INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL

CENTRO INTERDICIPLINARIO EN CIENCIAS MARINAS

CICIMAR-IPN

DETERMINACIÓN DE CADMIO Y COBRE EN TEJIDO MUSCULAR Y HEPÁTICO DE *Mustelus henlei* (GILL, 1863) EN LA COSTA OCCIDENTAL DE BAJA CALIFORNIA SUR, MÉXICO

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN MANEJO DE RECURSOS MARINOS

P R E S E N T A

JUAN JOSÉ PALAFOX PADILLA

DIRECTORES

Dra. Ana Judith Marmolejo Rodríguez

Dra. Laura Arreola Mendoza

LA PAZ, B.C.S Febrero 2024

Índice

1. Introducción **14**

2. Antecedentes: **17**

2.1 Elementos traza en tiburones *17*

2.2 Metales pesados en tiburones de México *18*

2.3 Estudios en *Mustelus henlei* y especies del género Mustelus *19*

2.4 Estudios de elementos traza, oligoelementos, metales pesados y metaloides en el sedimento y columna de agua de la península de Baja California , México. *21*

3. Planteamiento del problema **23**

4. Justificación **25**

5. Hipótesis **25**

6. Objetivo general **26**

6.1. Objetivos específicos *26*

7. Materiales y Métodos **27**

7.1. Área de estudio *27*

7.1.1. Campo pesquero Punta Lobos: **27**
7.1.2. Puerto Adolfo López Mateos: **28**
7.1.3. Laguna San Ignacio: **29**
7.1.4. Bahía Tortugas B.C.S: **30**

7.2 Trabajo de campo *31*

7.3 Trabajo de Laboratorio *32*

7.3.1. Disección y Liofilización de muestras **32**
7.3.2. Homogenización **32**
7.3.3. Digestión ácida **32**
7.3.4. Validación de los métodos **33**
7.3.5. Determinación del Cadmio **33**
7.3.6. Determinación del Cobre **34**

7.4 Trabajo de gabinete *34*

8. Resultados **35**

8.1 Cadmio en músculo *42*

8.1.2 Cadmio en hígado **45**

8.2 Cobre en músculos *49*
8.2.2 Cobre en hígado **53**

9. Discusión **57**

9.1 concentración de Cd en músculo *59*

9.2 Concentración de Cd en Hígado *60*

9.3 Concentración de Cu en músculo e hígado *61*

10.- Conclusiones **63**

10.1. Cadmio *63*

10.2. Cobre *63*

11. Bibliografía. **65**

Índice de figuras.

Figura 1. Vista ventral y dorsal de *M. henlei* (Compagno, 1995)..... 20

Figura 2. Vista satelital de la costa occidental de Baja California Sur, México (B.C.S) 27

Figura 3. Concentración general de Cd en músculos de machos y hembras en las cuatro zonas de estudio. 43

Figura 4. Bioacumulación de Cd en el músculo de *M. henlei* para cada área de estudio. 44

Figura 5. Comparación entre hembras (A) y machos (B) con respecto a la concentración de cadmio en el músculo, la línea roja discontinua indica el límite permitido por la Norma Oficial Mexicana (0.5 mg/kg ww). 44

Figura 6. Comparación de la concentración de Cd en el músculo de *M. henlei* en las cuatro áreas de estudio. 45

Figura 7. Concentración general de Cd en el hígado incluyendo machos y hembras de *M. henlei* en las cuatro áreas de estudio. 46

Figura 8. Bioacumulación de Cd en el hígado de *M. henlei* en cada una de las áreas de estudio. 47

Figura 9. Comparación entre hembras (A) y machos (B) con respecto a la concentración de cadmio en el hígado, la línea roja discontinua indica el límite permitido por la Norma Oficial Mexicana (0.5 mg/kg ww). 48

Figura 10. Comparación de la concentración de Cd en el hígado de *M. henlei* en las cuatro áreas de estudio. 49

Figura 13. Comparación entre hembras y machos con respecto a la concentración de cadmio en el músculo, la línea azul discontinua indica el límite permitido por la FAO (30 mg/kg) y la línea negra discontinua marca los límites permitidos por la EPA (0.02 mg/kg). 52

Figura 14. Comparación de la concentración de Cu en el músculo de *M. henlei* en las cuatro áreas de estudio. 53

Figura 15. Concentración general de Cu en hígado de machos y hembras de *M. henlei* en cada las cuatro áreas de estudio. 54

Figura 16. Bioacumulación de Cu en hígado de *M. henlei* en cada una de las áreas de estudio. 55

Figura 17. Comparación entre hembras y machos respecto a la concentración de cadmio en el músculo, la FAO marca (30 mg/kg) como límite y la línea negra discontinua marca los límites permitidos por la EPA (0.2 mg/kg)..... 56

Figura 18. Comparación de la concentración de Cu en el músculo de *M. henlei* en las cuatro áreas de estudio. 57

Índice de tablas

Tabla1.- Número de muestras colectadas en la costa occidental de Baja California Sur, México..... 31

Tabla 2.- Concentraciones promedio en peso húmedo (w.w. por sus siglas en inglés) de *M. henlei* en las 4 áreas de estudio (<L.D. menor al límite de detección). 35

Tabla 3.- Porcentajes de humedad y resultados de la concentración de Cd y Cu en peso seco (dw) y peso húmedo (ww) en el músculo de *M. henlei.* 36

Tabla 4.- Porcentajes de humedad y resultados de la concentración de Cd y Cu en peso seco y peso húmedo en hígados de *M. henlei.* 39

Tabla5.- Tabla comparativa de diferentes estudios referentes a las concentraciones de Cd y Cu en tejido muscular y hepático de tiburones. ….57

Resumen

Los elementos traza (ET) también conocidos como oligoelementos se encuentran presentes en cantidades muy pequeñas en los tejidos y son nutrientes esenciales, los cuales realizan funciones indispensables para el mantenimiento de la vida, el crecimiento y la reproducción. El cazón mamón *Mustelus henlei* constituye una de las especies de tiburón más importante en la pesquería artesanal de la costa occidental de Baja California Sur (BCS), México, representando una fuente de alimento para el ser humano. Esta especie puede bioacumular altas concentraciones de contaminantes potencialmente tóxicos. El objetivo de la presente investigación es conocer las concentraciones de cadmio (Cd) y cobre (Cu) en los tejidos muscular y hepático de *M. henlei* en cuatro localidades de Baja California Sur: Punta Lobos, Puerto Adolfo López Mateos, Laguna San Ignacio y Bahía Tortugas y comparar con las normas oficiales mexicanas e internacionales con respecto a los límites para el consumo humano. Las concentraciones promedio de Cd en peso seco (d. w. por sus siglas en inglés) en el músculo de *M. henlei* para cada localidad fue en Punta Lobos (0.161 ± 0.188 mg/kg dw), en López Mateos (0.006 ± 0.023 mg/kg dw), en Bahía San Ignacio (0.476 ± 0.377 mg/kg dw) y en Bahía Tortugas (0.066 ± 0.069 mg/kg dw). Con respecto a las concentraciones promedio de Cd (peso seco) en el hígado, Punta Lobos está en un rango de7.590 ± 2.334 mg/kg dw, en López Mateos (3.714 ± 2.812 mg/kg d.w.), en Laguna San Ignacio (1.536 ± 1.121 mg/kg dw) y en Bahía Tortugas (2.425± 1.849 mg/kg dw), siendo mayor la concentración de Cd en el hígado y superando los límites permitidos por la Norma Oficial Mexicana (NOM). Las concentraciones de promedio de Cu (peso seco) en el músculo en cada localidad: Punta Lobos (1.550 ± 0.808 mg/kg dw), en López Mateos (0.810 ± 1.481 mg/kg dw), en Bahía San Ignacio (4.005 ± 6.912 mg/kg dw) y en Bahía Tortugas (1.087 ± 0.322 mg/kg dw). La concentración promedio de Cu en hígado fue en Punta Lobos (3.430 ± 0.508 mg/kg dw), en López Mateos (5.179 ± 2.676 mg/kg dw), en Laguna San Ignacio (3.246 ± 2.061 mg/kg dw)

y en Bahía Tortugas (4.400 ± 1.862 mg/kg p.s.) la concentración de Cu fue mayor en el músculo; sin embargo, al comparar con las normas internacionales no representaron un riesgo para la salud humana, en relación al consumo de esta especie.

Abstract

There are chemical elements known as trace elements (TE) that are present in very small amounts in tissues and are essential nutrients, which perform indispensable functions for the maintenance of life, growth and reproduction. The bigeye dogfish *Mustelus henlei* is one of the most important shark species in the artisanal fishery of the west coast of Baja California Sur (BCS), Mexico, representing a source of food for humans. This species can bioaccumulate high concentrations of potentially toxic contaminants such as cadmium (Cd). The objective of this research is to determine the concentrations of cadmium (Cd) and copper (Cu) in the muscle and liver tissues of *M. henlei* in four locations in Baja California Sur: Punta Lobos, Puerto Adolfo López Mateos, Laguna San Ignacio and Bahía Tortugas, and to compare with the official Mexican and international standards regarding the limits for human consumption. The average concentrations of Cd (dry weight) in the muscle of M. henlei for each locality were in Punta Lobos (0.161 ± 0.188 mg/kg dw); in López Mateos (0.006 ± 0.023 mg/kg dw); in Bahía San Ignacio (0.476 ± 0.377 mg/kg dw); in Bahía Tortugas (0.066 ± 0.069 mg/kg dw). The average concentrations of Cd (dry weight) in the liver of Punta Lobos are in a range (7.590 ± 2.334 mg/kg dw); in López Mateos (3.714 ± 2.812 mg/kg dw); in Laguna San Ignacio (1.536 ± 1.121 mg/kg dw); in Bahía Tortugas (2.425± 1.849 mg/kg dw), being higher in the liver and exceeding the limits allowed by the official Mexican regulations. The average concentrations of Cu (dry weight) in muscle in each locality Punta Lobos (1.550 ± 0.808 mg/kg dw); in López Mateos (0.810 ± 1.481 mg/kg dw); in Bahía San Ignacio (4.005 ± 6.912 mg/kg dw); in Bahía Tortugas (1.087 ± 0.322 mg/kg dw), the average concentration of Cu in livers was in Punta (3. 430 ± 0.508 mg/kg dw); in López Mateos (5.179 ± 2.676 mg/kg dw); in Laguna San Ignacio (3.246 ± 2.061 mg/kg dw); in Bahía Tortugas (4.400 ± 1.862 mg/kg dw) the Cu concentration was higher in the muscle; however,

when compared with international standards, they did not represent a human health risk for the consumption of this species.

Glosario:

A

Absorción: Proceso por el cual una sustancia se incorpora a otra a nivel molecular.

Adsorción: Proceso por cual una sustancia se adhiere a la superficie de otra.

B

Bioacumulación: Acumulación de sustancias químicas en los tejidos de los seres vivos a lo largo del tiempo.

Biodilución: Disminución de la concentración de una sustancia química en los tejidos de los seres vivos a medida que se mueven a través de la cadena alimentaria.

Biodisponibilidad: Grado en que una sustancia química está disponible para ser absorbida por los seres vivos.

Biodiversidad: Variedad de formas de vida en un ecosistema o en todo el planeta.

Biomagnificación: Aumento de la concentración de una sustancia química en los tejidos de los seres vivos a medida que se mueven a través de la cadena alimentaria.

Biótico: Relativo a los seres vivos y sus interacciones.

C

Coliformes: Grupo de bacterias que se utilizan como indicadores de contaminación fecal en el agua.

Complejación: Proceso por cual una sustancia química se une a otra para formar un complejo más grande y estable.

Convección: Movimiento de fluidos debido a diferencias de temperatura y densidad.

Cuenca hidrográfica: Es un territorio continental drenado por un sistema de drenaje natural, sus aguas dan a un río o un lago endorreico.

D

Densidad: Masa por unidad de volumen de una sustancia.

Desorción: Proceso por el cual una sustancia química se libera de la superficie a la que estaba adsorbida.

E

Ecosistema: Comunidad de seres vivos y su entorno físico y químico.

Elasmobranquio: Subclase de peces cartilaginosos que incluye a los tiburones y las rayas.

Elemento traza: Elemento químico presente en pequeñas cantidades en los seres vivos y en el medio ambiente.

Espiráculo: Orificio respiratorio de los insectos, arácnidos y otros artrópodos.

Estratificación: Proceso de formación de estratos o capas de diferentes características en un material o en un medio.

F

Fuentes geogénicas: Fuentes de contaminación que se originan en la tierra o en la corteza terrestre.

G

Geoquímico: Relativo a la geoquímica, que es la ciencia que estudia la composición química de la Tierra y otros cuerpos planetarios.

H

Hepático: Relativo al hígado.

Hidrólisis: Reacción química en la que una molécula se divide en dos o más moléculas más simples mediante la adición de agua.

Hidrotérmico: Relativo a la acción combinada del agua y el calor.

Homogeneización: Proceso de mezcla de dos o más sustancias para obtener una mezcla uniforme.

