



Universidad
del Atlántico

CÓDIGO: FOR-DO-109

VERSIÓN: 0

FECHA: 03/06/2020

**AUTORIZACIÓN DE LOS AUTORES PARA LA CONSULTA, LA
REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL, Y PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DEL
TEXTO COMPLETO**

Puerto Colombia, 3 de mayo de 2024

Señores

DEPARTAMENTO DE BIBLIOTECAS

Universidad del Atlántico

Cuidad

Asunto: Autorización Trabajo de Grado

Cordial saludo,

Yo, **JAIME ARTETA SALTARÍN.**, identificado(a) con **C.C. No. 3.730.765** de **JUAN DE ACOSTA**, autor(a) del trabajo de grado titulado **EFFECTOS DEL MERCURIO SOBRE LA BIOLOGÍA REPRODUCTIVA DE TRIPORTHEUS MAGDALENAE EN EL EMBALSE DEL GUÁJARO** presentado y aprobado en el año **2023** como requisito para optar al título Profesional de **MAGÍSTER EN CIENCIAS AMBIENTALES.**; autorizo al Departamento de Bibliotecas de la Universidad del Atlántico para que, con fines académicos, la producción académica, literaria, intelectual de la Universidad del Atlántico sea divulgada a nivel nacional e internacional a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios del Departamento de Bibliotecas de la Universidad del Atlántico pueden consultar el contenido de este trabajo de grado en la página Web institucional, en el Repositorio Digital y en las redes de información del país y del exterior, con las cuales tenga convenio la Universidad del Atlántico.
- Permitir consulta, reproducción y citación a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato CD-ROM o digital desde Internet, Intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer.

Esto de conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, "Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores", los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

Atentamente,

Firma

JAIME ARTETA SALTARÍN.

C.C. No. 3.730.765 de JUAN DE ACOSTA

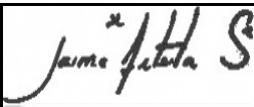
DECLARACIÓN DE AUSENCIA DE PLAGIO EN TRABAJO ACADÉMICO PARA GRADO

Puerto Colombia, 3 de mayo de 2024

Una vez obtenido el visto bueno del director del trabajo y los evaluadores, presento al **Departamento de Bibliotecas** el resultado académico de mi formación profesional o posgradual. Asimismo, declaro y entiendo lo siguiente:

- El trabajo académico es original y se realizó sin violar o usurpar derechos de autor de terceros, en consecuencia, la obra es de mi exclusiva autoría y detento la titularidad sobre la misma.
- Asumo total responsabilidad por el contenido del trabajo académico.
- Eximo a la Universidad del Atlántico, quien actúa como un tercero de buena fe, contra cualquier daño o perjuicio originado en la reclamación de los derechos de este documento, por parte de terceros.
- Las fuentes citadas han sido debidamente referenciadas en el mismo.
- El (los) autor (es) declara (n) que conoce (n) lo consignado en el trabajo académico debido a que contribuyeron en su elaboración y aprobaron esta versión adjunta.

Título del trabajo académico:	EFFECTOS DEL MERCURIO SOBRE LA BIOLOGÍA REPRODUCTIVA DE TRIPORTHEUS MAGDALENAE EN EL EMBALSE DEL GUÁJARO.
Programa académico:	MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES

Firma de Autor 1:							
Nombres y Apellidos:	JAIME ARTETA SALTARÍN						
Documento de Identificación:	CC	x	CE		PA	Número:	3730765
Nacionalidad:	COLOMBIANO			Lugar de residencia:	JUAN DE ACOSTA		
Dirección de residencia:	Carrera 5 N° 8 – 31						
Teléfono:					Celular:	3046450650	



FORMULARIO DESCRIPTIVO DEL TRABAJO DE GRADO

TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO DE GRADO	EFFECTOS DEL MERCURIO SOBRE LA BIOLOGÍA REPRODUCTIVA DE TRIPORTHEUS MAGDALENÆ EN EL EMBALSE DEL GUÁJARO.
AUTOR(A) (ES)	JAIME ARTETA SALTARIN.
DIRECTOR (A)	VERENA BAYUELO ESPITIA.
CO-DIRECTOR (A)	JOSE LUIS MARRUGO NEGRETE.
JURADOS	LUCELLYS IRINA SIERRA MÁRQUEZ y CARLOS ALBERTOTOLOZA TOLOZA
TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE	MAGISTER EN CIENCIAS AMBIENTALES.
PROGRAMA	MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES
PREGRADO / POSTGRADO	POSTGRADO
FACULTAD	CIENCIAS BÁSICAS
SEDE INSTITUCIONAL	SEDE NORTE.
AÑO DE PRESENTACIÓN DEL TRABAJO DE GRADO	2023
NÚMERO DE PÁGINAS	52 PÁGINAS
TIPO DE ILUSTRACIONES	DESCRIBIR TIPO DE ILUSTRACIONES: Mapas, Tablas, gráficos y diagramas, Láminas y/o Fotografías.
MATERIAL ANEXO (VÍDEO, AUDIO, MULTIMEDIA O PRODUCCIÓN ELECTRÓNICA)	NO APLICA
PREMIO O RECONOCIMIENTO	NO APLICA)



**EFFECTOS DEL MERCURIO (Hg) SOBRE LA BIOLOGÍA REPRODUCTIVA DE LA
ARENCA (*Triportheus magdalenae*) EN EL EMBALSE DEL GUÁJARO**

JAIME ARTETA-SALTARÍN

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE MAGISTER EN CIENCIAS
AMBIENTALES**

PROGRAMA DE MAESTRIA EN CIENCIAS AMBIENTALES

FACULTAD DE CIENCIAS BASICAS

UNIVERSIDAD DEL ATLÁNTICO

PUERTO COLOMBIA

2024



**EFFECTOS DEL MERCURIO (Hg) SOBRE LA BIOLOGÍA REPRODUCTIVA DE LA
ARENCA (*Triportheus magdalenae*) EN EL EMBALSE DEL GUÁJARO**

JAIME ARTETA SALTARIN

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TITULO DE MAGISTER EN CIENCIAS
AMBIENTALES**

DIRECTOR(A): VERENA SILVIA BAYUELO ESPITIA

MAGISTER EN ZOOLOGÍA Y ECOLOGÍA.

CODIRECTOR: JOSE LUIS MARRUGO NEGRETE

Ph.D. EN CIENCIAS QUIMICAS

PROGRAMA DE CIENCIAS AMBIENTALES

FACULTAD DE CIENCIAS BASIACAS

UNIVERSIDAD DEL ATLÁNTICO

PUERTO COLOMBIA

2024

NOTA DE ACEPTACION

DIRECTOR(A)

JURADO(A)S

AGRADECIMIENTOS

Agradeciendo a DIOS, por haberme dado la oportunidad de iniciar y culminar este proyecto. A mi directora Verena Bayuelo Espitia y a mi codirector José Luis Marrugo-Negrete por su constante confianza, apoyo y orientación en la elaboración de la presente investigación. Así mismo, a Jorge Bernal Alviz por su invaluable ayuda y asesoría investigativa para la realización de este trabajo, por último, a mis padres Jaime Arteta y Diana Saltarín.

EFFECTOS DEL MERCURIO (Hg) SOBRE LA BIOLOGÍA REPRODUCTIVA DE LA ARENCA (*Triportheus magdalenae*) EN EL EMBALSE DEL GUÁJARO

RESUMEN

La contaminación de ecosistemas acuáticos por Mercurio (Hg), dan lugar a afectaciones que recaen directamente sobre las especies icticas, principalmente endémicas como *Triportheus magdalenae*. En medios acuáticos como el Embalse del Guájaro, el Hg tiende a generar afecciones significativas en las especies de peces, principalmente sobre su ciclo celular y su ciclo reproductivo. Por lo tanto, esta investigación evaluó el efecto de la bioacumulación de Hg sobre la biología reproductiva de *Triportheus magdalenae* en el Embalse del Guájaro, partiendo de un análisis comparativo de las concentraciones de este metal pesado en músculo, hígado y gónadas, así como del contraste del Factor de condición (K), índice hepatosomático (IHS) y el índice gonadosomático (IGS) de 42 individuos de esta especie, en el periodo comprendido entre noviembre de 2021 hasta febrero de 2022. Las concentraciones de Hg en los tejidos fueron medidas mediante el método US EPA 7473 (descomposición térmica, amalgamación y espectrofotometría de absorción atómica, usando el analizador directo de mercurio); la aptitud reproductiva de esta especie se determinó calculando los índices morfofisiológicos. Factor de condición K, el índice hepatosomático (IHS) y el índice gonadosomático (IGS). Los resultados muestran que los peces capturados en el primer muestreo (noviembre de 2021) acumularon las mayores medias de Hg en el músculo ($71,03 \pm 27,67$ ug/kg), en el hígado ($84,37 \pm 47,36$ ug/kg) y en las gónadas ($106,9 \pm 120,7$ ug/kg). De igual forma los peces capturados en el primer muestreo también exhibieron los IGS ($0,464 \pm 0,564\%$) y el Factor de condición K ($0,567 \pm 0,047\%$) más elevados; los peces del cuarto muestreo (febrero de 2022) describieron los mayores IHS ($1,714 \pm 0,766\%$). Así mismo, el porcentaje de hembras capturadas fue notablemente superior al porcentaje de machos, correspondiendo estas cifras a un 80,95% de hembras y a un 19,05% de machos del total de la población; se estimó la proporción sexual poblacional en 1 macho por cada 4 hembras. Por su parte las diferencias significativas ($p < 0,05$) halladas entre las medias de las concentraciones de Hg en el hígado y entre los índices hepatosomáticos (IHS) y el Factor de condición K en la población de *Triportheus magdalenae* evaluada, pueden estar respondiendo a disponibilidad del alimento y de los sustratos bioquímicos óptimos para su desarrollo, así como a las condiciones hídricas del embalse. Y conjuntamente las dos correlaciones significativas ($p < 0,05$) y negativas encontradas entre las concentraciones de

Hg en las gónadas y el Factor K y el IHS podrían implicar afectaciones severas sobre la viabilidad celular y metabólica de las gónadas y por tanto de la aptitud reproductiva de *Triportheus magdalenae*, se concluye que las tasas de bioacumulación de Hg en el tejido muscular, en el tejido hepático, así como en el tejido gonadal de la población de *Triportheus magdalenae* en el Embalse del Guájaro, pueden variar y ser dependientes de patrones de flujo hídricos, de factores propios del hábitat que ocupa esta especie, de cambios en la disponibilidad y en la caracterización de las condiciones físico y geoquímicas de este cuerpo de agua.

Palabras clave: *Ecotoxicología, metales pesados, ecosistemas acuáticos, peces neotropicales.*

ABSTRACT

The contamination of aquatic ecosystems by Mercury (Hg) gives rise to effects that fall directly on fish species, mainly endemic such as *Triportheus magdalenae*. In aquatic environments such as the Guájaro Reservoir, Hg tends to generate significant effects on fish species, mainly on their cell cycle and reproductive cycle. Therefore, this research evaluated the effect of Hg bioaccumulation on the reproductive biology of *Triportheus magdalenae* in the Guájaro Reservoir, based on a comparative analysis of the concentrations of this heavy metal in muscle, liver and gonads, as well as the contrast of the Condition Factor (K), hepatosomatic index (IHS) and the gonadosomatic index (IGS) of 42 individuals of this species, in the period from November 2021 to February 2022. Hg concentrations in tissues were measured using the US EPA 7473 method (thermal decomposition, amalgamation and atomic absorption spectrophotometry, using the direct mercury analyzer); The reproductive fitness of this species was determined by calculating the morphophysiological indices. Condition factor K, the hepatosomatic index (IHS) and the gonadosomatic index (GIS). The results show that the fish captured in the first sampling (November 2021) accumulated the highest average Hg in the muscle (71.03 ± 27.67 ug/kg), in the liver (84.37 ± 47.36 ug /kg) and in the gonads (106.9 ± 120.7 ug/kg). Similarly, the fish captured in the first sampling also exhibited the highest IGS ($0.464 \pm 0.564\%$) and Condition Factor K ($0.567 \pm 0.047\%$); the fish from the fourth sampling (February 2022) described the highest IHS ($1.714 \pm 0.766\%$). Likewise, the percentage of captured females was notably higher than the percentage of males, these figures corresponding to 80.95% of females and 19.05% of males of the total population; the population sexual ratio was estimated at 1 male for every 4 females. For their part, the significant differences ($p < 0.05$) found between the means of Hg concentrations in the liver and between the hepatosomatic indices (IHS) and the Condition Factor K in the population of *Triportheus magdalenae* evaluated, may be responding availability of food and optimal biochemical substrates for their development, as well as the water conditions of the reservoir. And together, the two significant ($p < 0.05$) and negative correlations found between Hg concentrations in the gonads and Factor K and IHS could imply severe effects on the cellular and metabolic viability of the gonads and therefore on the fitness reproductive of *Triportheus magdalenae*, it is concluded that the bioaccumulation rates of Hg in the muscle tissue, in the liver tissue, as well as in the gonadal tissue of the population of *Triportheus magdalenae* in the Guájaro Reservoir, can vary and be dependent on patterns of water flow, factors specific to the habitat occupied by this

species, changes in availability and in the characterization of the physical and geochemical conditions of this body of water.

