

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE CIENCIAS PURAS Y NATURALES
MAESTRÍA TERMINAL EN CIENCIAS BIOLÓGICAS



**“Variación en la concentración del mercurio
en tejidos del lagarto (*Caiman yacare*) en la
cuenca del río Beni de la Amazonía
boliviana”**

Tesis de grado para optar al título de Máster en Ciencias Biológicas
presentada por:

Andrea Cristina Salazar Pammo

Tutor de Tesis: Dr. Darío Achá
Asesor de Tesis: Lic. Guido Miranda-Chumacero

La Paz-Bolivia

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE CIENCIAS PURAS Y NATURALES
MAESTRÍA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS**

***Título: Variación en la concentración del mercurio en tejidos del lagarto (*Caiman yacare*)
en la cuenca del río Beni de la Amazonía boliviana***

Por: Andrea Cristina Salazar Pammo.

TUTOR:

Dr. Darío Achá

ASESOR:

Lic. Guido Miranda-Chumacero

TRIBUNALES:

Dr. Luis Pacheco

Dr. Carlos Molina

JEFE DE CARRERA:

Lic. Rubén Marín

La Paz, 25 de agosto 2020

*Dedicado al esfuerzo y apoyo constante de
Mi esposo, madre y hermana*

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a:

WILDLIFE CONSERVATION SOCIETY-BOLIVIA (WCS), por brindarme el apoyo económico y técnico durante la toma de muestras en campo para la realización de la presente tesis de Maestría.

CONSEJO INDIGENA DEL PUEBLO TACANA (CIPTA), a don Eduardo y su familia por su hospitalidad brindada en la comunidad Cachichira, a los socios Tacana manejadores de Lagarto (MATUSHA AIDHA). Gracias a Gustavo Álvarez y José Luis Mollericona por su ayuda durante la toma de muestras.

UNIDAD DE CALIDAD AMBIENTAL DEL INSTITUTO DE ECOLOGÍA (LCA), por su apoyo económico para la realización de la presente tesis (P.I.; Dario Achá). A Vania García, por su valiosa asistencia durante los análisis para la detección del mercurio total.

PROGRAMA DE MAESTRÍA TERMINAL EN CIENCIAS BIOLÓGICAS, por toda la enseñanza hacía el camino científico. Quiero agradecer de todo corazón a mi tutor de tesis Dr. Dario Achá, por brindarme su generosa enseñanza, orientación, paciencia y apoyo incondicional a lo largo de cada fase para la elaboración del artículo científico. Gracias a mi asesor Lic. Guido Miranda-Chumacero, por su valioso aporte en la elaboración y ejecución del artículo científico.

INSTITUT DE RECHERCHE POUR LE DÉVELOPPEMENT (IRD), por su soporte económico dentro del proyecto “young research associate team "JEA TITICACA" (P.I.; D. Achá)”.

Quiero agradecer profundamente a mis tribunales Dr. Luis Pacheco y Dr. Carlos Molina por sus valiosas observaciones y por su disposición en la revisión del presente documento y del artículo científico.

Agradezco profundamente a Alessandro Baldo mi adorado esposo, por haberme brindado su apoyo incondicional en cada etapa de la Maestría.

Le doy gracias a mi adorada madre Magda por apoyarme en todo momento en las buenas y en las malas, por los valores que me ha inculcado y por haberme dado la oportunidad de tener una excelente educación en el transcurso de mi vida. A mi papá Ricardo que, aunque ya no está con nosotros siempre será mi fuente de inspiración de desarrollo profesional a seguir. A mi hermana Valeria por ser parte importante de mi vida, gracias por el apoyo de toda mi familia en general.

Finalmente quiero agradecer a todas aquellas personas que en algún momento formaron parte de mi vida y me motivaron a seguir adelante.

ÍNDICE GENERAL

	Página
AGRADECIMIENTOS.....	i
ÍNDICE GENERAL.....	ii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	iii
ÍNDICE DE TABLAS.....	iv
RESUMEN.....	v
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. MÉTODOS.....	3
2.1 Área de estudio.....	3
2.2 Toma de muestras de los tejidos	5
2.3 Análisis de las muestras.....	5
2.3.1 Extracción del mercurio total (HgT).....	5
2.3.2 Análisis estadísticos.....	6
3. RESULTADOS.....	6
3.1 Concentración del Hg total en los diferentes tejidos del lagarto.....	6
3.2 Concentración del Hg total en tejidos de diferentes vertebrados acuáticos	7
4. DISCUSIÓN.....	9
4.1 Acumulación de mercurio en el lagarto y en otros vertebrados acuáticos	9
4.2 Las metalotioneínas (MTs) como una vía a la desintoxicación del Hg.....	10
5. CONCLUSIÓN.....	13
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	14
ANEXOS.....	25
Anexo 1. Concentración de mercurio total (media ± SD) obtenida en el hígado y el tejido muscular para este estudio y de aquellos estudios reportados para otros vertebrados acuáticos.....	25

ÍNDICE DE FIGURAS

Página

- Figura 1.** Transformación del Hg a través de las Bacterias Sulfato Reductoras (BSR)... **1**
- Figura 2.** Ubicación del Sistema de lagunas Colorado-Majal donde se cosecharon los lagartos en la Comunidad Cachichira de la TCO Tacana I **4**
- Figura 3.** Media de la concentración de mercurio total entre los diferentes tejidos de los lagartos cosechados en el sistema de lagunas Colorado-Majal en la comunidad de Cachichira (TCO Tacana I). La línea horizontal a 0.5 mg.kg-1 indica el límite recomendado por la OMS para organismos de agua dulce..... **7**
- Figura 4.** Media y desviación estándar de la concentración del Hg total del tejido muscular (M) y hepático (H) de aves (AM y AH) (cajas grises), peces carnívoros (PCM, PCH) (cajas azules) y omnívoros (POM, POH) (cajas naranjas), cocodrilianos (CM y CL) (caja verde oscuro) obtenidos en múltiples estudios y del *Caiman yacare* (Cy) (cajas cafés) obtenidos para este estudio. La línea horizontal a 0.5 µg. g-1 indica el límite recomendado por la OMS..... **8**
- Figura 5.** Hg total de músculo e hígado de aves acuáticas (AM y AH), peces carnívoros y omnívoros (PCM, PCH y POM, POH) y de cocodrilianos (CM y CL), obtenidos para este estudio y en múltiples estudios. (ver tabla 1). La línea horizontal y vertical a 0.5 µg. g-1 indica el límite recomendado por la OMS..... **8**

ÍNDICE DE TABLAS

Página

Tabla 1. Correlación no paramétrica de Spearman (r_s) (valor p) entre los cuatro tejidos analizados del lagarto.....**7**

RESUMEN

La forma orgánica del mercurio (Hg), el metilmercurio (MeHg), es capaz de bioacumularse en los tejidos de los animales y biomagnificarse en cada nivel trófico hasta alcanzar una alta concentración en los depredadores tope. El *Caiman yacare*, es considerado como uno de los principales depredadores tope en la cuenca del Amazonas y, en consecuencia, su tejido muscular debería alcanzar una mayor concentración de mercurio y a la vez ser la más alta en la cadena trófica. Sin embargo, estudios previos, han reportado lo contrario. El tejido muscular del *C. yacare* ha mostrado bajas concentraciones de mercurio en comparación con la concentración de mercurio hallado en el músculo de peces carnívoros que forman parte de la principal dieta alimenticia del *C. yacare*. En el presente estudio se comparó la acumulación de mercurio en cuatro diferentes tejidos del *C. yacare*: músculo, riñón, grasa e hígado. Adicionalmente, a través de la literatura disponible, se evaluó si las tendencias observadas para la distribución de mercurio entre los tejidos del *C. yacare* eran las mismas que en otros cocodrilianos y otros organismos acuáticos como las aves y los peces omnívoros y carnívoros. El análisis del Hg total muestra una diferencia significativa entre los cuatro tejidos estudiados. La grasa obtuvo las concentraciones más bajas ($0.025 \pm 0.03 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) seguida del músculo ($0.15 \pm 0.06 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), el riñón ($0.57 \pm 0.30 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) y el hígado ($1.81 \pm 0.80 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). Según la OMS, el tejido muscular y el tejido graso del *C. yacare* tienen concentraciones de Hg por debajo del límite recomendado para el consumo humano (0.5 y $1.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ para peces frescos y marinos, respectivamente). Tal acumulación preferencial hace del músculo del *C. yacare* una carne segura para la comercialización y para el consumo local. Además de ser una mejor alternativa que la carne de los peces carnívoros. Por otro lado, es también posible el consumo del tejido adiposo como una alternativa medicinal. La acumulación preferencial de mercurio en el hígado no es exclusiva del *C. yacare*, pero es tan significativa en los cocodrilianos como en el grupo de las aves. Comprender la distribución de contaminantes en diferentes organismos podría coadyudar a su gestión sostenible.