I

Interespecífico: Relativo a la relación entre diferentes especies.

L

Liofilización: Proceso de secado de un material mediante la eliminación del agua por sublimación en condiciones de vacío.

M

Molar: Relativo a la concentración de una sustancia química en una solución.

O

Oligoelementos: Elementos químicos presentes en pequeñas cantidades en los seres vivos y en el medio ambiente.

Organotropismo: Tendencia de una sustancia química a acumularse en ciertos órganos o tejidos de los seres vivos.

Oxidación: Proceso químico por el cual una sustancia pierde electrones.

R

Reducción: Proceso químico por cual una sustancia gana electrones.

S

Sedimento: Material sólido que se deposita en el fondo de un cuerpo de agua.

Surgencia: Fenómeno por el cual el agua profunda y fría se eleva a la superficie en ciertas áreas del océano.

Sustrato: Material sobre el cual crecen los seres vivos.

T

Topografía: Características físicas de la superficie de la Tierra.

Transferencia trófica: Movimiento de energía y nutrientes a través de la cadena alimentaria.

1. Introducción

Existen elementos químicos conocidos como elementos traza (ET) u oligoelementos que se encuentran presentes en cantidades muy pequeñas en los tejidos y son nutrientes esenciales, los cuales realizan funciones indispensables para el mantenimiento de la vida, el crecimiento y la reproducción. Se pueden dividir en esenciales como el cobre (Cu), Hierro (Fe), zinc (Zn) que son necesarios para el desarrollo fisiológico, químico y biológico de los organismos y los no esenciales como el cadmio (Cd), plomo (Pb), arsénico (As), que en bajas concentraciones pueden interferir con funciones vitales (Alarcón-Corredor, 2009).

Los ET suelen estar presentes en cantidades muy bajas (<1000 mg/kg) en la corteza terrestre en sedimentos de ecosistemas y en el agua de mar (1 mg/kg; Bruland y Lohan, 2004) y se transfieren a los organismos a través de las redes tróficas (Pancaldi, 2020).

Dentro de los ET, un grupo importantes son los metales pesados y metaloides que se caracterizan por tener una alta densidad (>4g/mL), son persistentes en el ambiente y son elementos potencialmente tóxicos (EPT). Los metales pesados suelen introducirse en el medio ambiente de manera natural por fuentes fluviales, atmosféricas e hidrotermales (Chester y Jickells, 2012) y a través de actividades humanas, como la minería, los procesos industriales y el uso de pesticidas y fertilizantes (Londoño-Franco *et al*., 2016).

Los efectos tóxicos que provocan dependen de las características fisicoquímicas del metal, de la concentración, de la vía de entrada, de la biodisponibilidad y de las condiciones fisiopatológicas del individuo. Debido a su alta concentración en el ambiente, el riesgo de bioacumulación y biomagnificación, así como los diversos efectos en los ecosistemas, han provocado enfermedades, así como daños en órganos vitales y desarrollos cancerígenos (Reyes *et al*.,2016; Londoño-Franco *et al*., 2016).

Los metales pesados están sujetos a distintos procesos los cuales modifican y permiten su integración a los ecosistemas y organismos. Entre los más importantes

se encuentran los siguientes procesos químicos que afectan la movilidad y la biodisponibilidad de los metales pesados que incluyen: la oxidación, reducción, hidrólisis, complejación, adsorción, desorción, absorción y precipitación entre otros (Libes, 2009).

Las condiciones reductoras pueden modificar el estado de oxidación de los metales de tal manera que los convierta en formas más solubles y móviles, mientras que la oxidación puede convertirlos en formas menos solubles y móviles. La hidrólisis puede formar hidróxidos insolubles, mientras que la complejación puede formar complejos solubles. La adsorción hace que los metales se adhieran al material particulado en suspensión, las cuales precipitan al sedimento y, por lo tanto, disminuir su disponibilidad (Wang *et al*., 2013).

Los procesos físicos afectan el comportamiento de los metales pesados en el ambiente, incluyen la volatilización, sedimentación y el transporte por difusión o convección. La volatilización conduce un metal en un gas; mientras que la sedimentación puede hacer que los metales se depositen en el fondo de los cuerpos de agua o del suelo. La difusión y convección pueden afectar la velocidad de transporte de los metales en el medio ambiente (Luoma, 1990).

En los organismos vivos los procesos biológicos incluyen la bioacumulación, biodilución y biomagnificación. La bioacumulación es un proceso por el cual ciertas sustancias tóxicas, como metales pesados o productos químicos, se acumulan en organismos a lo largo de su vida (Pantoja-Echevarría *et al*., 2020; Pancaldi, 2020).

Este proceso se produce a medida que los organismos ingieren alimentos que contienen estas sustancias y las absorben en su tejido corporal. Por el contrario, la biodilución es un proceso por el cual la concentración de un elemento o contaminante que disminuye a medida que crece y también si se mueve a través de las redes tróficas (Sun et al., 2020). Otro proceso analizado en organismos depredadores es la biomagnificación por la cual los elementos se transfieren de un organismo a otro a través de las redes tróficas (Pantoja-Echevarría *et al*., 2020; Pancaldi, 2020; Tao Sun, 2020). Los estudios de biomagnificación consisten en el principio de transferencia de energía y nutrientes a lo largo de los diferentes niveles

tróficos de un ecosistema. Cuando un organismo se alimenta de otro organismo contaminado, los compuestos tóxicos presentes en el alimento son absorbidos y almacenados en sus tejidos corporales (Tao Sun, 2020).

La bioacumulación de contaminantes en los tiburones no solo es una preocupación para la salud de los tiburones; sino también para la salud humana. Debido a que los tiburones son una fuente importante de alimento para muchas comunidades costeras y también son una especie de pesca comercial, los seres humanos pueden estar expuestos a los contaminantes acumulados en los tiburones a través del consumo de su carne (Hammerschlag *et al*., 2011).

En resumen, los procesos químicos, físicos y biológicos controlan la movilidad, la toxicidad y la biodisponibilidad de los metales pesados en el ambiente, por lo que los estudios sobre bioacumulación, biodilución y biomagnificación de elementos traza, son necesarios para conocer si los organismos son afectados en su capacidad para sobrevivir y reproducirse en ambientes contaminados de estos elementos.

2. Antecedentes:

2.1 Elementos traza en tiburones

Recientemente, se realizó un estudio sobre la concentración de elementos traza del tiburón *Scyliorhinus canicula* por Filice *et al*., (2023) en el cual se analizó la acumulación de oligoelementos en el músculo de *S. canicula,* en el mar Tirreno en las costas de Italia. En este estudio, el análisis ecotoxicológico mostró la presencia (promedio ± desviación estándar y rango) de Cd (0.17 ± 0.52 mg/kg; 0–2.44), Cu (8.59 ± 13.25 mg/kg; 0.17–64.75). No se observaron diferencias significativas entre sexos, mientras que se encontró una correlación negativa entre Pb y la longitud del animal.

Un estudio realizado por Moore *et al*., (2015), en el Golfo de Pérsico determinó concentraciones de 11 oligoelementos en músculo e hígado en cinco ejemplares juveniles y dos adultos de *Carcharinus leiodon*. En la cual se observó una correlación positiva en las concentraciones de Pb con relación a la longitud (0.06 ± 0.04 mg/kg); mientras que el manganeso, la concentración disminuyó (0.73 ± 0.19 mg/kg), Las concentraciones de As en el músculo, estuvieron entre las más altas (27.43 ± 9.96 mg/kg) reportadas en elasmobranquios. Las concentraciones de Hg en el músculo (4.37 ± 3.31 mg/kg) excedieron los límites establecidos por la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria y fueron entre los más altos reportados en cualquier elasmobranquio. Estos resultados y estudios previos indican que las concentraciones potencialmente peligrosas del mercurio y otros contaminantes pueden ocurrir en los tiburones en esta región, agregando más factores de estrés a estas poblaciones vulnerables.

En otro estudio, Storelli *et al*., (2010) investigó las concentraciones de Hg, Cd, Pb, Cr, Ni, Cu, Zn en el músculo, gónadas, piel y cerebro de *Mustelus mustelus* en el Mar Mediterráneo por las costas de Italia, para definir los patrones de distribución de los metales. Los resultados mostraron que la concentración de los metales depende del tejido como consecuencia de sus requerimientos metabólicos,

propiedades fisicoquímicas y de los procesos de biodilución específicos de cada elemento. Las concentraciones de estos metales fueron mayores en las gónadas (Cd 0.02–0.10 mg/kg; Cu 1.95–21.62 mg/kg), en la piel (Cd 0.01–0.04 mg/kg; Cu 0.78–6.80 mg/kg), en el cerebro (Cd 0.01–0.05; Cu 0.90–4.02 mg/kg), el tejido muscular presentó las menores concentraciones (Cd 0.01–0.06 mg/kg; Cu 0.33–2.23 mg/kg).

2.2 Metales pesados en tiburones de México

En el caso de México diversos estudios han reportado la presencia y bioacumulación de los elementos traza y metales pesados en los elasmobranquios.

Un estudio realizado por Martínez-Ayala *et al*., (2022), evaluó la presencia de metales pesados en Santa Rosalía, Golfo de California, México para conocer si se encontraban por debajo del límite de consumo permisible. Se determinaron las concentraciones de elementos traza esenciales (Cu, Fe, Mn y Zn) y no esenciales (Ag, Cd y Pb) en cincuenta y siete muestras de músculo de *Rhizoprionodon longurio.* Las concentraciones promedio de Fe (5.26 ±10.67 mg/kg) > Zn (4.68 ± 5.48 mg/kg) > Cu(0.16 ± 0.25mg/kg) > Mn (0.22 ± 0.37 mg/kg) > Cd (0.04 ± 0.03 mg/kg) > Ag (0.10 ± 0.16 mg/kg), no superaron los límites permisibles para el consumo humano establecidos por la NOM, la OMS y la FAO. La ingesta diaria de minerales fue de 0.10 a 0.53 % × 100 g de músculo, y el porcentaje de consumo semanal fue de 2.5 % a <12 % respecto al peso corporal.

Lara *et al*., (2022), midieron el cadmio, selenio y mercurio en el tiburón azul *Prionace glauca* y el tiburón *Sphyrna zygaena.* Este trabajo mostró que las concentraciones de Cd y Hg fueron más bajas que el límite máximo permisible para consumo humano establecido por el gobierno mexicano (Hg = 1.0 mg/kg y Cd = 0,50 mg/kg). Las diferencias interespecíficas en la acumulación de oligoelementos denotaron variaciones en la dieta y requisitos fisiológicos de cada especie de tiburón. Los valores calculados del factor de biomagnificación (BMF) confirmaron una transferencia trófica de elementos presa depredadora. Resultados no significativos del valor del índice de beneficios para la salud del selenio (*P. glauca*= − 0.46; *S.*

zygaena = − 0.02) que indican que no hay un riesgo significativo en cuanto al consumo.

Otro estudio realizado por Lara *et al*., (2020) evaluaron la bioacumulación y la transferencia trófica de elementos potencialmente tóxicos en el tiburón zorro *Alopias pelagicus,* en B.C.S, México. Los resultados revelaron que las concentraciones promedio de Hg (0.76 mg kg) en los tejidos musculares estaban por debajo de los límites máximos permisibles para el consumo humano. El Se en los músculos fue relativamente bajo (media: 0.30 mg kg) lo que resultó en un exceso molar de Hg sobre él Se. Los niveles medios de Cd hepático fueron extremadamente superiores al límite máximo de consumo. El organotropismo de Hg fue músculo > hígado, mientras que Se y Cd presentaron un orden de hígado > músculo. El factor de biomagnificación (BMF) enfatizó la transferencia trófica de elementos lo que plantea riesgos potenciales para la salud que exigen un control regular de los riesgos para la salud.

Los trabajos en diversas especies en México y otras partes del mundo, muestran que la bioacumulación es un proceso por el cual los tiburones y otros depredadores tope pueden acumular sustancias tóxicas en su cuerpo a lo largo de su vida. Estas sustancias pueden provenir de su alimentación y de la contaminación ambiental. Los estudios indican que diferentes especies de tiburones presentan niveles variables de contaminantes en sus tejidos, lo que puede tener implicaciones para la salud de los tiburones y para la seguridad alimentaria humana.

2.3 Estudios en *Mustelus henlei* y especies del género *Mustelus* en México

Mustelus henlei es una especie perteneciente al género *Mustelus* de la familia Triakidae. Habita en costas del Océano Pacífico Oriental a profundidades de 200m aproximadamente (Compagno, 1995). Se localiza en diferentes sustratos; sin embargo, tiene preferencia por zonas fangosas o arenosas, siendo su zona principal de refugio y alimentación. Incluye una distribución que va desde el norte de California hasta las costas de Ecuador y Perú entre las latitudes 43° Norte y 18° Sur.