Keywords: *Ecotoxicology, heavy metals, aquatic ecosystems, neotropical fish*

CONTENIDO

RESUMEN.....	5
ABSTRACT.....	7
1. INTRODUCCIÓN	12
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	14
3. JUSTIFICACIÓN	16
4. MARCO TEÓRICO.....	18
5. OBJETIVOS.....	25
6. METODOLOGÍA.....	26
7. RESULTADOS.....	32
8. DISCUSIÓN.....	41
9. CONCLUSIONES.....	45
10. RECOMENDACIONES.....	46
11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	47

LISTA DE TABLAS O FIGURAS

Figura 1. <i>Triportheus magdalenae</i> (Steindachner, 1878)	23
Figura 2. Área de estudio: Embalse del Guájaro.....	27
Figura 3. Coeficientes de Pearson ($p < 0,05$) y elipses para las correlaciones entre las concentraciones de Hg (ug/kg) en músculo (Hg-M), Hígado (Hg-H) y gónadas (Hg-G) y los índices morfofisiológicos de <i>Triportheus magdalenae</i>	39
Figura 4. Comparaciones HSD de Tukey ($p < 0,05$) entre las concentraciones medias de Hg (ug/kg) en los tejidos evaluados de <i>Triportheus magdalenae</i>	40
Figura 5. Comparaciones HSD de Tukey ($p < 0,05$) entre los índices morfofisiológicos de <i>Triportheus magdalenae</i>	40

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Caracterización de <i>Triportheus magdalenae</i> en función del sexo durante cada muestreo.....	32
Tabla 2. Resultados histológicos de las gónadas de <i>Triportheus Magdalenae</i> en el Embalse del Guájaro.....	33
Tabla 3. Resultados histológicos del tejido hepático de <i>Triportheus Magdalenae</i> en el Embalse del Guájaro.....	36
Tabla 4. Análisis descriptivo de las concentraciones medias de Hg en los tejidos estudiados (ug/kg) y de los índices morfofisiológicos de <i>Triportheus magdalenae</i> en los 4 muestreos.....	37
Tabla 5. Concentraciones medias de Hg (ug/kg) en el músculo de <i>Triportheus magdalenae</i> en otros estudios realizados en el embalse de Guájaro.....	41

INTRODUCCIÓN

En el neotrópico, los medios dulceacuícolas como los humedales, las ciénagas, los ríos o los embalses, se caracterizan por poseer un alto grado de interconectividad con los elementos ecosistémicos y las estructuras ambientales que los circundan (Barletta et al., 2010), por esta razón poseen gran susceptibilidad a los impactos ocasionados por fenómenos como la contaminación con metales pesados, la cual genera alteraciones significativas sobre los ecosistemas y sobre la biota que albergan (Pelicice et al., 2017). En este sentido el mercurio (Hg) se constituye como el principal agente contaminante de los medios dulceacuícolas entre los metales pesados (Monteiro et al., 2017), fundamentalmente porque estos medios se caracterizan por presentar ecosistemas con una elevada biodiversidad y un gran flujo y ciclaje de moléculas, nutrientes y condiciones fisicoquímicas que propician este tipo de contaminación en sus distintos estratos ambientales (Vanni, 2002). Así estas condiciones garantizan la biomagnificación del mercurio mediante procesos de oxidación y reducción y de su posterior bioactivación y transferencia trófica a través de la metilación, la cual implica su transformación en metilmercurio $[\text{CH}_3\text{Hg}]^+$, caracterizándose el metilmercurio por ser una molécula potencialmente más tóxica y nociva que el mercurio en su forma inorgánica más común: Hg^{+2} (Ubillús et al., 2000). Dado este panorama, los peces por su amplio rol ecológico y sus particularidades biológicas se destacan como biomonitores eficientes para la evaluación de los impactos de la contaminación con Hg sobre estos medios (Buck et al., 2019), ya que se ha demostrado a través de un gran número de investigaciones que la evaluación de los grados de acumulación de Hg en múltiples tejidos y de las alteraciones sobre la salud, la condición orgánica y el ciclo de vida de especies ícticas endémicas entre las que se encuentran las pertenecientes al género *Triportheus* (Queiroz-Sousa et al., 2018), permite entender la magnitud de los impactos que genera la contaminación con este metal pesado en el equilibrio ambiental de los ecosistemas acuáticos del neotrópico.

En Colombia el Embalse del Guájaró figura como uno de los medios lénticos más extensos e importantes, ya que este gran cuerpo de agua situado en la región Caribe puntualmente en la jurisdicción del departamento del Atlántico, representa un amplio reservorio de nichos conformados por extensión estructural (Castellanos-Romero et al., 2017). Convirtiéndolo en un hábitat propicio para especies endémicas de la cuenca del Magdalena como *Triportheus magdalenae*, las cuales poseen una movilidad dependiente del flujo hidrodinámico de este medio dulceacuícola, a partir de la apertura y del cierre de las compuertas que abastecen

sus aguas con el influjo del canal del Dique en el departamento de Bolívar (Torres-Bejarano et al., 2016). No obstante, se han reportado concentraciones de metales pesados como el Hg en sus aguas y sedimentos (Torregroza-Espinosa et al., 2018), en los suelos (Martínez-Mera et al., 2019) y en el músculo de *Triporthus magdalenae* (Ortega-Herrera y Peña-Coronado, 2020), esencialmente debido al vertimiento de aguas contaminadas provenientes del canal del Dique producto de actividades mineras, a las actividades agrícolas y a la influencia en los patrones de movilidad de estos elementos derivados de los cambios estacionales (Martínez-Mera et al., 2019). Por consiguiente, los efectos toxicológicos del Hg sobre la ictiofauna, entre los que predominan alteraciones multisistémicas de orden nervioso, hemático y comportamental, así como disrupciones celulares, metabólicas, enzimáticas, genéticas y alimentarias (Zhang et al., 2016); pueden tener una amplia influencia en cuanto a la determinación de los ciclos sexuales, hormonales, histológicos y reproductivos de especies ícticas con un rol ecológico fundamental y con alta sensibilidad a la contaminación con metales pesados en estos ecosistemas, como *Triporthus magdalenae* (Valdelamar-Villegas, 2018). De este modo, para evaluar los efectos de tóxicos como los metales pesados sobre la reproducción de los peces, se han implementado una serie de índices morfofisiológicos que registran y detallan cambios puntuales en la histología, en las características y en la actividad fisiológica de órganos cruciales para el ciclo reproductivo como el hígado, las gónadas entre otras glándulas, así como la condición morfométrica general de los peces (Gedig et al., 2022), como respuesta a procesos de contaminación o a una alteración significativa de las condiciones de vida y del medio en el que habita este tipo de biota. En consecuencia, a través del presente estudio se pretende evaluar el efecto de la bioacumulación de Hg sobre la biología reproductiva de *Triporthus magdalenae* en el Embalse del Guájaro, partiendo de un análisis comparativo de las concentraciones de este metal pesado en el músculo, en el hígado y en las gónadas, así como del contraste de algunos índices morfofisiológicos de esta especie entre diferentes meses.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los efectos del deterioro ambiental sobre el componente hídrico, inciden directamente en la estabilidad de las especies ícticas. Puesto que los peces suelen presentar una elevada sensibilidad a muchos contaminantes que se depositan en el agua. La exposición a estos contaminantes puede ocurrir a partir de los sedimentos, material particulado en suspensión, columna de agua o fuentes alimenticias, lo cual suele depender de la dieta y del modo de vida del organismo (Ochoa y Gonzales, 2008). De este modo dentro de los contaminantes que más problemas con lleva en los afluentes y reservorios de agua se encuentran los metales pesados, entre ellos Cd, Pb y Hg, los cuales constituyen una de las principales causas que afectan las especies ícticas. Metales como el mercurio llegan a bioacumularse en peces en función de la posición en la cadena trófica y sus hábitos alimenticios (Mancera y Álvarez, 2005).

Por lo cual, las especies ícticas que viven en el fondo de los cuerpos de agua suelen tener un mayor contacto con estos metales, los cuales pueden acumularse en sedimentos donde los microorganismos como bacterias que viven allí pueden convertirlos a formas orgánicas (metilmercurio) y posteriormente ingresar a la cadena trófica, y por su alta solubilidad en lípidos atravesar las membranas de los peces (Mancera y Álvarez, 2005). En ese sentido, estos metales suelen ocasionar impactos negativos en el ambiente, afectando a los organismos que de una u otra forma mantienen relación con ellos, por tal razón están asociados a graves problemas de salud ambiental (Toledo et al., 2000). Por lo tanto, estos problemas ambientales ocasionados por metales pesados presentes en los cuerpos de agua suelen ocasionar daños irreversibles a los peces, hasta el punto que estos pueden considerarse como herramientas para monitorear, caracterizar y definir la calidad del agua en ríos y lagos (Aguilera, 2005).

Para estos organismos expuestos a los metales pesados la tasa de asimilación a través de los medios circundantes generalmente es mayor que la tasa de eliminación, lo que provoca una modificación en el metabolismo fisiológico (Reyes et al., 2016). Por tales motivos, los metales pesados constituyen una de las fuentes más peligrosas para los ecosistemas acuáticos y las especies presentes en ellos. Dentro de estas especies afectadas se encuentra *Triportheus magdalenae*, la cual es una especie de clima tropical; en la que los efectos de los contaminantes y su toxicidad se vuelven incluso más agudos y generan una alta demanda bioquímica de oxígeno, incrementando el peligro potencial de los efectos deletéreos ocasionados por contaminantes (Mancera y Álvarez, 2005).

Estudios sobre estos metales han arrojado como resultado la afectación del sistema reproductivo de los peces, siendo este un blanco ideal de concentraciones subletales de contaminantes que afecta directamente procesos hormonales, fisiológicos, comportamentales. De la misma forma la gametogénesis, el desove, la fertilización, el tiempo de incubación y el desarrollo embrionario (Daza et al.,2005). Obedeciendo este contexto, surge la siguiente pregunta de investigación:

¿Qué efectos produce la contaminación con mercurio (Hg) sobre la biología reproductiva de *Triportheus magdalenae* en la ciénaga del Guájaro en el departamento del Atlántico?

3. JUSTIFICACIÓN

La importancia de determinar cómo algunos contaminantes impactan en las diferentes especies ícticas en los cuerpos de agua, es de gran relevancia al momento de tomar decisiones que permitan salvaguardar y mitigar las condiciones de vida de cada una de estas especies. Por tales razones, se hace necesario el estudio de los cuerpos de agua, debido a que las zonas costeras, y ciénagas son los principales blancos para la entrada de contaminantes no biodegradables, que por lo general provienen de descargas industriales y domésticas (Toledo et al., 2000; Sankhla et al., 2016; Vardhan et al., 2019).

Por otra parte, son escasas las investigaciones sobre la influencia de los metales pesados en la biología reproductiva de las especies ícticas, por lo cual este tipo de investigaciones en peces que representan una gran valor comercial y nutricional son de vital interés. En este sentido los estudios acerca de la reproducción de peces permiten tomar decisiones acertadas sobre el manejo sostenible de una especie explotada como es el caso de *Triportheus magdalenae* en el Embalse del Guájaro (Valdelamar-Villegas et al., 2015). Si se puntualiza el abordaje alimentario, el consumo de peces en las poblaciones de países en vías de desarrollo como Colombia es altamente relevante, en especial para las comunidades más vulnerables. En 2013 el pescado como materia prima alimentaria proporcionó a más de 3100 millones de personas casi el 20% de la ingesta promedio de proteínas de origen animal per cápita (FAO, 2016). De acuerdo con el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) en Colombia y, particularmente en las poblaciones ribereñas y costeras, el 90% del consumo de proteína de origen animal proviene del pescado, como resultado de un acceso muy bajo a otro tipo de proteínas (Vargas-Licon y Marrugo-Negrete, 2017).

Por esta razón, es de vital interés los estudios relacionados con la bioacumulación de metales pesados de alta distribución e incidencia contaminante como el cadmio, el plomo y el mercurio, ya que permiten evaluar la toxicidad de estas sustancias en diversas especies ícticas, puesto que es una herramienta que define y describe las alteraciones físicas que experimentan dichos organismos ante un contaminante ya sea específico o combinado (Osorio, 2010).

Siendo necesario, los estudios en la forma como inciden los metales pesados en la biología reproductiva de peces, lo que lleva a incluir dentro de los muestreos un mayor número de especies de hábitos bentónicos, como es el caso de *Triportheus magdalenae* de tal manera

que se pueda obtener mayor conocimiento de la dinámica de estas sustancias en los cuerpos de agua y realizar estudios que determinen como afecta los procesos reproductivos la exposición a estas sustancias, ya que se ha comprobado que puede generarse una disminución en el número de puestas y de huevos de muchas especies (Mancera y Álvarez, 2005).

Relacionar estos estudios de impactos causados por la contaminación con metales pesados en *Triportheus magdalenae*, permite tener información sobre este organismo de hábitos detritívoros, que puede desempeñarse como especie bioindicadora por su estrecha relación con los sedimentos y el zooplancton (Olivero et al.,1997). Además de lo anterior, *Triportheus magdalenae* es una especie endémica de Colombia, de una gran importancia alimenticia lo que ha ocasionado que este afectada por la sobreexplotación (Valdelamar-Villegas, 2018). Así este tipo de investigaciones son pertinentes, ya que con los resultados obtenidos se pueden generar políticas encaminadas a la sostenibilidad de los recursos que brinden los cuerpos de agua, en Colombia esta regulación legal está amparada en la Ley 99 de 1993 y está relacionada con la formulación, concertación y adopción de políticas orientadas a regular las condiciones de conservación y manejo de ciénagas, pantanos, lagos, lagunas y demás ecosistemas hídricos continentales (Ley 99 de 1993).

En zonas como el Embalse del Guájaro, los habitantes de sus riveras ven el recurso pesquero como un sustento económico y nutricional. (Valdelamar-Villegas et al., 2015). Las especies con mayor mercado juegan un papel importante como fuente de alimento y sustento para muchas comunidades, de allí su importancia de estudio y caracterización de los posibles impactos ambientales que afecten a estos organismos.

4. MARCO TEÓRICO

Antecedentes.

A nivel internacional existen diversos estudios en los que se han evaluado los procesos de bioacumulación de metales pesados en una gran variedad de matrices tisulares y orgánicas de los peces. Entre estos destacan:

En México Vázquez *et al.*, (2008) analizaron el contenido de metales pesados en tejido muscular del bagre, *Ariopsis felis* en el sur del golfo de México durante el período 2001-2004. La investigación fue efectuada buscando establecer un marco de referencia ambiental para este organismo. La concentración metálica siguió el orden: Hg<Co<Pb<Ni<V<Cr. Para esta investigación dentro de los resultados se mostró tendencia al aumento con respecto al tiempo en el contenido de cromo, mercurio y níquel, e incluso también se planteó como conclusión que los metales incorporados con mayor facilidad en el tejido muscular de *A. felis* podrían estar influyendo en rutas metabólicas, o interactuando con otros metales para favorecer su incorporación (correlación positiva) o liberación. En Valencia (España), Jaramillo (2009) en un estudio sobre la biología, la fenología y los hábitos alimenticios de cinco especies de peces bentónicos de interés comercial, como el salmonete de roca (*Scorpaena scrofa*), la rata (*Uranoscopus scaber*) y el torpedo común o vaca (*Torpedo torpedo*), encontró una la relación entre los aspectos ecológicos y fisiológicos de los peces con la incorporación de sustancias contaminantes como metales pesados, y sus patrones de acumulación en diferentes órganos y tejidos. En tanto que Espinoza & Falero (2015), en el río Tumbes (Ecuador) evaluaron las cantidades de mercurio, cadmio, plomo y arsénico, en tejido muscular, en siete especies de interés comercial (perinche, dica, mojarra, chalaco, camotillo, lisa y sábalo), encontrando patrones de asociación similares a los descritos en la anterior investigación.

