante los análisis de Hg fue de 99,2% (n=10), con una linealidad $R^2 > 0,995$ y un CV < 5%. Asimismo, los límites de detección y cuantificación correspondieron a $0,0015 \mu\text{g/g}^{-1}$ y $0,03 \mu\text{g/g}^{-1}$ respectivamente.

El Zn, Cd, Pb y Cu en el músculo de *Caquetaia kraussii*, *Sorubim cuspicaudus*, *Cyphocharax magdalenae* y *Prochilodus magdalenae* fueron tomados partiendo de la adición de 7g de cada muestra liofilizada, digerida en fase ácida y homogenizada a un horno MILESTONE-ETHOS ONE con ácido trioxonítrico V (HNO_3) y H_2O_2 en una relación (8:2) por 1h a 180°C . De esta manera, todas las cuantificaciones fueron llevadas a cabo en un espectrómetro de absorción atómica ICE-3500 THERMOSCIENTIFIC. Así, el Zn y el Cu se determinaron a través de espectroscopía de absorción atómica con llama (FLAAS) (método EPA-7000B); por su parte el Pb y el Cd en músculo se cuantificaron usando espectroscopía de absorción atómica en horno de grafito (GFAAS) (método EPA-7010). El material certificado de referencia empleado en las determinaciones correspondió al homogéneo de pez EA-407 del IAEA para la medición de elementos traza, siendo los valores de referencia para el Zn ($67,1 \pm 3,8 \mu\text{g/g}^{-1}$), para el Cd ($0,189 \pm 0,019 \mu\text{g/g}^{-1}$), para el Pb ($0,12 \pm 0,06 \mu\text{g/g}^{-1}$) y para el Cu ($3,28 \pm 0,40 \mu\text{g/g}^{-1}$). En lo concerniente al control de calidad, el porcentaje de recuperación medio de todas las determinaciones correspondió a 98,03% (n=10) presentando una linealidad $R^2 > 0,995$ y una precisión CV < 5%. En tanto que los límites de detección y cuantificación fueron para Zn ($0,0285 \mu\text{g/g}^{-1}$ y $0,112 \mu\text{g/g}^{-1}$), para Cd ($0,00275 \mu\text{g/g}^{-1}$ y $0,009 \mu\text{g/g}^{-1}$), para Pb ($0,00337 \mu\text{g/g}^{-1}$ y $0,009 \mu\text{g/g}^{-1}$) y para Cu ($0,00743 \mu\text{g/g}^{-1}$ y $0,014 \mu\text{g/g}^{-1}$).

Procesamiento Estadístico

La normalidad en las distribuciones de las concentraciones de Hg, Zn, Cd, Pb y Cu en el tejido muscular de *Caquetaia kraussii*, *Sorubim cuspicaudus*, *Cyphocharax magdalenae* y *Prochilodus magdalenae* a través de las observaciones de los tratamientos (Control, Guisado, Viuda y Frito) fue corroborada mediante la prueba de Kolmogorov-Smirnov con corrección de Lilliefors, a un nivel de significancia del 95%. Mediante la prueba homocedasticidad de Barlett se evaluó la dispersión entre las varianzas de cada grupo muestral. En este sentido la evaluación de correlaciones entre las concentraciones en músculo de Hg, Zn, Cd, Pb y Cu y los tratamientos (Control y Métodos de Cocción) se desarrolló mediante el coeficiente de correlación de Pearson con una significancia ($p < 0,05$). Mediante la prueba de Dunnett se examinó la existencia de diferencias significativas ($p < 0,05$) entre los tratamientos. Subsecuentemente, se evaluó la existencia de diferencias significativas ($p < 0,05$) entre las concentraciones de Hg, Zn, Cd, Pb y Cu en *Caquetaia kraussii*, *Sorubim cuspicaudus*, *Cyphocharax magdalenae* y *Prochilodus magdalenae* en función del nivel trófico, a través de las comparaciones múltiples de Kruskal-Wallis. Adicionalmente, se realizó un análisis multivariable de *clustering* jerárquico (CA), partiendo de la evaluación de componentes principales (PCA) en las observaciones de los métodos de cocción (Guisado, Viuda y Frito) para determinar asociaciones entre los patrones de concentración de Hg, Zn, Cd, Pb y Cu, los *clusters* se construyeron empleando el menor incremento en la sumatoria de cuadrados de las varianzas con el enlace de Ward y la similitud en los coeficientes de Pearson. Todos los análisis se desarrollaron usando los paquetes estadísticos SPSS 26 y MINITAB 20.

Estimaciones del Riesgo de la Salud Humana

La estimación de los riesgos potenciales a la salud humana, asociados a la exposición a Hg, Zn, Cd, Pb y Cu a través de la ingesta de carne de *Caquetaia kraussii*, *Sorubim cuspicaudus*, *Cyphocharax magdalenae* y *Prochilodus magdalenae* en los habitantes de La Mojana, se realizó a partir de la determinación de los coeficientes de peligro objetivo (THQ) para cada metal y los índices de riesgo objetivo (HI_{THQn}), tomando como referencia las ecuaciones fijadas por la USEPA (2010) y las modelaciones realizadas por Zhang et al., (2019) y Yu et al., (2020). Así como también los reportes realizados por Marrugo-Negrete et al., (2017b).

$$THQ = \frac{EF \times ED \times FIR \times C}{R_{fd} \times W_{AB} \times T_A} \times 10^{-3}$$

ED - Tiempo estimado de exposición poblacional (70 años). Basado en la expectativa de vida media humana

FIR - Ingesta media estimada diaria de las especies estudiadas en g/per cápita/día (57,58) conforme a la FAO (2013).

EF - Frecuencia de exposición (365 días/año)

C - Concentración de Hg, Cd, Zn, Pb y Cu en el músculo de las especies estudiadas ($\mu\text{g}/\text{g}^{-1}$)

R_{fd} - Dosis de referencia oral de cada metal en $\mu\text{g}/\text{g}^{-1}/\text{peso individual corporal kg}^{-1}\text{d}^{-1}$ (3×10^{-4} para Hg), (1×10^{-3} para Cd), (4×10^{-2} para Cu), (3×10^{-1} para Zn) y (4×10^{-3} para Pb); basados en las referencias *NOAEL* (sin efectos adversos observables) descritas por la USEPA/IRIS (2011)

W_{AB} - Peso medio de los consumidores (57 ± 16 kg), basado en 413.604 habitantes registrados por el DANE (2017) y una muestra de 839 habitantes caracterizada por Marrugo-Negrete et al., (2020)

T_A - Tiempo medio de exposición a los metales estudiados (365 días/año*ED)

A partir de lo anterior, se calculó el índice de riesgo objetivo (HI_{THQn}) para determinar los riesgos totales a la salud de los pobladores de La Mojana, producto de la exposición a Hg, Zn, Cd, Pb y Cu a través del consumo de las especies ícticas objeto de estudio. Valores en los coeficientes de los THQ y el HI superiores a 1 indican riesgos elevados y por tanto, impactos deleterios significativos sobre el organismo y la salud de las poblaciones humanas del área de estudio, así entre mayor sea el valor de los coeficientes mayores serán los impactos y la incidencia de los riesgos estimados (Fang et al., 2014).