Presenta un cuerpo alargado, con una cabeza corta y hocico puntiagudo, sus ojos son ovalados y se puede ver un espiráculo posterior al ojo, la primera aleta dorsal es triangular con bordes posteriores deshilachados, la segunda aleta dorsal es más larga que la aleta anal y dientes con una cúspide central alta acompañada de dos cúspides laterales más pequeñas (Fig. 1) (Compagno, 1995).

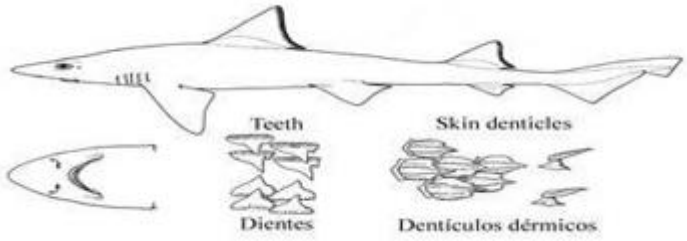

Figura 1. Vista ventral y dorsal de *M. henlei* (Compagno, 1995)

Se han reportado tallas que van entre los 32-93 cm de longitud total (LT), con un promedio de 66.8 cm. Existen diferencias significativas por sexo donde existe una mayor abundancia de hembras en intervalo por arriba de los 60 cm (LT) en comparación con los machos. La talla de primera madurez para las hembras es de 57-60 cm (LT) y para machos es de 55-56 cm (LT), su reproducción es vivípara placentaria llegando a tener hasta 21 crías por camada (Pérez-Jiménez y Sosa Nishizaki, 2008), y se alimenta principalmente de crustáceos, peces y cefalópodos (Palafox, 2016).

El tiburón *M. henlei,* al igual que otras especies de tiburones, se concentran dentro de la zona costera de la costa occidental de Baja California Sur en las épocas de primavera y verano con fines reproductivos y de crianza (Villavicencio-Garayzar, 1996).

El tiburón mamón pardo *M. henlei* constituye una de las especies de tiburón más importante en la pesquería artesanal en la costa occidental de Baja California Sur (B.C.S). Estudios previos han revelado que esta especie puede bioacumular altas concentraciones de contaminantes potencialmente tóxicos como el cadmio (Cd) y

mercurio (Hg), así como oligoelemententos como el selenio (Se) (Pantoja-Echevarría *et al*., 2020).

Pantoja-Echevarría *et al*. (2021), llevó a cabo un estudio sobre la concentración de cadmio en *M. henlei* (hígado y músculo) en un área influenciada por depósitos naturales de fosforita y afloramientos costeros, demostrando que las concentraciones en el hígado (0.96 mg/kg) fueron más altas en comparación con el músculo (0.040 mg/kg) y en el caso del hígado superó el límite permitido para consumo (0.5 mg/kg) marcados en la NOM-242-SSA1-2009.

En otro estudio realizado en la costa occidental de B.C.S. por (Pantoja-Echevarría, 2021) indicó que las concentraciones medias de Hg eran más altas en músculo que en el hígado; sin embargo, las concentraciones de Hg se encontraron por debajo de los límites máximos permisibles, por lo que el consumo de esta especie no representa un riesgo para la salud humana (Pantoja-Echavarría, 2021).

2.4 Estudios de elementos traza, oligoelementos, metales pesados y metaloides en el sedimento y columna de agua de la península de Baja California Sur, México.

La cuenca hidrográfica El Carrizal ubicada en la Paz B.C.S, tiene un yacimiento minero de oro, drena hacia la costa cercana al poblado Melitón Albañez que es la costa adyacente a Punta Lobos. Marmolejo-Rodríguez *et al*., (2011), analizaron la migración de As, Hg, Pb y Zn en los sedimentos de una mina abandonada de oro en el poblado del Triunfo B.C.S, México, analizando depósitos de desechos mineros y las cenizas del horno de ignición de la mina. Las concentraciones en relaves y cenizas fueron para As (8890 y 505 000 mg kg^{-1}); para Pb (92 700 y 19 300 mg kg^{-1}); y para Zn (49 600 y 1380 mg kg^{-1}). El estudio indicó enriquecimiento de elementos potencialmente tóxicos y más de una fuente de composición litogénica.

Estudios en las Lagunas de Laguna San Ignacio y Ojo de Liebre (Macías-Zamora *et al*., 2008) evaluaron elementos traza en los sedimentos, así como en el pasto marino *Zostera marina.* Se midieron metales en sedimentos (Cd, Cu) en ambas

lagunas, también se midieron en parches de *Z. marina* en ambas lagunas. Los resultados no mostraron una concentración elevada de metales. Sin embargo, si observaron una correlación entre la concentración de los sedimentos y *Z. marina*.

Se realizó un análisis geoquímico ambiental de Bahía Magdalena (Babu, 2017), para evaluar las características ambientales y geoquímicas de los elementos abióticos (agua y sedimentos) y bióticos de la bahía para evaluar el estado de contaminación. Se observaron *in situ* las características físicas del agua, la temperatura (28.98°C), pH (8.25), salinidad (35.2) PSU y la saturación de oxígeno (96.8%). Sin embargo, los perfiles verticales de las propiedades del agua de mar (temperatura, oxígeno, densidad y salinidad), no presentaron capas de estratificación térmica. Las características de las aguas indicaron que la región está influenciada por los procesos de surgencias, las circulaciones oceánicas, los regímenes de marea, la topografía del fondo del mar, los insumos hidrotérmicos y los patrones de viento.

Los resultados del análisis del tamaño de grano en los sedimentos mostraron 98.73% de arena debido a la alta energía, el contenido de carbono total varió entre 0.20 y 1.84%. El análisis de metal total (Si, Al, Fe, Ca, Mg, K, P, S, Ti, Ba, Mn, Cr, Pb, Zn, Cd, Mo, Sr, V, Y, As, Zr, Nb, Th, U, Rb) y las concentraciones de metal lixiviable (Fe, Mn, Cr, Cu, Ni, Co, Pb, Zn, Cd, As y Hg) en los sedimentos se midieron utilizando un espectrómetro XRF y de Absorción Atómica, respectivamente. Las concentraciones de Sr total (421.44 mg/kg), Mn lixiviable (123.20 mg/kg), Cr (64 mg/kg), Ni (16.13 mg/kg), Co (8.57 mg/kg) en los sedimentos superficiales se adscriben a su fuente a partir de las formaciones geológicas y su proximidad con la zona de subducción. El Cu en la columna de agua fue de 0.013-0.015 mg/L y el Cd fue de 0.016-0.017mg/L. Al comparar las concentraciones de metales con la de las Guías de Calidad de Sedimentos (SQGs), se observó que Cd y As eran más altos en la región.

En Isla San Benito cerca de Bahía Tortugas, Sujitha *et al*. (2020) encontraron elevadas concentraciones de Cu elevados en cangrejos (30.32 mg/kg) y peces (3.94 mg/kg), y en el caso del Cd en macrófitas (4.92 mg/kg), cangrejos (9.56 mg/kg) y

peces (1.69 mg/kg). Estos autores dicen que el origen es de fuentes geogénicas, circulación del agua profunda, deposición atmosférica y procesos hidrotermales. Concluyendo que la presencia de elementos potencialmente tóxicos desbalancea el ambiente marino, afectando a las redes tróficas a través de la biomagnificación y consecuentemente al humano.

3. Planteamiento del problema

La contaminación por metales pesados es un problema que afecta a diversas localidades de Baja California Sur, México, incluyendo a Laguna San Ignacio, Bahía Tortugas, Puerto Adolfo López Mateos y Punta Lobos. La actividad minera y otras actividades económicas como la pesca, la agricultura y el turismo, son las fuentes principales de contaminación por metales pesados en estas zonas las cuales son utilizadas como zonas de alimentación y reproducción de la especie *M. henlei,* volviéndola una especie vulnerable a la contaminacion por ET.

En Punta Lobos, Baja California Sur, también se han identificado problemas de contaminación por metales pesados. Se ha demostrado que la actividad minera de zonas aledañas al poblado de Punta Lobos genera desechos tóxicos que contienen metales pesados como arsénico, cadmio y plomo, que se lixivian a los océanos y se sedimentan (Marmolejo-Rodríguez *et al.,* 2011; Boye, 2012; Vargas-González, 2017). Esta contaminación puede afectar tanto la salud humana como la biodiversidad local, incluyendo a las especies marinas y terrestres. Por lo tanto, es importante abordar esta problemática para proteger el ambiente en la región y en consecuencia también proteger la salud de la población.

La minería también ha sido identificada como una fuente de contaminación por metales pesados en la comunidad del puerto Adolfo López Mateos. La extracción de minerales como el oro, la plata y el cobre genera desechos tóxicos que son vertidos al ambiente sin un adecuado tratamiento y control. Estos desechos pueden

contaminar el agua y el suelo, lo que representa un riesgo para la salud de la población y la biodiversidad local (Reyes, 2017).

Dentro de la localidad de Laguna San Ignacio, la actividad minera ha sido identificada como una fuente de contaminación por metales pesados como plomo, arsénico y mercurio. La explotación de minerales como el zinc y el plomo ha generado desechos tóxicos que son vertidos al ambiente sin un adecuado tratamiento y control. Estos desechos pueden contaminar el agua, el suelo y la vegetación, lo que representa un riesgo para la salud de la población local y la biodiversidad de la zona (Sany, 2013).

En Bahía Tortugas, las principales fuentes de metales de manera natural son: las corrientes de aguas profundas, fuentes hidrotermales, fuentes geogénicas y deposiciones atmosféricas (Sujitha *et al*., 2020). Por otra parte, las fuentes de contaminación antropogénica son la pesca, la agricultura y el turismo. Los desechos de la actividad pesquera pueden contener metales pesados como mercurio y plomo, mientras que los fertilizantes y pesticidas utilizados en la agricultura pueden contaminar el suelo y las aguas con metales como el cadmio y el níquel. Además, la actividad turística genera residuos que pueden contener metales pesados, como los que se encuentran en las baterías de los vehículos y los equipos de navegación.

La contaminación por metales pesados puede tener efectos negativos en la salud humana, como daños al sistema nervioso, al sistema cardiovascular y al sistema reproductivo, así como cáncer y problemas de desarrollo en niños. También puede tener impactos negativos en la biodiversidad, como la reducción en las poblaciones de especies acuáticas y terrestres.

Por lo tanto, evaluar las concentraciones de metales pesados (Cd y Cu), en los tejidos de *M. henlei* permitirá conocer si el consumo de esta especie representa un riesgo para la salud, y si estas están por encima del límite de consumo permitido.

4. Justificación

M. henlei es una especie meso-depredadora de importancia pesquera ya que representa el 79.9% de las capturas de tiburón en B.C.S (Ramírez-Amaro, 2011), además es una especie utilizada para consumo humano en Baja California Sur y es exportada a todo México.

La evaluación y determinación de la concentración de metales pesados en músculo e hígado de *M. henlei* permitirá ampliar la información con respecto a la concentración de elementos como Cd y Cu, y si pudieran representar un riesgo para la salud humana.

5. Hipótesis

La concentración de Cd y Cu será diferente en el musculo e hígado de *M. henlei* para cada zona de estudio, siendo mayor en las zonas con menor plataforma continental y tiene influencia de una zona minera, además de todas las zonas que se encuentren más urbanizadas.

6. Objetivo general

Determinar la bioacumulación de cadmio y cobre en tejidos del tiburón mamón pardo, *Mustelus henlei* en cuatro diferentes zonas de la costa occidental de Baja California Sur (Punta Lobos, Puerto Adolfo López Mateos, Laguna San Ignacio y Bahía Tortugas), y comprobar si se encuentran dentro de los límites máximos permisibles para consumo humano establecidos en la Norma Oficial Mexicana (NOM-242-SSA1-2009).

6.1. Objetivos específicos

a) Determinar las concentraciones de cadmio y cobre en tejido muscular y hepático de *M. henlei* y comparar los resultados obtenidos con los valores de la NOM -242-SSA1-2009 y otras normas internacionales.
b) Evaluar la bioacumulación de cadmio y cobre mediante los resultados de estos elementos y la talla del organismo.
c) Determinar si existen diferencias significativas en la bioacumulación por sexo, mediante la concentración de cadmio y cobre en músculo e hígado con respecto del sexo de los organismos.

   Identificar si existen diferencias en la concentración de estos metales entre las cuatro zonas de estudio.

7. Materiales y Métodos

7.1. Área de estudio

En el presente estudio se tomaron muestras de tejido muscular y hepático de *M. henlei* de 4 localidades pertenecientes al estado de Baja California Sur, México.