1. INTRODUCCIÓN

El mercurio (Hg) es uno de los metales traza más tóxicos y de amplia distribución en el ambiente. Su ciclo biogeoquímico y toxicidad están controlados por su especiación. Su forma orgánica, el metilmercurio (MeHg), es neurotóxica y debido a su naturaleza lipofílica es capaz de bioacumularse en los tejidos de los organismos vivos a lo largo de toda su vida y biomagnificarse en cada nivel trófico hasta llegar a los depredadores tope (Barbosa et al. 2003, Molina et al. 2010, Pouilly et al. 2013). El mercurio inorgánico (Hg), es transformado en MeHg por acción de comunidades microbianas como las Bacterias Sulfato Reductoras (BSR) (Fig. 1), que frecuentemente son las principales, mas no las únicas metiladoras de mercurio, pues a esta transformación se suman las bacterias reductoras de hierro, las bacterias metanogénicas, entre otros (Compeau and Bartha 1985, King et al. 2000, Macalady et al. 2000, Achá et al. 2011).

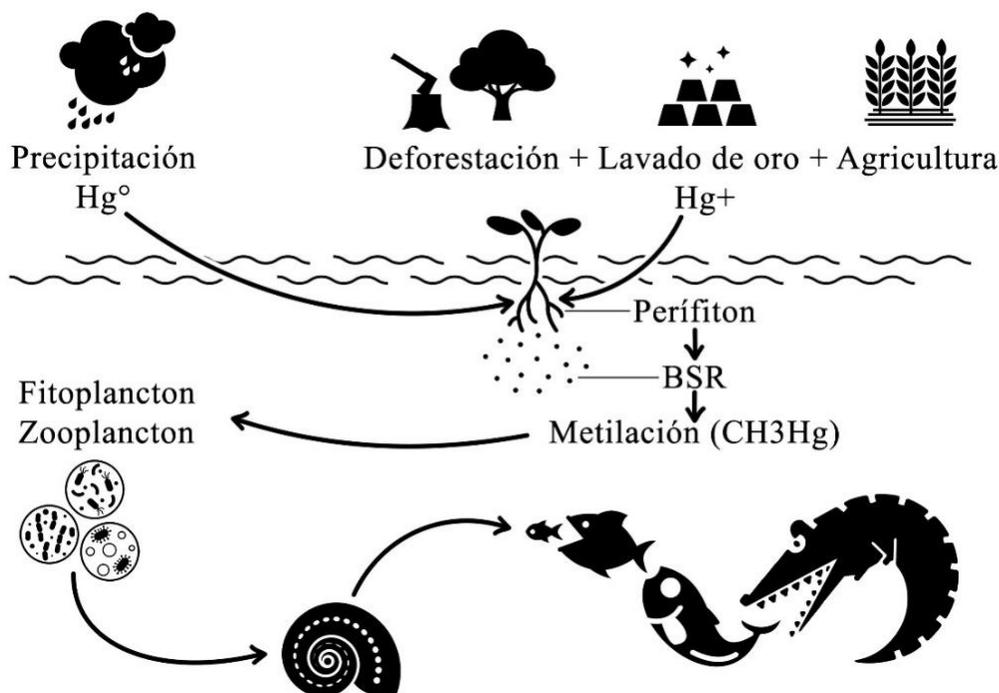


Fig. 1. Transformación del Hg a través de las Bacterias Sulfato Reductoras (BSR).

En la Amazonía Boliviana, en especial el río Beni, la presencia del Hg es preocupante principalmente por los riesgos a la salud humana y los efectos inmediatos sobre el ambiente (Roulet et al. 1998, Maurice-Bourgoin 2000, Molina et al. 2010). Las fuentes de mercurio en

estos ecosistemas acuáticos son tanto naturales como antropogénicas (Roulet et al. 1998, 2001, Maurice-Bourgoin 2000, Molina et al. 2010). El mercurio es liberado por erosión natural del suelo, principalmente en época de lluvias, pues ocasiona una importante liberación de éste metal, que es absorbido por los suelos (Roulet et al. 2001).

Los reptiles cocodrilianos se caracterizan por ser longevos (Grigg y Kirshner, 2015), lo que los hace organismos capaces de bioacumular Hg en sus tejidos y órganos como lo reportan Burger et al. (2000), Khan and Tansel (2000), Xu et al. (2006), Viera et al. (2011), Schneider et al. (2012), Ribera et al. (2016), Buenfil-Rojas et al. (2018). Sin embargo, todavía son pocos los estudios donde mostraron baja concentración de mercurio en el tejido muscular del *Caiman yacare* (Vieira et al., 2011; Schneider et al., 2015; Rivera et al., 2016).

El *C. yacare* o lagarto como se conoce en la comunidad indígena Tacana y como será mencionado en adelante, es considerado como uno de los depredadores tope en la cuenca del Amazonas (Sergio et al., 2014). Los adultos pueden alcanzar aproximadamente los 2.5 m y su dieta puede variar con la edad, sexo, hábitat y la variabilidad de presas (Magnusson et al., 1987). Como en todos los cocodrilianos, su dieta cambia a lo largo de su vida (Grigg y Kirshner, 2015). Los cocodrilianos más jóvenes suelen comer principalmente invertebrados terrestres y cuando éstos empiezan a la etapa de la adultez su dieta se convierte a principalmente peces (Da Silveira and Magnusson, 1999) aunque pueden llegar a ser depredadores oportunistas, depredando aves acuáticas y pequeños mamíferos como lo reportado por (Santos et al. 1996).

La población del lagarto es comercialmente explotada en Bolivia desde 1999 bajo el Programa Nacional de Conservación y Aprovechamiento Sostenible del Lagarto (MMAyA 2009, CIPTA and WCS 2010). Para el grupo indígena Tacana, la carne de lagarto es muy importante pues es aprovechada y comercializada desde el año 2007 en cada cosecha estacionaria para el consumo humano (Asociación Matusha Aidha 2016). La carne del lagarto aporta una fuente significativa de proteína, además del Omega-3, el cual tiene numerosos beneficios para la salud y nutrición (IBCE 2010).

La posición del lagarto en la cadena trófica puede llegar a generar elevadas concentraciones de mercurio en sus tejidos como ha sido observado en otras especies de cocodrilianos sudamericanos en el tejido muscular (Vieira et al., 2011; Schneider et al., 2015). Sin embargo, Rivera et al. (2016) reportaron concentraciones de mercurio en el lagarto por debajo de los niveles observado en el músculo de peces carnívoros siendo los peces carnívoros parte de la variada dieta alimenticia del lagarto. Sin embargo, estudios sobre el sorprendente bajo nivel de mercurio en el músculo del lagarto y la alta asimilación fisiológica del mismo en el hígado deben ser estudiados a profundidad durante cada monitoreo rutinario.

Estudios anteriores han demostrado que el mercurio podría almacenarse preferentemente en diferentes tejidos de cocodrilianos (Burguer et al. 2000; Rumbold et al. 2002; Campbell et al. 2010; Nilsen et al. 2016; Buenfil-Rojas et al. 2018). Sin embargo, como muchos organismos, los crocodilianos tienen diferentes mecanismos como respuesta a la exposición a metales. Entre éstas se encuentran las vías de desintoxicación a través del hígado y los riñones y la unión de metales pesados a proteínas específicas. (Grillitsch y Schiesari 2010; Schneider et al. 2013; Lázaro et al. 2015). En el presente estudio, se ha evaluado las concentraciones de mercurio en cuatro diferentes tejidos de lagarto, particularmente aquellos que podrían ser una vía de exposición potencial para el pueblo Tacana durante la cosecha estacional como el tejido graso, ya que lo usan para la preparación de aceite para su consumo medicinal y el tejido muscular proveniente de la cola que es también usado cada cosecha para generar ingresos y también para consumirlo. Adicionalmente se ha analizado la información disponible publicada para evaluar si las tendencias observadas en la acumulación de mercurio en el lagarto son exclusivas de la especie, de la familia Alligatoridae o entender si la acumulación diferenciada de mercurio es diferente entre organismos.

2. MÉTODOS

2.1 Área de estudio

La Tierra Comunitaria de Origen Tacana I (TCO Tacana I) se encuentra ubicada en la Provincia Abel Iturralde del Departamento de La Paz (Fig. 2). La comunidad de Cachichira se localiza al este de la TCO Tacana I, en el Municipio de San Buenaventura. Dentro de dicha

comunidad se encuentra ubicado el sistema de lagunas Colorado-Majal, lugar donde se cosecharon los lagartos.