$$HI = THQ_{Hg} + THQ_{Zn} + THQ_{Cd} + THQ_{Pb} + THQ_{Cu}$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las determinaciones de Hg, Zn, Cd, Pb y Cu en el músculo de *Caquetaia kraussii*, *Sorubim cuspicaudus*, *Cyphocharax magdalenae* y *Prochilodus magdalenae* muestran que las máximas concentraciones medias de estos metales se presentaron en las muestras sometidas al proceso de freído en *Sorubim cuspicaudus* (Hg), *Prochilodus*

magdalenae (Zn, Cd y Pb) y *Caquetaia kraussii* (Cu). En este sentido los límites máximos permisibles de las concentraciones de Hg, Zn, Cd, Pb en carne de consumo de las especies ícticas estudiadas (VR) fijados por la FAO (2013) y la Unión Europea (2017), muestran que en lo relativo a Hg y Cd *Sorubim cuspicaudus* sobrepasó estos umbrales en todos los tratamientos (control y métodos de cocción) evaluados, excepto en las muestras de control de Cd. Por su parte, *Prochilodus magdalenae* presentó concentraciones medias de Cd y Pb que superaron los límites máximos permisibles en la totalidad de los tratamientos. *Cyphocharax magdalenae* excedió los umbrales citados para Cd en las muestras preparadas con los métodos de guisado y viuda, así como también en todos los tratamientos realizados en las muestras de evaluación de Pb. No obstante, *Caquetaia kraussii* solamente sobrepasó los límites de seguridad alimentaria contrastados en las muestras de evaluación de Cd sometidas al proceso de freido. Tabla 1.

Tabla 1. Concentraciones medias ($\mu\text{g/g}^{-1}$) \pm SD de Hg, Zn, Cd, Pb y Cu en todos los tratamientos (T) y valores de referencia (VR) de la UE (2017) y la FAO (2013) para los límites máximos permisibles en carne de peces para el consumo humano (en negrilla las concentraciones por encima de los límites).

| T | <i>Cyphocharax magdalenae</i> | <i>Prochilodus magdalenae</i> | <i>Sorubim cuspicaudus</i> | <i>Caquetaia kraussii</i> | VR ($\mu\text{g/g}^{-1}$ ww) | n |
|------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|---|
| Hg-C | 0,01480 \pm 0,00425 | 0,02984 \pm 0,01820 | 0,628 \pm 0,680 | 0,1482 0,0280 | \pm | 5 |
| Hg-S | 0,03277 \pm 0,01509 | 0,0443 \pm 0,0239 | 0,866 \pm 0,826 | 0,2110 0,0342 | \pm | 5 |
| Hg-V | 0,01484 \pm 0,00447 | 0,03591 \pm 0,01905 | 0,882 \pm 0,959 | 0,1694 0,0360 | \pm | 5 |
| Hg-F | 0,04723 \pm 0,01910 | 0,08460 \pm 0,01048 | 1,277 \pm 1,393 | 0,2549 0,0411 | \pm | 5 |
| Zn-C | 8,794 \pm 1,703 | 4,613 \pm 1,622 | 3,790 \pm 0,740 | 4,54 \pm 2,96 | | 5 |
| Zn-S | 9,02 \pm 4,63 | 5,729 \pm 1,862 | 5,733 \pm 1,358 | 4,90 \pm 3,00 | 30 | 5 |
| Zn-V | 3,444 \pm 1,212 | 5,89 \pm 2,51 | 5,780 \pm 1,891 | 5,25 \pm 3,65 | | 5 |
| Zn-F | 13,10 \pm 7,15 | 15,47 \pm 7,08 | 8,33 \pm 2,84 | 7,95 \pm 5,41 | | 5 |
| Cd-C | 0,0429 \pm 0,0503 | 0,0675 \pm 0,0825 | 0,0394 \pm 0,0236 | 0,03257 0,01659 | \pm | 5 |
| Cd-S | 0,1226 \pm 0,1333 | 0,1129 \pm 0,1593 | 0,0585 \pm 0,0263 | 0,03806 0,01910 | \pm | 5 |
| Cd-V | 0,0624 \pm 0,0453 | 0,0778 \pm 0,0826 | 0,0531 \pm 0,0297 | 0,03659 0,01790 | \pm | 5 |
| Cd-F | 0,03327 \pm 0,01822 | 0,238 \pm 0,276 | 0,0821 \pm 0,0370 | 0,0561 0,0284 | \pm | 5 |
| Pb-C | 0,541 \pm 0,860 | 0,521 \pm 0,577 | 0,0753 \pm 0,0544 | 0,06763 0,01848 | \pm | 5 |
| Pb-S | 1,38 \pm 2,37 | 0,782 \pm 0,957 | 0,0777 \pm 0,0427 | 0,07922 | \pm | 5 |

| | | | | | | |
|--------------|----------------------|----------------------|--------------------|----------------------|----|-----------|
| | | | | 0,01018 | | |
| Pb-V | 0,555 ± 0,993 | 0,572 ± 0,579 | 0,04462 0,01987 | ± 0,07688 0,02017 | ± | 5 |
| Pb-F | 1,57 ± 2,75 | 1,869 ± 2,161 | 0,0901 ± 0,0357 | 0,09063 0,01633 | ± | 5 |
| Cu-C | 4,63 ± 4,01 | 4,70 ± 3,04 | 4,266 ± 1,823 | 6,84 ± 7,77 | | 5 |
| Cu-S | 2,50 ± 3,21 | 6,96 ± 5,20 | 6,84 ± 4,75 | 6,87 ± 7,72 | | 5 |
| Cu-V | 4,33 ± 3,23 | 5,36 ± 2,88 | 5,28 ± 2,39 | 7,84 ± 9,02 | 20 | 5 |
| Cu-F | 6,56 ± 3,27 | 9,49 ± 6,85 | 7,66 ± 3,71 | 12,32 ± 14,23 | | 5 |
| Total | | | | | | 80 |

Claves: C- Control; S-Guisado; V-Viuda; F-Frito

En lo respectivo a la distribución de las concentraciones de Hg, Zn, Cd, Pb y Cu en el tejido muscular de *Caquetaia kraussii*, *Sorubim cuspicaudus*, *Cyphocharax magdalenae* y *Prochilodus magdalenae* en función del nivel trófico (hábitos alimenticios) que ocupan, las máximas concentraciones medias de Hg y Cu fueron registradas en las especies con hábitos alimenticios carnívoros (*Caquetaia kraussii* y *Sorubim cuspicaudus*), en tanto que las concentraciones más elevadas de Cd y Pb se cuantificaron en el músculo de los individuos con hábitos omnívoros (*Prochilodus magdalenae*). Por otra parte, el Zn mostró sus mayores concentraciones medias en los individuos con hábitos alimenticios herbívoros (*Cyphocharax magdalenae*). Respecto a los límites máximos permisibles de las concentraciones de Hg, Zn, Cd, Pb en carne de consumo de las especies ícticas estudiadas (VR) fijados por la FAO (2013) y la Unión Europea (2017), los individuos con hábitos alimenticios de carácter herbívoro (*Cyphocharax magdalenae*) y omnívoro (*Prochilodus magdalenae*) excedieron los umbrales de seguridad alimentaria en sus concentraciones medias de Pb, y Cd y Pb respectivamente. Tablas 2 y 3. Lo anterior puede obedecer a los patrones de acumulación, ingesta, depuración, afinidad y absorción de estos metales en los niveles tróficos estudiados, teniendo elementos traza esenciales como el Zn una marcada tendencia a acumularse en altas concentraciones en la vegetación acuática y detritos de los cuales se alimentan mayoritariamente especies herbívoras como *Cyphocharax magdalenae* (Alamdard et al., 2016; Zhou et al., 2018). En tanto que el Cu y principalmente el Hg bioactivado, tienden a incrementar considerablemente sus concentraciones en peces que poseen hábitos alimenticios carnívoros como *Caquetaia kraussii* y *Sorubim cuspicaudus*, debido a una alta eficiencia de la transferencia trófica acumulativa y a los procesos de afinidad orgánica de ambos metales en el organismo de especies depredadoras (Qadir et al., 2011; Gutiérrez-Mosquera et al., 2020). Por su parte el Cd y el Pb al ser elementos traza que se

acumulan principalmente en la fase de sedimentos de la columna de agua y se depositan en los fondos de los ecosistemas acuáticos, son ingeridos y absorbidos en altas dosis por peces omnívoros con nichos alimenticios en el detritus como *Prochilodus magdalenae* (Tesser et al., 2021).