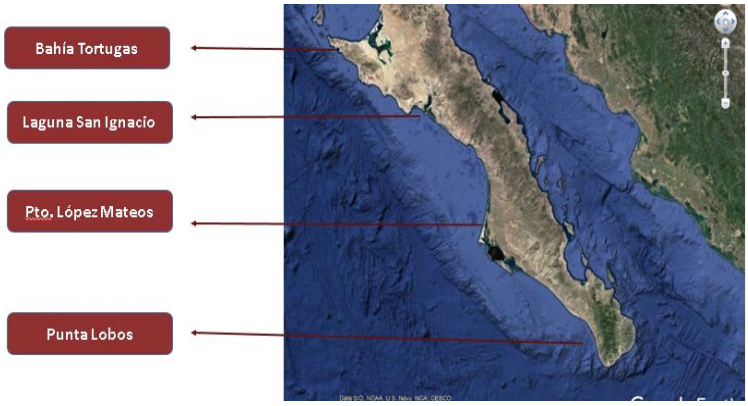

Figura 2. Vista satelital de la costa occidental de Baja California Sur, México (B.C. S)

7.1.1. Campo pesquero Punta Lobos:

Es una playa de gran extensión, se encuentra ubicada cerca del pueblo de Todos Santos en el municipio de La Paz, Baja California Sur, México.

Se localiza a 81 km de la ciudad de La Paz, sus coordenadas geográficas son 23°26´55” N y 110°13´24” O. La temperatura media anual es de 18°C, Se encuentra influenciada principalmente por la corriente de California, que sigue una dirección paralela a la costa hasta llegar al extremo de la península.

Esta corriente se forma y se caracteriza por aguas frías y de baja salinidad. Dentro su geografía presenta una variedad de sustratos arenosos-rocosos donde se concentran una variedad de peces e invertebrados de importancia comercial. Se localiza cerca del cauce del Río Hondo que se transforma en el Río Las Gallinas y

Río El Carrizal, que pasa por la zona minera de El Triunfo, en la que se extrae: oro, plata (Guadarrama-Romero, 2011).

Punta Lobos también tiene un gran valor cultural, ya que es el hogar de una comunidad pesquera tradicional que ha vivido allí durante generaciones. Según el investigador y antropólogo Enrique Hambleton, "La actividad pesquera en Punta Lobos es una tradición que se ha transmitido de generación en generación y que forma parte importante del patrimonio cultural de la región" (Hambleton, 2015).

Desafortunadamente, Punta Lobos también enfrenta problemas de contaminación que afectan su ecosistema y su biodiversidad. Uno de los principales problemas es la calidad del agua debido a la descarga de aguas residuales y la actividad humana en la zona.

Según un estudio realizado por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), "La calidad del agua en Punta Lobos se ha visto afectada por la presencia de coliformes fecales y otros contaminantes debido a la actividad humana y la falta de infraestructura para el tratamiento de aguas residuales" (SEMARNAT, 2018).Además de los problemas de contaminación del agua y la basura, la minería también ha sido un problema importante en la región de Punta Lobos en Baja California Sur, México. La actividad minera ha causado la liberación de metales pesados y otros contaminantes en el suelo y el agua, lo que ha tenido un impacto negativo en la biodiversidad y la salud humana en la zona (CNDH, 2018).

7.1.2. Puerto Adolfo López Mateos:

Es uno de los principales puertos comerciales y turísticos del Municipio de Comondú en la entidad federativa de Baja California Sur. Se localiza 25°11′38″N 112°06′45″O, en la costa occidental de Baja California Sur.

Es uno de los puertos más importantes de la región y tiene una amplia gama de actividades económicas, como la pesca, el turismo y el comercio.

La pesca comercial es una de las principales actividades económicas del puerto. Las especies más capturadas en la zona son la langosta, el camarón, el mero, la cabrilla, el atún y el dorado. El puerto también tiene una importante flota pesquera

que se dedica a la pesca deportiva, y ofrece servicios de alquiler de embarcaciones y guías de pesca.

El turismo es otra actividad económica importante en el puerto, con numerosas empresas que ofrecen tours de avistamiento de ballenas, paseos en kayak, snorkel y buceo. Además, el puerto es un punto de partida para visitar la Isla Magdalena, famosa por sus colonias de lobos marinos.

Sin embargo, el puerto y la zona circundante enfrentan una serie de problemas ambientales, incluyendo la contaminación y la minería. Según un estudio realizado por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático de México, la calidad del agua en el puerto Adolfo López Mateos ha sido afectada por la actividad humana, en particular la pesca y la descarga de desechos. Además, se ha identificado la presencia de metales pesados en los sedimentos del puerto, lo que indica una posible contaminación por actividades industriales (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, 2013).

En cuanto a la minería, la región circundante al puerto podemos encontrar depósitos naturales de fosforita: fósforo, cadmio y uranio. Esta zona ha sido objeto de exploración y explotación minera desde la década de 1970. Un estudio publicado en la revista Environmental Science and Pollution Research International encontró que la minería en la zona ha causado la degradación de los suelos y la contaminación de las aguas subterráneas (Ordoñez-Acevedo *et al*., 2016; Pérez-Vargas *et al*., 2017).

7.1.3. Laguna San Ignacio:

Está localizada en el municipio de Mulegé, Baja California Sur, México. Sus coordenadas geográficas son 26°54´00” N y 26°13´00” O. Esta laguna pertenece a la Reserva de la Biosfera del Vizcaíno, se extiende 16 km dentro del desierto con un ancho de 5 millas, es considerada como sitio RAMSAR, denominada así en el 2004.

Se encuentra cerca de una salinera: Cloro, sodio Magnesio y Potasio, presenta un clima cálido-seco durante el verano y parte del otoño y fresco-húmedo durante el invierno y la primavera, tiene una temperatura media anual de 18°C a 22°C.

Es uno de los ecosistemas más importantes de la región debido a su rica biodiversidad y a su papel crítico en la ecología local. La laguna es un área protegida por el gobierno mexicano desde 1994 y es hogar de una gran cantidad de especies de flora y fauna, incluyendo ballenas grises y leones marinos, que atraen a turistas de todo el mundo (Padilla, 2008).

7.1.4. Bahía Tortugas B.C.S:

Ubicada en el municipio de Mulegé, en Baja California Sur, Bahía de Tortugas es un lugar enigmático colmado de historia, gastronomía y una gran biodiversidad. se encuentra en la región más desértica del estado y cercana a la costa, se han localizado ventilas hidrotermales, las cuales aportan una gran cantidad de elementos y nutrientes para el desarrollo de los organismos (Pantoja-Echevarría *et al*., 2021; Sujitha *et al*., 2020).

Es conocida por su rica biodiversidad marina y su importancia como lugar de anidación para tortugas marinas, es un importante punto de pesca deportiva y de observación de la fauna marina, especialmente de ballenas.

La contaminación en Bahía Tortugas es causada principalmente por las actividades humanas en la zona, como la pesca, la agricultura y el turismo. La actividad pesquera produce residuos que pueden contaminar el agua y el suelo de la zona, mientras que el uso de pesticidas y fertilizantes en la agricultura puede contaminar los ríos y arroyos que alimentan la bahía.

La minería también es una actividad que tiene un impacto significativo en Bahía Tortugas y sus alrededores ya que se encuentran depósitos de oro, tungsteno, silicio, hierro, azufre. La extracción de minerales y la gestión de residuos mineros pueden liberar sustancias tóxicas en el agua y el aire, lo que puede afectar la salud de la población local y la calidad del agua en la zona (Aceves-Bueno *et al*., 2018).

La extracción de minerales requiere de sustancias químicas que pueden contaminar los suelos y las aguas subterráneas. También puede generar impactos negativos en la flora y fauna de la región, incluyendo especies en peligro de extinción (Plascencia-Jiménez *et al*., 2020).

De acuerdo con un artículo publicado en el diario local "El Sudcaliforniano", la empresa minera Cerro del Gallo ha sido criticada por los residentes y grupos ambientalistas debido a su plan de explotación de oro y plata en la región. La empresa ha asegurado que cumplirá con las normas ambientales y de seguridad, pero los activistas temen que la actividad minera tenga consecuencias irreversibles para el ecosistema local.

7.2 Trabajo de campo

Se colectaron muestras en las localidades de Punta Lobos, Puerto Adolfo López Mateos, Laguna San Ignacio y Bahía Tortugas B.C.S, de las cuales se tomaron datos de sexo, estadio de madurez y longitud total. Asimismo, se colectaron muestras de tejido muscular y hepático, posteriormente las muestras se etiquetaron con sus respectivos datos: localidad, especie, sexo tipo de tejido, longitud total y se congelaron para su análisis en el laboratorio. Para este estudio se analizaron 140 muestras, 51 hígados y 89 músculos, de machos y hembras.

Tabla1.- Número de muestra colectada en la costa occidental, Baja California Sur, México.

Tejido	***B. Tortugas***	***Laguna San Ignacio***	***López Mateos***	***Punta Lobos***	***Total***
Músculo	18	33	18	20	89
Hígado	15	15	15	6	51
				N=	**140**

7.3 Trabajo de Laboratorio

7.3.1. Disección y Liofilización de muestras

Las muestras obtenidas se diseccionaron utilizando pinzas de plástico para la manipulación de las muestras, y con ayuda de un bisturí se obtuvieron partes del tejido tratando de obtener una sección que haya estado con el menor contacto con la superficie. Para la esterilización y limpieza del material se utilizó ácido clorhídrico (HCl) al 10% y ácido nítrico (HNO_3) al 15%, cada vez que se disecaba una muestra nueva se sometió al proceso de limpieza y esterilización para evitar que se contaminen. Una vez obtenidas las muestras se obtuvo el peso húmedo con una balanza y depositaron en bolsas esterilizadas de la marca *"whirl-pak*" para ser sometidas a un proceso de liofilización en la cual se sometieron a liofilizar durante 24 horas para el músculo y 48 horas para el hígado a una temperatura de -50 ^{o}C y una presión de 0.120 mbar.

Para el análisis de la concentración de Cd y Cu en músculo e hígado de *M. henlei,* se utilizó el protocolo propuesto por la EPA método 823-B-00-007 (EPA,2000), el cual consiste en tres etapas: homogenización de las muestras, digestión ácida por calentamiento de placas y lectura de las concentraciones por espectrofotometría de absorción atómica con generación de hidruros.

7.3.2. Homogenización

Las muestras se maceraron, en un mortero de ágata, hasta obtener un polvo fino el cual se pesó ya seco el tejido y se guardó en recipientes esterilizados y etiquetados con su respectiva especie, localidad y tejido. El mortero fue limpiado y esterilizado con HCl al 10 % y NHO_3 al 15% cada vez que se cambiaba de muestra.

7.3.3. Digestión ácida

Para esta etapa del proceso se pesó 1g de tejido los cuales se depositaron en vasos de precipitado, una vez pesadas se procedió a agregar los ácidos HCl, NHO_3, y peróxido de hidrógeno (H_2O_2) los cuales se agregaron en tres etapas: Etapa 1) se aforó 2 ml de NHO_3, 0.5 ml de HCl y 5 ml de H_2O_2 en ese respectivo orden dejándolas reaccionar durante 24 hrs. Etapa 2) pasadas las 24 horas se procedió a aforar 5 ml de H_2O_2, posteriormente se utilizaron parillas de calentamiento a una temperatura de 50^0C agitándolos periódicamente, hasta la digestión y evaporación de todos los gases y materia obteniendo al final una sustancia de consistencia viscosa y de color ámbar. Etapa 3) se procedió al filtrado de la sustancia obtenida, para esta etapa se utilizó papel filtro Wahtman-41 aforando a cada muestra agua destilada hasta alcanzar los 50 ml para las muestras que pesaron 1 g y en el caso de las muestras menores a un gramo se aforo hasta 30 ml de agua destilada.

7.3.4. Validación de los métodos

Se utilizaron blancos y materiales de referencia certificados DORM-4 y DOLT-5 que corresponden respectivamente, a músculo e hígado de pescado para validar la metodología. Esto se hizo intercalando los estándares aleatoriamente cada 10 muestras, con el objetivo de garantizar que el método y el lugar donde se implementa son capaces de lograr resultados precisos y exactos dentro de las especificaciones del método y que sus resultados son confiables.

7.3.5. Determinación del Cadmio

Las concentraciones de Cd fueron determinadas en el Laboratorio de Análisis y Monitoreo Ambiental del Centro Interdisciplinario de Investigaciones del Medio Ambiente y Desarrollo (CIIEMAD-IPN), en la Ciudad de México, se utilizó aproximadamente 1 g de muestra las cuales fueron colocadas en vasos de precipitados de 100 ml, añadiendo 2 ml de HNO_3, 0.5 ml de HCl y 10 ml de H_2O_2 dejándolas digerir durante 24 h. Posteriormente se colocaron en parrillas a 50 ^{o}C de temperatura sin alcanzar el punto de ebullición hasta la eliminación de los vapores nitrosos, sin permitir que la muestra se evaporara por completo.

Las concentraciones de Cd y Cu se obtuvieron mediante un espectrofotómetro de absorción atómica equipado para flama (Perkin Elmer Modelo AAnalyst 100; Portman, 1976; EPA, 2000). El cual mide los niveles de absorbancia, intercalándolos en una curva de calibración para cada elemento. También se utilizaron blancos y materiales de referencia (DORM-4 y DOLT-5) en cada lote de diez muestras. Los porcentajes de recuperación de los estándares de referencia fue de 98%.