En Colombia se han realizado diferentes estudios sobre la contaminación por metales pesados y la biología reproductiva de diferentes especies (Osorio, 2010; Alvares, 2011; Ortegón *et al.*, 2014; Valdelamar *et al.*, 2015; Ortega-Herrera y Peña-Coronado, 2020). En primera instancia Valdelamar *et al.*, (2015) evaluaron los aspectos reproductivos de *Triportheus magdalenae* en el canal del Dique, obteniendo como resultado cuatro estados de desarrollo gonadal macroscópico (inmaduro, inicio de maduración, en maduración y maduro). También encontraron que la especie presenta un tipo de desove asincrónico parcelado, y además con el índice de IGS se observó que *Triportheus magdalenae* se

caracteriza por poseer tres periodos de reproducción; el primero en agosto a octubre, el segundo de enero a marzo y el tercero de abril a junio. Ortega y Peña, (2020); evaluaron las concentraciones de metales pesados como Hg, Pb, Zn y Cr, en el tejido muscular de especies ícticas (mojarra negra (*Oreochromis niloticus*), arenca (*Triportheus magdalenae*), barbudo (*Pimelodus blochii*), doncella (*Ageneiosus cáucanus*), viejito (*Cypocharax magdalenae*), mojarra amarilla (*Caquetaia kraussi*), pacora (*Plagioscion magdalenae*) y tilapia (*Oreochromis spp*). En el Embalse del Guájaro, obteniendo como resultados que ninguna de las especies sobrepasó el valor del riesgo potencial para los metales pesados. Marrugo *et al* 2008, al analizar las concentraciones de Hg y metilmercurio en *P. magdalenae* (Bocachico), *P. magdalenae* (Pacora) y *H. malabaricus* (Moncholo), especies consumidas por habitantes cercanos al municipio de Montecristo (Bolívar, Colombia), encontraron una alta proporción de Hg en forma de metilmercurio. Fuentes-Gándara et al., (2018) evaluaron las concentraciones de metales pesados en el tejido muscular y hepático de especies ícticas de la ciénaga, empleando espectrofotometría de absorción atómica, encontrando concentraciones de Zn, Pb, Ni y Cr correspondientes a $28.71 \pm 14.1 \mu\text{g/g}$, $0.31 \pm 0.32 \mu\text{g/g}$, $0.22 \pm 0.07 \mu\text{g/g}$ y $1.31 \pm 0.68 \mu\text{g/g}$, respectivamente; describiendo así procesos de acumulación significativos de estos contaminantes en esta biota.

Metales pesados

Los metales pesados refieren a cualquier elemento químico metálico o metaloide que tenga una alta densidad (>5) y sea toxico en concentraciones mínimas, la toxicidad se debe a que presentan una alta persistencia y rápida acumulación en los ecosistemas acuáticos, además de su capacidad de combinarse con una gran variedad de moléculas orgánicas (Valarezo, 2010; Briffa et al., 2020). No obstante, en este grupo se encuentran los metales esenciales para la supervivencia de los organismos.

Los metales pesados constituyen una fuente de contaminación en los ambientes acuáticos, las especies ícticas que en ellos habitan son las principales afectadas por su posición en la cadena alimenticia y el contacto permanente con la columna de agua. Los metales pesados principalmente se agrupan en elementos como el cadmio, el plomo y el mercurio, entre otros; estos metales representan un riesgo potencial para al ambiente, en especial cuando ingresan a los sistemas biológicos de los diferentes organismos, ya que la biota es incapaz de metabolizarlos naturalmente; tendiendo a desencadenar procesos de bioacumulación en las redes tróficas, alcanzando por consiguiente altos niveles de toxicidad (Mancera y Álvarez, 2006; Ajsuvakova et al., 2020).

Metales como el cadmio, plomo y mercurio se destacan por ser los que más impactos negativos causan en el ambiente, debido a que reúnen y comparten características como: la generación de efectos adversos sobre la biología y la ecología de la biota, sobre las variables fisicoquímicas del medio, la bioacumulación, la persistencia y la movilidad con el viento y los flujos de agua (Ramírez, 2002).

Mercurio en peces

En lo relativo al mercurio, desde inicio de la era industrial sus niveles han aumentado en el ambiente considerablemente, hasta el punto de alcanzar concentraciones que afectan los ecosistemas. En el agua y en el suelo, bacterias metanógenas, a través de un proceso de metilación, transforman el Hg^{+2} en MeHg, la forma más tóxica de este metal. Esta modificación lo hace más lipofílico, por lo cual se acumula fácilmente en la cadena trófica animal. El MeHg se une a las proteínas de las algas y del plancton, y de estos últimos se alimentan los peces, ingresando de esta manera a los eslabones consumidores de la red trófica (Gaiolia et al., 2012). En concreto, la forma bioactivada más común de este elemento que corresponde al metilmercurio, y a nivel reproductivo en los peces tiende a causar una tasa de fertilización muy reducida, debido a una activación prematura de la ova por la ruptura de las vesículas corticales y al posterior bloqueo del micrópilo, ya que las formas inorgánicas de Hg por su parte tienden más a estar asociadas con una reducción en el diámetro del micrópilo (Daza et al., 2005; Ye et al., 2020).

Mercurio y ciclo reproductivo de los peces

El mercurio puede afectar la reproducción de los peces, ya que puede bioacumularse en las gónadas y en varios compartimentos tisulares del aparato reproductor, como los ovarios y los testículos (Crump y Trudeau, 2009), y alterar la producción de gametos y el potencial reproductivo. En este sentido, se ha demostrado que la exposición crónica al mercurio en peces puede causar disminución en la tasa de eclosión de los huevos y detrimentos en la viabilidad y supervivencia de los alevinos y de los peces juveniles (Massányi et al., 2020). En cuanto a los efectos endocrinos, el mercurio puede interferir con la función hormonal, afectando la producción y liberación de hormonas sexuales, como el estradiol y la testosterona, lo que puede tener consecuencias en la maduración sexual y en el apartado comportamental de los peces; además, el mercurio tiende a alterar la función de la glándula tiroideas, lo que puede tener impactos sobre el crecimiento y desarrollo, así como en su

capacidad de respuesta a estímulos ambientales y a cambios en las condiciones del agua y las demás variables y factores que componen sus hábitats (Govoni et al., 2017).

Dada la capacidad del mercurio y sus formas bioactivas para interactuar y poseer afinidad con los receptores hormonales y las vías de señalización endocrina de los peces, la contaminación con este metal pesado involucra una alta probabilidad de generar disrupciones funcionales de la glándula tiroidea, lo que puede tener implicaciones negativas para la reproducción de manera individual y poblacional; puesto que esta glándula posee un papel crucial en la regulación y la retroalimentación química de los ciclos reproductivos en las especies ícticas; por consiguiente, la síntesis y liberación de hormonas tiroideas se pueden ver seriamente comprometidas, como por ejemplo la tiroxina (T4) y la triyodotironina (T3), que son esenciales para el crecimiento, la maduración y la reproducción de los peces (Zhang et al., 2016). De igual forma, el mercurio tiene efectos adversos sobre la estructura y el metabolismo hepático de la ictiofauna, ya que tiende a alterar la dinámica funcional de las células hepáticas, así como la capacidad del hígado para sintetizar y asimilar metabolitos, y para intervenir en la autorregulación de los ciclos reproductivos (Monteiro et al., 2010). Este fenómeno suele manifestarse fundamentalmente mediante un incremento exacerbado de especies reactivas de oxígeno (ROS) y radicales libres en la matriz hepática; induciendo daño oxidativo que ocasiona disfunciones en el ciclo celular y, por tanto, en las rutas hormonales de los peces, disminuyendo significativamente su aptitud y viabilidad reproductiva (Fu et al., 2017). En conjunto con esto, a nivel citogenético se ha reportado que la exposición a mercurio desencadena efectos genotóxicos y teratogénicos que desnaturalizan en gran medida la expresión de genes involucrados en la regulación hormonal y en la maduración de los órganos reproductores; ya que por ejemplo, la exposición a mercurio está fuertemente asociada a un incremento en la expresión de genes relacionados con procesos inflamatorios e inmunológicos en los ovarios y testículos de los peces, impactando de forma crítica la gametogénesis y la calidad de las células reproductivas formadas (Romano et al., 2020; Malinowski et al., 2021).

En términos generales, es bien sabido que los metales pesados como el Hg desencadenan afecciones crónicas y severas en los organismos contaminados, sin embargo, se hace necesario ahondar más en los efectos adversos causados por estos contaminantes en el organismo y en el metabolismo de los peces. Un ejemplo de esto, son los efectos del Hg sobre la respuesta inmune y la aptitud reproductiva de la ictiofauna, ya que se ha

evidenciado que los organismos expuestos, tienden a presentar un descenso significativo en la viabilidad de las células sanguíneas hepáticas, además de afectaciones en las respuestas fagocíticas de los polimorfonucleares, así como efectos deletéreos sobre la producción y la calidad de las células reproductivas (Vargas y Salazar, 2012; Rhea et al., 2013).

Clasificación taxonómica de *Triportheus magdalenae* (Steindachner, 1878)

Reino: Animalia

Phylum: Chordata

Subphylum: Vertebrata

Clase: Actinopterygii

Subclase: Neopterygii

Infraclase: Teleostei

Superorden: Ostariophysii

Orden: Characiformes

Familia: Triportheidae

Género: *Triportheus* (Cope, 1872)

Especie: *Triportheus magdalenae* (Steindachner, 1878)

Biología de *Triportheus magdalenae*

Este pez es un charácido perteneciente a la familia Triportheidae, el cual es endémico de la cuenca del río Magdalena (Colombia), (Villa et al., 2006), que puede alcanzar una longitud de 24 cm, presentando hábitos detritívoros y zooplanctónicos. En este sentido, *Triportheus magdalenae* presenta tres periodos reproductivos marcados: el primero ocurre de agosto a octubre, el segundo de enero a marzo y el tercero de abril a mayo, estando estos períodos influenciados por los cambios estacionales y climatológicos del medio. La fecundidad de los peces está influenciada por la dinámica de algunos procesos en el organismo, al igual que por las características del medio en que estos habitan. En este sentido, *Triportheus*

magdalenae habita principalmente en humedales de agua dulce con bajos valores de dióxido de carbono y con acidez moderada. Así, esta especie juega un papel importante en la cadena trófica de los ecosistemas acuáticos, principalmente como reguladora del plancton (Valdelamar-Villegas et al., 2015).



Figura 1. *Triportheus magdalenae* (Steindachner, 1878)

Caracteres morfológicos

Triportheus magdalenae es una especie que se caracteriza por tener el cuerpo alargado y comprimido lateralmente. Posee una quilla en la parte media ventral y grandes aletas pectorales. La línea lateral está claramente definida, adopta una forma curva ventralmente y presenta por lo general entre 37 y 42 escamas (Valdelamar-Villegas, 2018).

Reproducción y ambiente

Factor de condición K

Es uno de los índices reproductivos o morfofisiológicos, el cual compara la “condición” o “bienestar” de un pez o población, basándose en que los peces de mayor peso, a una determinada longitud, presentan una mejor condición (Cifuentes et al., 2012). el factor de condición (K) son descriptores de gran interés en la biología de poblaciones de peces, ya que aportan información fundamental sobre estrategias de crecimiento, estado nutricional y reproducción (Cifuentes et al., 2012).

Índices de actividad reproductiva

En términos generales, los índices de actividad reproductiva permiten evaluar el estado funcional de los individuos de una comunidad, así como la intensidad reproductiva de la comunidad dominante, y como sus poblaciones, especies e individuos responden y se adaptan a alteraciones y perturbaciones significativas en su hábitat (Vazzoler et al., 1996).

Índice gonadosomático o gonadal (IGS)

Es el más común, también llamado coeficiente de madurez. Se describe como el peso de la gónada expresado como porcentaje del peso corporal eviscerado. (Saborido et., al 2008). Y se constituye como un indicador exploratorio del potencial reproductivo de los peces.

Índice hepatosomático (IHS)

Es el peso del hígado en proporción al peso corporal, expresado en porcentaje. Permite cuantificar los cambios cíclicos en el peso del hígado, que son debidos fundamentalmente a la actividad hormonal, a la acumulación de lípidos y a la síntesis de vitelogenina, proteína precursora del vitelo almacenado en los ovocitos durante la vitelogénesis (Saborido et al., 2008).

5. OBJETIVOS

Objetivo General

Evaluar el efecto del mercurio (Hg) sobre la biología reproductiva de la arenca (*Triportheus magdalenae*) en el Embalse del Guájaro

Objetivos Específicos

- Estimar los índices gonadosomático (IGS) y hepatosomático (IHS), el factor de condición (K) y la proporción sexual de *Triportheus magdalenae*.
- Determinar las concentraciones de mercurio (Hg) en el hígado, en las gónadas y en el músculo de *Triportheus magdalenae*.
- Determinar el efecto del mercurio (Hg) sobre los índices reproductivos de *Triportheus magdalenae*.
- Determinar posibles alteraciones histopatológicas de los tejidos hígado y gónadas de la arenca.

6. METODOLOGÍA

Área de estudio

El área de estudio está conformada por el Embalse del Guájaro, el cual está situado al sur del departamento del Atlántico, en la región Caribe de Colombia. En este sentido, el departamento de Atlántico se localiza al norte del país entre los 10°15'36"-11°06'37" grados de latitud Norte y los 74°42'47"-75°16'34" grados de longitud Oeste (Gobernación del Atlántico, 2014). Así mismo, el Embalse del Guájaro está ubicado puntualmente entre los 10°25'-10°38' grados de latitud Norte y los 75°00'-75°08' grados de longitud Oeste. A nivel orográfico, este cuerpo de agua léntico presenta elevaciones medias que oscilan entre 3 m.s.n.m y 13 m.s.n.m; el embalse se sitúa en la margen izquierda de la cuenca del río Magdalena, teniendo conexión directa con las aguas del canal del Dique en su zona sur (Corporación autónoma regional del Atlántico – CRA, 2014).

El Embalse del Guájaro es el principal depósito hídrico del departamento del Atlántico, el cual fue construido en 1965 y abarca un área de 16.000 hectáreas, presentando una capacidad de almacenamiento de agua de 400.000.000 m³ y un volumen efectivo de 230.000.000 m³; el embalse posee una capacidad de drenaje de 12.000 hectáreas distribuidas en un distrito agrícola de riego y de drenaje, así mismo posee dos controles hidrodinámicos a través de las compuertas que conectan sus aguas con las del canal del Dique (Torres-Bejarano et al., 2016), siendo alimentado mediante este mecanismo con aguas provenientes del río Magdalena. El Embalse de Guájaro se encuentra distribuido entre las jurisdicciones de los municipios de Repelón, Manatí y Sabanalarga, en el departamento del Atlántico. El clima en esta región es tropical (cálido-seco) con temperaturas medias que anualmente oscilan en torno a los 27,8 °C y los 28°C (García-Alzate et al., 2016). (Figura 2).