Los umbrales de toxicidad de Hg, Zn, Cd, Pb y Cu en peces señalan que para el Hg las especies carnívoras (*Caquetaia kraussii* y *Sorubim cuspicaudus*) exhibieron concentraciones medias de este metal que indican incidencia de manifestaciones toxicológicas significativas de acuerdo a lo descrito por Dillon et al., (2010). Asimismo, las concentraciones medias de Zn y Cu en todos los niveles tróficos evaluados muestran que existen riesgos elevados por procesos de toxicidad producto de la contaminación con estos elementos en *Caquetaia kraussii*, *Sorubim cuspicaudus*, *Cyphocharax magdalenae* y *Prochilodus magdalenae*, en función de las descripciones realizadas por Mebane et al., (2012) y Shuhaimi-Othman et al., (2013).

Tabla 2. Concentraciones medias ($\mu\text{g/g}^{-1}$) \pm SD y medianas de Hg, Zn, Cd, Pb y Cu en los niveles tróficos y valores de referencia (VR) de la UE (2017) y la FAO (2013) para los límites máximos permisibles en carne de peces para el consumo humano con umbrales de toxicidad en peces descritos por Dillon et al., (2010), Mebane et al., (2012) y Shuhaimi-Othman et al., (2013) (en negrilla las concentraciones por encima de los límites).

| Nivel Trófico | Concentraciones medias y medianas de Hg, Zn, Cd, Pb y Cu ($\mu\text{g/g}^{-1}$) \pm SD | | | | | | | | | | |
|-------------------|--|--------|------------------------------|--------|-------------------------------|--------|-------------------------------|--------|------------------------------|--------|-----------|
| | Hg | η | Zn | η | Cd | η | Pb | η | Cu | η | n |
| <i>Herbívoros</i> | 0,0148 \pm | 0,0 | 8,79 \pm | 7,9 | 0,042 \pm | 0,0 | 0,541 \pm | | 4,63 \pm | | |
| | 0,0042 | 14 | 1,70 | 8 | 0,050 | 11 | 0,860 | 0,21 | 4,01 | 3,47 | 5 |
| <i>Omnívoros</i> | 0,0298 \pm | 0,0 | 4,61 \pm | 4,5 | 0,067 \pm | 0,0 | 0,621 \pm | | 4,70 \pm | | |
| | 0,0182 | 25 | 1,62 | 2 | 0,082 | 33 | 0,577 | 0,2 | 3,04 | 5,22 | 5 |
| <i>Carnívoros</i> | 0,388 \pm | 0,1 | 4,16 \pm | 3,7 | 0,0360 \pm | 0,0 | 0,071 \pm | | 5,55 \pm | | |
| | 0,519 | 75 | 2,07 | 4 | 0,019 | 38 | 0,038 | 0,05 | 5,49 | 4,22 | 10 |
| Total | | | | | | | | | | | 20 |
| VR | 0,5 | | 30 | | 0,05 | | 0,3 | | 20 | | |
| Umbr toxic | 0,1 | | 2,5 | | 1,5 | | 4,9 | | 0,05 | | |

Los patrones de contaminación, movilidad, distribución, especiación y acumulación de Hg, Zn, Cd, Pb y Cu en los ecosistemas acuáticos de La Mojana y las especies ícticas asociadas a estos, generalmente están determinados por procesos de emisión de Hg

que comprenden las actividades mineras llevadas a cabo en las cuencas hidrográficas de los ríos que irrigan a esta planicie aluvial, así como también las actividades de agrarias en especial los grandes monocultivos implementados en el área de estudio, los cuales requieren para su manutención la aplicación constante de elevadas concentraciones de agroquímicos y fertilizantes, los cuales son ricos en metales como el Cu, el Pb, Zn y Cd. Generando lo anterior a través de los cambios estacionales, los procesos de movilidad y escorrentía de aguas y sedimentos a nivel aluvial, el transporte y la especiación y por tanto la fijación y acumulación estratificada de estos metales en los suelos y los ecosistemas acuáticos de La Mojana (Marrugo-Negrete et al, 2017b; Marrugo-Negrete et al, 2019), que ocupan *Caquetaia kraussii*, *Sorubim cuspicaudus*, *Cyphocharax magdalenae* y *Prochilodus magdalenae* (Linares-Arias et al., 2018a).

Así, estos procesos de contaminación con metales pesados como el Hg y sus formas bioactivas (MeHg, DMeHg) en peces tienden a causar efectos adversos sobre la fisiología de los individuos contaminados, provocando inactividad de sustratos reguladores de estrés oxidativo a nivel celular como las selenoproteínas y las enzimas del complejo glutatiónico (GSH) (peroxidasas, reductasas y transferasas) (Cappello et al., 2016). Y de esta forma el material genético y su expresión se ven significativamente alterados causando efectos deletéreos en ciclo celular y las matrices tisulares y orgánicas del individuo, sobre todo en el sistema nervioso, el reproductor y el hematológico (Authman et al., 2015). En tanto que el Zn y el Cu, tienden a generar alteraciones histológicas principalmente a nivel hepático y branquial, lo que desencadena una disminución significativa del conteo y calidad de las células del componente sanguíneo y daño orgánico (Ciji & Nandan, 2014), así como también una alta probabilidad de disrupción de la actividad catalizadora de enzimas claves en la sinapsis como la colinesterasa (Nunes et al., 2014). El Cd y el Pb tienden a producir anomalías en el sistema nervioso y en la capacidad de los axones disminuyendo el nivel y calidad de los impulsos nerviosos, así mismo producen una respuesta inmune debilitada (Lee et al., 2019) y cambios exacerbados en la histología de los epitelios branquiales y renales desnaturalizando el sistema el transporte iónico en el citoplasma y por consiguiente la regulación osmótica y electrolítica del individuo (Kondera et al., 2014; Clemow & Wilkie, 2015). Estos procesos de contaminación y toxicidad generados por el Hg, Zn, Cd, Pb y Cu en los individuos de *Caquetaia kraussii*, *Sorubim cuspicaudus*,

Cyphocharax magdalenae y *Prochilodus magdalenae* de los ecosistemas acuáticos de La Mojana, impactan de manera significativa sus poblaciones, puesto que se ha demostrado que los niveles de contaminación con metales pesados disminuyen la viabilidad adaptativa y reproductiva de las poblaciones, dando lugar a incrementos significativos en la fragilidad de estas poblaciones; como resultado de la pérdida de diversidad α y β en las composiciones de sus comunidades y por tanto en el entramado de nichos, micro y macro hábitats, y las relaciones intra e interespecíficas en los ecosistemas acuáticos contaminados (Winegardner et al., 2017; Luo et al., 2021). Estando lo anterior íntimamente ligado a la posición trófica y la ecología alimenticia de las especies en cuestión (Jiang et al., 2016). Tabla 3.