Los ambientes acuáticos de la TCO Tacana I, corresponden a un sistema “río-planicie de inundación”, que abarcan ríos, lagunas y pantanos interconectados (CIPTA and WCS 2002). El río que da origen a este sistema es el río Beni, que va formando lagos y lagunas debido a la poca pendiente que presenta dicho río (CIPTA and WCS 2010).

La región presenta un clima tropical húmedo, la época de lluvias se extiende de noviembre a mayo y la época seca de junio a octubre. La temperatura media anual es 27°C y la precipitación media anual alcanza 2.500 mm (CIPTA and WCS 2010). La vegetación corresponde al bosque ribereño se distribuye a lo largo de las riberas del río Beni y otros ríos y arroyos menores y se encuentra fitogeográficamente incluida dentro de la región amazónica (Ibish et al. 2003). La vegetación ribereña comprende especies vegetativas tales como *Cecropia membranacea*, *C. concolor* y *Ochroma pyramidale*, además de *Inga nobilis*, *I. ruiziana*, *Pleurothyrium poeppigii* y *Erythrina poeppigiana* en el dosel (Fuentes 2005).

La dinámica geológica e hidrológica del río Beni da lugar a cuerpos de agua, como lagunas de tamaño mediano a pequeño, donde habita el lagarto junto con otros reptiles como el Caimán Negro (*Melanosuchus niger*), Petas de río (*Podocnemis unifilis*) y gran diversidad de peces (CIPTA and WCS 2010, Asociación Matusha Aidha 2016).



Fig. 2. Ubicación del Sistema de lagunas Colorado-Majal donde se cosecharon los lagartos en la Comunidad Cachichira de la TCO Tacana I.

2.2 Toma de muestras de los tejidos

Durante la cosecha realizada en octubre de 2017 por los socios Tacana manejadores de Lagarto (MATUSHA AIDHA) en el sistema de lagunas Colorado-Majal de la Comunidad Cachichira, se colectaron 28 muestras de cuatro distintos tejidos (hepático, adiposo, muscular y renal) de siete individuos de lagarto ($n=7$). Los individuos cosechados, oscilaban entre 24 y 46 kg. Tales medidas corresponden a los individuos machos > 180 cm de largo total (LT) equivalente a 90 cm de longitud cabeza-cuerpo (LCC), correspondiente a la clase IV (individuos sujeto a aprovechamiento) (Asociación Matusha Aidha, 2016).

Para la obtención de las muestras de tejido, se utilizaron cuchillos desechables de plástico. Se obtuvieron muestras de al menos 1 g de cada tipo de tejido, se colocaron las muestras en crio-tubos y en tubos eppendorf® para finalmente introducirlas en un contenedor con nitrógeno líquido para su conservación.

2.3 Análisis de las muestras

2.3.1 Extracción del mercurio total (HgT)

Las muestras de tejido fueron analizadas en el Laboratorio de Calidad Ambiental (LCA) del Instituto de Ecología de la Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia. Se usó una variación del método descrito por Rivera et al. (2016). Con la ayuda de una balanza analítica, la extracción de mercurio se hizo a partir de 0,2 g de peso húmedo. Luego se colocó 3ml de HNO_3 (PA concentrado) y se dejó reposando durante 12 horas. Pasado este tiempo se colocaron las muestras en el digestor (dry bath FB15103 Fisher Scientific) a 100°C , durante 2 horas. Después de hacer enfriar las muestras, el extracto se digirió a 600 μl de H_2O_2 (50%) por 2 horas más. Pasado este tiempo se los llevó a refrigerar a 4°C . El extracto final se completó con 10 ml de agua ultra-pura.

El mercurio total se detectó con fluorescencia atómica a través de la acidificación con HCl (5%) y se redujo con SnCl_2 (10%). La concentración de mercurio fue determinada usando

una curva estándar y la estabilidad del instrumento fue monitoreada en una lectura de cada set de cinco muestras de tejido.

2.3.2 Análisis estadístico

Los datos fueron evaluados para normalidad con la prueba de Shapiro-Wilk. La prueba de análisis de varianza de Kruskal-Wallis unidireccional se utilizó para comparar el Hg total entre tejidos. También se evaluó la correlación de la concentración de Hg total entre cada tipo de tejido (hígado, músculo, grasa y riñón) con una prueba de correlación no paramétrica de Spearman (r_s).

La concentración de mercurio en los órganos del lagarto se comparó con la acumulación de mercurio en organismos acuáticos como aves, peces carnívoros y omnívoros, y otras especies de cocodrilianos (Anexo 1). Se utilizó ANOVA unidireccional en los rangos para comparar la concentración del Hg total en el músculo de aves (AM), hígado de aves (AL), músculo de peces carnívoros (PCM), hígado de peces carnívoros (PCH), músculo de peces omnívoros (POM), hígado de peces omnívoros (POH), músculo de cocodrilianos (CM) e hígado de cocodrilianos (CH).

Finalmente, se evaluó la relación entre diferentes concentraciones de órganos mediante un análisis de regresión lineal después de la transformación logarítmica. Se utilizó un $\alpha = 0.05$ para todas las pruebas. Todos los análisis se realizaron en PASW SPSS® versión 19.0 para Windows (SPSS Inc. Chicago, IL, EE. UU.) (IBM 2015) y SigmaPlot 12.0.

3. RESULTADOS

3.1 Concentración del Hg total en los diferentes tejidos del lagarto

Todas las muestras de tejido analizadas de los lagartos cosechados, mostraron una concentración de Hg total diferente entre sí ($H = 24.340$, $p < 0.001$) (Figura 3). La media de la concentración del Hg total para el hígado fue de $1.81 \pm 0.80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, para el riñón $0.57 \pm 0.30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, para el músculo $0.15 \pm 0.06 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ y para la grasa $0.025 \pm 0.03 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (peso húmedo).

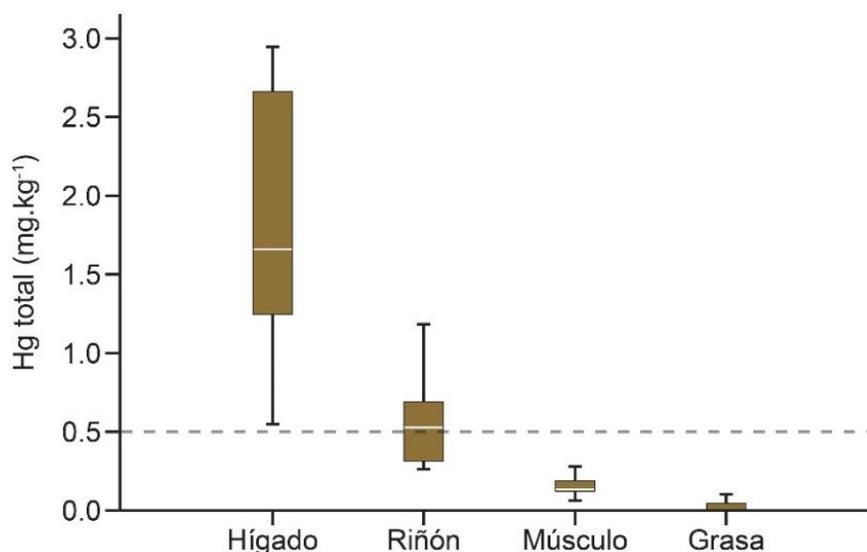


Fig. 3. Mediana con valores máximos y mínimos de la concentración de mercurio total entre los diferentes tejidos de los lagartos cosechados en el sistema de lagunas Colorado-Majal en la comunidad de Cachichira (TCO Tacana I). La línea horizontal a 0.5 mg.kg⁻¹ indica el límite recomendado por la OMS para organismos de agua dulce.

Sin embargo, los tejidos analizados de los lagartos, no mostraron correlación significativa (Tabla 1), aunque los resultados muestran una tendencia a ser positiva.

Tabla 1. Correlación no paramétrica de Spearman (r_s) (valor p) entre los cuatro tejidos analizados del lagarto.

	Grasa	Hígado	Músculo	Riñón
Grasa		$p=0.302$	$p=0.594$	$p=0.594$
Hígado	$r_s=0.428$		$p=0.302$	$p=0.302$
Músculo	$r_s=0.250$	$r_s=0.464$		$p=0.594$
Riñón	$r_s=0.214$	$r_s=0.464$	$r_s=0.214$	

3.2 Concentración del Hg total en tejidos de diferentes vertebrados acuáticos

La revisión bibliográfica muestra que la concentración del Hg total en el hígado es más alta en el grupo de los cocodrilianos al igual que en el grupo de las aves, comparando con el grupo de los peces carnívoros y omnívoros (Figura 4 y 5).