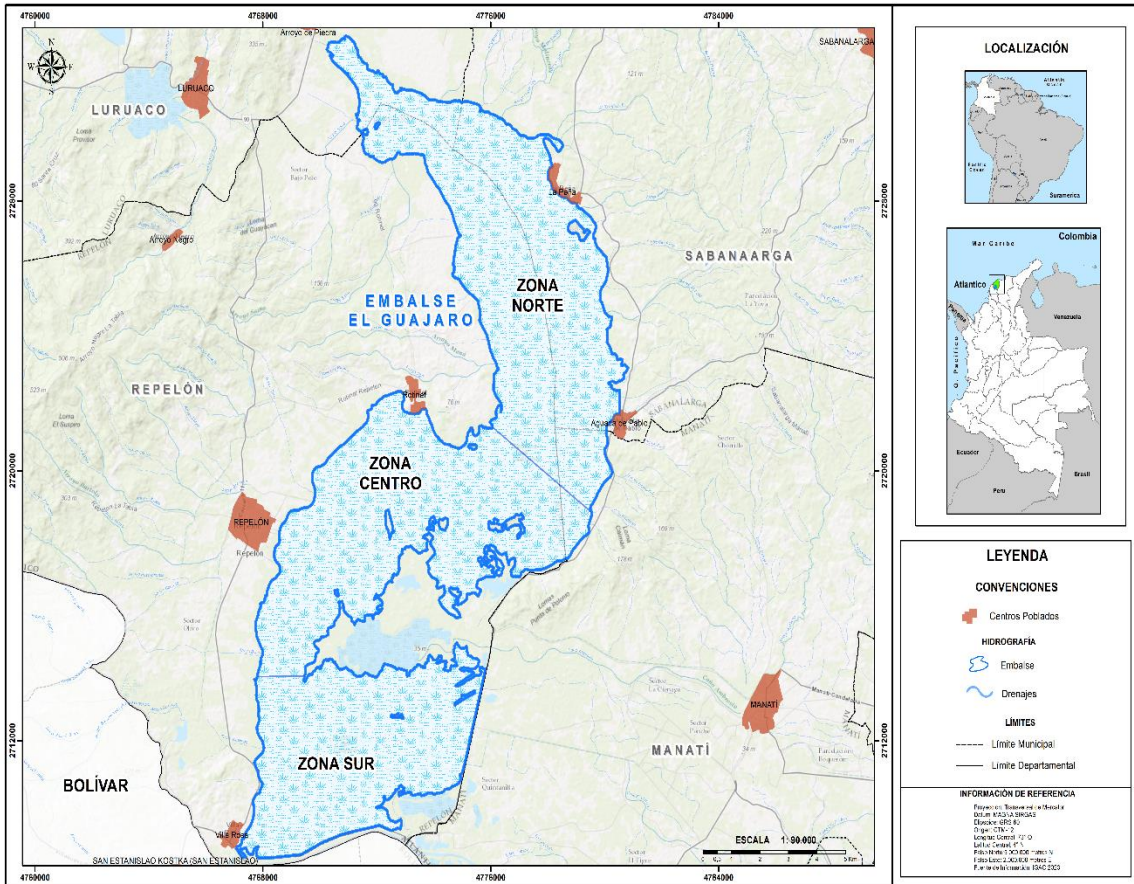


Figura 2. Área de estudio: Embalse del Guájaro y sus zonas

De manera contextual, es necesario señalar que el Canal del Dique está localizado en la región Caribe colombiana y la conforman diecinueve municipios: siete en el departamento del Atlántico, once en Bolívar y uno en Sucre. Esta zona se distingue por ser una llanura aluvial conformada por un complejo de humedales que poseen una riqueza hídrica, compuesta por ciénagas que amortiguan el flujo del canal, presentando en gran parte de su extensión suelos inundables ricos en vegetación acuática y de gran biodiversidad de especies terrestres y piscícolas. En el tramo de la región alta del Canal del Dique se encuentran los municipios de Manatí, Repelón, Santa Lucía, Sabanalarga, Luruaco, Suan, Campo de la Cruz, Calamar, Arroyo Hondo, Soplaviento y San Cristóbal (Aguilera, 2006).

Diseño muestral y captura de *Triportheus magdalenae*

En el Embalse del Guájaro los muestreos se realizaron mensualmente, durante un ciclo de 4 meses, los cuales abarcaron los meses de noviembre, diciembre, enero y febrero entre los años de 2021 y 2022 respectivamente. En lo referente a los peces estos fueron suministrados por los pescadores artesanales del centro de acopio del Embalse del Guájaro, un total de N=42 especímenes en 4 muestreos, los peces fueron obtenidos en función de su abundancia en el medio y en función de su viabilidad para los propósitos del presente estudio. Colectándose n=16 individuos en el primer muestreo (noviembre de 2021), n=4 individuos en el segundo muestreo (diciembre de 2021), n=13 individuos (enero de 2022), y n=9 individuos en el cuarto muestreo (febrero de 2022). Las capturas de los peces se llevaron a cabo mediante el uso de atarrayas (ojos de malla de 1 cm y 2.5 cm, con 3 m y 5 m de diámetro, respectivamente). Se capturaron individuos adultos, machos y hembras al azar de *Triportheus magdalenae*.

Morfometría y pesajes

Una vez realizadas las capturas, los peces fueron debidamente sexados y se determinó *in situ* con el uso de una balanza analítica de ± 0.5 g de precisión el peso total y el peso eviscerado de los ejemplares, de la misma forma mediante el uso de un ictiómetro se estableció la longitud total, estándar y horquilla del pez, medidas desde la sínfisis mandibular hasta la extremidad distal del radio más largo de la aleta caudal (Vazzoler, 1982). Para la extracción de los tejidos y los órganos estudiados, se removió una porción de 10 g de la parte del musculo dorsal del pez, con un cuchillo teflón, además se realizaron disecciones para extraer las muestras de los tejidos hepático y gonadal, estas fueron empacadas, al igual que las muestras del tejido muscular individualmente en bolsas ziploc y mantenidas en cadena de frío desde su extracción y trasladadas inmediatamente al laboratorio de Aguas, Química aplicada y Ambiental de la universidad de Córdoba - Colombia (Fuentes-Gándara et al., 2018).

Histología hepática y gonadal de *Triportheus magdalenae*

Para la evaluación de los efectos tisulares de la contaminación con Hg sobre los tejidos claves del ciclo reproductivo de *Triportheus magdalenae* (hígado y gónadas), se realizó un procesamiento histológico de los tejidos aplicándoles un tratamiento de imbibición en parafina, ejecutando de esta forma cortes transversales de 6 µm y sometiendo los cortes a un proceso de tinción con hematoxilina y eosina (Uchida et al., 2004). En este sentido, las láminas histológicas con los de hígado y gónadas, fueron observadas mediante un microscopio óptico Olympus con un objetivo de 1000x, con una cámara acoplada Leica.

Índice gonadosomático (IGS), hepatosomático (IHS) y factor de condición (K) de *Triportheus magdalenae* en el Embalse del Guájaró

Reproducción

Para la medición de los caracteres sexuales particulares de los peces, se consideró el color y la forma de los ovarios y de los testículos de las especies estudiadas. Posteriormente los ovarios y los testículos de los peces muestreados de *Triportheus magdalenae* se caracterizaron macroscópicamente, teniendo en cuenta características morfológicas como: coloración, tamaño de la gónada, espacio que ocupa en la cavidad abdominal, irrigación sanguínea, presencia de ovocitos o semen (Vazzoler, 1982).

Manejo y análisis de datos

La actividad reproductiva se determinó a través de los índices gonadosomático (IGS), hepatosomático (IH) y el factor de condición (K). (Maddock & Burton, 1998).

- **Índice gonadosomático (IGS)** o de madurez gonadal: Nos indica el estado de desarrollo de la gónada se analiza con la Ecuación 1:

$$\text{IGS} = \frac{\text{Peso gónada (g)}}{\text{Peso total (g)}} \times 100$$

Ecuación 1

- **Índice hepatosomático (IH):** Medida adicional de la condición del pez, se calculó con la siguiente Ecuación 2.

$$IH = \frac{\text{Peso hígado (g)}}{\text{Peso total (g)}} \times 100$$

Ecuación 2

- **Factor de condición K:** Es uno de los índices reproductivos y morfofisiológicos, el cual compara la “condición” o “bienestar” de un pez o población, basándose en que los peces de mayor peso, a una determinada longitud, presentan una mejor condición. De este modo, el factor de condición (K) se constituye en un descriptor de gran interés en la biología y ecología de poblaciones de peces, ya que aporta información fundamental sobre estrategias de crecimiento, estado nutricional y reproducción (Cifuentes et al., 2012). Ecuación 3:

$$K = \frac{\text{Peso total (g)}}{\text{Longitud total}^3 \text{ (cm)}} \times 100$$

Ecuación 3

Determinación de las concentraciones de mercurio en los tejidos (hígado, gónadas y músculo) de *Triportheus magdalenae*.

Para los análisis de las cantidades bioacumuladas de mercurio total (T-Hg) en las muestras de músculo dorsal, de hígado y de gónadas de los individuos de *Triportheus magdalenae* estudiados, se pesaron entre 15-30mg de cada muestra a las que se le aplicó un procesamiento digestivo de preparación ácida hidrobromica (HBr) para la cuantificación de las concentraciones de mercurio por el método US EPA 7473: descomposición térmica, amalgamación y espectrofotometría de absorción atómica, usando el analizador directo de mercurio DMA-80 TriCell Milestone (Salazar-Camacho et al., 2021). De este modo el material de calidad para la certificación por triplicado de los análisis fue el DORM-3 (382 ± 60 µg/kg). Así mismo, los límites de detección y cuantificación correspondieron a 0,75 µg/kg y 1,8 µg/kg, respectivamente. Como parámetro de calidad y reproductividad adicional, se implementó un procesamiento de analítico por duplicado, a través del que se determinó el porcentaje de recuperación medio equivalente a un 99,15% (n=16), con una relación de linealidad $R^2 > 0,998$ y una precisión total del $CV < 5\%$.

Tratamiento estadístico

La normalidad y la homogeneidad de las varianzas en las concentraciones de Hg en el músculo, en el hígado y en las gónadas de *Triportheus magdalenae*, así como en los índices morfofisiológicos estudiados (IGS, IHS y el Factor de condición K) fueron determinadas utilizando la prueba de Shapiro-Wilk y el test de Bartlett con un nivel de significancia $p < 0,05$, respectivamente. De esta manera se evaluaron posibles correlaciones entre las concentraciones de Hg en estos tejidos y los índices morfofisiológicos en cada estación, implementando los coeficientes de correlación de Pearson ($p < 0,05$). Así mismo, las diferencias significativas ($p < 0,05$) fueron calculadas a partir de un ANOVA y la prueba *post hoc* de la significancia honesta de Tukey (HSD) para comparar los rangos de las medias de las concentraciones de Hg en el músculo, en el hígado y en las gónadas de *Triportheus magdalenae* en cada muestreo, y los rangos de las medias del IGS, del IHS y del Factor de condición K en cada muestreo. El tratamiento de la información fue ejecutado usando el software estadístico especializado NCSS 2021.

7. RESULTADOS

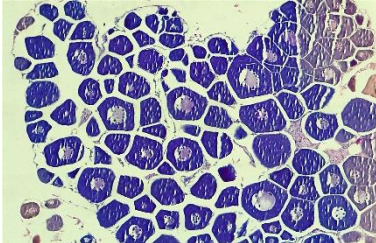
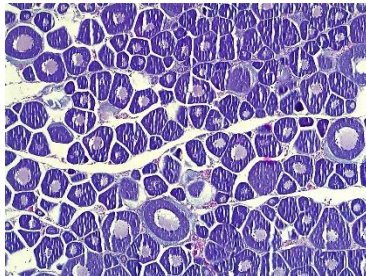
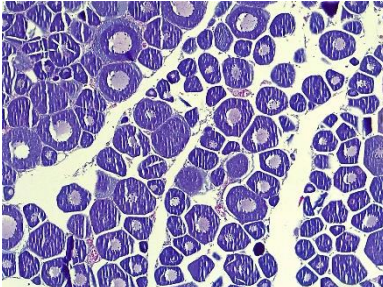
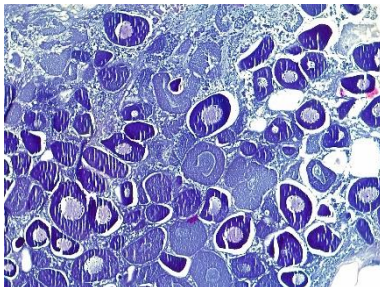
Los resultados acerca del número de peces de *Triportheus magdalenae* capturados en función del sexo por cada mes o muestreo, señalan que en términos generales el porcentaje de hembras capturadas fue notablemente superior al porcentaje de machos, correspondiendo estas cifras a un 80,95% de hembras y a un 19,05% de machos del total de la población. Dichos porcentajes describen una proporción sexual para la población aproximada de 1 macho por cada 4 hembras. De esta forma en el primer muestreo realizado durante noviembre de 2021, se registró el mayor número de hembras y machos de manera conjunta, en tanto que en el segundo muestreo realizado en el mes de diciembre de 2021 se registró la abundancia más baja de todos los muestreos (Tabla 1).