Tabla 3. Comparaciones múltiples de Kruskal-Wallis entre las concentraciones de Hg, Zn, Cd, Pb y Cu en los niveles tróficos de los peces estudiados (en negrilla las diferencias significativas $p < 0,05$)

| Nivel Trófico | Hg | Zn | Cd | Pb | Cu | n |
|---------------|--------------|--------------|-------|--------------|-------|----|
| Carnívoros | | | | | | 10 |
| Omnívoros | 0,001 | 0,011 | 0,832 | 0,041 | 0,984 | 5 |
| Herbívoros | | | | | | 5 |
| Total | | | | | | 20 |

La evaluación de las correlaciones entre las concentraciones de Hg, Zn, Cd, Pb y Cu en los controles y los métodos de cocción estudiados en *Caquetaia kraussii*, *Sorubim cuspicaudus*, *Cyphocharax magdalenae* y *Prochilodus magdalenae*, revela que el 88,3% de los tratamientos contrastados presentaron correlaciones estadísticamente significativas ($p < 0,05$) de carácter positivo; siendo los grados de asociación: Cu>Hg>Cd>Pb>Zn (Tabla 4). Lo anterior implica que las concentraciones base de Hg, Zn, Cd, Pb y Cu en las muestras de control podrían estar teniendo una alta incidencia en los procesos de distribución de las concentraciones finales de cada metal en el tejido muscular, una vez realizados los métodos de cocción en cuestión (guisado, viuda y frito). Lo anterior podría estar determinado por el hecho de que las especies ícticas tienden a acumular y por tanto a poseer dinámicas de concentración de metales pesados en función de variables endógenas como su naturaleza bioquímica, su metabolismo, los procesos de depuración, asimilación molecular y su composición

estructural (Islam et al., 2016), así como también por variables como el tamaño, la longitud, la edad, los hábitos alimenticios y factores exógenos como los niveles de contaminación y distribución de metales pesados como el Hg, Zn, Cd, Pb y Cu en el entramado de hábitats que conforman los ecosistemas acuáticos que esta biota ocupa (Farkas et al, 2003).

Tabla 4. Coeficientes de correlación de Pearson entre las concentraciones de Hg, Zn, Cd, Pb y Cu en los controles (C) y en los respectivos métodos de cocción estudiados (en negrilla las correlaciones significativas $p < 0,05$)

| Especie | Método de Cocción | Hg - HgC | Zn - ZnC | Cd - CdC | Pb - PbC | Cu - CuC |
|-------------------------------|-------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| <i>Cyphocharax magdalenae</i> | Guisado | 0,518 | 0,443 | 0,986 | 0,996 | 0,989 |
| | Viuda | 0,821 | 0,388 | 0,734 | 0,836 | 0,913 |
| | Frito | 0,951 | 0,725 | 0,156 | 0,989 | 0,64 |
| <i>Prochilodus magdalenae</i> | Guisado | 0,964 | 0,808 | 0,925 | 0,978 | 0,939 |
| | Viuda | 0,966 | 0,888 | 0,91 | 0,998 | 0,985 |
| | Frito | 0,934 | 0,444 | 0,887 | 0,935 | 0,57 |
| <i>Sorubim cuspicaudus</i> | Guisado | 0,994 | 0,329 | 0,926 | 0,983 | 0,86 |
| | Viuda | 0,91 | 0,925 | 0,859 | 0,966 | 0,988 |
| | Frito | 0,976 | 0,835 | 0,826 | 0,938 | 0,936 |
| <i>Caquetaia kraussii</i> | Guisado | 0,479 | 0,64 | 0,881 | -0,007 | 0,997 |
| | Viuda | 0,986 | 0,997 | 0,999 | 0,83 | 0,998 |
| | Frito | 0,901 | 0,875 | 0,979 | 0,91 | 0,909 |

En cuanto a las diferencias significativas ($p < 0,05$) encontradas entre la acumulación de los metales estudiados en las muestras de control y las concentraciones cuantificadas en los métodos de cocción objeto de estudio, se evidenciaron en total 6 diferencias en *Sorubim cuspicaudus*, *Cyphocharax magdalenae* y *Prochilodus magdalenae* (5 en las muestras sometidas al proceso de freído y 1 sometida al de guisado). Las diferencias halladas sugieren que la cocción (especialmente el proceso de freído) del músculo de estas especies da lugar a procesos que impactan en los patrones de acumulación y la eficiencia del tejido muscular y las matrices bioquímicas de los tratamientos en cuestión (guisado y frito) para fijar los metales con vías de afinidad metabólica, puntualmente el Hg (en sus formas metiladas) y el Zn (Atia et al., 2018). Así, los procesos de deshidratación, reducción y desnaturalización que experimentan las muestras de tejido

muscular de este tipo de alimentos en sus componentes esenciales como el complejo tropomiosina-actina, los ácidos grasos y la matriz ósea al ser cocidas, y, por tanto, al inducir cambios radicales en sus variables fisicoquímicas iniciales (pH, temperatura, humedad, salinidad, etc.) (Oliveri et al., 2014; Nong et al., 2021) podrían incidir en un incremento similar de la probabilidad en los valores de las cuantificaciones finales de estos metales una vez realizados estos tratamientos); sumado lo anterior a las dinámicas bioquímicas del músculo de estas especies, y de metales bioactivos como el Hg (en sus formas metiladas) y el Zn puntualmente (Kalogeropoulos et al., 2012). Tabla 5.

Tabla 5. Comparaciones de Dunnett entre las concentraciones de Hg, Zn, Cd, Pb y Cu en las muestras de control y en las muestras sometidas a los métodos de cocción estudiados (en negrilla las diferencias significativas $p < 0,05$)

| Metal | Especie | Método de Cocción | Media | Agrupación | p-valor |
|-------|-------------------------------|-------------------|----------------|------------|--------------|
| Hg | <i>Cyphocharax magdalenae</i> | Guisado | 0,03277 | A | 0,094 |
| | | Viuda | 0,01484 | A | 0,999 |
| | | Frito | 0,04723 | B | 0,002 |
| | <i>Prochilodus magdalenae</i> | Guisado | 0,0443 | A | 0,482 |
| | | Viuda | 0,03591 | A | 0,917 |
| | | Frito | 0,0846 | B | 0,001 |
| | <i>Caquetaia kraussii</i> | Guisado | 0,2111 | B | 0,031 |
| | | Viuda | 0,1694 | A | 0,663 |
| | | Frito | 0,2549 | B | 0,001 |
| Zn | <i>Cyphocharax magdalenae</i> | Guisado | 5,78 | A | 0,271 |
| | | Viuda | 5,73 | A | 0,255 |
| | | Frito | 8,33 | B | 0,004 |
| | <i>Prochilodus magdalenae</i> | Guisado | 5,891 | A | 0,944 |
| | | Viuda | 5,729 | A | 0,92 |
| | | Frito | 15,47 | B | 0,001 |