7.3.6. Determinación del Cobre

Las concentraciones de Cu fueron determinadas en el Laboratorio de Análisis y Monitoreo Ambiental del Centro Interdisciplinario de Investigaciones del Medio Ambiente y Desarrollo (CIIEMAD-IPN), en la Ciudad de México, se utilizó aproximadamente 1 g. de muestra las cuales fueron colocadas en vasos de precipitados de 100 ml, añadiendo 2 ml de HNO_3, 0.5 ml de HCl y 10 ml de H2O2 dejándolas digerir durante 24 h. Posteriormente se colocaron en parrillas a 50^o c de temperatura sin alcanzar el punto de ebullición hasta la eliminación de los vapores nitrosos, sin permitir que la muestra se evaporara por completo.

Las concentraciones de Cd se obtuvieron mediante un espectrofotómetro de absorción atómica equipado para flama (Perkin Elmer Modelo AAnalyst 100; Portman, 1976; EPA, 2000). Se utilizaron blancos y materiales de referencia (DORM-4 y DOLT-5) en cada lote de diez muestras. Los porcentajes de recuperación de los estándares de referencia fue de 103%.

7.4 Trabajo de gabinete

Para el análisis estadístico se utilizó el programa Sigma Plot 12.0 donde se calculó normalidad y homogeneidad de varianza mediante la prueba de Shapiro-Wilk. Para la comparación entre los diferentes valores por sexo de los organismos se utilizó la prueba de U Mann-Whitney (Mann & Whitney, 1947)

$$U_1 = n_1 n_2 + \frac{n_1(n_1+1)}{2} - R_1$$
$$U_2 = n_1 n_2 + \frac{n_2(n_2+1)}{2} - R_2$$

donde:

n_1 y n_2 son los tamaños respectivos de cada muestra; R_1 y R_2 es la suma de los rangos (la suma de la posición relativa de cada individuo de la muestra) de las observaciones de las muestras 1 y 2 respectivamente.

Para determinar las diferencias y comparar entre las cuatro áreas de estudio se aplicó ANOVA de una vía, con el programa Sigma Plot 12.0. Para determinar la bioacumulación se utilizó la regresión lineal para observar las tendencias de bioacumulación basadas en la longitud total.

8. Resultados

Los resultados se presentan en peso seco (dw por sus siglas en inglés) debido a que todas las muestras al ser analizadas se utiliza el peso en seco, de igual manera los datos en cuanto a las concentraciones promedio en peso húmedo se muestran en la tabla 2. Las proporciones en peso húmedo y peso seco con respecto al porcentaje de humedad se presentan en las tablas 3 y 4; así como las concentraciones en peso húmedo y peso seco de cada elemento.

Tabla 2.- Concentraciones promedio en peso húmedo (w.w. por sus siglas en inglés) de *M. henlei* en las 4 áreas de estudio (<L.D. menor al límite de detección).

	Cu mg/kg ww				Cd mg/kg ww			
	Músculo		hígado		Músculo		hígado	
	H	M	H	M	H	M	H	M
Punta Lobos	0.531±0.273 0.240-0.965	0.358±0.207 0.059-0.832	<L.D.	2.158±0.326 1.844-2.611	0.238±0.0.224 0.000-0.653	0.104±0.129 0.000-0.378	<L.D.	7.087±2.246 4.34-9.818
López Mateos	0.191±0.340 0.000-1.131	0.090±0.066 0.000-0.188	2.195±0.816 1.442-3.677	3.364±1.288 2.560-6.452	0.009±0.028 0.000- 0.088	<L.D.	1.220±0.398 0.704-1.649	4.696±1.555 3.548-8.142
San Ignacio	0.657±0.693 0.086-2.639	4.474± 8.263 0.300-38.750	1.977±1.196 0.969-3.977	0.957±0.440 0.000-1.327	0.274±0.116 0.046- 0.488	0.577±0.441 0.000-1.700	1.164±0.683 0.376-2.155	1.562±1.204 0.000-3.952
Bahía Tortugas	0.215±0.074 0.104-0.406	0.183±0.112 0.104-0.347	2.653±1.299 1.046-5.020	<L.D.	0.075±0.071 0.000- 0.203	0.029±0.041 0.000-0.088	2.213±1.635 0.888-5.989	<L.D.

Tabla 3.- Porcentajes de humedad y resultados de la concentración de Cd y Cu en peso seco (dw) y peso húmedo (ww) en el músculo de *M. henlei.*

No.	Código Muestra	Peso Seco (g)	Peso húmedo (g)	%humedad	Cd mg/kg dw	Cd mg/kg ww	Cu mg/kg dw	Cu mg/kg ww
1	#2LM	1.78	9.1	80	0.000	0.000	1.300	0.254
2	#3LM	0.52	4.11	87	0.000	0.000	0.300	0.038
3	#4LM	1.43	6.37	78	0.000	0.000	0.400	0.090
4	#5LM	1.15	6.2	81	0.000	0.000	0.650	0.121
5	#6LM	0.93	5.69	84	0.000	0.000	0.690	0.113
6	#7LM	0.97	5.3	82	0.000	0.000	6.180	1.131
7	#8LM	0.84	3.35	75	0.000	0.000	0.750	0.188
8	#10LM	0.96	5.39	82	0.000	0.000	0.930	0.166
9	#11LM	0.97	5.32	82	0.090	0.016	0.660	0.120
10	#12LM	1.03	5.56	81	0.000	0.000	0.600	0.111
11	#13LM	1.42	7	80	0.000	0.000	0.200	0.041
12	#15LM	2.4	11.93	80	0.000	0.000	0.000	0.000
13	#16LM	0.9	3.44	74	0.000	0.000	0.300	0.078
14	#17LM	1.48	5.75	74	0.000	0.000	0.000	0.000
15	#18LM	1.29	6.99	82	0.000	0.000	0.000	0.000
16	#19LM	2.02	10.06	80	0.000	0.000	0.000	0.000
19	#61PL	1.76	7.48	76	0.150	0.035	2.800	0.659
20	#62PL	1.75	5.92	70	0.000	0.000	0.900	0.266
21	#63PL	1.52	7	78	0.150	0.033	1.000	0.217
22	#64PL	2.26	7.88	71	0.100	0.029	1.950	0.559
23	#65PL	3.37	11	69	0.000	0.000	1.650	0.506
24	#66PL	0.95	4.67	80	0.000	0.000	1.000	0.203

25	#67PL	1.66	4.9	66	0.450	0.152	2.300	0.779
26	#68PL	1.25	2.93	57	0.000	0.000	1.950	0.832
27	#69PL	5.56	19.67	72	0.150	0.042	1.150	0.325
28	#69.1PL	5.56	19.67	72	0.150	0.042	0.850	0.240
29	#70PL	1.36	5.83	77	0.150	0.035	1.400	0.327
30	#71PL	3.25	11.12	71	0.700	0.205	3.300	0.964
31	#72PL	1.26	4.04	69	0.000	0.000	1.350	0.421
32	#73PL	1.36	5.51	75	0.150	0.037	1.550	0.383
33	#74PL	1.19	7.58	84	0.400	0.063	2.700	0.424
34	#75PL	1.05	5.82	82	0.250	0.045	1.900	0.343
35	#76PL	1.04	5.29	80	0.000	0.000	0.300	0.059
36	#77PL	2.01	6.81	70	0.000	0.000	0.550	0.162
37	#78PL	1.68	4.17	60	0.250	0.101	0.850	0.342
39	#80SI	1.39	5.26	74	0.150	0.040	1.770	0.468
40	#81SI	0.9	3.13	71	0.360	0.104	0.300	0.086
41	#82SI	1.16	3.19	64	0.300	0.109	1.230	0.447
42	#83SI	1.11	5.96	81	0.270	0.050	1.770	0.330
43	#84SI	1.25	3.1	60	0.120	0.048	1.230	0.496
44	#85SI	1.94	8.18	76	0.210	0.050	1.260	0.299
45	#86SI	0.65	4.19	84	0.000	0.000	0.300	0.047
46	#87SI	2.34	9.06	74	0.510	0.132	1.290	0.333
47	#88SI	2.15	7.36	71	1.080	0.315	1.890	0.552
48	#89SI	1.39	4.42	69	1.700	0.535	38.750	12.186
49	#90SI	2.13	6	65	0.350	0.124	6.800	2.414
50	#91SI	0.95	4.62	79	0.510	0.105	2.520	0.518
51	#92SI	0.81	4.4	82	0.240	0.044	5.010	0.922
52	#93SI	1.48	5.46	73	0.250	0.068	2.550	0.691
53	#95SI	1.14	4.01	72	0.630	0.179	2.310	0.657
54	#96SI	1.21	4.84	75	0.120	0.030	2.880	0.720

55	#97SI	1.67	5.25	68	0.200	0.064	3.500	1.113
56	#98SI	1.83	6.01	70	0.050	0.015	3.550	1.081
57	#99SI	0.85	3.41	75	0.360	0.090	4.740	1.182
58	#100SI	1.41	7.01	80	0.450	0.091	3.150	0.634
59	#101SI	1.36	4.12	67	1.170	0.386	7.440	2.456
60	#102SI	0.7	4.01	83	0.450	0.079	15.120	2.639
61	#103SI	1.9	5.97	68	0.950	0.302	2.450	0.780
62	#104SI	1.79	7.58	76	0.500	0.118	2.400	0.567
63	#105SI	1.64	6.87	76	1.000	0.239	2.250	0.537
64	#106SI	1.15	6.37	82	0.300	0.054	1.500	0.271
65	#107SI	0.66	2.66	75	0.510	0.127	1.290	0.320
66	#109SI	1.03	6.71	85	0.390	0.060	2.130	0.327
67	#111SI	0.96	3.2	70	0.630	0.189	1.320	0.396
68	#112SI	0.6	4.6	87	0.330	0.043	1.560	0.203
69	#113SI	0.82	5.33	85	0.180	0.028	1.650	0.254
70	#114SI	0.98	3.36	71	0.960	0.280	2.250	0.656
72	#130BT	0.69	4.28	84	0.000	0.000	1.140	0.184
73	#131BT	0.96	5.78	83	0.150	0.025	1.590	0.264
74	#132BT	1.58	7.41	79	0.000	0.000	1.300	0.277
75	#133BT	0.91	4.99	82	0.090	0.016	1.020	0.186
76	#134BT	0.7	4.53	85	0.210	0.032	0.930	0.144
77	#135BT	1.34	6.39	79	0.120	0.025	1.020	0.214
78	#137BT	0.84	5	83	0.150	0.025	0.960	0.161
79	#138BT	0.78	4.99	84	0.000	0.000	1.410	0.220
80	#139BT	0.42	3.39	88	0.000	0.000	0.840	0.104
81	#140BT	1.81	8.24	78	0.050	0.011	1.850	0.406
82	#141BT	0.96	4.81	80	0.120	0.024	1.080	0.216
83	#142BT	0.75	4.63	84	0.030	0.005	0.750	0.121
84	#143BT	1.05	5.88	82	0.120	0.021	1.140	0.204

85	#144BT	0.68	2.87	76	0.000	0.000	0.930	0.220
86	#145BT	0.3	1.13	73	0.000	0.000	0.600	0.159
87	#146BT	0.69	4.57	85	0.090	0.014	0.690	0.104
88	#147BT	1.13	4	72	0.000	0.000	1.230	0.347

Tabla 4.- Porcentajes de humedad y resultados de la concentración de Cd y Cu en peso seco y peso húmedo en hígados de *M. henlei.*

No.	Código Muestra	Peso Seco (g)	Peso húmedo (g)	%humedad	Cd mg/kg dw	Cd mg/kg ww	Cu mg/kg dw	Cu mg/kg ww
90	#20H-LM	6.38	11.44	44	1.100	0.613	4.300	2.398
91	#21H-LM	2.99	6.29	52	1.000	0.475	4.350	2.068
92	#22H-LM	4.18	8.84	53	0.750	0.355	3.050	1.442
93	#23H-LM	4.44	6.4	31	1.600	1.110	5.300	3.677
94	#24H-LM	4.25	6.84	38	1.700	1.056	2.400	1.491
95	#25H-LM	6.36	8.81	28	1.750	1.263	2.900	2.094
97	#41H-LM	4.66	8.01	42	4.100	2.385	4.400	2.560
98	#41.1HLM	4.66	8.01	42	4.500	2.618	4.650	2.705
99	#42H-LM	2.57	4.46	42	4.000	2.305	5.650	3.256
100	#43H-LM	1.73	3.66	53	11.200	5.294	13.650	6.452
101	#44H-LM	4.82	10.44	54	4.650	2.147	5.750	2.655
102	#45H-LM	4.35	7.41	41	3.950	2.319	4.600	2.700
103	#46H-LM	4.54	8.34	46	5.350	2.912	5.850	3.185
104	#47H-LM	3	4.99	40	6.350	3.818	5.650	3.397
105	#40H-PL	2.83	4.41	36	8.950	5.743	3.150	2.021
106	#41H-PL	5	7.85	36	5.750	3.662	4.100	2.611