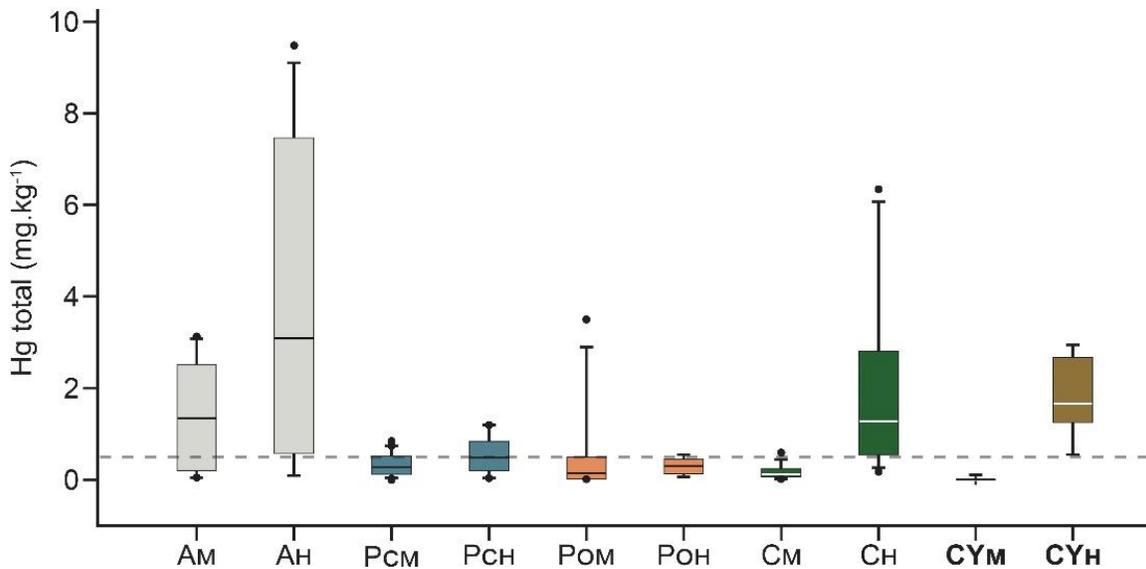


Fig. 4. Mediana con valores máximos y mínimos de la concentración del Hg total del tejido muscular (M) y hepático (H) de aves (AM y AH) (cajas grises), peces carnívoros (PCM, PCH) (cajas azules) y omnívoros (POM, POH) (cajas naranjas), cocodrilianos (CM y CL) (caja verde oscuro) obtenidos en múltiples estudios y del *Caiman yacare* (Cy) (cajas cafés) obtenidos para este estudio. La línea horizontal a 0.5 $\mu\text{g. g}^{-1}$ indica el límite recomendado por la OMS.

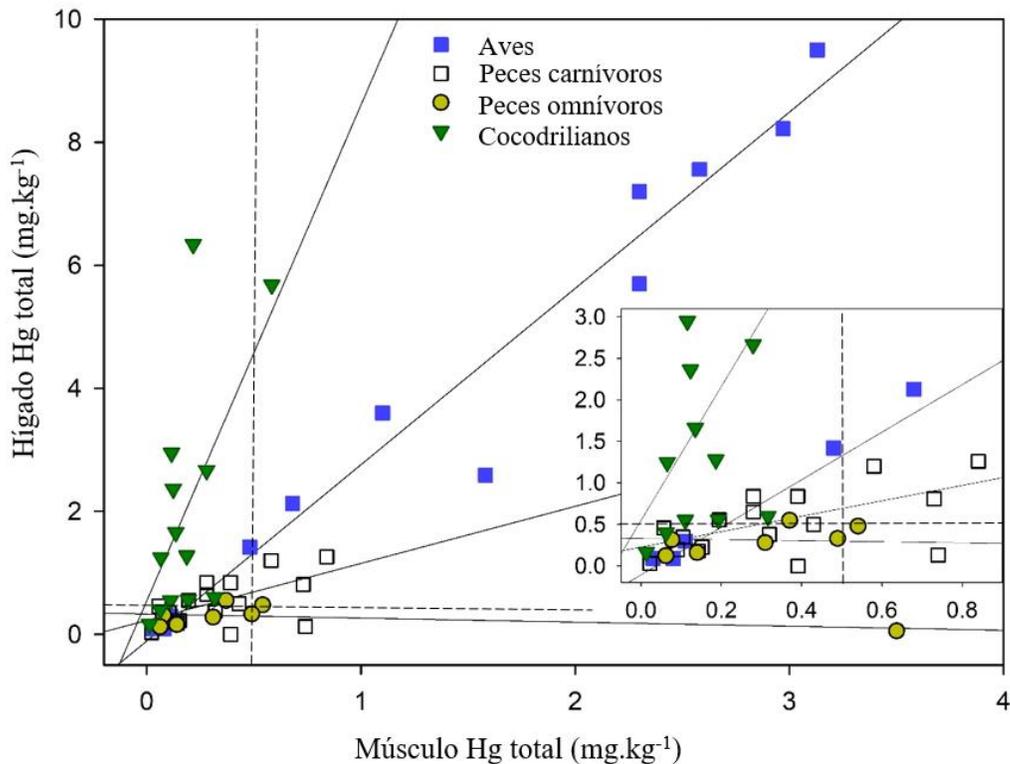


Fig. 5 Hg total de músculo e hígado de aves acuáticas (AM y AH), peces carnívoros y omnívoros (PCM, PCH y POM, POH) y de cocodrilianos (CM y CL), obtenidos para este estudio y en múltiples estudios. (ver tabla 1). La línea horizontal y vertical a 0.5 $\mu\text{g. g}^{-1}$ indica el límite recomendado por la OMS.

4. DISCUSIÓN

4.1 Acumulación de mercurio en el lagarto y en otros vertebrados acuáticos

La acumulación preferencial de Hg en el hígado del lagarto no es una novedad pues concuerda con los resultados obtenidos en otras especies de cocodrilianos (Khan y Tansel 2000, Rumbold et al 2002, Xu et al 2006, Nilsen 2016). La ausencia de correlación entre los tejidos analizados en el lagarto, discrepa con los resultados obtenidos por Burger et al. (2000) en los tejidos hepáticos y muscular de *Alligator mississippiensis*. Esta discrepancia podría explicarse debido a la variación ontogenética al hábitat y a la dieta, que podría determinar las diferencias inter e intra específicas (Schneider et al., 2012; Lázaro et al., 2015).

Pocos estudios reportan sobre la dieta de los cocodrilianos en la Amazonía. Estudios de Magnusson et al. (1987), Da Silveira y Magnusson (1999), Horna et al. (2003) y Lavery y Dobson (2013) reportan contenidos intestinales. Estos estudios confirman que los cocodrilianos son los principales depredadores y que están expuestos a concentraciones de metilmercurio (MeHg) relativamente altas. En consecuencia, pueden acumular cargas sustanciales de Hg en sus órganos debido a la biomagnificación. Por lo tanto, el estudio del comportamiento del Hg en especies de cocodrilianos es de mucha importancia, pues entender la acumulación de metales en sus tejidos, puede coadyuvar a su manejo sostenible.

Según la OMS (1991), los tejidos grasos y musculares tienen concentraciones de Hg total por debajo del límite recomendado para el consumo humano (0.5 y 1.0 mg · kg⁻¹ para peces frescos y marinos, respectivamente). Sin embargo, el hígado y el riñón tienen concentraciones de Hg total superiores a los límites recomendados por la OMS. Según la comunidad indígena Tacana, no consumen ni venden el hígado ni el riñón del lagarto. Sin embargo, no se puede descartar la posibilidad de que a veces se consuman las vísceras en general.

Las concentraciones más altas de Hg total encontradas en las muestras de hígado del lagarto, concuerdan con los datos reportados en otras especies de cocodrilianos y también con otros vertebrados (Burger et al. 2000; Rumbold et al. 2002; Xu et al. 2006; Eagle-Smith et al. 2008; Campbell et al., 2010; Lucia et al., 2010; Branco et al., 2011; Lodenius et al., 2014;

Souza-Araujo et al.2015; Schneider et al.2015; Buenfil-Rojas et al.2018; de Queiroz et al.2018) (Anexo 1). Aun así, la relación entre las concentraciones de Hg en el hígado y el músculo, sin embargo, es mucho menor (Figura 4), por lo que se apunta a que la acumulación diferencial de Hg en las muestras de hígado es mayor que en el grupo de peces. Las concentraciones relativamente altas del Hg total en el hígado del lagarto pueden estar relacionadas con el rol del hígado en el proceso de la desintoxicación (Branco et al. 2011; Buenfil-Rojas et al. 2018).