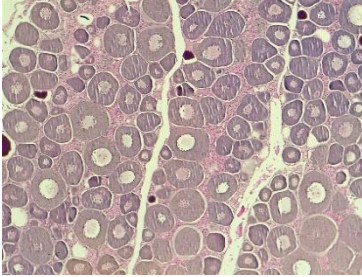
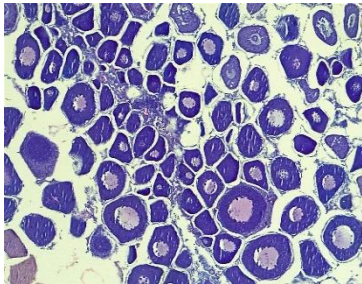
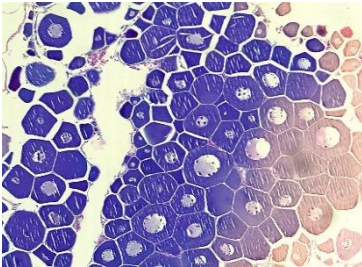
Tabla 1. Caracterización de *Triportheus magdalenae* en función del sexo durante cada muestreo

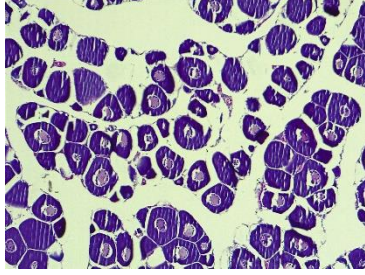
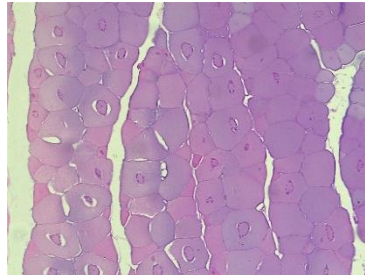
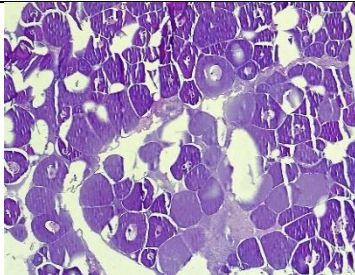
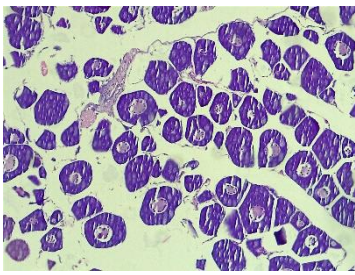
Mes/Muestreo	Hembras	Machos	Total
Noviembre (M1)	11	5	16
Diciembre (M2)	4	0	4
Enero (M3)	11	2	13
Febrero (M4)	8	1	9
Total	34	8	42

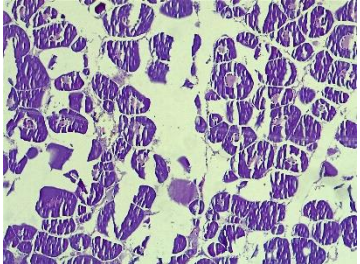
Por otra parte, el análisis histológico de las gónadas de *Triportheus magdalenae*, arroja que todos los ejemplares (muestras de gónadas viables) fueron hembras, encontrándose estas en un estado inmaduro (Tabla 2). En este sentido, se hace notable la abundancia y característica común de ovocitos en estados incipientes del desarrollo y la maduración gamética, los cuales a nivel histológico no describen la ocurrencia de estadios de diferenciación manifiestos. Así mismo, tampoco se observan daños celulares y epiteliales derivados de la contaminación con Hg.

Tabla 2. Resultados histológicos de las gónadas de *Triportheus Magdalenae* en el Embalse del Guájaro

ID	Estado	Descripción microscópica	Vista microscópica
01	Inmaduro/Reposo	Las lamelas ovulíferas se evidencia definidas, predominan ovocitos perinucleolares de diferentes tamaños y con variación en la cantidad de nucléolos.	
02	Inmaduro/Reposo	Las lamelas ovulíferas se evidencia definidas, predominan ovocitos perinucleolares de diferentes tamaños y con variación en la cantidad de nucléolos.	
03	Inmaduro/Reposo	Las lamelas ovulíferas se evidencia definidas, predominan ovocitos perinucleolares de diferentes tamaños y con variación en la cantidad de nucléolos.	
04	Inmaduro/Reposo	Las lamelas ovulíferas se evidencia definidas, predominan ovocitos perinucleolares de diferentes tamaños. En las gónadas de este ejemplar se observa heterogeneidad en la composición del tejido, parte de los ovocitos se observan desintegrados, sin embargo, no puede atribuir a una alteración patológica, puesto	

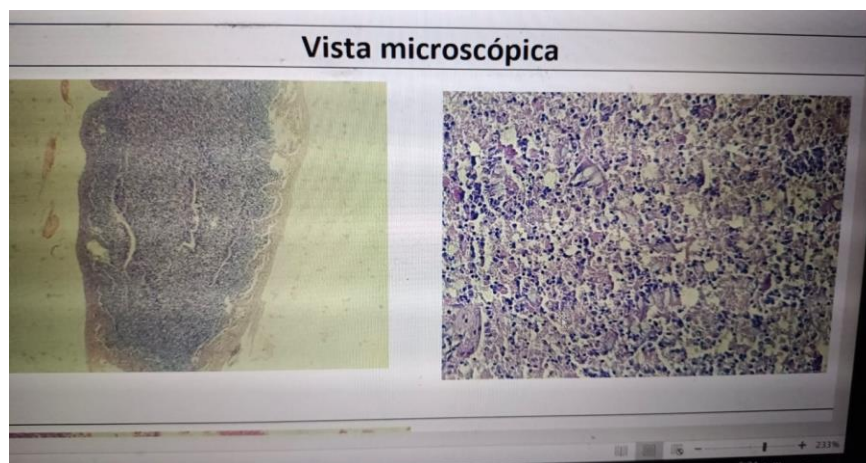
ID	Estado	Descripción microscópica	Vista microscópica
		que los cortes presentan resequead del tejido y artefactos por coloración.	
05	Inmaduro/Reposo	Las lamelas ovulíferas se evidencia definidas, predominan ovocitos perinucleolares de diferentes tamaños y con variación en la cantidad de nucléolos.	
06	Inmaduro/Reposo	Las lamelas ovulíferas se evidencia definidas, predominan ovocitos perinucleolares de diferentes tamaños y con variación en la cantidad de nucléolos.	
08	Inmaduro/Reposo	Las lamelas ovulíferas se evidencia definidas, predominan ovocitos perinucleolares de diferentes tamaños y con variación en la cantidad de nucléolos.	

ID	Estado	Descripción microscópica	Vista microscópica
11	Inmaduro/Reposo	Predominan ovocitos perinucleolares de diferentes tamaños y cantidad de nucleolos.	
12	Inmaduro/Reposo	Las lamelas ovulíferas se evidencia definidas, predominan ovocitos perinucleolares de diferentes tamaños y con variación en la cantidad de nucléolos.	
13	Inmaduro/Reposo	Las lamelas ovulíferas se evidencia definidas, predominan ovocitos perinucleolares de diferentes tamaños y con variación en la cantidad de nucléolos.	
14	Inmaduro/Reposo	Las lamelas ovulíferas se evidencia definidas, predominan ovocitos perinucleolares de diferentes tamaños y con variación en la cantidad de nucléolos.	

ID	Estado	Descripción microscópica	Vista microscópica
16	Inmaduro/Reposo	El corte presenta resequead del tejido, sin embargo, se observa mayormente ovocitos perinucleolares de diferentes tamaños.	

En cuanto al análisis del tejido hepático, se observa que a nivel general las muestras de este órgano presentaron alteraciones histológicas importantes, entre las cuales se destacaron trastornos degenerativos, presentándose con mayor frecuencia procesos de vacuolización severa de borde irregular con una extensión de la lesión en el tejido (>50%) y en menor proporción, necrosis moderada, hepatitis linfocítica multifocal, hepatopancreatitis necrotizante multifocal moderada, así como una individualización de los hepatocitos y de hemorragias moderadas multifocales (Tabla 3).

Tabla 3. Resultados histológicos del tejido hepático de *Triporthus Magdalenae* en el Embalse del Guájaro



En lo relativo a la bioacumulación de Hg, las mayores concentraciones medias de este metal en el músculo, en el hígado y en las gónadas de *Triporthus magdalenae* fueron halladas en los peces del primer muestreo, así mismo estos individuos describieron los índices gonadosomáticos (IGS) y los Factores de condición K más elevados. Por su parte, los mayores índices hepatosomáticos (IHS) fueron determinados en los peces del cuarto

muestreo. Las concentraciones más bajas de Hg en el músculo, en el hígado y en las gónadas de *Tripurtheus magdalenae* se cuantificaron en los peces del tercer muestreo, del cuarto muestreo y del segundo muestreo respectivamente. En contraposición a esto, las máximas concentraciones de este metal pesado fueron medidas en el músculo de los peces del tercer muestreo, en el hígado y en las gónadas de los peces del primer muestreo. Complementariamente la mayor variación acumulada en las concentraciones de Hg en los tejidos evaluados y en los índices morfofisiológicos de *Tripurtheus magdalenae* (mostrada por los coeficientes de variación), fue detectada en los peces del tercer muestreo. En términos generales los peces del primer muestreo tendieron a acumular mayores concentraciones medias de Hg en el músculo, en el hígado y en las gónadas (Tabla 4).

Tabla 4. Análisis descriptivo de las concentraciones medias de Hg en los tejidos estudiados (ug/kg) y de los índices morfofisiológicos de *Tripurtheus magdalenae* en los 4 muestreos

Muestreo	Parámetro	Media ± Sd	Min	Mediana	Max	CV	n
1	Hg en músculo	71,03 ± 27,67	34,88	62,04	124,9	0,389	16
	Hg en hígado	84,37 ± 47,36	36,55	77,27	240,8	0,561	
	Hg en gónadas	106,9 ± 120,7	32,76	52,36	486,1	1,121	
	IGS	0,464 ± 0,564	0,092	0,135	1,714	1,214	
	IHS	1,345 ± 0,351	0,865	1,365	2,142	0,261	
	Factor k	0,567 ± 0,047	0,499	0,556	0,661	0,083	
2	Hg en músculo	52,38 ± 20,91	33,33	49,94	76,31	0,399	4
	Hg en hígado	43,61 ± 13,77	26,41	44,95	58,15	0,315	
	Hg en gónadas	19,59 ± 9,771	10,53	17,97	31,88	0,498	
	IGS	0,138 ± 0,033	0,105	0,141	0,166	0,237	
	IHS	1,633 ± 0,819	0,919	1,557	2,510	0,501	
	Factor k	0,497 ± 0,060	0,448	0,479	0,583	0,121	

3	Hg en músculo	54,68 ± 30,17	22,95	44,07	134,5	0,551	13
	Hg en hígado	47,30 ± 19,91	20,68	50,26	76,38	0,421	
	Hg en gónadas	61,16 ± 41,41	13,95	55,99	152,3	0,677	
	IGS	0,239 ± 0,317	0,106	0,151	1,291	1,327	
	IHS	0,789 ± 0,744	0,111	0,531	2,375	0,942	
	Factor k	0,540 ± 0,034	0,486	0,545	0,601	0,063	
4	Hg en músculo	47,60 ± 21,93	30,34	41,98	102,4	0,461	9
	Hg en hígado	35,85 ± 16,65	11,64	30,49	65,77	0,464	
	Hg en gónadas	34,66 ± 17,62	17,44	26,48	70,54	0,508	
	IGS	0,147 ± 0,022	0,109	0,147	0,185	0,151	
	IHS	1,714 ± 0,766	0,989	1,625	3,538	0,447	
	Factor k	0,561 ± 0,029	0,515	0,563	0,598	0,052	
Total							42

Los análisis de correlaciones entre las concentraciones de Hg en el músculo, en el hígado y en las gónadas, y los índices morfofisiológicos de *Triporthus magdalenae*, muestran que sólo presentaron significancia 2 correlaciones. Siendo significativas ($p < 0,05$) y negativas las correlaciones entre el Hg en las gónadas y el Factor de condición K de los peces del primer muestreo. En este sentido las correlaciones entre el Hg en las gónadas de *Triporthus magdalenae* y el índice hepatosomático (IHS) de los individuos del cuarto muestreo, también describieron significancia ($p < 0,05$) y una asociación negativa (Figura 3).

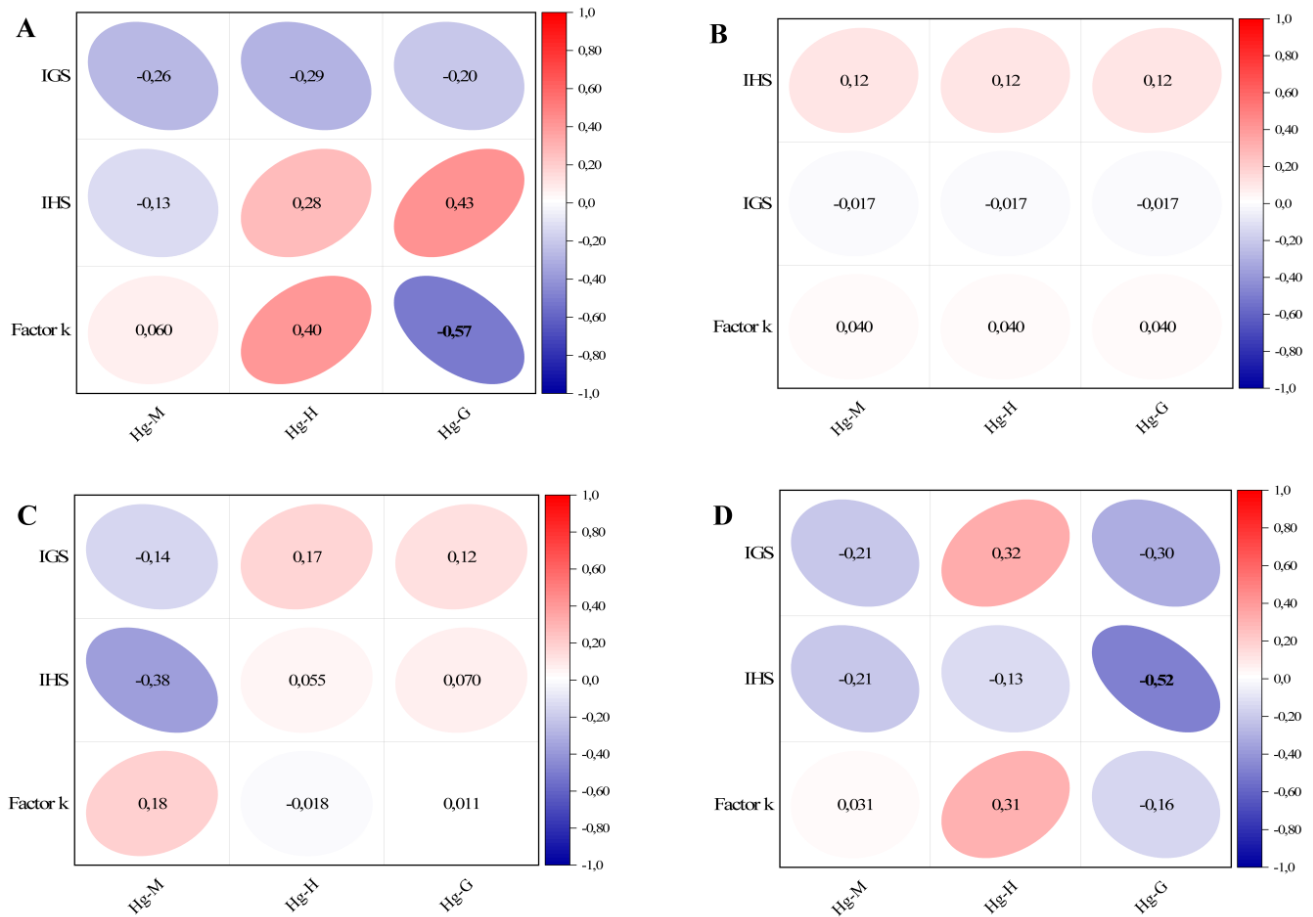


Figura 3. Coeficientes de Pearson ($p < 0,05$) y elipses para las correlaciones entre las concentraciones de Hg ($\mu\text{g}/\text{kg}$) en músculo (Hg-M), Hígado (Hg-H) y gónadas (Hg-G) y los índices morfofisiológicos de *Tripurtheus magdalenae* (en negrilla las correlaciones significativas)

A: primer muestreo **B:** segundo muestreo **C:** tercer muestreo **D:** cuarto muestreo

Los contrastes de las HSD de Tukey entre las concentraciones medias de Hg en el hígado, en las gónadas y en los índices morfofisiológicos de esta especie, revelan que para los cuatro muestreos solamente se presentaron diferencias significativas ($p < 0,05$) entre las medias de las cantidades de este metal pesado en el hígado, concretamente en los peces del primer muestreo respecto a los peces de los demás muestreos (Figura 4).