107	#42H-PL	4.18	6.06	31	10.400	7.174	2.800	1.931
108	#43H-PL	4.36	7.92	45	8.150	4.487	3.350	1.844
109	#44H-PL	2.81	4.42	36	4.700	2.988	3.750	2.384
111	#115H-SI	2.46	3.99	38	1.700	1.048	6.450	3.977
112	#116H-SI	2.01	5.12	61	1.450	0.569	2.900	1.138
113	#117H-SI	2.48	3.66	32	2.300	1.558	1.950	1.321
114	#118H-SI	2.5	6.37	61	0.550	0.216	1.800	0.706
115	#120H-SI	2.48	5.01	50	0.400	0.198	3.000	1.485
116	#121H-SI	1.9	5.01	62	2.750	1.043	3.100	1.176
117	#122H-SI	3.99	8.87	55	0.000	0.000	0.000	0.000
118	#122.1HSI	3.99	8.87	55	4.200	1.889	2.950	1.327
119	#123H-SI	1.22	4.28	71	1.700	0.485	2.350	0.670
120	#124H-SI	1.76	5.03	65	0.850	0.297	3.750	1.312
121	#125H-SI	4.58	8.87	48	0.900	0.465	2.250	1.162
122	#127H-SI	1	3.99	75	2.600	0.652	8.550	2.143
123	#128H-SI	2.58	5.89	56	1.000	0.438	2.900	1.270
124	#129H-SI	0.95	3.43	72	1.100	0.305	3.500	0.969
126	#148H-BT	2.11	3	30	1.200	0.844	4.550	3.200
127	#149H-BT	4.59	8.66	47	5.800	3.074	6.550	3.472
128	#149.1HBT	4.59	8.66	47	6.900	3.657	6.600	3.498
129	#150H-BT	3.36	6.74	50	1.050	0.523	7.350	3.664
130	#151H-BT	2.11	4.8	56	1.750	0.769	1.700	0.747
131	#152H-BT	3.14	3.31	5	2.550	2.419	3.900	3.700
132	#153H-BT	3.6	7.62	53	2.100	0.992	2.850	1.346
133	#154H-BT	2.99	6.37	53	1.700	0.798	4.750	2.230
134	#155H-BT	1.35	3.99	66	1.900	0.643	3.600	1.218
135	#156H-BT	2.25	3.16	29	4.000	2.848	7.050	5.020
136	#157H-BT	2.56	5.11	50	1.050	0.526	2.400	1.202
137	#158H-BT	3.5	4.63	24	1.400	1.058	4.600	3.477

138	**#159H-BT**	**2.19**	**5.13**	**57**	**1.600**	**0.683**	**2.450**	**1.046**
139	**#160H-BT**	**2.15**	**4.94**	**56**	**0.950**	**0.413**	**3.250**	**1.414**

Para la comparación con la norma oficial mexicana e internacionales (NOM-242-SSA1-2009), (EPA,2002) y (FAO, 1983) los resultados se muestran en peso húmedo debido a que la normas marcan un límite de consumo en base al peso húmedo de las muestras.

La longitud total (LT) promedio de *M. henlei* en el presente estudio fue (LT = 69.3 cm ± 20.7 cm)); siendo similares a las tallas promedio que se describen para *M. henlei* es (LT = 89.8 cm ± 13.7 cm para el presente estudio, el rango se puede ver en la (Fig. 3). Se encontró un outlayer de 140 cm en Bahía Tortugas; sin embargo, otras especies diferentes pertenecientes al género *Mustelus* y *Rhizoprionodon longurio* presentan tallas de 110 cm aproximadamente (Marín-Osorno, 1992; Guitart-Manday,1998).

8.1 Cadmio en músculo

Las concentraciones de Cd en peso seco (dw) en el músculo de las hembras de *M. henlei* en las 4 localidades fue desde < l.d. - 0.700 mg/kg dw), con un promedio de 0.156 ± 0.1 mg/kg; mientras que en los machos <l.d.-1.700 mg/kg dw), con un promedio de 0.309 ± 0.4 mg/kg dw (Fig. 3).

Con respecto a la relación entre la talla y la concentración no se encontró diferencias que infieran una correlación entre la longitud total de la especie, ya que presento un valor **p=0.927** para hembras y **p=0.412** para los machos lo cual indica que no hay diferencias significativas que determinen esta relación.

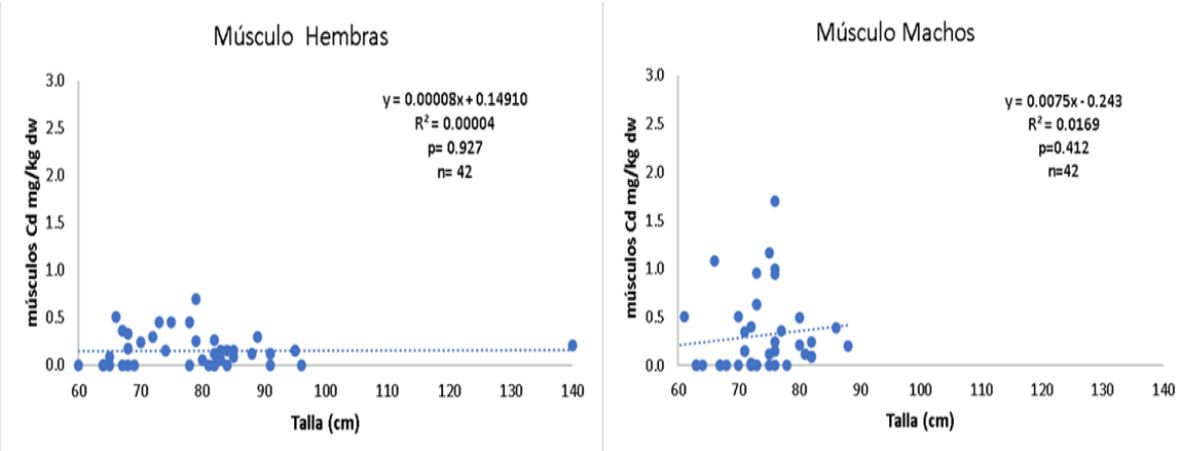

Figura 3. Concentración de Cd en músculos de machos y hembras de las cuatro zonas de estudio.

En cuanto a la bioacumulación en cada zona de estudio encontramos que la concentración de Cd en Punta Lobos está en un rango de <l.d.-0.700 mg/kg dw, con un promedio de 0.161 ± 0.2 mg/kg dw; en López Mateos <l.d. -0.090 mg/kg dw, con un valor promedio 0.006 ± 0.02 mg/kg dw; en Bahía Laguna San Ignacio <l.d. - 1.700 mg/kg dw, con un valor promedio 0.476 ± 0.4 mg/kg dw; en Bahía Tortugas <l.d.-0.210 mg/kg dw, con un valor promedio 0.066 ± 0.07 mg/kg dw) (fig.4).

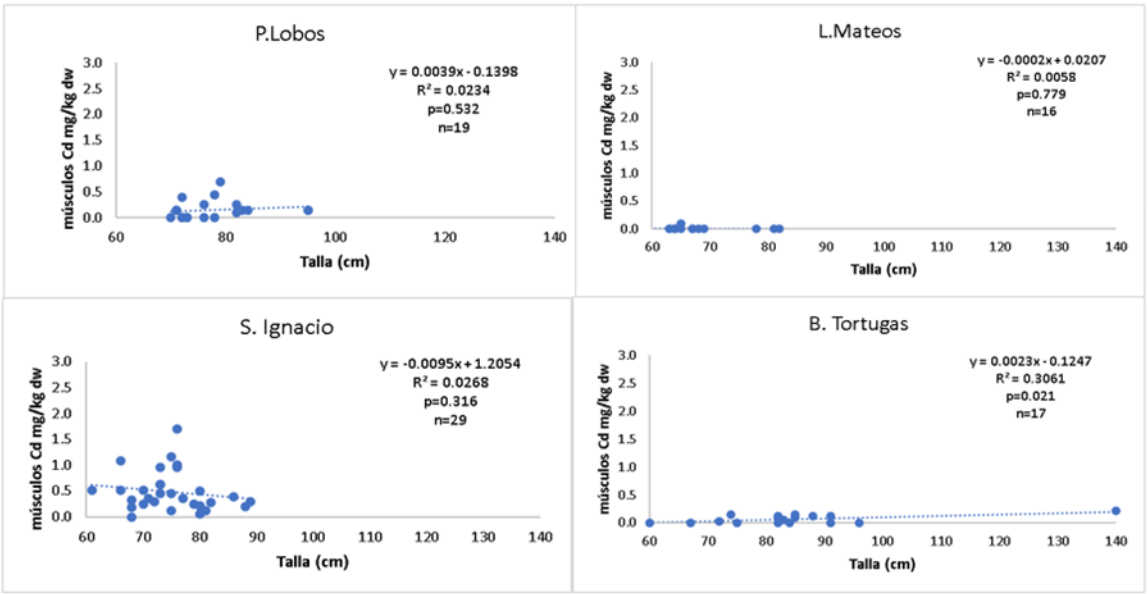

Figura 4. Bioacumulación de Cd en el músculo de *M. henlei* para cada área de estudio.

Al comparar entre sexos la prueba de U Mann-Whitney indicó que no hay diferencias significativas (T = 1667. 000; P = 0.282) entre sexos con relación a la concentración de Cd de machos y hembras (Fig. 5). Esto quiere decir que tanto las hembras como los machos están bioacumulando el Cd en el músculo de una manera similar.

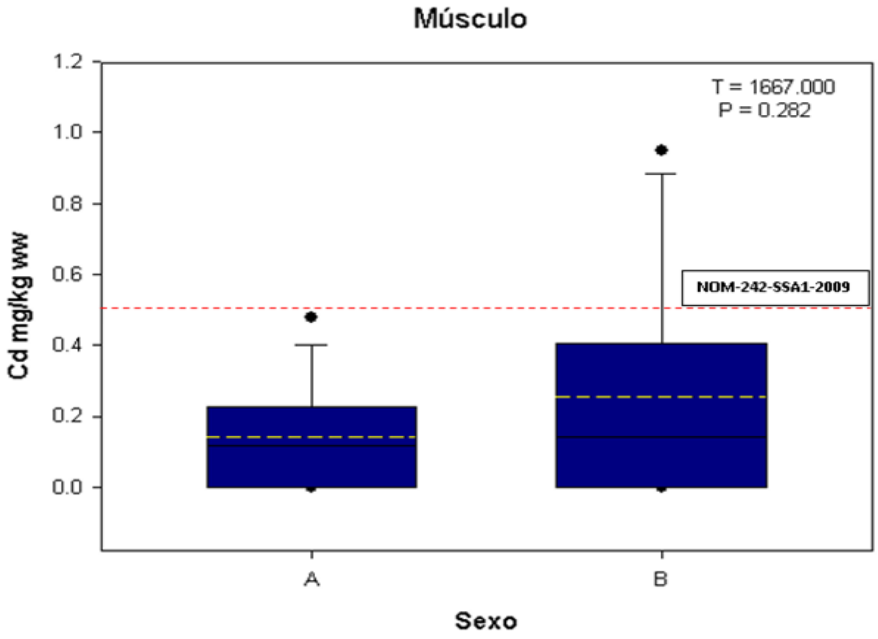

Figura 5. Comparación entre hembras (A) y machos (B) respecto a la concentración de cadmio en el músculo, la línea discontinua roja indica el límite permitido por la Norma Oficial Mexicana NOM-242-SSA1-2009 (0.5 mg/kg ww).

Al comparar entre las cuatro localidades; Punta Lobos, López Mateos, Laguna San Ignacio y Bahía Tortugas la prueba de variancia de una vía (ANOVA *One Way*), existen diferencias significativas en cuanto a las concentraciones de Cd en el tejido muscular (p=<0.001, F= 13.325), lo cual indica que respecto al músculo se está acumulando de diferente manera siendo Laguna San Ignacio quien presenta la mayor concentración de Cu.

Por otra parte, la concentración de Cd promedio para cada localidad fue: Punta lobos 0.043 ± 0.06 mg/kg ww; López Mateos 0.006 ± 0.02 mg/kg ww; Laguna San Ignacio 0.128 ± 0.12 mg/kg ww; Bahía tortugas 0.066 ± 0.07 mg/kg ww, al comparar con la norma oficial mexicana las concentraciones de Cd en los músculos para cada localidad se encuentran por debajo del límite permisible del consumo humano (Fig. 6). Lo cual indica que el consumo de la carne de esta especie no representa un riesgo para la salud.