Asimismo, en el análisis de componentes principales (PCA) se observa que las agrupaciones del Hg, Zn, Cd, Pb y Cu en *Caquetaia kraussii*, *Sorubim cuspicaudus*, *Cyphocharax magdalenae* y *Prochilodus magdalenae* estuvieron determinadas por dos componentes principales, los cuales explican el 93% de la variación presentada en la distribución bioquímica de estos elementos a partir de los métodos de cocción evaluados. Así el primer componente PC1 incluyó las distribuciones del Hg, en tanto que el segundo abarcó en su composición a los subgrupos (Cd-Pb) y (Cu-Zn), pudiendo obedecer estos patrones particulares de acumulación en primer lugar al

comportamiento y naturaleza fisicoquímica de los elementos en cuestión, ya que el Hg aunque no es un metal esencial y por tanto carece de una función biológica específica, tiene el potencial de bioactivarse, biomagnificarse e integrarse de manera eficiente a gran parte de los sustratos y procesos metabólicos y fisiológicos de los peces que contamina (Sun et al., 2020). En tanto que metales como el Cu y el Zn sí se constituyen en elementos esenciales que naturalmente hacen parte de los procesos biológicos y moleculares de los peces (Barwick & Maher, 2003), y por tanto dada su gran afinidad y correspondencia con la química celular de la ictiofauna presentan patrones de acumulación y agrupación considerablemente similares en las matrices orgánicas y metabólicas de los peces (Bawuro et al., 2018). Por su parte el Cd y el Pb son metales no esenciales que si bien no poseen un rol biológico conocido; al igual que el Zn y el Cu, no tienen un potencial de biomagnificación concretamente descrito o dilucidado en los ecosistemas acuáticos en general (Cardwell et al., 2013), y por consiguiente en los peces describen un comportamiento acumulativo y distributivo más cercano a elementos como el Zn y el Cu más que al Hg (Liu et al., 2019). De esta forma a partir de los métodos de cocción implementados, los patrones de acumulación del Hg, Zn, Cd, Pb y Cu en el tejido muscular de *Caquetaia kraussii*, *Sorubim cuspicaudus*, *Cyphocharax magdalenae* y *Prochilodus magdalenae* muestran bajas tasas de acumulación general de Hg dado el alto número de valores negativos vectoriales del PC1, seguidos de los valores vectoriales del Cd y el Pb en el PC2. Diferenciándose de las tasas de acumulación del Zn y el Cu en el PC2, cuyos valores vectoriales fueron mayoritariamente positivos indicando altos grados de acumulación en las especies objeto de estudio (Tabla 1) – Figuras (2, 3, 4)

Figura 2. Análisis de componentes principales (PCA): vectores de carga y puntuaciones de los dos componentes que determinan la variación bioquímica del Hg, Zn, Cd, Pb y Cu en los métodos de cocción y las especies estudiadas: en rombos los elementos del PC1 – en triángulos los elementos del PC2.

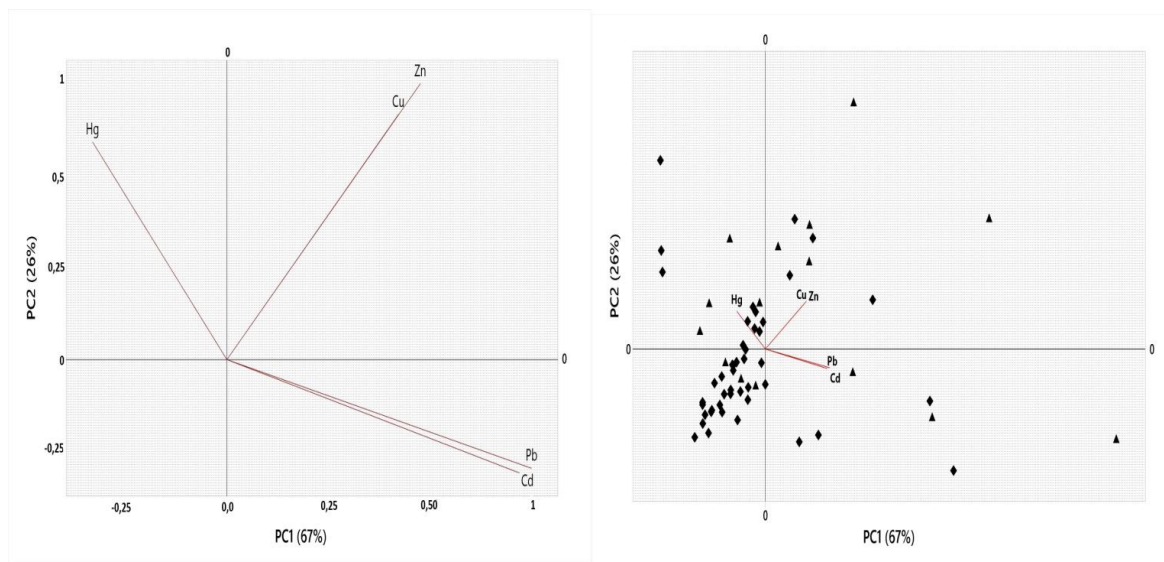


Figura 3. Clustering de las concentraciones de Hg, Zn, Cd y Pb

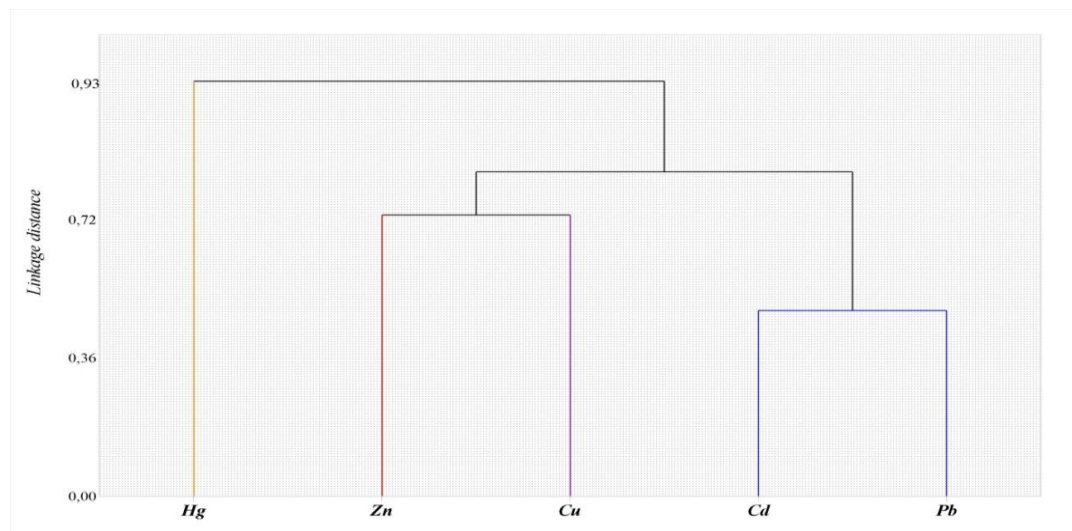
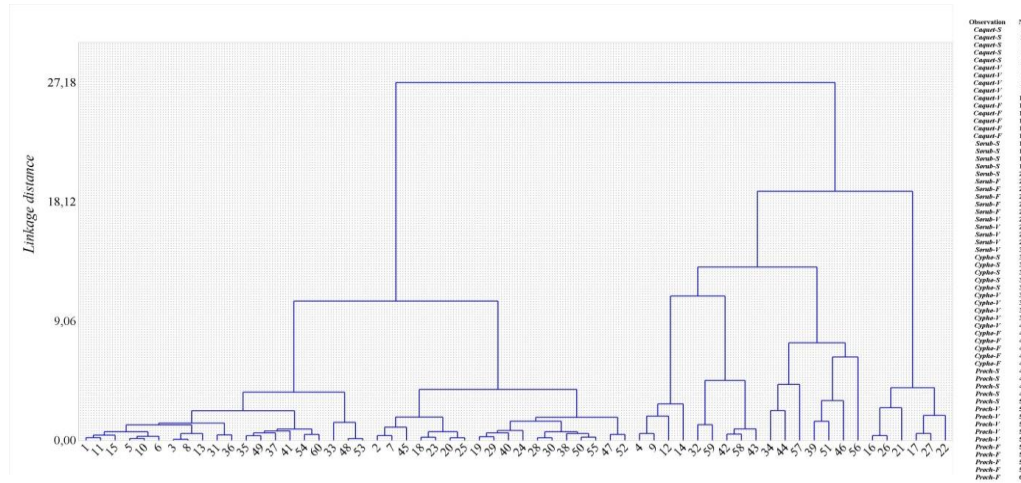