La acumulación de mercurio en organismos acuáticos afecta a diferentes niveles ya sea según el tipo de especie, tamaño, madurez sexual, variación estacional, hábito alimenticio, nivel trófico, calidad del agua y contaminación ambiental (Khan and Tansel 2000). La concentración total de Hg ha mostrado el mismo comportamiento en el hígado de las aves acuáticas en comparación con peces carnívoros y peces omnívoros (Figura 4).

En el estudio de Eagle-Smith et al. (2008) evaluaron las relaciones de concentración entre tejidos en cuatro especies de aves acuáticas (*Recurvirostra americana*, *Himantopus mexicanus*, *Sterna caspia*, *Sterna forsteri*). Estos autores observaron que las concentraciones de Hg fueron más altas en las plumas que en el hígado. Mientras tanto, Lucia et al. (2010) mostraron que en especies como *Anser anser*, *Pluvialis squatarola*, *Calidris canutus* la acumulación de este metal fue mayor en el hígado, seguido de plumas y riñones.

4.2 Las metalotioneínas (MTs) como una vía a la desintoxicación del Hg

La acumulación de metales varía entre las especies acuáticas y terrestres dependiendo de una variedad de factores (Smith et al. 2007). Los metales tienden a tener afinidades específicas de órganos y, a su vez, los órganos tienden a servir como ubicaciones específicas de metales para la acumulación de los mismos, proceso que se conoce como organotropismo (Norris 1997). En el presente estudio, las altas concentraciones de Hg en el hígado y el riñón no son una novedad ya que son capaces de acumular iones divalentes como el Hg^{+2} debido a la presencia de abundante cisteína (Cys), metalotioneína y glutatión (GSH) (Zalups 2000).

La acumulación del Hg en el riñón de varios reptiles ha sido bien estudiada principalmente en especies de cocodrilianos. De manera consistente con los datos del presente estudio, se ha demostrado que la alta concentración de Hg se acumula en el riñón de *Alligator mississippiensis*, *Alligator sinensis* y *Crocodylus moreletii* (Yanochko et al. 1997; Jagoe et al. 1998; Khan y Tansel 2000; Xu et al. 2006; Buenfil-Rojas et al. 2018) y también en tortugas marinas como *Eretmochelys imbricata* y *Chelonia mydas* (Anan et al. 2001, Sakai et al. 2000). Todas las formas de mercurio provocan daños en los tejidos renales (Zalups 2000; Magos et al. 2005).

Por otro lado, el hígado produce metalotioneínas, proteínas de unión a metales ricas en cisteína y Glutación-s-transferasa (GST) en respuesta a la presencia de metales xenobióticos como el Hg y otros metales, como una vía de descontaminación (Cosson 1994; Thomas et al. 1994; Gunderson et al. 2016) La expresión de tales proteínas depende de la edad, el sexo y la exposición a metales (Gunderson et al. 2016), lo que puede explicar la mayor proporción de concentración de Hg entre el hígado y el músculo en comparación con otros cocodrilianos. En cualquier caso, la baja concentración del Hg total en el tejido adiposo del lagarto es una buena noticia para la población Tacana ya que pueden continuar usándola en cada cosecha estacional para la preparación de aceite y su consumo como medicamento (Azevedo et al. 2020).

La participación de las MTs en el secuestro, la bioacumulación y la desintoxicación de metales en teleósteos, aves y mamíferos no es una novedad (Margoshes y Vallee 1957; Hamer 1986; Nordberg y Nordberg 2009). Sin embargo, de acuerdo con los resultados obtenidos en el presente estudio (Figura 4), existen diferencias entre la producción de MT entre los grupos de vertebrados (Cai et al. 2005; Vasak et al. 2005; Trinchella et al. 2008; Buenfil-Rojas et al. 2015). Si bien existe una relación clara entre la exposición a metales y las concentraciones de MT y GST en los cocodrilianos (Gunderson et al.2016; Buenfil-Rojas et al.2018), no existe tal relación al menos en algunas especies de peces (Mieiro et al.2011).

Algunos estudios afirman que la medición de las concentraciones de MT puede ser una herramienta adecuada para el monitoreo de rutina en organismos que están expuestos a

metales pues éstas están relacionadas con la regulación homeostática de Cu-Zn, además de tener una mejor comprensión sobre la relación entre las MTs y los órganos en diferentes vertebrados (Trinchella et al. 2008; Andreani et al. 2008; Buenfil-Rojas et al. 2018). Dado que el orden de los cocodrilianos ha sido el principal depredador durante mucho tiempo a través de su evolución (Grigg y Kirshner 2015), dichos organismos pueden haber estado expuestos a elevadas concentraciones de MeHg y evolucionar procesos de descontaminación más eficientes a través del hígado.

Además de las MTs y de GST, varios componentes o productos celulares son importantes en la unión de metales. La melanina y los pigmentos relacionados desempeñan papeles defensivos importantes en muchos organismos porque son capaces de unir radicales y cationes derivados del oxígeno, como se explica en Heaton-Jones et al. (1994) y Klaassen (2007). Los melano-macrófagos descritos en el hígado de varias especies de reptiles (por ejemplo, McClellan-Green et al. 2006) se consideran importantes en la desintoxicación. La medición futura de la concentración de Hg en el lagarto debe considerar el tejido dérmico, epidérmico y sanguíneo para aclarar las formas de desintoxicación del Hg (Buenfil-Rojas et al. 2018, 2020). Las queratinas, que son las principales proteínas estructurales epidérmicas, son proteínas de unión a metales ricas en azufre y pueden concentrar iones metálicos con tiol-reactivos de metales xenobióticos como el Hg en la epidermis y en sus diferentes estructuras (Grillitsch y Schiesari 2010).

Se sugieren a los cocodrilianos como buenos bioindicadores de mercurio debido a su alto nivel trófico y su capacidad para bioacumular el Hg en sus tejidos (Khan y Tansel 2000). Sin embargo, Rivera et al. (2016) y los resultados del presente estudio, sugieren que se necesita una mejor comprensión sobre la acumulación del Hg en los tejidos de los cocodrilianos. Dicha información también tiene el potencial de ser útil para el manejo sostenible de las especies y, en general, para la conservación de las mismas. Estudios futuros sobre procesos metabólicos y fisiológicos de Hg en cocodrilianos deberían ser considerados.

5. CONCLUSIÓN

Los resultados muestran que el lagarto acumula la mayor parte del Hg en su hígado y riñón, lo que significa que la población indígena Tacana puede continuar con el consumo de carne del lagarto durante la cosecha estacional y continuar con su comercialización. Asimismo, pueden usar la grasa del lagarto para la preparación y el consumo de aceite. También es notable que la información obtenida de la literatura científica disponible muestra que la acumulación de mercurio en los tejidos depende en gran medida del grupo de vertebrados, lo que tiene implicaciones evolutivas y ambientales. Además, comprender la distribución de contaminantes en diferentes organismos puede coadyuvar a su gestión sostenible.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Achá, D., Hintelmann, H., Yee, J., 2011. Importance of sulfate bacteria in mercury methylation and demethylation in periphyton from Bolivia Amazon region. *Chemosphere*. 82, 911-916.

Adams DH, Sonne C, Basu N, Dietz R, Nam DH, Leifsson PS, Jensen AL (2010) Mercury contamination in spotted seatrout, *Cynoscion nebulosus*: an assessment of liver, kidney, blood, and nervous system health. *Sci Total Environ* 408:5808-5816.

Anan Y, Kunito T, Watanabe I, Sakai H, Tanabe S (2001) Trace element accumulation in hawksbill turtles (*Eretmochelys imbricata*) and green turtles (*Chelonia mydas*) from Yaeyama Islands, Japan. *Environ Toxicol Chem* 20:2802–2814.

Andreani G, Santoro M, Cottignoli S, Fabbri M, Carpena E, Isani G (2008) Metal distribution and metallothionein in logger head (*Caretta caretta*) and green (*Chelonia mydas*) sea turtles. *Sci Total Environ* 390:287–294.

Asociación Matusha Aidha, 2016. Plan de Manejo de Lagarto (*Caiman yacare*) de la TCO Tacana I 2016-2018. CIPTA, WCS y MMNPT. 77.

Aazami J, Esmaili-Sari A, Bahramifar N, Ghasempouri M, Savabieasfahani M (2011) Mercury in liver, kidney, feather and muscle of seabirds from major wetlands of the Caspian Sea, Iran. *B Environ Contam Tox* 86:657.

Azevedo LP, dos Santos Ferraz RH, de Magalhães MRL, Oliveira AP, Cogliati B, Lemos LMS et al (2020) Healing potential of *Caiman yacare* (Daudin, 1802) visceral fat oil. *Wound Medicine*, 100195.