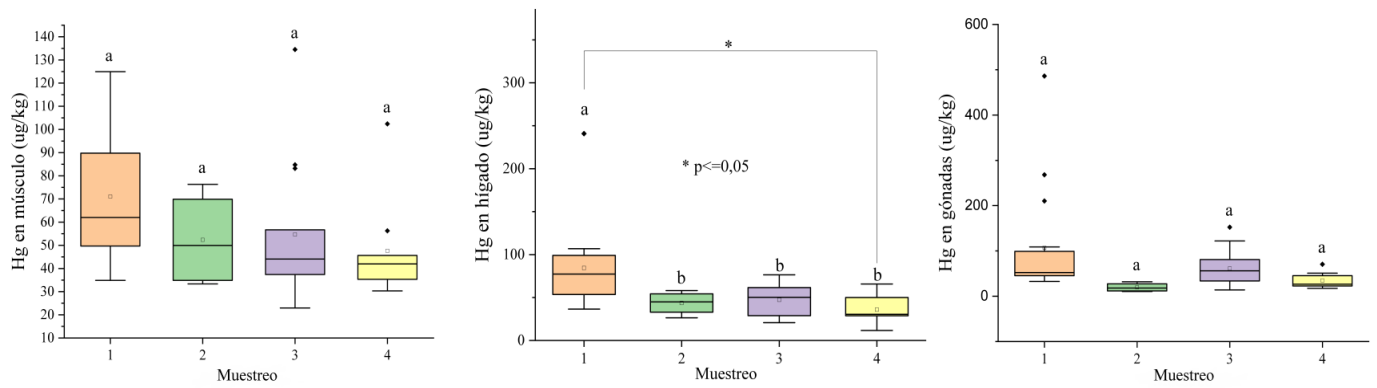


Figura 4. Comparaciones HSD de Tukey ($p < 0,05$) entre las concentraciones medias de Hg ($\mu\text{g}/\text{kg}$) en los tejidos evaluados de *Triportheus magdalenae* (las diferencias significativas están notadas con * y letra distintiva)

Por otra parte, las comparaciones entre las medias de los índices morfofisiológicos estudiados (IGS, IHS y el Factor de condición K), arrojan la ocurrencia de diferencias significativas ($p < 0,05$) en los índices hepatosomáticos (IHS) y los Factores de condición K en la población de *Triportheus magdalenae* evaluada. En primera instancia debido a que los IHS de los peces del tercer muestreo variaron de manera significativa respecto a los IHS de los peces de los demás muestreos; y a que los Factores de condición K de los peces del primer muestreo también describieron variaciones en sus distribuciones respecto a los individuos de los otros muestreos (Figura 5).

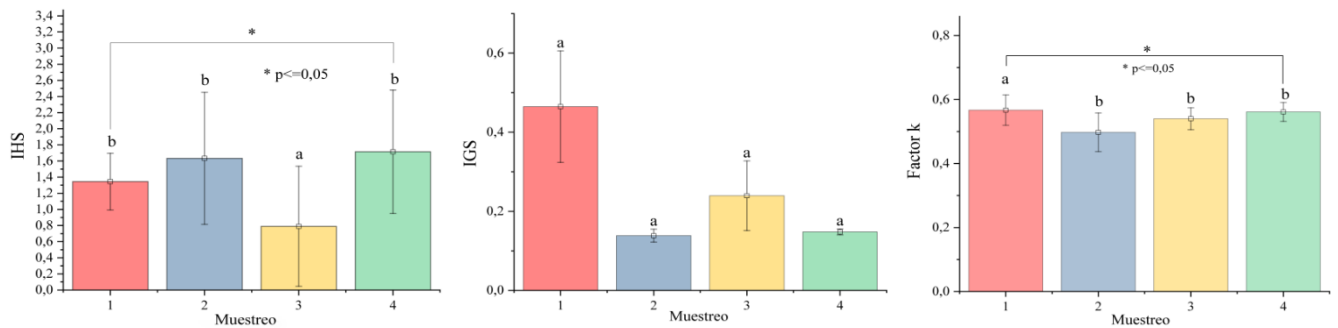


Figura 5. Comparaciones HSD de Tukey ($p < 0,05$) entre los índices morfofisiológicos de *Triportheus magdalenae* (las diferencias significativas están notadas con * y letra distintiva)

8. DISCUSIÓN

Los procesos contaminantes generados por el mercurio a partir de sus especies químicas en las distintas matrices de los ecosistemas acuáticos, puntualmente en los dulceacuícolas, se constituyen entre los principales tensores que alteran de manera drástica y significativa el equilibrio biótico de estos medios, en especial en la ictiofauna de la que hace parte *Triporthus magdalenae* (Subhadra et al., 1991; Hayati et al., 2019). En el presente estudio, las mayores concentraciones medias de Hg acumuladas en el músculo de esta especie fueron inferiores a las registradas en las investigaciones de referencia contrastadas, excepto a las reportadas por Olivero-Verbel et al., (2013) (Tabla 3). Estas investigaciones abordaron procesos de contaminación con Hg y otros metales pesados en *Triporthus magdalenae* en la zona de estudio y sus áreas de influencia; mostrando que existió una acumulación relativamente baja de este contaminante en el tejido muscular de la población de *Triporthus magdalenae* estudiada. Lo anterior podría ser el resultado de dinámicas acumulativas influenciadas en primera instancia por los bajos niveles hídricos que presentó el embalse durante los muestreos, los cuales fueron producto de la no apertura de las compuertas del control hidrodinámico que permiten el ingreso de las aguas desde canal del Dique, para finalmente repercutir sobre el número de individuos viables de *Triporthus magdalenae* muestreados y sobre la magnitud de las concentraciones de Hg acumuladas en el músculo, pero también en el hígado y en las gónadas de estos organismos (Torregroza-Espinosa et al., 2018; Valdelamar-Villegas, 2018).

Tabla 5. Concentraciones medias de Hg (ug/kg) en el músculo de *Triporthus magdalenae* en otros estudios realizados en el embalse de Guájaro

Referencia	Media ± Sd	n
Olivero-Verbel et al., (1997)	105 ± 56	35
Álvarez-Galeano (2013)	216 ± 185	37
Olivero-Verbel et al., (2013)	70 ± 10	105
Ortega-Herrera y Peña-Coronado, (2020)	104 ± 39	13
Padilla-Ramírez (2021)	99,3 ± 37	12
	71,03 ±	
Este estudio	27,67	42

Así, las diferencias significativas ($p < 0,05$) registradas entre las concentraciones medias de Hg en los tres tejidos, muestran que las tasas de bioacumulación en el hígado de *Triporthus magdalenae* se diferenciaron, particularmente en el primer muestreo respecto a los demás, esto podría estar relacionado con el hecho de que los peces de este muestreo también presentaron las mayores medias de Hg en el músculo y las gónadas, y por tanto

las concentraciones halladas en el tejido hepático serían un reflejo de estos procesos acumulativos en función de las tasas de asimilación, depuración, actividad endocrina y de detoxificación que realiza el hígado, esencialmente cuando ocurre la exposición a este metal y hay presencia de actividad reproductiva en los peces (Wang et al., 2013; Boalt et al., 2014, Vieira et al., 2021). Así mismo estas dinámicas de acumulación de Hg en los tejidos evaluados, se ven directamente reflejadas en la caracterización de los índices morfofisiológicos y reproductivos analizados (IGS, IHS y el Factor de condición K), ya que en lo relativo al IHS y al Factor de condición K, las diferencias significativas ($p < 0,05$) halladas podrían ser una respuesta de la especie frente a una variación en la disponibilidad del alimento y de los sustratos bioquímicos óptimos para su desarrollo (Łuczyńska et al., 2018; Łuczyńska et al., 2020), dadas las condiciones hídricas en las que se realizaron los muestreos, traducido lo anterior en una posible disminución de las poblaciones de zooplancton y macroinvertebrados de los que *Tripurtheus magdalenae* se alimenta, causada por la precarización de variables fisicoquímicas como los niveles de oxígeno disuelto, la acidificación de las aguas y los sedimentos, así como una marcada disminución de las tasas de exposición al Hg y su transporte en las matrices geoquímicas del embalse durante el período evaluado (Olivero-Verbel et al., 2013).

Dadas estas circunstancias, los índices reproductivos de *Tripurtheus magdalenae* podrían, de forma endógena estar respondiendo a los procesos metabólicos, hormonales y de aptitud reproductiva de los peces estudiados, ya que es conocido que agentes contaminantes como el Hg poseen un elevado potencial para desnaturalizar los procesos moleculares, catabólicos, genéticos y celulares en general implicados en la síntesis de factores precursores del desarrollo, la diferenciación y la maduración de las células sexuales y de las estructuras gonadales, y en consecuencia de la capacidad reproductiva de la ictiofauna (Chakraborty, 2021). Fundamentalmente porque este metal pesado tiende a inhibir en los machos y en las hembras la actividad de la 3 β -hidroxiesteroide deshidrogenasa (3- β HSD), la cual es una enzima de vital importancia en la biosíntesis de andrógenos y estrógenos durante la esteroidogénesis que sucede en las gónadas, la cual está ampliamente relacionada con la actividad hormonal reguladora que realiza el hígado sobre los niveles de gonadotropina (GH) sérica, así como con el tamaño y la morfología de esta glándula (Gómez et al., 1999; Crump y Trudeau, 2009; Shivakumar et al., 2014). Repercutiendo los fenómenos anteriormente descritos, sobre la variabilidad de la expresión morfológica general del Factor de condición K, ya que las alteraciones descritas en conjunto con otros efectos citotxicológicos adversos desencadenados por la acumulación de este

metal pesado en taxones altamente sensibles como los peces, tienden a propiciar y a estar asociadas con disminuciones significativas en los índices de masa corporal y en la longitud total de los peces, principalmente en ecosistemas dulceacuícolas con un bajo recambio en los flujos de agua y por tanto con una baja movilidad interecosistémica de las poblaciones de los peces contaminados (Grieb et al., 1990; Monteiro et al., 2013); pudiendo también las condiciones y las variaciones climatológicas tener una influencia significativa en la determinación de estos procesos toxicológicos, y en la diferencia proporcional de la abundancia entre machos y hembras, ya que en lo relativo a los efectos poblacionales de la contaminación con xenobióticos como el Hg en peces, las hembras tienden a desarrollar características que les permiten ser más resilientes que los machos frente a los impactos de la contaminación, ya que en la ictiofauna por lo general la supervivencia y por tanto la abundancia de las hembras es más crucial para la estabilidad de las especies (Fuchsman et al., 2016; Knott et al., 2022). Lo anterior se refleja directamente en el estado de reposo e inactividad de los ovocitos observados mediante el análisis histológico, ya que la ausencia de gametos en estados de maduración podría atribuirse a que los peces fueron capturados en un embalse con una conectividad y dinámica hídrica prácticamente estacionarias, en contraste con el hecho de que el ciclo reproductivo de *Triportheus magdalenae* es estimulado e indicado a través de la migración, experimentando cambios en las gónadas las cuales aumentan de tamaño para dar lugar al desarrollo y a la diferenciación de los gametos (Valdelamar-Villegas, 2018).

En consecuencia las correlaciones significativas ($p < 0,05$) determinadas entre las concentraciones de Hg en las gónadas de *Triportheus magdalenae* con el Factor de condición K y los IHS de estos peces, están en concordancia con los fenómenos y hallazgos descritos, sumado a que estos índices en términos generales fueron notablemente bajos a nivel poblacional en los peces muestreados, ya que por ejemplo un coeficiente propicio para el Factor de condición K como indicador de equilibrio sistémico y reproductivo debe ser superior a 0,80, en tanto que los valores óptimos del IHS deben estar por encima de 2, pudiendo implicar estas correlaciones negativas la ocurrencia de afectaciones severas sobre la viabilidad celular y metabólica de las gónadas y de los sustratos moleculares claves para la regulación endocrina de su ciclo reproductivo (Cizdziel et al., 2002), pudiendo evidenciarse estos procesos de toxicidad mediante la vacuolización de los hepatocitos y las alteraciones severas de la matriz hepática determinadas a partir del análisis histológico. De esta forma, se constata que la bioacumulación de Hg en *Triportheus magdalenae*, puntualmente en las gónadas está relacionada con el detrimento de las matrices tisulares

y orgánicas evaluadas, así como con el potencial de este metal pesado que aún en bajas dosis puede generar alteraciones sobre las tasas de fertilidad, sobre la aptitud reproductiva, la viabilidad fisiológica de los peces, así como en la actividad reguladora del hígado, y la histología de múltiples órganos, viéndose reflejadas estas afecciones en la condición general de los peces (de Oliveira-Ribeiro et al., 2002; Ramos-Osuna et al., 2020). Con base en los hallazgos aquí discutidos, se pone de manifiesto la necesidad de realizar acciones pertinentes que permitan realizar un control de los índices de contaminación con metales pesados en el Embalse del Guájaro, así como lograr la reducción de los efectos nocivos ocasionados por este fenómeno sobre la biota, especialmente sobre especies de alto valor ecológico como *Triportheus magdalenae*.