Figura 4. Clustering de las observaciones de los métodos de cocción en *Caquetaia kraussii*, *Sorubim cuspicaudus*, *Cyphocharax magdalenae* y *Prochilodus magdalenae*. Claves: S-Guisado; V-Viuda; F-Frito



En lo concerniente a los índices de peligro (THQ) y riesgo (HI) objetivo de exposición a Hg, Zn, Cd, Pb y Cu en las poblaciones estudiadas de La Mojana producto del consumo de *Caquetaia kraussii*, *Sorubim cuspicaudus*, *Cyphocharax magdalenae* y *Prochilodus magdalenae*, muestran que existen elevados riesgos a la salud de estas poblaciones, siendo expresados estos riesgos en función de las concentraciones de los metales: **Hg>Cu>Pb>Cd>Zn**; en función de los métodos de cocción empleados: **Frito>Guisado>Viuda**; y en función de las especies consumidas: ***Sorubim cuspicaudus* >*Prochilodus magdalenae* > *Caquetaia kraussii* > *Cyphocharax magdalenae***. De esta manera todos los coeficientes de los índices de riesgo objetivo (HI) sobrepasaron el valor de seguridad de 1, lo que implica que la ingesta de estas especies dadas las frecuencias y cantidades de consumo por parte de los pobladores del área de estudio tienen una alta probabilidad de desencadenar efectos toxicológicos graves, los cuales pueden ser de carácter sistémico, crónico e incluso representar la incidencia de cuadros clínicos letales producto de la contaminación con Hg, Zn, Cd, Pb y Cu (Férrandez-Maestre et al., 2018). Entre estas manifestaciones toxicológicas pueden presentarse daño cromosómico y carcinogenicidad (Calao & Marrugo-Negrete, 2015), alteraciones en el número y la viabilidad de sustratos celulares y orgánicos como los componentes hematológicos, neuronales, reproductivos, epiteliales y respiratorios (Vargas-Licona & Marrugo-Negrete, 2019; Marrugo-Negrete et al., 2020), así como la generación de trastornos, síndromes estructurales, inmunológicos, y cognitivos de larga data y de

naturaleza hereditaria, principalmente por la toxicidad de metales como el Hg, el Cd y el Pb (Díaz et al., 2020). Configurándose estos fenómenos en un potencial problema de salud pública en la región. Tabla 6.

Tabla 6. Índices de peligro (THQ) y riesgo (HI) objetivo de exposición a Hg, Zn, Cd, Pb y Cu en las poblaciones estudiadas de La Mojana en función del consumo de *Caquetaia kraussii*, *Sorubim cuspicaudus*, *Cyphocharax magdalenae* y *Prochilodus magdalenae* y los métodos de cocción implementados (en negrilla los coeficientes que implican peligros y riesgos significativos).

| Especie | Método de Cocción | THQ | | | | | HI |
|-------------------------------|-------------------|-------------|----------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | | Hg | Zn | Cd | Pb | Cu | VR |
| | VR | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| <i>Cyphocharax magdalenae</i> | Guisado | 0,21 | 0,21 | 0,75 | 1,75 | 0,88 | 3,8 |
| | Viuda | 0,13 | 0,01 | 0,38 | 0,91 | 0,26 | 1,69 |
| | Frito | 0,47 | 0,39 | 0,2 | 1,84 | 0,37 | 3,27 |
| <i>Prochilodus magdalenae</i> | Guisado | 0,52 | 0,23 | 0,71 | 1,54 | 1,26 | 4,26 |
| | Viuda | 0,48 | 0,19 | 0,49 | 1,11 | 0,87 | 3,14 |
| | Frito | 1,31 | 0,28 | 1,57 | 2,93 | 1,66 | 7,75 |
| <i>Sorubim cuspicaudus</i> | Guisado | 5,78 | 0,07 | 0,58 | 0,15 | 1,44 | 8,02 |
| | Viuda | 3,88 | 0,02 | 0,37 | 0,03 | 1,39 | 5,69 |
| | Frito | 6,07 | 0,09 | 0,83 | 0,05 | 1,62 | 8,66 |
| <i>Caquetaia kraussii</i> | Guisado | 1,97 | 0,15 | 0,33 | 0,13 | 0,74 | 3,32 |
| | Viuda | 1,18 | 0,12 | 0,29 | 0,19 | 0,86 | 2,64 |
| | Frito | 2,11 | 0,27 | 0,45 | 0,14 | 1,28 | 4,25 |

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alamdar, A., Eqani, S. A. M. A. S., Hanif, N., Ali, S. M., Fasola, M., Bokhari, H., Katsoyiannis, I. A., & Shen, H. (2017). Human exposure to trace metals and arsenic via consumption of fish from river Chenab, Pakistan and associated health risks. *Chemosphere*, 168, 1004–1012. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.10.110>
- Atia, A.S., Darwish, W.S., Zaki, M.S. (2018). Monitoring of heavy metal residues, metal-metal interactions and the effect of cooking on the metal load in shellfish. *J. Anim. Plant Sci.* 28, 732–743.

- Authman, M. M. (2015). Use of Fish as Bio-indicator of the Effects of Heavy Metals Pollution. *Journal of Aquaculture Research & Development*, 06(04). <https://doi.org/10.4172/2155-9546.1000328>
- Barwick, M., & Maher, W. (2003). Biotransference and biomagnification of selenium copper, cadmium, zinc, arsenic and lead in a temperate seagrass ecosystem from Lake Macquarie Estuary, NSW, Australia. *Marine Environmental Research*, 56(4), 471–502. <https://doi.org/10.1016/s0141>
- Bawuro, A. A., Voegborlo, R. B., & Adimado, A. A. (2018). Bioaccumulation of Heavy Metals in Some Tissues of Fish in Lake Geriyo, Adamawa State, Nigeria. *Journal of Environmental and Public Health*, 2018, 1–7. <https://doi.org/10.1155/2018/1854892>
- Calao, C., Marrugo-Negrete, J. 2015. Efectos genotóxicos asociados a metales pesados en una población humana de la región de La Mojana, Colombia, 2013. *Biomedica*. 35(2). 139-151. <http://dx.doi.org/10.7705/biomedica.v35i0.2392>.
- Cappello, T., Brandão, F., Guilherme, S., Santos, M. A., Maisano, M., Mauceri, A., Canário, J., Pacheco, M., & Pereira, P. (2016). Insights into the mechanisms underlying mercury-induced oxidative stress in gills of wild fish (*Liza aurata*) combining ¹ H NMR metabolomics and conventional biochemical assays. *Science of The Total Environment*, 548–549, 13–24.
- Cardwell, R. D., DeForest, D. K., Brix, K. V., & Adams, W. J. (2013). Do Cd, Cu, Ni, Pb, and Zn Biomagnify in Aquatic Ecosystems? In *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology Volume 226* (pp. 101–122). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6898-1_4
- Ciji, P. P., & Bijoy Nandan, S. (2014). Toxicity of copper and zinc to *Puntius parrah* (Day, 1865). *Marine Environmental Research*, 93, 38–46. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2013.11.006>
- Clemow, Y., & Wilkie, M. P. (2015). Effects of Pb plus Cd mixtures on toxicity, and internal electrolyte and osmotic balance in the rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquatic Toxicology*, 161, 176–188. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2015.01.032>
- de Paula Gutiérrez, B. F., & Agudelo, C. A. R. (2020). Fish as bioindicators: coal and mercury pollution in Colombia's ecosystems. *Environmental Science and*