Barbosa, A.C., Souza, J.D., Dórea, J.G., Jardim, W.F., Fadini, P.S., 2003. Mercury bio-magnification in a tropical black water, río negro, Brazil. *Archives Environmental Contamination Toxicology*. 45, 235-246.

Buenfil-Rojas AM, Álvarez-Legorreta T, Cedeño-Vázquez, JR (2015) Metals and metallothioneins in Morelet's crocodile (*Crocodylus moreletii*) from a transboundary river between Mexico and Belize. *Arch Environ Contam Toxicol* 68:265-273.

Buenfil-Rojas AM, Alvarez-Legorreta T, Cedeño-Vázquez JR (2018) Mercury and metallothioneins in blood fractions and tissues of captive Morelet's crocodiles in Quintana Roo, Mexico. *Chemosphere* 199: 630-636.

Buenfil-Rojas AM, Alvarez-Legorreta T, Cedeño-Vazquez JR, Rendón-von Osten J, González-Jáuregui M (2020) Distribution of metals in tissues of captive and wild Morelet's crocodiles and the potential of metallothioneins in blood fractions as a biomarker of metal exposure. *Chemosphere* 244:125-551.

Burger, J., Gochfeld, M., Rooney, A.A., Orlando, E.F., Woodward, A.R., Guillette Jr., L.J., 2000. Metals and metalloids in tissues of American alligators in three Florida lakes. *Archives Environmental Contamination and Toxicology*. 38, 501-508.

Burger J, Jeitner C, Donio M, Pittfield T, Gochfeld M (2013) Mercury and selenium levels, and selenium: mercury molar ratios of brain, muscle and other tissues in bluefish (*Pomatomus saltatrix*) from New Jersey, USA. *Sci Total Environ* 443:278-286.

Cai B, Zheng Q, Huang ZX (2005) The properties of the metal–thiolate clusters in recombinant mouse metallothionein-4. *The Protein J* 24: 327-336.

Campbell, J.W., Waters, M.N., Tarter, A., Jackson, J., 2010. Heavy metal and selenium concentrations in liver tissue from wild American Alligator (*Alligator mississippiensis*) livers near Charleston, South Carolina. *Journal of Wildlife Diseases*. 46, 1234-1241.

Cammilleri G, Vazzana, M, Arizza, V, Giunta F, Vella A, Lo Dico G et al (2018) Mercury in fish products: what's the best for consumers between bluefin tuna and yellowfin tuna?. Nat Prod Res 32:457-462.

CIPTA y WCS. 2002. Estrategia de Desarrollo Sostenible de la TCO Tacana con base en el manejo de los recursos naturales 2001– 2005, CIPTA, WCS, USAID, La Paz, Bolivia. 425 p.

CIPTA, WCS. 2010. Manejo del lagarto por el pueblo Tacana, La Paz, Bolivia. 28.

Compeau, G.C., Bartha, R., 1985. Sulfate-reducing bacteria: principal methylators of mercury in anoxic estuarine sediment. Appl. Environ. Microbiol. 50, 498-502.

Cosson RP (1994) Heavy metal intracellular balance and relationship with metallothionein induction in the liver of carp after contamination by silver, cadmium and mercury following or not pretreatment by zinc. Biometals 7:9-19.

da Silva CC, Teixeira ME, de Oliveira RRR, Oliveira de Jesus FE (2013) Total mercury bioaccumulation in tissues of carnivorous fish (*Micropogonias furnieri* and *Cynoscion acoupa*) and oysters (*Crassostrea brasiliiana*) from Sepetiba Bay, Brazil. J Aquat Food Prod Technol 22:96-102.

Da Silveira, R., Magnusson, W., 1999. Diet of Spectacled and Black Caiman in the Anavilhanas Archipelago, Central Amazonia, Brazil. Journal of Herpetology. 33, 181-192.

de Queiroz JV, Vieira JCS, da Cunha Bataglioli I, Bittarello AC, Braga CP, de Oliveira G, Padilha CCF, de Magalhães Padilha P (2018) Total mercury determination in muscle and liver tissue samples from Brazilian Amazon fish using slurry sampling. Biol Trace Elem Res 184:517-522.

Delany MF, Bell JU, Sundlof SF (1988) Concentrations of contaminants in muscle of the American alligator in Florida. *J Wildl Dis* 24:62-66.

Eagles-Smith, CA, Ackerman, J.T., Yee, J., Adelsbach, T.L., 2008. Mercury demethylation in waterbird livers: dose-response thresholds and differences among species. *Environmental Toxicology Chemistry*. 28,568–577.

Ebrahimi M, Taherianfard M (2010) Concentration of four heavy metals (cadmium, lead, mercury, and arsenic) in organs of two cyprinid fish (*Cyprinus carpio* and *Capoeta sp.*) from the Kor River (Iran). *Environ Monit Assess* 168:575-585.

Elsy RM, Lance, VA, Campbell L (1999) Mercury levels in alligator meat in south Louisiana. *B Environ Contam Tox*, 63:598-603.

Endo T, Hisamichi Y, Haraguchi K, Kato Y, Ohta C, Koga N (2008) Hg, Zn and Cu levels in the muscle and liver of tiger sharks (*Galeocerdo cuvier*) from the coast of Ishigaki Island, Japan: relationship between metal concentrations and body length. *Mar. Pollut. Bull* 56:1774-1780.

Fuentes, A. (2005). Una introducción a la vegetación de la región de Madidi. *Ecología en Bolivia*, 40(3), 1-31.

Grigg, G. Kirshner, D. 2015. *Biology and evolution of crocodylians*. Clayton South (VIC): CSIRO Publishing.

Gunderson MP, Pickett MA, Martin JT, Hulse EJ, Smith SS, Smith LA, Campbell RM, Lowers RH, Boggs A, Guillette LJ et al (2016) Variations in hepatic biomarkers in American alligators (*Alligator mississippiensis*) from three sites in Florida, USA. *Chemosphere* 155:180-187.

Hamer DH (1986) Metallothionein. *Annu. Rev. Biochem* 55:913-951.

Heaton-Jones TG, Homer BL, Heaton-Jones DL, Sundlof SF (1997) Mercury distribution in American alligators (*Alligator mississippiensis*) in Florida. *J Zoo Wildlife Med* 28:62–70.

Havelková M, Dušek L, Némethová D, Poleszczuk G, Svobodová Z (2008) Comparison of mercury distribution between liver and muscle—a biomonitoring of fish from lightly and heavily contaminated localities. *Sensors*, 8:4095-4109.

Horna, V., Zimmermann, R., Cintra, R., Vásquez, P., Horna, J. 2003. Feeding ecology of the black caiman (*Melanosuchus niger*) in Manu National Park, Peru. *Lyonia*. 4, 65–72.

Houserová, P. Kubán, V., Krácmár, S. Sitko, J., 2007. Total mercury and mercury species in birds and fish in an aquatic ecosystem in the Czech Republic. *Environmental Pollution*. 145, 185-194.

Hosseini, M., Bagher, S.M., 2013. Bioaccumulation of Trace Mercury in Trophic Levels of Benthic, Benthopelagic, Pelagic Fish Species, and Sea Birds from Arvand River, Iran. *Biological Trace Elements Research*. 156, 175–180.

IBCE, 2010. Perfil de Mercado, carne y cuero de lagarto. Instituto Boliviano de Comercio Exterior. Santa Cruz. Bolivia. 31.

Ibisch, P. L., Beck, S. G., Gerkmann, B., y Carretero, A. (2003). Ecoregiones y ecosistemas. Biodiversidad: la riqueza de Bolivia. Estado de conocimiento y conservación. Ministerio de Desarrollo Sostenible y Planificación, Editorial FAN, Santa Cruz.

IBM. 2015. IBM SPSS Statistics, version 23.0. <https://www.ibm.com/products/spss-statistics>.