9. CONCLUSIONES

- Las tasas de bioacumulación de Hg en el tejido muscular, en el tejido hepático, así como en el tejido gonadal de la población de *Triportheus magdalenae* en el Embalse del Guájaro, pueden variar y ser altamente dependientes de los patrones de flujo hídricos del embalse, de factores propios del hábitat que ocupa esta especie, de la condición de salud de los peces en cuestión y de cambios en la disponibilidad y en la caracterización de las condiciones físico y geoquímicas de este cuerpo de agua.
- En este sentido, a pesar de haberse determinado concentraciones de este metal pesado relativamente bajas en los tejidos estudiados, se destaca la incidencia negativa que tiene la contaminación con Hg sobre los índices morfofisiológicos (Factor de condición K y el IHS) y la aptitud reproductiva de *Triportheus magdalenae*.
- Estos hallazgos pueden ser resultado principalmente de los efectos deletéreos y los cambios de carácter negativo que este metal tiende a inducir sobre la regulación y sobre el metabolismo de los sustratos precursores de la maduración reproductiva y de la fertilidad en esta especie.

10. RECOMENDACIONES

Partiendo de los hallazgos reportados en el presente estudio se plantean las siguientes recomendaciones:

- Realizar controles permanentes sobre los niveles de contaminantes en las aguas y demás matrices fisicoquímicas del Embalse del Guájaró
- Evaluar de manera integral los impactos generados por la contaminación con estos agentes, especialmente con metales pesados con alto potencial toxicológico como el Hg
- Ejecutar planes de acción efectivos para la conservación de la fauna y de la flora en este ecosistema acuático, los cuales estén enmarcados en políticas públicas que posibiliten su implementación a escala regional y nacional
- Incrementar el foco de atención investigativa sobre especies de alto valor ecológico como *Triportheus magdalenae*

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar I A., (2005). Los peces como indicadores de la calidad ecológica del agua. Revista Digital Universitaria 10 de agosto 2005 • Volumen 6 Número 8 • ISSN: 1067-6079.
- Aguilera, Díaz, M. M., (2006). El Canal del Dique y su subregión: una economía basada en la riqueza hídrica. Documentos de Trabajo sobre Economía Regional Banco de la República – Sucursal Cartagena.
- Ajsuvakova, O. P., Tinkov, A. A., Aschner, M., Rocha, J. B. T., Michalke, B., Skalnaya, M. G., Skalny, A. V., Butnariu, M., Dadar, M., Sarac, I., Aaseth, J., & Bjørklund, G. (2020). Sulfhydryl groups as targets of mercury toxicity. In *Coordination Chemistry Reviews* (Vol. 417, p. 213343). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2020.213343>
- Álvarez Galeano, S. (2013). Acumulación de mercurio (Hg) en tejido muscular y hepático en especies ícticas en diferentes ciénagas del Magdalena Medio (Tesis de maestría). Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia
- Alvarez, Garzón, C., (2011). Efectos teratogénicos del nitrato de plomo en el desarrollo embrionario del pez cebra *Danio rerio* (hamilton, 1822) a cinco dosis subletales. Pontificia universidad javeriana facultad ciencias carrera biología Bogotá D.C.
- AOAC. (2005). Official Method 999.11: Determination of Lead, Cadmium, Copper, Iron, and Zinc in Foods. Disponible en: <https://bit.ly/2XyGfGp>
- APHA — AWWA-WPCF. (2017). Metals by electrothermal atomic absorption spectrometry, in: *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 21st edn., American Public Health Association, Washington, USA,
- Barletta, M., Jaureguizar, A. J., Baigun, C., Fontoura, N. F., Agostinho, A. A., Almeida-Val, V. M. F., Val, A. L., Torres, R. A., Jimenes-Segura, L. F., Giarrizzo, T., Fabré, N. N., Batista, V. S., Lasso, C., Taphorn, D. C., Costa, M. F., Chaves, P. T., Vieira, J. P., & Corrêa, M. F. M. (2010). Fish and aquatic habitat conservation in South America: a continental overview with emphasis on neotropical systems. In *Journal of Fish Biology* (Vol. 76, Issue 9, pp. 2118–2176). Wiley. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2010.02684.x>

- Bistoni, M.D., Hued, A., Videla, M., Sagretti, L., (2000). Efectos de la calidad del agua sobre las comunidades ícticas de la región central de Argentina. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Avda. Vélez Sársfield 299, 5000 Córdoba, Argentina
- Boalt, E., Miller, A., & Dahlgren, H. (2014). Distribution of cadmium, mercury, and lead in different body parts of Baltic herring (*Clupea harengus*) and perch (*Perca fluviatilis*): Implications for environmental status assessments. In *Marine Pollution Bulletin* (Vol. 78, Issues 1–2, pp. 130–136). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.10.051>
- Briffa, J., Sinagra, E., & Blundell, R. (2020). Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans. In *Heliyon* (Vol. 6, Issue 9, p. e04691). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04691>
- Buck, D. G., Evers, D. C., Adams, E., DiGangi, J., Beeler, B., Samánek, J., Petrlik, J., Turnquist, M. A., Speranskaya, O., Regan, K., & Johnson, S. (2019). A global-scale assessment of fish mercury concentrations and the identification of biological hotspots. In *Science of The Total Environment* (Vol. 687, pp. 956–966). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.159>
- Castellanos-Romero, K., Pizarro Del Río, J., Cuentas Villarreal, K., Costa Anillo, J. C., Pino Zarate, Z., Gutierrez, L. C., Franco, O. L., & Arboleda Valencia, J. W. (2017). Lentic water quality characterization using macroinvertebrates as bioindicators: An adapted BMWP index. In *Ecological Indicators* (Vol. 72, pp. 53–66). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.07.023>
- Chakraborty, S. B. (2021). Non-Essential Heavy Metals as Endocrine Disruptors: Evaluating Impact on Reproduction in Teleosts. In *Proceedings of the Zoological Society* (Vol. 74, Issue 4, pp. 417–431). Springer Science and Business Media LLC. <https://doi.org/10.1007/s12595-021-00399-x>
- Cifuentes, González, R., González, J., Montoya, G., Jara, A., Ortíz N., et al. (2012). Relación longitud-peso y factor de condición de los peces nativos del río San Pedro (cuenca del río Valdivia, Chile). *Gayana Especial*: 101-110.

- Cizdziel, J. V., Hinners, T. A., Pollard, J. E., Heithmar, E. M., & Cross, C. L. (2002). Mercury Concentrations in Fish from Lake Mead, USA, Related to Fish Size, Condition, Trophic Level, Location, and Consumption Risk. In *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* (Vol. 43, Issue 3, pp. 309–317). Springer Science and Business Media LLC. <https://doi.org/10.1007/s00244-002-1191-6>
- Congreso de la República de Colombia. (1993). Ley 99 de 1993: Política Nacional para Humedales interiores de Colombia
- Cope, E. D. 1872. On the fishes of the Ambyiacu River. *Proceedings of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia*, 23: 250-294.
- Corporación Autónoma Regional del Atlántico. (2014). Diagnóstico inicial para el ordenamiento del Embalse del Guájaro y la ciénaga de Luruaco.inf ejecutivo, corporación autónoma regional del atlántico, Barranquilla, 203 p.
- Crump, K. L., & Trudeau, V. L. (2009). Mercury-induced reproductive impairment in fish. In *Environmental Toxicology and Chemistry* (Vol. 28, Issue 5, p. 895). Wiley. <https://doi.org/10.1897/08-151.1>
- Daza, P. V., Landines, M. A., Parra, A. I., & Sanabria O. (2005). Reproducción de peces en el trópico. Ministerio de Agricultura INCODER. Universidad nacional de Colombia Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia.
- De Oliveira Ribeiro, C. A., Belger, L., Pelletier, E., & Rouleau, C. (2002). Histopathological evidence of inorganic mercury and methyl mercury toxicity in the arctic charr (*Salvelinus alpinus*). *Environmental research*, 90(3), 217-225.
- Fu, D., Leef, M., Nowak, B., & Bridle, A. (2017). Thyroid hormone related gene transcription in southern sand flathead (*Platycephalus bassensis*) is associated with environmental mercury and arsenic exposure. In *Ecotoxicology* (Vol. 26, Issue 5, pp. 600–612). Springer Science and Business Media LLC. <https://doi.org/10.1007/s10646-017-1793-4>
- Fuchsman, P. C., Henning, M. H., Sorensen, M. T., Brown, L. E., Bock, M. J., Beals, C. D., Lyndall, J. L., & Magar, V. S. (2016). Critical perspectives on mercury toxicity reference values for protection of fish. In *Environmental Toxicology and Chemistry* (Vol. 35, Issue 3, pp. 529–549). Wiley. <https://doi.org/10.1002/etc.3267>

- Fuentes-Gándara, F., Pinedo-Hernández, J., Marrugo-Negrete, J. (2018). Metales pesados en especies ícticas de la ciénaga de Mallorquín, Colombia. *Revista espacios*.
- Gaiolia, M., Amoedoa D., González, D., (2012). Impacto del mercurio sobre la salud humana y el ambiente. *Pediatría práctica*.
- García-Alzate, C., Gutierrez, L., De la Parra, A. (2016). El Embalse del Guájaro: diagnóstico ambiental y estrategias de rehabilitación. *Researchgate*.
- Gedig, D. P., Hauger, M., Armstrong, D. A., & Jeffries, K. M. (2022). Mercury contamination of an introduced generalist fish of intermediate trophic level. *Cold Spring Harbor Laboratory*. <https://doi.org/10.1101/2022.12.01.518449>
- Gobernación del Atlántico. (2014). Departamento del Atlántico: Barranquilla, Colombia. *Gobernación del atlántico*. Recuperado de <https://www.atlantico.gov.co/index.php/departamento>
- Gómez, J. M., Mourot, B., Fostier, A., & Le Gac, F. (1999). Growth hormone receptors in ovary and liver during gametogenesis in female rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Reproduction*, 115(2), 275-285.
- Govoni, J. J., Morris, J. A., Jr., & Evans, D. W. (2017). Tracing Dietary Mercury Histochemically, with Autometallography, through the Liver to the Ovaries and Spawned Eggs of the Spot, a Temperate Coastal Marine Fish. In *Journal of Aquatic Animal Health* (Vol. 29, Issue 3, pp. 173–180). Wiley. <https://doi.org/10.1080/08997659.2017.1349009>
- Grieb, T. M., Bowie, G. L., Driscoll, C. T., Gloss, S. P., Schofield, C. L., & Porcella, D. B. (1990). Factors affecting mercury accumulation in fish in the upper Michigan peninsula. *Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal*, 9(7), 919-930.
- Hayati, A., Wulansari, E., Armando, D. S., Sofiyanti, A., Amin, M. H. F., & Pramudya, M. (2019). Effects of in vitro exposure of mercury on sperm quality and fertility of tropical fish *Cyprinus carpio* L. In *The Egyptian Journal of Aquatic Research* (Vol. 45, Issue 2, pp. 189–195). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2019.06.005>

- Jaramillo, L. A. M. (2009). estudio de la biología trófica de cinco especies de peces bentónicos de la costa de Cullera. Relaciones con la acumulación de metales pesados; universidad politécnica de valencia, tesis doctoral.
- Knott, K. K., Coleman, E., Cianci–Gaskill, J. A., O’Hearn, R., Niswonger, D., Brockman, J. D., Argerich, A., North, R., & Wenzel, J. (2022). Mercury, selenium, and fatty acids in the axial muscle of largemouth bass: evaluating the influence of seasonal and sexual changes in fish condition and reproductive status. In *Ecotoxicology* (Vol. 31, Issue 5, pp. 761–781). Springer Science and Business Media LLC. <https://doi.org/10.1007/s10646-022-02544-4>
- Łuczyńska, J., Paszczyk, B., & Łuczyński, M. J. (2018). Fish as a bioindicator of heavy metals pollution in aquatic ecosystem of Pluszne Lake, Poland, and risk assessment for consumer’s health. In *Ecotoxicology and Environmental Safety* (Vol. 153, pp. 60–67). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.01.057>
- Łuczyńska, J., Paszczyk, B., Łuczyński, M. J., Kowalska-Górska, M., Nowosad, J., & Kucharczyk, D. (2020). Using *Rutilus rutilus* (L.) and *Perca fluviatilis* (L.) as Bioindicators of the Environmental Condition and Human Health: Lake Łańskie, Poland. In *International Journal of Environmental Research and Public Health* (Vol. 17, Issue 20, p. 7595). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/ijerph17207595>
- Maddock, D., Burton, M., (1998). Gross and histological of ovarian development and related condition changes in American plaice. *Journal of Fish Biology* 53: 928-944.
- Malinowski, C. R., Stacy, N. I., Coleman, F. C., Cusick, J. A., Dugan, C. M., Koenig, C. C., Ragbeer, N. K., & Perrault, J. R. (2021). Mercury offloading in gametes and potential adverse effects of high mercury concentrations in blood and tissues of Atlantic Goliath Grouper *Epinephelus itajara* in the southeastern United States. In *Science of The Total Environment* (Vol. 779, p. 146437). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146437>
- Mancera-Rodríguez, N J., Álvarez-León, R. (2006). Estado del conocimiento de las concentraciones de mercurio y otros metales pesados en peces dulceacuícolas de Colombia. *Acta Biológica Colombiana*, vol. 11, núm. 1, 2006, pp. 3-23 Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá, Colombia.