- Pollution Research, 27(22), 27541–27562. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09159-4>
- Díaz, S., Muñoz-Guerrero, M., Palma-Parra, M., Becerra-Arias, C., & Fernández-Niño, J. (2018). Exposure to Mercury in Workers and the Population Surrounding Gold Mining Areas in the Mojana Region, Colombia. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(11), 2337. <https://doi.org/10.3390/ijerph15112337>
- Díaz, S. M., Palma, R. M., Muñoz, M. N., Becerra-Arias, C., & Fernández Niño, J. A. (2020). Factors Associated with High Mercury Levels in Women and Girls from The Mojana Region, Colombia, 2013–2015. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(6), 1827.
- Dillon, T., Beckvar, N., & Kern, J. (2010). Residue-based mercury dose-response in fish: An analysis using lethality-equivalent test endpoints. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 29(11), 2559–2565. <https://doi.org/10.1002/etc.314>
- European Union (EU). (2017). Commission regulation (EC) No 1881/2006 (2017Rev.): Setting maximum levels for certain contaminants in foodstuffs
- Fang, Y., Nie, Z., Liu, F., Die, Q., He, J., & Huang, Q. (2014). Concentration and health risk evaluation of heavy metals in market-sold vegetables and fishes based on questionnaires in Beijing, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(19), 11401–11408. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3127-x>
- FAO. (2013). Food and Agriculture Organization, 2013. http://www.fao.org/fishery/to_pic/16140/en
- Farkas, A., Salánki, J., & Specziár, A. (2003). Age- and size-specific patterns of heavy metals in the organs of freshwater fish *Abramis brama* L. populating a low-contaminated site. *Water Research*, 37(5), 959–964. [https://doi.org/10.1016/s0043-1354\(02\)00447-5](https://doi.org/10.1016/s0043-1354(02)00447-5)
- Fernandez-Maestre, R., Johnson-Restrepo, B., & Olivero-Verbel, J. (2018). Heavy Metals in Sediments and Fish in the Caribbean Coast of Colombia: Assessing the Environmental Risk. *International Journal of Environmental Research*, 12(3), 289–301. <https://doi.org/10.1007/s41742-018-0091-1>
- Gámez Barrera, D., Morón Granados, E., & Fuentes Reines, J. (2016). Descripción del hábito alimentario de doce especies de peces asociados a la ciénaga grande de

- santa marta, Colombia. *Bulletin of Marine and Coastal Research*, 43(1).
<https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2014.43.1.29>
- Garai P, Banerjee P, Mondal P, Saha N.C. (2021). Effect of Heavy Metals on Fishes: Toxicity and Bioaccumulation. *J Clin Toxicol*. S18:001
- Gutiérrez-Mosquera, H., Marrugo-Negrete, J., Díez, S., Morales-Mira, G., Montoya-Jaramillo, L. J., & Jonathan, M. P. (2021). Mercury distribution in different environmental matrices in aquatic systems of abandoned gold mines, Western Colombia: Focus on human health. *Journal of Hazardous Materials*, 404, 124080. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124080>
- Intamat, S., Phoonaploy, U., Sriuttha, M., Tengjaroenkul, B., & Neeratanaphan, L. (2016). Heavy metal accumulation in aquatic animals around the gold mine area of Loei province, Thailand. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 22(6), 1418–1432. <https://doi.org/10.1080/10807039.2016.1187062>
- Islam, Md. S., Ahmed, Md. K., Habibullah-Al-Mamun, Md., Raknuzzaman, M., Ali, M. M., & Eaton, D. W. (2016). Health risk assessment due to heavy metal exposure from commonly consumed fish and vegetables. *Environment Systems and Decisions*, 36(3), 253–265. <https://doi.org/10.1007/s10669-016-9592-7>
- Javed, M., & Usmani, N. (2014). Impact of Heavy Metal Toxicity on Hematology and Glycogen Status of Fish: A Review. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences*, 85(4), 889–900. <https://doi.org/10.1007/s40011-014-0404-x>
- Javed, M., & Usmani, N. (2017). An Overview of the Adverse Effects of Heavy Metal Contamination on Fish Health. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences*, 89(2), 389–403. <https://doi.org/10.1007/s40011-017-0875-7>
- Jiang, H., Qin, D., Chen, Z., Tang, S., Bai, S., & Mou, Z. (2016). Heavy Metal Levels in Fish from Heilongjiang River and Potential Health Risk Assessment. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 97(4), 536–542. <https://doi.org/10.1007/s00128-016-1894-4>
- Kalogeropoulos, N., Karavoltsos, S., Sakellari, A., Avramidou, S., Dassenakis, M., & Scoullou, M. (2012). Heavy metals in raw, fried and grilled Mediterranean

- finfish and shellfish. *Food and Chemical Toxicology*, 50(10), 3702–3708. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2012.07.012>
- Kondera, E., Ługowska, K., & Sarnowski, P. (2013). High affinity of cadmium and copper to head kidney of common carp (*Cyprinus carpio* L.). *Fish Physiology and Biochemistry*, 40(1), 9–22. <https://doi.org/10.1007/s10695-013-9819-1>
- Lee, J.-W., Choi, H., Hwang, U.-K., Kang, J.-C., Kang, Y. J., Kim, K. I., & Kim, J.-H. (2019). Toxic effects of lead exposure on bioaccumulation, oxidative stress, neurotoxicity, and immune responses in fish: A review. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 68, 101–108. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2019.03.010>
- Linares Arias J.C et al., (2018a). Caracterización en la dinámica temporal de los macrohábitats acuáticos en la región de La Mojana. Informe técnico final. Convenio 15-027. Bogotá: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt y Universidad de Córdoba
- Linares Arias J.C et al., (2018b). Caracterización en la dinámica espacial de los macrohábitats acuáticos en la región de La Mojana. Informe técnico final. Convenio 15-027. Bogotá: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt y Universidad de Córdoba
- Liu, J., Cao, L., & Dou, S. (2019). Trophic transfer, biomagnification and risk assessments of four common heavy metals in the food web of Laizhou Bay, the Bohai Sea. *Science of The Total Environment*, 670, 508–522. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.140>
- Luo, M., Yu, H., Liu, Q., Lan, W., Ye, Q., Niu, Y., & Niu, Y. (2021). Effect of river-lake connectivity on heavy metal diffusion and source identification of heavy metals in the middle and lower reaches of the Yangtze River. *Journal of Hazardous Materials*, 416, 125818. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125818>
- Marrugo-Negrete, J., Pinedo-Hernández, J., Combatt, E. M., Bravo, A. G., & Díez, S. (2019). Flood-induced metal contamination in the topsoil of floodplain agricultural soils: A case-study in Colombia. *Land Degradation & Development*, 30(17), 2139–2149. <https://doi.org/10.1002/ldr.3398>
- Marrugo-Negrete, J., Vargas-Licona, S., Ruiz-Guzmán, J. A., Marrugo-Madrid, S., Bravo, A. G., & Díez, S. (2020). Human health risk of methylmercury from fish