- Jagoe, C.H., Arnold-Hill, B., Yanochko, G.M., Winger P.V., Brisbin Jr. I.L., 1998. Mercury in alligators (*Alligator mississippiensis*) in the southeastern United States. *The Science of the Total Environment*. 213, 255-262.
- Kaoud H.A., El-Dahshan, A.R., 2010. Bioaccumulation and histopathological alterations of the heavy metals in *Oreochromis niloticus* fish. *Nature and Science*. 8, 147-156.
- Khan, B., Tansel. B., 2000. Mercury Bioconcentration Factors in American Alligators (*Alligator mississippiensis*) in the Florida Everglades. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 47, 54-58.
- King, J.K., Kostka, J.E., Frischer, M.E., Michael Saunders, F., 2000. Sulfate-Reducing Bacteria Methylate Mercury at Variable Rates in Pure Culture and in Marine Sediements. *Applied and Environmental Microbiology*. 66, 2430-2437.
- Klaassen CD (2007) Casarett and Doull's toxicology: The basic science of poisons. New York: McGraw-Hill.
- Lavery TM y Dobson AP (2013) Dietary overlap between black caimans and spectacled caimans in the Peruvian Amazon. *Herpetologica* 69: 91-101.
- Lázaro, W.I., de Oliveira, R.F., dos Santos-Filho, M., da Silva, C.J., Malm, O., Ignacio, A.R., Diéz, S., 2015. Non-lethal sampling for mercury evaluation in crocodilians, *Chemosphere*. 138, 25-32.
- Lodenus, M., Skaren, U., Hellstedt, P., Tulisalo, E., 2014. Mercury in various tissues of three mustelid species and other trace metals in liver of European otter from Eastern Finland. *Environmental Monitoring and Assessment*. 186, 325-333.
- Lucia, M., André, J.M., Gontier, K., Diot, N., Veiga, J., Davail, S., 2010. Trace Element Concentrations (Mercury, Cadmium, Copper, Zinc, Lead, Aluminium, Nickel, Arsenic, and

Selenium) in Some Aquatic Birds of the Southwest Atlantic Coast of France. *Archive Environmental Contamination Toxicology*. 58, 844–853.

Macalady, J.L., Mack, E.E., Nelson D.C., Scow, K.M., 2000. Sediement Microbial Community Structure and Mercury Methylation in Mercury Poulled Clear Lake, California. *Applied and Environmental Microbiology*. 66, 1479-1488.

Malik N, Biswas AK, Qureshi TA, Borana K, Virha R (2010) Bioaccumulation of heavy metals in fish tissues of a freshwater lake of Bhopal. *Environ Monit Assess*, 160:267.

McClellan-Green P, Celandier M, Oberdoester E (2006) Hepatic, renal and adrenal toxicology. In: Gardner SC, Oberdoester E (eds) *Toxicology of reptiles. New perspectives: toxicology and the environment*. Boca Raton (FL): Taylor and Francis 123–148.

MMAyA, 2009. Estrategia para la Reconducción del Programa Nacional de Conservación y Aprovechamiento Sostenible del Lagarto. Viceministerio de Medio Ambiente, Biodiversidad y Cambios Climáticos – Dirección General de Biodiversidad y Áreas Protegidas. La Paz, Bolivia.

Magos L, Brown AW, Sparrow S, Bailey E, Snowden RT, Skipp WR (1985) The comparative toxicology of ethyl- and methylmercury. *Arch Toxicol* 57:260–267.

Magnusson, W.E., Da Silva E.V., Lima, A., 1987. Diets of Amazonian Crocodilians. *Journal of Herpetology*. 21, 85-95.

Margoshes M, Vallee BL (1957) A cadmium protein from equine kidney cortex. *J Am Chem Soc* 79:4813–4814.

Maurice-Bourgoin, L., Quiroga. I., Chincheros. J., Courau, P., 2000. Mercury distribution in water and fishes of the upper Madeira rivers and mercury exposure in riparian Amazonian populations. *Science Total Environment*. 260, 73-86.

Mieiro CL, Bervoets L, Joosen S, Blust R, Duarte AC, Pereira ME, Pacheco M (2011) Metallothioneins failed to reflect mercury external levels of exposure and bioaccumulation in marine fish considerations on tissue and species specific responses. *Chemosphere* 85:114-121.

Molina, C.I., Gibon, F.M., Duprey, J.L., Dominguez, E., Guimarães, J.R.D., Roulet, M., 2010. Transfer of mercury and methylmercury along macroinvertebrate food chains in a floodplain lake of the Beni River, Bolivian Amazonia. *Science of the Total Environment*. 408, 3382-3391.

Nevado, J.B., Martín-Doimeadios, R.R., Bernardo, F.G., Moreno, M.J., Ropero, M.P., de Marcos Serrano, A., 2011. Mercury speciation in fish tissues from a Mediterranean River basin: The Tagus River (central Spain) as a case study. *Archives of environmental contamination and toxicology*. 61, 642-652.

Nilsen F.M., Parrot, B.B. Bowden, J.A. Kassim, B.L., Somerville, S.E. Bryan, T.A., Bryan, C.E., Lange, T.R., Delaney, J.P., Brunell, A.M., Long, S.E., Guillette Jr. L.J., 2016. Global DNA methylation loss associated with mercury contamination and aging in the American Alligator (*Alligator mississippiensis*). *Science of the Total Environment*. 545, 389-397.

Nordberg M, Nordberg G (2009) Metallothioneins: Historical development and overview. *Metal ions in life sciences*. R Soc Chem Cambridge 1–29.

Norris DO (1997) *Vertebrate Endocrinology*. Academic Press, San Diego, U.S.

Núñez NG, Bautista OJ, Rosiles MR (1998) Concentración y distribución de mercurio en tejidos del cazón (*Rhizoprionodon terraenovae*) del Golfo de México. *Vet Mex* 15-21

Pouilly, M., Rejas, D., Pérez, T., Duprey, J.L., Molina, C.I., Húbas, C., Guimarães, J.R.D., 2013. Trophic Structure and Mercury Biomagnification in Tropical Fish Assemblages, Iténez River, Bolivia. PLoS ONE. 8, 5.

Rahmanikhah Z, Esmaili-Sari A, Bahramifar N (2020) Total mercury and methylmercury concentrations in native and invasive fish species in Shadegan International Wetland, Iran, and health risk assessment. Environ Sci Pollut R 1-9.

Rivera, S.J., Pacheco, L.F., Achá, D., Molina, C.I., Miranda-Chumacero, G., 2016. Low total mercury in *Caiman yacare* (Alligatoridae) as compared to carnivorous, and non-carnivorous fish consumed by Amazonian indigenous communities. Environmental Pollution. 218, 366-371.

Rumbold, D.G., Fink, L.E., Laine, K.A., Niemczyk, S.L., Chandrasekhar, T., Wankel S.D., Kendall, C., 2002. Levels of mercury in alligators (*Alligator mississippiensis*) collected along a transect through the Florida Everglades. The Science of the Total Environment. 297, 239–252.

Sakai H, Saeki K, Ichihashi H, Kamezaki N, Tanabe S, Tatsukawa R (2000) Growth-related changes in heavy metal accumulation in green turtle (*Chelonia mydas*) from Yaeyama Islands, Okinawa, Japan. Arch Environ Contam Toxicol 39:378–385.

Santos, S. A., Nogueira, M.S., Pinheiro, M.S., Campos, Z., Magnusson, W.E., Mourao, G.D.M., 1996. Diets of Caiman crocodilus yacaré from different habitats in the Brazilian Pantanal. Herpetology Journal. 6, 111-118.

Schneider, L., Pacheco, R., Kluczkowski Jr, A., Martinez, G., Marioni, B., Carl Vogt R., Da Silveira, R., 2012. Mercury Concentration in the Spectacled Caiman and Black Caiman (Alligatoridae) of the Amazon: Implications for Human Health. Archive Environmental Contamination Toxicology. 63, 270-279.

Schneider L, Maher W, Green A, Vogt RC (2013) Mercury Contamination in Reptiles: An Emerging Problem with Consequences for Wildlife and Human Health. In: Ki-Hyun K, Brown RJC (eds) Mercury: Source, Applications and Health Impacts. Nova Science Publishers Inc, pp 178-197.

Schneider, L., Eggins, S., Maher, W., Vogt, R.C., Krikowa, F., Kinsley, L., Eggins, S.M., Da Silveira, R., 2015. An evaluation of the use of reptile dermal scutes as a non-invasive method to monitor mercury concentrations in the environment. *Chemosphere*. 119, 162-170.

Sergio, F., Schmitz, O.J., Krebs, C.J., Holts, R.D., Wirsing, M.R., Ripple, W.J., Ritchie, E., Ainley, D. Oro, D., Jhala, Y., Hiraldo, F., Korpimäki, E., 2014. Towards a cohesive, holistic view of top predation: a definition, synthesis and perspective. *Oikos*. 123, 1234-1243.

Smith PN, Cobb GP, Godard-Codding C, Hoff D, McMurry ST, Rainwater TR (2007) Contaminant exposure in terrestrial vertebrates. *Environ Pollut* 150:41–64.

Souza-Araujo, J., Giarrizo, T., Lima, M.O., 2015. Mercury concentration in different tissues of *Podocnemis unifilis* (Troschel, 1848) (Podocnemididae: Testudines) from the lower Xingu River – Amazonian, Brazil. 75, 106-111.

Storelli MM, Giacomini-Stuffler R, Marcotrigiano G (2002) Mercury accumulation and speciation in muscle tissue of different species of sharks from Mediterranean Sea, Italy. *B Environ Contam Tox* 68:201-210.