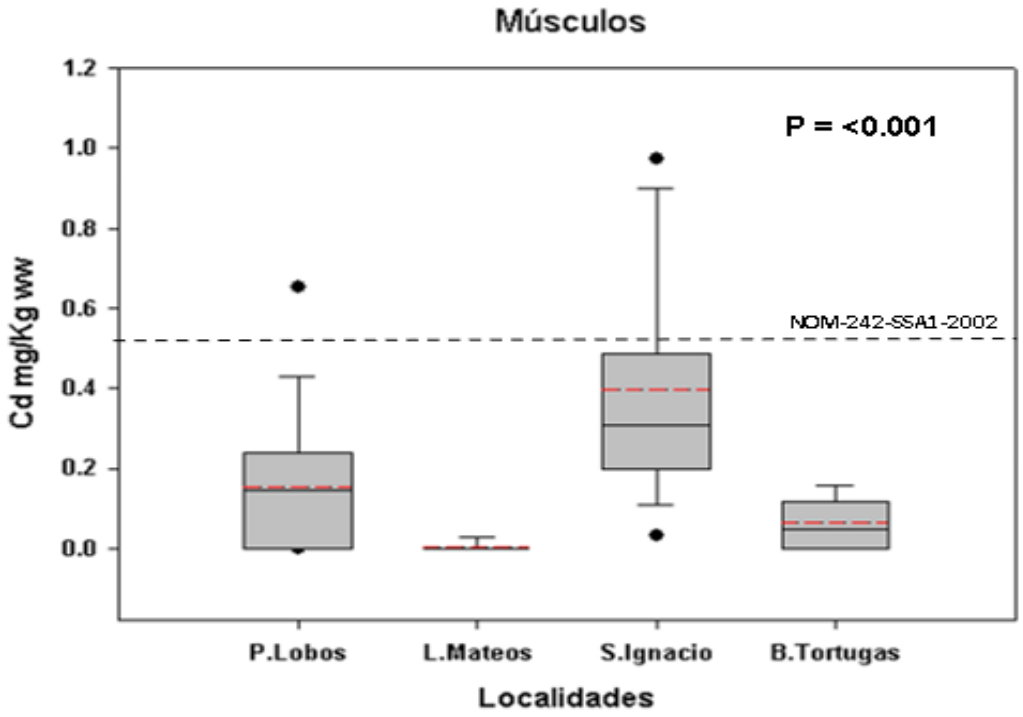

Figura 6. Comparación de la concentración de Cd en el músculo de *M. henlei* en las cuatro áreas de estudio con la NOM-242-SSA1-2002 (0.5 mg/kg ww)

8.1.2 Cadmio en hígado

Las concentraciones de Cd en peso seco (dw) en el hígado de las hembras de *M. henlei* en las 4 localidades fue de 0.400-6.900 mg/kg dw, con un promedio de 1.948

± 1.5; mientras que en los machos <l.d.-11.200 mg/kg dw, con un promedio de 4.289 ± 3.1(Fig. 7).

Con respecto a la relación entre la talla y la concentración no se encontró diferencias que infieran una correlación significativa entre la longitud total de la especie, (r^2= 0.16 para hembras y r^2=0.13 para los machos, presento un valor de p=0.052 para hembras y p=0.084 para los machos lo cual indica que no hay diferencias significativas que determinen esta relación.

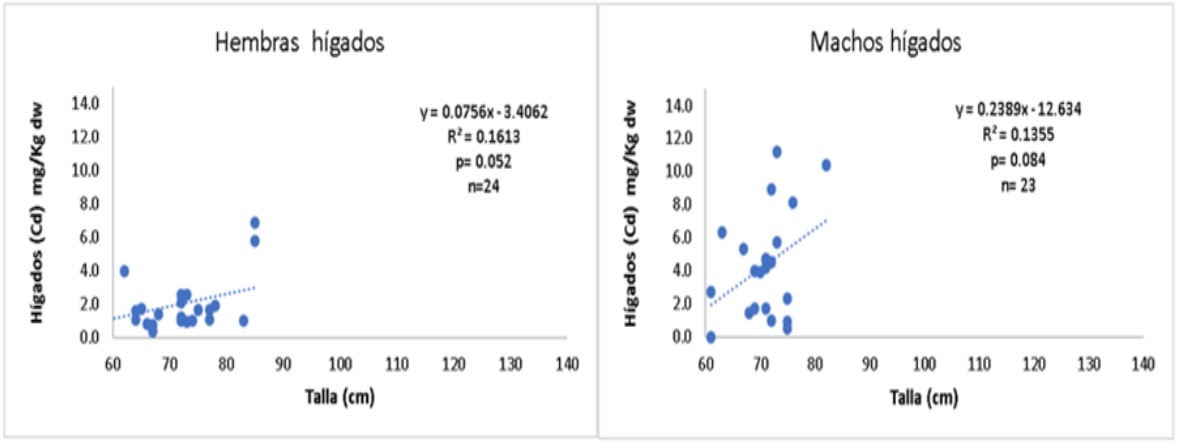

Figura 7. Concentración de Cd en tejido hepático de machos y hembras de *M. henlei* considerando los resultados de las cuatro áreas de estudio.

En cuanto a la bioacumulación en los hígados en cada zona de estudio encontramos que la concentración de Cd en Punta Lobos está en un rango de <d.l.-4.700 mg/kg dw con un promedio 7.590 ± 2.3 mg/kg dw; en López Mateos 0.750-11.200 mg/kg dw, con un valor promedio 3.714 ± 2.9 mg/kg dw; en Bahía Laguna San Ignacio < l.d.-4.200 mg/kg dw, con un valor promedio 1.536 ± 1.1 mg/kg dw; en Bahía Tortugas 0.950-6.900mg/kg dw, con un valor promedio 2.425± 1.9 mg/kg dw, de igual manera no se encontró una correlación significativa dentro de cada área de estudio que indique una bioacumulación del cadmio siendo Punta Lobos r^2 = 0.57, Adolfo López Mateos r^2 = 0.04, Laguna San Ignacio r^2 = 0.01, Bahía Tortugas r^2 = 0.26(Fig. 8).

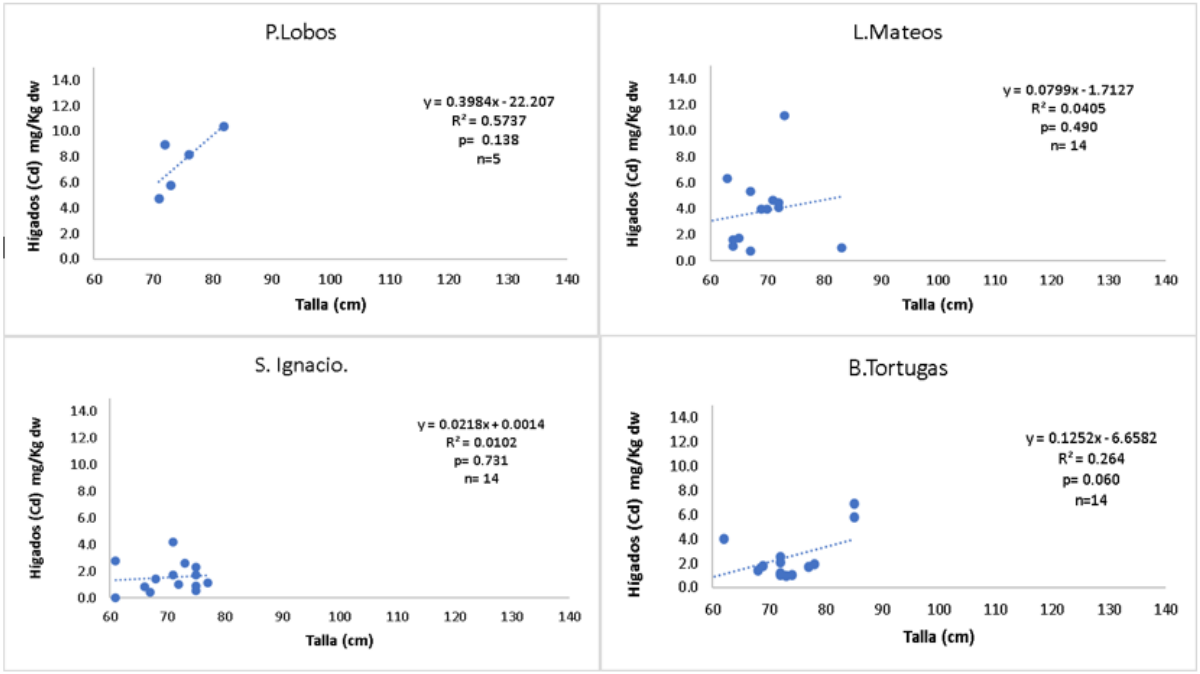

Figura 8. Bioacumulación de Cd en el hígado de *M. henlei* en cada una de las áreas de estudio.

Al comparar entre sexos la prueba de U Mann-Whitney indicó que si existen diferencias significativas (T = 693.000; P = 0.005) entre sexos con relación a la concentración de Cd de machos fue de 2.324 ± 1.69 mg/kg ww y en las hembras 0.911 ± 0.47 mg/kg ww (Fig. 9). Siendo los machos los que presentan mayor concentración y superando para ambos sexos los límites permisibles por la norma Oficial Mexicana.

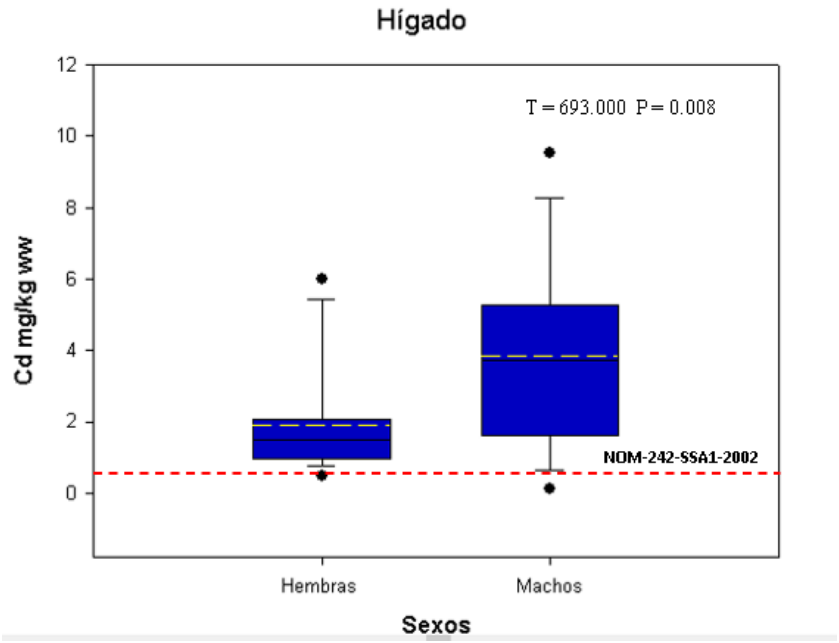

Figura 9. Comparación entre hembras (A) y machos (B) respecto a la concentración de cadmio en el hígado, la línea discontinua roja indica el límite permitido por la Norma Oficial Mexicana NOM-242-SSA1-2009 (0.5 mg/kg ww).

Al comparar entre las cuatro localidades: Punta Lobos, López Mateos, Laguna San Ignacio y Bahía Tortugas la prueba de variancia de una vía (ANOVA *One Way*) se ±observaron diferencias significativas en cuanto a las concentraciones de Cd en el tejido hepático (p=<0.490, F= 14.895), mostrando que las concentraciones de Cd en el hígado son diferentes siendo Punta Lobos quien presenta la mayor concentración 4.811 ± 1.67 mg/kg ww. Por otra parte, al comparar con la norma oficial mexicana podemos ver las cuatro áreas: Punta Lobos 4.811 ± 1.67 mg/kg ww; López Mateos 2.084 ± 1.38 mg/kg ww; Laguna San Ignacio 0.654 ± 0.54 mg/kg ww; Bahía Tortugas 1.375 ± 1.11 mg/Kg ww, que se encuentran por encima del límite permisible del consumo humano (Fig. 10).

La alta concentración de Cd en Punta Lobos, supera el límite de consumo, indicando que en esa zona se infiere un problema de contaminación por la presencia de Cd.

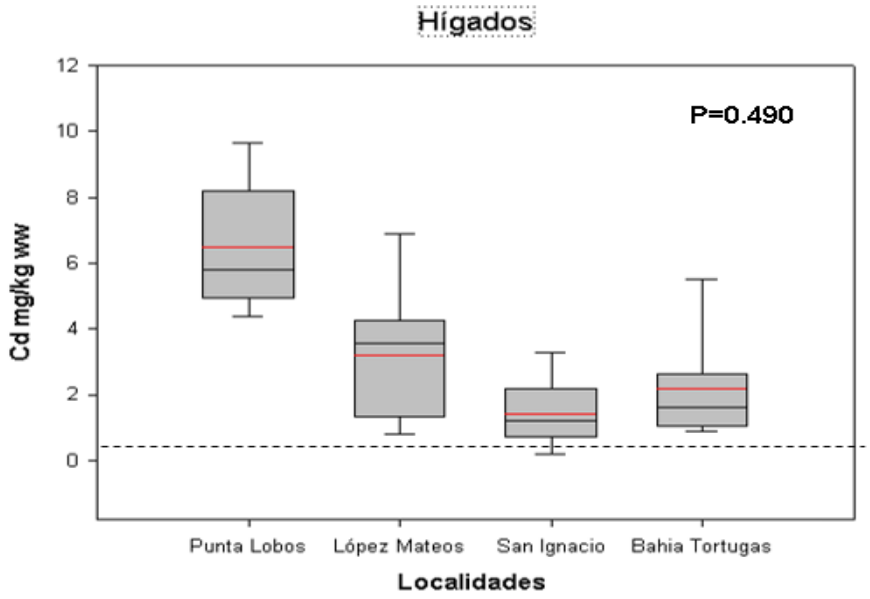

Figura 10. Comparación de la concentración de Cd en el hígado de *M. henlei* en las cuatro áreas de estudio con la Norma Oficial Mexicana NOM-242-SSA1-2009 (0.5 mg/kg ww).