- consumption at the largest floodplain in Colombia. *Environmental Research*, 182, 109050. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.109050>
- Marrugo-Negrete, J. L., Ruiz-Guzmán, J. A., & Ruiz-Fernández, A. C. (2017a). Biomagnification of Mercury in Fish from Two Gold Mining-Impacted Tropical Marshes in Northern Colombia. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 74(1), 121–130. <https://doi.org/10.1007/s00244-017-0459-9>
- Marrugo-Negrete, J., Pinedo-Hernández, J., & Díez, S. (2017b). Assessment of heavy metal pollution, spatial distribution and origin in agricultural soils along the Sinú River Basin, Colombia. *Environmental Research*, 154, 380–388. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.01.021>
- Mebane, C. A., Dillon, F. S., & Hennessy, D. P. (2012). Acute toxicity of cadmium, lead, zinc, and their mixtures to stream-resident fish and invertebrates. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 31(6), 1334–1348. <https://doi.org/10.1002/etc.1820>
- Mendoza-Carranza, M., Sepúlveda-Lozada, A., Dias-Ferreira, C., & Geissen, V. (2016). Distribution and bioconcentration of heavy metals in a tropical aquatic food web: A case study of a tropical estuarine lagoon in SE Mexico. *Environmental Pollution*, 210, 155–165. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.12.014>
- Mojica, J. I.; J. S. Usma; R. Álvarez-León y C. A. Lasso (Eds). (2012). Libro rojo de peces dulceacuícolas de Colombia 2012. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia, WWF Colombia y Universidad de Manizales. Bogotá, D. C., Colombia, 319 pp.
- Morales, B.E. (2010). Fogón Caribe-Historia de la gastronomía del Caribe colombiano. La iguana ciega, Barranquilla. ISBN: 978-958-99536-0-0
- Nong, Q., Dong, H., Liu, Y., Liu, L., He, B., Huang, Y., Jiang, J., Luan, T., Chen, B., & Hu, L. (2021). Characterization of the mercury-binding proteins in tuna and salmon sashimi: Implications for health risk of mercury in food. *Chemosphere*, 263, 128110. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128110>
- Nunes, B., Capela, R. C., Sérgio, T., Caldeira, C., Gonçalves, F., & Correia, A. T. (2014). Effects of chronic exposure to lead, copper, zinc, and cadmium on biomarkers

- of the European eel, *Anguilla anguilla*. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(8), 5689–5700. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-2485-0>
- Oliveri, C., Peric, L., Sforzini, S., Banni, M., Viarengo, A., Cavaletto, M., & Marsano, F. (2014). Biochemical and proteomic characterisation of haemolymph serum reveals the origin of the alkali-labile phosphate (ALP) in mussel (*Mytilus galloprovincialis*). *Comparative Biochemistry and Physiology Part D: Genomics and Proteomics*, 11, 29–36. <https://doi.org/10.1016/j.cbd.2014.07.003>
- Paschoalini, A. L., & Bazzoli, N. (2021). Heavy metals affecting Neotropical freshwater fish: A review of the last 10 years of research. *Aquatic Toxicology*, 237, 105906. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2021.105906>
- Pinzón-Bedoya, C. H., Pinzón-Bedoya, M. L., Pinedo-Hernández, J., Urango-Cardenas, I., & 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>
- Qadir, A., & Malik, R. N. (2011). Heavy Metals in Eight Edible Fish Species from Two Polluted Tributaries (Aik and Palkhu) of the River Chenab, Pakistan. *Biological Trace Element Research*, 143(3), 1524–1540. <https://doi.org/10.1007/s12011-011-9011-3>
- Ríos-Touma, B., & Ramírez, A. (2019). Multiple Stressors in the Neotropical Region: Environmental Impacts in Biodiversity Hotspots. In *Multiple Stressors in River Ecosystems* (pp. 205–220). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-811713-2.00012-1>
- Rúa-Cardona A. F., Flórez Molina M. T., & Palacio Baena J. (2013). Variations of seasonal and spatial Hg, Pb, Cr and organic matter contents in Ayapel Flood Plain Lake sediments, Córdoba, northwest Colombia. *Revista Facultad De Ingeniería Universidad De Antioquia*, (69), 244-255. Retrieved from <https://revistas.udea.edu.co/index.php/ingenieria/article/view/18153>
- Shuhaimi-Othman, M., Yakub, N., Ramle, N.-A., & Abas, A. (2013). Comparative toxicity of eight metals on freshwater fish. *Toxicology and Industrial Health*, 31(9), 773–782. <https://doi.org/10.1177/0748233712472519>

- Sun, C., Zhang, Z., Cao, H., Xu, M., & Xu, L. (2019). Concentrations, speciation, and ecological risk of heavy metals in the sediment of the Songhua River in an urban area with petrochemical industries. *Chemosphere*, 219, 538–545. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.12.040>
- Sun, T., Wu, H., Wang, X., Ji, C., Shan, X., & Li, F. (2020). Evaluation on the biomagnification or biodilution of trace metals in global marine food webs by meta-analysis. *Environmental Pollution*, 264, 113856. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113856>
- Terán, C., Jimenez, C., González, C & Villaneda, E. (1998). Metodología para la zonificación agroclimática de la región de La Mojana mediante el sistema de información geográfica ARC/Info. *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria* 2(2): 19-26. Disponible via Dialnet <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5624812>
- Tesser, T. T., da Rocha, C. M., & Castro, D. (2021). Metal contamination in omnivores, carnivores and detritivores fish along the Tramandaí River Basin, RS, Brazil. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 16, 100496. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2021.100496>
- Torres Perez, M. P., Romero Deimer, V., & Cordero Alexander, P. (2019). Biorremediación de mercurio y níquel por bacterias endófitas de macrófitas acuáticas. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 21(2), 36–44. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v21n2.79975>
- USEPA. (2010). Risk assessment guidance for superfund. In: *Human Health Evaluation Manual (Part A). Volume I.* pp. 2015. https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/rags_a.pdf
- USEPA- IRIS. (2011). Evaluating the Science and Process behind Chemical Risk Assessment. Subcommittee on Investigations and Oversight of the Committee on Science, Space, and Technology, House of Representatives, 112th Cong., 1st Sess., July 14, 2011.
- Vargas Licon, S. P., & Marrugo Negrete, J. L. (2019). Mercurio, metilmercurio y otros metales pesados en peces de Colombia: riesgo por ingesta. *Acta Biológica Colombiana*, 24(2), 232–242. <https://doi.org/10.15446/abc.v24n2.74128>

- Winegardner, A. K., Salter, N., Aebischer, S., Pienitz, R., Derry, A. M., Wing, B., Beisner, B. E., & Gregory-Eaves, I. (2017). Cladoceran diversity dynamics in lakes from a northern mining region: responses to multiple stressors characterized by alpha and beta diversity. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 74(10), 1654–1667. <https://doi.org/10.1139/cjfas-2016-0449>
- Ye, H., Zang, S., Xiao, H., & Zhang, L. (2013). Speciation and ecological risk of heavy metals and metalloid in the sediments of Zhalong Wetland in China. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12(1), 115–124. <https://doi.org/10.1007/s13762-013-0399-5>
- Yu, B., Wang, X., Dong, K. F., Xiao, G., & Ma, D. (2020). Heavy metal concentrations in aquatic organisms (fishes, shrimp and crabs) and health risk assessment in China. *Marine Pollution Bulletin*, 159, 111505. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111505>
- Zhang, J. L., Fang, L., Song, J. Y., Luo, X., Fu, K. D., & Chen, L. Q. (2019). Health risk assessment of heavy metals in *Cyprinus carpio* (Cyprinidae) from the upper Mekong River. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(10), 9490–9499. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04291-2>
- Zhou, Y., Wei, F., Zhang, W., Guo, Z., & Zhang, L. (2018). Copper bioaccumulation and biokinetic modeling in marine herbivorous fish *Siganus oramin*. *Aquatic Toxicology*, 196, 61–69. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2018.01.009>