Thomas P, Baer KN, White RB (1994) Isolation and partial characterization of metallothionein in the liver of the red-eared turtle (*Trachemys scripta*) following intraperitoneal administration of cadmium. *Comp Biochem Physiol C Toxicol Pharmacol* 107:221-226.

Trinchella F, Riggio M, Filosa S, Parisi E, Scudiero R (2008) Molecular cloning and sequencing of metallothionein in squamates: new insights into the evolution of the metallothionein genes in vertebrates. *Gene* 423:48-56.

Vasak M (2005) Advances in metallothionein structure and functions. *J. Trace Elem Med Biol* 19:13–17.

Vélez-Alavez M, Labrada-Martagón V, Méndez-Rodríguez LC, Galván-Magaña F, Zenteno-Savín T (2013) Oxidative stress indicators and trace element concentrations in tissues of mako shark (*Isurus oxyrinchus*). *Comp Biochem Phys A* 165:508-514.

Vieira, L.M., Nunes, V.D S., Amaral, M.D.A., Oliveira, A.C., Hauser-Davis R.A., Campos, R.C., 2011. Mercury and methylmercury ratios in Caiman (*Caiman cocodrilus yacare*) from the Pantanal area, Brazil. *Journal Environment Monitoring*. 13, 280-287.

WHO (World Health Organization), 1991. Inorganic mercury. World Health Organization International Programme on Chemical Safety, Geneva, Switzerland. 118, 168.

Xu, Q., Fang, S., Wang, Z., Wang, Z., 2006. Heavy Metal Distribution in Tissues and Eggs of Chinese Alligator (*Alligator sinensis*). *Archive Environmental Contamination Toxicology*. 50, 580–586.

Yanochko GM, Jagoe CH, Brisbin Jr. IL (1997) Tissue mercury concentrations in alligators (*Alligator mississippiensis*) from the Florida Everglades and the Savannah River Site, South Carolina. *Arch Environ Con Tox* 32:323-328.

Zalups RK (2000) Molecular interactions with mercury in the kidney. *Pharmacol Rev* 52:113-144.

ANEXOS

Anexo 1. Concentración de mercurio total (media \pm SD) obtenida en el hígado y el tejido muscular para este estudio y de aquellos estudios reportados para otros vertebrados acuáticos.

Grupo de vertebrados acuáticos	Referencia	Especies	Hígado	Musculo	
AVES	Houserová et al. 2007	<i>Podiceps cristatus</i>	7.2 \pm 1.43	2.30 \pm 0.16	
	Eagle-Smith et al. 2008	<i>Recurvirostra americana</i>	2.59 \pm 0.23	1.58 \pm 0.23	
		<i>Himantopus mexicanus</i>	7.56 \pm 0.69	2.58 \pm 0.23	
		<i>Sterna caspia</i>	8.22 \pm 1.07	2.97 \pm 0.39	
		<i>Sterna forsteri</i>	9.50 \pm 0.84	3.13 \pm 0.28	
	Lucia et al. 2009	<i>Anser anser</i>	0.09 \pm 0.1	0.08 \pm 0.06	
		<i>Calidris canutus</i>	2.13 \pm 0.57	0.68 \pm 0.27	
		<i>Pluvialis squatarola</i>	1.42 \pm 0.65	0.48 \pm 0.25	
	Aazami et al. 2011	<i>Phalacrocorax carbo</i>	5.7 \pm 0.91	2.30 \pm 2.0	
		<i>Anas platyrhynchos</i>	0.3 \pm 0.02	0.11 \pm 0.01	
		<i>Fulica sp.</i>	0.09 \pm 0.02	0.03 \pm 0.02	
	Hosseini et al. 2013	<i>Anas crecca</i>	3.6 \pm 0.4	1.10 \pm 0.6	
		Núñez et al. 1998	<i>Rhizoprionodon terraenovae</i>	0.16 \pm 0.15	0.63 \pm 0.37
		Storelli et al. 2002	<i>Sphyrna tudes</i>		18.29
		Endo et al. 2008	<i>Galeocerdo cuvier</i>	0.81 \pm 1.8	0.73 \pm 0.26
Havelková et al. 2008		<i>Perca fluviatilis</i>	0.23 \pm 0.55	0.15 \pm 0.65	
		<i>Leuciscus cephalus</i>	0.18 \pm 0.79	0.14 \pm 0.55	
		<i>Rutilus rutilus</i>	0.12 \pm 0.47	0.06 \pm 0.2	
Ebrahimi and Taherianfard 2009		<i>Capoeta sp.</i>	0.55 \pm 0.44	0.37 \pm 0.3	
		<i>Cyprinus carpio</i>	0.33 \pm 0.55	0.49 \pm 0.46	
Malik et al. 2009		<i>Ctenopharyngodon idella</i>	0.16 \pm 0.01	0.14 \pm 0.002	
		<i>Labeo rohita</i>	0.32 \pm 0.01	0.08 \pm 0.002	
Kaoud and El-Dahshan 2010		<i>Oreochromis niloticus</i>	0.05 \pm 0.003	3.5 \pm 0.33	
Adams et al. 2010		<i>Cynoscion nebulosus</i>	0.5 \pm 0.2	0.43 \pm 0.1	
Nevado et al. 2011		<i>Cyprinus carpio</i>	0.48	0.54	
		<i>Ameiurus melas</i>	0.28	0.31	

PECES	Da Silva et al. 2013	<i>Micropogonias furnieri</i>	0.03 ± 0.01	0.02 ± 0.01
	Burger et al. 2013	<i>Pomatomus saltatrix</i>	0.38 ± 0.06	0.32 ± 0.02
	Hosseini et al. 2013	<i>Strongylura strongylura</i>	0.84	0.39
		<i>Chanos chanos</i>	0.65	0.28 ± 0.6
		<i>Epinephelus diacanthus</i>	1.2 ± 0.4	0.58 ± 0.7
	Vélez-Alavez et al. 2013	<i>Isurus oxyrinchus</i>	0.0001	0.4
	de Queiroz et al. 2018	<i>Brachyplathystoma filamentosum</i>	1.04 ± 0.01	0.09 ± 0.001
		<i>Cichla spp</i>	1.26 ± 0.02	0.11 ± 0.002
		<i>Colossoma macropomum</i>	0.2 ± 0.003	0.06 ± 0.001
		<i>Arapaima gigas</i>	0.35	0.20 ± 0.002
		<i>Serrasalmus rhombeus</i>	0.49 ± 0.005	0.27 ± 0.003
		<i>Pinirampus pirinampu</i>	0.56 ± 0.007	0.07 ± 0.0008
	Cammilleri et al. 2018	<i>Thunnus thynnus</i>		0.84 ± 0.2
		<i>Thunnus albacares</i>		0.16 ± 0.3
	Rahmanikhah et al. 2020	<i>Mesopotamichthys sharpeyi</i>		0.02 ± 5.88
<i>Cyprinus carpio</i>			0.02 ± 3.02	
<i>Tilapia zillii</i>			0.028	
REPTILES (ALLIGATORIDAE)	Delany et al. 1988	<i>Alligator mississippiensis</i>		0.31
	Yanochko et al. 1997	<i>Alligator mississippiensis</i>	0.40	1.45
	Jago et al. 1998	<i>Alligator mississippiensis</i>		0.21
	Elsy et al. 1999	<i>Alligator mississippiensis</i>		0.22
	Burger et al. 2000	<i>Alligator mississippiensis</i>	0.40 ± 80.1	0.06 ± 16.5
	Khan and Tansel 2000	<i>Alligator mississippiensis</i>	0.17	0.01 ± 5.35
	Rumbold et al. 2002	<i>Alligator mississippiensis</i>	0.6	0.32
	Xu et al. 2006	<i>Alligator sinensis</i>	0.56	0.19
	Campbell et al. 2010	<i>Alligator mississippiensis</i>	5.68 ± 1.4	
	Vieira et al. 2011	<i>Caiman crocodilus yacare</i>		0.15
		<i>Melanosuchus niger</i>		0.19 ± 96.2

	Schneider et al. 2012	<i>Caiman crocodilus crocodilus</i>		0.28
	Schneider et al. 2015	<i>Melanosuchus niger</i>		0.18
		<i>Caiman crocodilus</i>		0.23
	Rivera et al. 2016	<i>Caiman yacare</i>		0.21 ± 0.22
	Nilsen et al 2017	<i>Alligator mississippiensis</i>	6.34	0.58
	Buenfil-Rojas 2018	<i>Crocodylus moreletii</i>	0.02 ± 0.01	
	This study	<i>Caiman yacare</i>	1.81 ± 0.87	0.14 ± 0.07

Concentración de mercurio en mg.kg⁻¹