- Marrugo-Negrete, Ruiz J., Ruiz, A., (2018). Biomagnification of Mercury in Fish from Two Gold Mining-Impacted Tropical Marshes in Northern Colombia. *Arch Environ Contam Toxicol.* 74(1):121– 130. Doi: <http://link.springer.com/10.1007/s00244-0170459-9>.
- Martínez-Mera, E.A., Ana Carolina, T.-E., Tito José, C.-B., José Luis, M.-N., & Luis Carlos, G.-M. (2019). Evaluation of contaminants in agricultural soils in an Irrigation District in Colombia. In *Heliyon* (Vol. 5, Issue 8, p. e02217). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02217>
- Massányi, P., Massányi, M., Madeddu, R., Stawarz, R., & Lukáč, N. (2020). Effects of Cadmium, Lead, and Mercury on the Structure and Function of Reproductive Organs. In *Toxics* (Vol. 8, Issue 4, p. 94). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/toxics8040094>
- Monteiro, D. A., Rantin, F. T., & Kalinin, A. L. (2010). Inorganic mercury exposure: toxicological effects, oxidative stress biomarkers and bioaccumulation in the tropical freshwater fish matrinxã, *Brycon amazonicus* (Spix and Agassiz, 1829). In *Ecotoxicology* (Vol. 19, Issue 1, pp. 105–123). Springer Science and Business Media LLC. <https://doi.org/10.1007/s10646-009-0395-1>
- Monteiro, D. A., Rantin, F. T., & Kalinin, A. L. (2013). Dietary intake of inorganic mercury: bioaccumulation and oxidative stress parameters in the neotropical fish *Hoplias malabaricus*. In *Ecotoxicology* (Vol. 22, Issue 3, pp. 446–456). Springer Science and Business Media LLC. <https://doi.org/10.1007/s10646-012-1038-5>
- Monteiro, D. A., Taylor, E. W., Rantin, F. T., & Kalinin, A. L. (2017). Impact of waterborne and trophic mercury exposures on cardiac function of two ecologically distinct Neotropical freshwater fish *Brycon amazonicus* and *Hoplias malabaricus*. In *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology* (Vol. 201, pp. 26–34). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2017.09.004>
- Ochoa, D.M., González, J.F., (2008). Estrés oxidativo en peces inducido por contaminantes ambientales. *Revista de la Facultad de Medicina Veterinaria y de Zootecnia*, vol. 55, núm. II, 2008, pp. 115-126. Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá, Colombia.

- Oliver H., & Pain D.J. (2002). Lead in the Environment. Pags: 373-408 en: Hoffman David J., Barnett A. Rattner, G. Allen Burton, Jr., John Cairns, Jr. (eds). Handbook of ecotoxicology. A CRC Press Company. New York
- Olivero-V J.,A Pérez, Navas., Solano, B., Acosta I., Arguello E., Salas, R., (1997). Mercury levels in muscle of some fish species from the Dique channel, Colombia. *Eviron contam toxicol.*
- Olivero-Verbel, J., & Caballero-Gallardo, K. (2013). Nematode and mercury content in freshwater fish belonging to different trophic levels. In *Parasitology Research* (Vol. 112, Issue 6, pp. 2187–2195). Springer Science and Business Media LLC. <https://doi.org/10.1007/s00436-013-3378-3>
- Ortega-H, A., & Peña, C, A. (2020). Evaluación del riesgo a la salud humana asociado al consumo de peces contaminados por metales pesados en el Embalse del Guájaro, Atlántico-Colombia, trabajo de grado, Universidad de la costa, CUC.
- Osorio, A., (2010). Efectos del Nitrato de Plomo en la Embriogénesis de la Trucha Arcoíris *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum, 1792). (Tesis de pregrado). Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ciencias. Bogotá.
- Pelicice, F. M., Azevedo-Santos, V. M., Vitule, J. R. S., Orsi, M. L., Lima Junior, D. P., Magalhães, A. L. B., Pompeu, P. S., Petreire, M., Jr, & Agostinho, A. A. (2017). Neotropical freshwater fishes imperilled by unsustainable policies. In *Fish and Fisheries* (Vol. 18, Issue 6, pp. 1119–1133). Wiley. <https://doi.org/10.1111/faf.12228>
- Pernía, B., De Sousa. A., Reyes, R.,. Castrillo, M., (2008). Biomarcadores de contaminación por cadmio en las plantas. *Interciencia.* 33(2). 112-119.
- Queiroz-Sousa, J., Brambilla, E. M., Garcia-Ayala, J. R., Travassos, F. A., Daga, V. S., Padiá, A. A., & Vitule, J. R. S. (2018). Biology, ecology and biogeography of the South American silver croaker, an important Neotropical fish species in South America. In *Reviews in Fish Biology and Fisheries* (Vol. 28, Issue 4, pp. 693–714). Springer Science and Business Media LLC. <https://doi.org/10.1007/s11160-018-9526-1>
- Ramírez, A., (2002). Toxicología del cadmio. Conceptos actuales para evaluar exposición ambiental u ocupacional con indicadores biológicos. *Anales de la Facultad de*

- Ramos-Osuna, M., Patiño-Mejía, C., Ruelas-Inzunza, J., & Escobar-Sánchez, O. (2020). Bioaccumulation of mercury in *Haemulopsis elongatus* and *Pomadasys macracanthus* from the SE Gulf of California: condition indexes and health risk assessment. In *Environmental Monitoring and Assessment* (Vol. 192, Issue 11). Springer Science and Business Media LLC. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08599-2>
- Reyes, Y., Vergara, I., Torres, O., Díaz, M., & González, E., (2016). Contaminación por metales pesados: implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Revista Ingeniería Investigación Y Desarrollo*. 16(2). 66–77.
- Rhea, D. T., Farag, A. M., Harper, D. D., McConnell, E., & Brumbaugh, W. G. (2013). Mercury and Selenium Concentrations in Biofilm, Macroinvertebrates, and Fish Collected in the Yankee Fork of the Salmon River, Idaho, USA, and Their Potential Effects on Fish Health. In *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* (Vol. 64, Issue 1, pp. 130–139). Springer Science and Business Media LLC. <https://doi.org/10.1007/s00244-012-9816-x>
- Rodríguez, M., (1992). Técnicas de evaluación cuantitativa de la madurez gonádica de peces. 1ª edición A.G.T. Editor, S.A. México, D.F.
- Romano, N., Renukdas, N., Fischer, H., Shrivastava, J., Baruah, K., Egnaw, N., & Sinha, A. K. (2020). Differential modulation of oxidative stress, antioxidant defense, histomorphology, ion-regulation and growth marker gene expression in goldfish (*Carassius auratus*) following exposure to different dose of virgin microplastics. In *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology* (Vol. 238, p. 108862). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2020.108862>
- Rubio, Armendáriz., C., Álvarez, R., De La Torre, A., (2006). Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAPs) en productos de la pesca: revisión. *Revista de Toxicología*, vol. 23, núm. 1, 2006, pp. 1-6 Asociación Española de Toxicología Pamplona, España.

- Saborido, Rey F. (2008). *Ecología de la reproducción y potencial reproductivo en las poblaciones de peces marinos*. Instituto de Investigaciones Marinas (CSIC) Universidad de Vigo.
- Salazar-Camacho, C., Salas-Moreno, M., Paternina-Urbe, R., Marrugo-Negrete, J., & Díez, S. (2021). Mercury species in fish from a tropical river highly impacted by gold mining at the Colombian Pacific region. In *Chemosphere* (Vol. 264, p. 128478). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128478>
- Sankhla, Mahipal Singh and Kumari, Mayuri and Nandan, Manisha and Kumar, Rajeev and Agrawal, Prashant, Heavy Metals Contamination in Water and Their Hazardous Effect on Human Health-A Review (September 22, 2016). *Int.J.Curr.Microbiol.App.Sci* (2016) 5(10): 759-766, Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=3428216> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3428216>
- Shivakumar, C. K., Thippeswamy, B., Tejaswikumar, M. V., & Prashanthakumara, S. M. (2014). Bioaccumulation of heavy metals and its effect on organs of edible fishes located in Bhadra River, Karnataka. *International Journal of Research in Fisheries and Aquaculture*, 4(2), 90-98.
- Steindachner F (1878) *Ichthyologische Beiträge* (VII). *Sitzungsb K Akad Wiss Wien, Math-Naturw Cl* 78: 377–400
- Subhadra, A. V., Nanda, A. K., Behera, P. K., & Panda, B. B. (1991). Acceleration of catalase and peroxidase activities in *Lemna minor* L. and *Allium cepa* L. in response to low levels of aquatic mercury. *Environmental Pollution*, 69(2-3), 169-179.
- Tezón, Mariana I., Morón, Campos, M., Cruz, Torrado, B., Garrido Ochoa, Y., (2018). *El Canal del Dique asediado por el conflicto armado: un camino para empoderar en memoria a jóvenes de 15 a 18 años*, Sello Editorial Tecnológico Comfenalco, 2018. Identificadores: ISBN 978-958-56891-3-8, Cartagena de Indias.
- Toledo, J., Lemus, M., Chung, K; (2000). Cobre, cadmio y plomo en el pez *Cyprinodon dearborni*, sedimentos y agua en dos lagunas de Venezuela. Instituto Oceanográfico de Venezuela y Escuela de Ciencias(I), Universidad de Oriente, Cumana 6101, Venezuela.

- Torregroza-Espinosa, A. C., Martínez-Mera, E., Castañeda-Valbuena, D., González-Márquez, L. C., & Torres-Bejarano, F. (2018). Contamination Level and Spatial Distribution of Heavy Metals in Water and Sediments of El Guájaro Reservoir, Colombia. In *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* (Vol. 101, Issue 1, pp. 61–67). Springer Science and Business Media LLC. <https://doi.org/10.1007/s00128-018-2365-x>
- Torres, Bejarano, F., Padilla, Cobaa, F., Rodríguez, Cuevas, C., Ramírez León, H., Cantero, Rodelo, R., (2016). La modelación hidrodinámica para la gestión hídrica del Embalse del Guájaro, Colombia. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería* Volume 32, Issue 3, July–September 2016.
- Torres-Bejarano, F., Padilla Caba, J., Rodríguez Cuevas, C., Ramírez León, H., & Cantero Rodelo, R. (2016). La modelación hidrodinámica para la gestión hídrica del embalse del Guájaro, Colombia. In *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería* (Vol. 32, Issue 3, pp. 163–172). Scipedia, S.L. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2015.04.001>
- Ubillús, F., Barberá, R., Farré, R., Lagarda, M. J., & Alegría, A. (2000). Methylmercury and inorganic mercury determination in fish by cold vapour generation atomic absorption spectrometry. *Food Chemistry*, 71(4), 529-533.
- Uchida, D., Yamashita, M., Kitano, T., & Iguchi, T. (2004). An aromatase inhibitor or high water temperature induce oocyte apoptosis and depletion of P450 aromatase activity in the gonads of genetic female zebrafish during sex-reversal. In *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology* (Vol. 137, Issue 1, pp. 11–20). Elsevier BV. [https://doi.org/10.1016/s1095-6433\(03\)00178-8](https://doi.org/10.1016/s1095-6433(03)00178-8)
- US EPA. (1998). Mercury in soils and solutions by thermal decomposition amalgamation and atomic spectrophotometry. Method 7473
- Valarezo, M. M. (2010). Determinación de metales pesados (CD y PB) en moluscos bivalvos de interés comercial de cuatro esteros del Golfo de Guayaquil. *Revista Científica Ciencias Naturales y Ambientales*, 4(1), 61-74.

- Valdebenito, I., Fletcher, C; Vera, V., Fernandez J. (2009). Factores fisicoquímicos que regulan la motilidad espermática en peces aspectos
- Valdelamar-Villegas, J. C., Bolívar, F. A., Bayuelo, V., Narváez, J.C., (2015). Particularidades reproductivas de la arenca *Triportheus magdalenae* (Steindachner, 1878) en el Embalse del Guájaro y el canal del dique (departamento del atlántico). Researchgate.
- Valdelamar-Villegas, J.C. (2018). Apuntes sobre la importancia ecológica, ambiental y social de la arenca *Triportheus magdalenae* (Steindachner, 1878). Un ejemplo de endemismo invisibilizado. Intropica | ISSN: 1794-161X - ISSN WEB: 2389-7864 | 152 – 165.
- Vanni, M. J. (2002). Nutrient Cycling by Animals in Freshwater Ecosystems. In Annual Review of Ecology and Systematics (Vol. 33, Issue 1, pp. 341–370). Annual Reviews. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.33.010802.150519>
- Vardhan, K. H., Kumar, P. S., & Panda, R. C. (2019). A review on heavy metal pollution, toxicity and remedial measures: Current trends and future perspectives. In Journal of Molecular Liquids (Vol. 290, p. 111197). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.111197>
- Vargas, A., Blanco, Y., Salazar, Lugo, R., (2012). Efecto del cobre y del cadmio sobre la respuesta inmune innata del pez *Colossoma macropomum* Revista de Toxicología, vol. 29, núm. 2, julio-diciembre, 2012, pp. 90-94 Asociación Española de Toxicología Pamplona, España.
- Vargas-Licon, S.P., & Marrugo, Negrete. J.L. (2019). Mercurio, metilmercurio y otros metales pesados en peces de Colombia: riesgo por ingesta. Acta biol. Colomb. 24(2):232-242. DOI: <http://dx.doi.org/10.15446/abc.v24n2.74128>
- Vázquez, F., R, Tomas.,A, Florville.,Herrera, M., Díaz, De León, L. M., (2008). Metales pesados en tejido muscular del bagre *Ariopsis felis* en el sur del golfo de México. Latin American Journal of Aquatic Research 36: 223-233.
- Vazzoler, A., (1996). Biología de reproducción de peixes teleosteos: teoría e prática. Ed Neepelia Mariaga – PR (Brasil).

- Vazzoler, A.,(1982). Manual de métodos para estudios biológicos de populacoes de peixes, Reproducao e crecimiento. CNPQ. 103 p.
- Vieira, H. C., Rodrigues, A. C. M., Soares, A. M. V. M., Abreu, S., & Morgado, F. (2021). Mercury Accumulation and Elimination in Different Tissues of Zebrafish (*Danio rerio*) Exposed to a Mercury-Supplemented Diet. In *Journal of Marine Science and Engineering* (Vol. 9, Issue 8, p. 882). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/jmse9080882>
- Villa, N. F. A., Zuñiga, U.P.T., Castro, R.D., García, M.J. E., GARCIA, M. L., J, Herrada. (2006). Peces del alto Magdalena, cuenca del río Magdalena, Colombia. *Biota colombiana*.
- Wang, R., Feng, X.-B., & Wang, W.-X. (2013). In Vivo Mercury Methylation and Demethylation in Freshwater Tilapia Quantified by Mercury Stable Isotopes. In *Environmental Science & Technology* (Vol. 47, Issue 14, pp. 7949–7957). American Chemical Society (ACS). <https://doi.org/10.1021/es3043774>
- Ye, X., & Fisher, N. S. (2020). Minor effects of dietary methylmercury on growth and reproduction of the sheepshead minnow *Cyprinodon variegatus* and toxicity to their offspring. In *Environmental Pollution* (Vol. 266, p. 115226). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115226>
- Zhang, Q.-F., Li, Y.-W., Liu, Z.-H., & Chen, Q.-L. (2016). Reproductive toxicity of inorganic mercury exposure in adult zebrafish: Histological damage, oxidative stress, and alterations of sex hormone and gene expression in the hypothalamic-pituitary-gonadal axis. In *Aquatic Toxicology* (Vol. 177, pp. 417–424). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2016.06.018>