8.2 Cobre en músculos

Las concentraciones de Cu en peso seco (dw) en el músculo de las hembras de *M. henlei* en las 4 localidades fue en un rango de < l.d. -15.120 mg/kg dw, con un promedio 1.843 ± 2.4 mg/kg dw; mientras que en los machos <l.d. - 38.750 mg/kg dw), con un promedio 2.658 ± 6.0 mg/kg dw (Fig. 11).

Con respecto a la relación entre la talla y la concentración no encontramos diferencias que infieran una correlación entre la longitud total de la especie (r^2 =0.007 en hembras y r^2= 0.017), presentando un valor de **p=0.582** para hembras y **p=0.411** para los machos lo cual indica que no hay diferencias significativas que determinen esta relación.

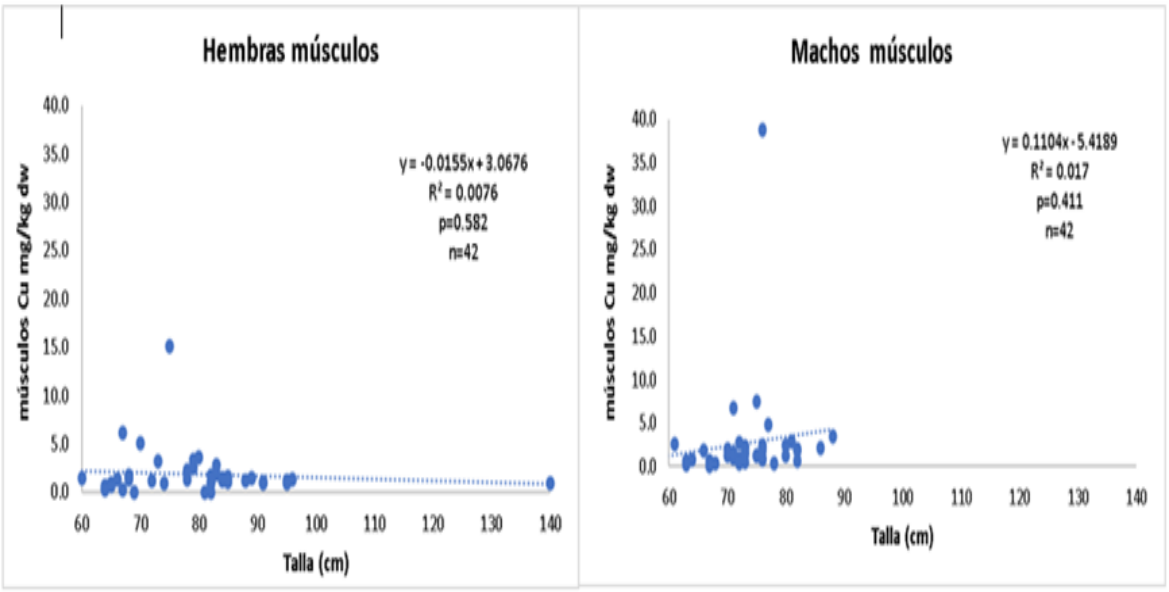

Figura 11. Concentración de Cu en músculo en hembras y machos de *M. henlei* en las cuatro áreas de estudio.

Con respecto a la bioacumulación en los músculos en cada zona de estudio se encontró que la concentración de Cu en Punta Lobos está en un rango de 0.300-3.300 mg/kg dw, con un promedio de 1.550 ± 0.9 mg/kg dw; en López Mateos <l.d. – 6.180 mg/kg dw, con un valor promedio de 0.810 ± 1.4 mg/kg dw; en Bahía Laguna San Ignacio el rango fue de 0.300 - 38.750 mg/kg dw, con un valor promedio 4.005 ± 6.912 mg/kg dw; en Bahía Tortugas el rango fue de 0.600 – 1.850 mg/kg dw, con un valor promedio de 1.087 ± 0.3 mg/kg dw, en cuanto a la bioacumulación no se encontró una correlación significativa, siendo Punta Lobos $r^2 = 0.0006$, Adolfo López Mateos $r^2 = 0.016$, Laguna San Ignacio $r^2 = 0.004$, Bahía Tortugas $r^2 = 0.0006$ (Fig. 12).

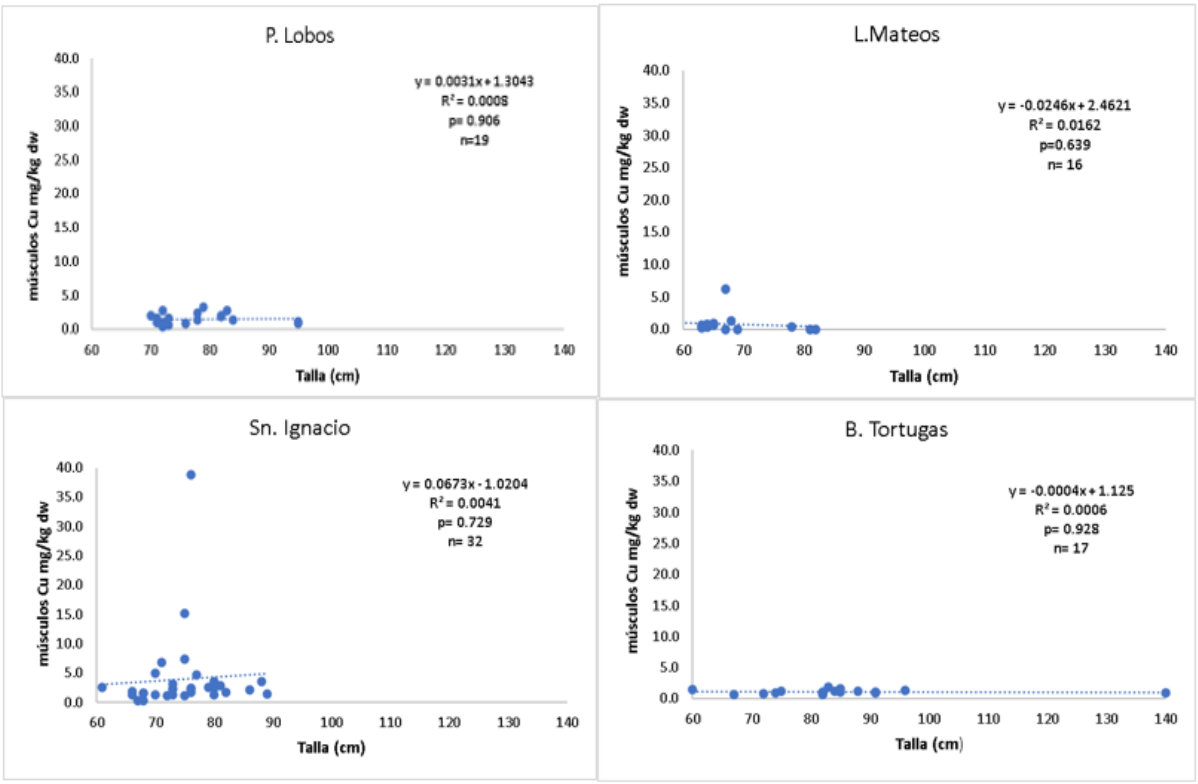

Figura 12. Bioacumulación de Cu en músculo de *M. henlei* en cada una de las áreas de estudio.

Al comparar entre sexos la prueba de U Mann-Whitney indicó que no existen diferencias significativas (T = 1611. 500; p = 0.122) entre sexos con relación a la concentración de Cu de machos y hembras. Sin embargo, se puede observar que los machos presentaron una mayor concentración de cobre en el músculo 0.492 ± .060 mg/kg ww y las hembras 0.396 ± 0.20 mg/kg ww, al comprar estos valores con las normas oficiales internacionales se puede notar que, la concentración de Cu se encuentra por debajo del valor permitido marcado por la Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la Agricultura (FAO, 1983; 30 mg/kg ww) y por encima del valor permitido por la Environmental Protection Agency, USA (EPA, 2002; 0.02 mg/kg ww) (Fig. 13).

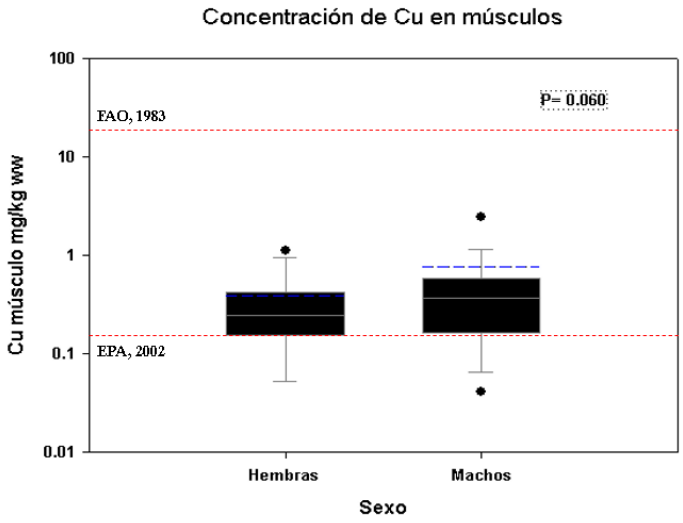

Figura 13. Comparación entre hembras y machos respecto a la concentración de cadmio en el músculo en las cuatro áreas de estudio, la línea discontinua azul indica el límite permitido por la FAO (30 mg/kg) y la línea negra discontinua marca los límites permitidos por la EPA,2002 (0.02 mg/kg).

Al comparar entre las cuatro localidades; Punta Lobos, López Mateos, Laguna San Ignacio y Bahía Tortugas la prueba de variancia de una vía (ANOVA One Way) mostró diferencias significativas en cuanto a las concentraciones de Cu en el músculo (p=<0.387, F= 1.030), siendo Punta Lobos 0.422 ± 0.24 mg/kg ww; López Mateos 0.810 ± 1.48 mg/kg ww; Laguna San Ignacio 1.081 ± 2.13 mg/kg ww; Bahía Tortugas 1.087 ± 0.32 mg/kg ww, siendo Bahía Tortugas quien presentó las mayores concentraciones de Cu (Fig. 14).

Al comparar con las Normas internacionales se muestra que dependiendo de la norma puede estar por encima o debajo del límite de consumo; ya que para las Mexico la NOM-242-SSA1-2009 no marca un valor mínimo para el consumo, sin embargo, al tener comportamiento de nutriente y ser un elemento esencial podemos inferir que estos valores no representan como tal un riesgo a la salud.

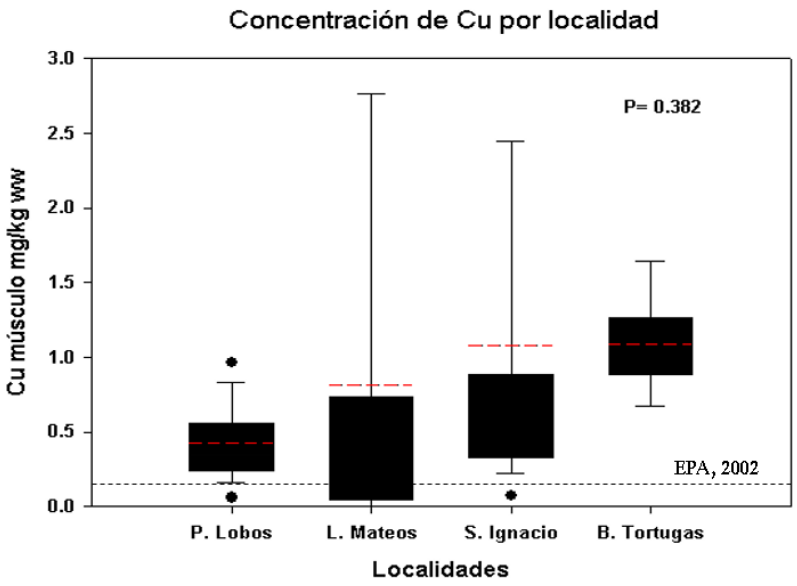

Figura 14. Comparación de la concentración de Cu en el músculo de *M. henlei* en las cuatro áreas de estudio con las normas internacionales FAO 1983; 30mg/kg ww y la EPA, 2002; 0.02 mg/kg ww.

8.2.2 Cobre en hígado

Las concentraciones de Cu en peso seco (dw) en el hígado de las hembras de *M. henlei* en las 4 localidades fue en un rango de 2.400 - 8.550 mg/kg dw, con un valor promedio 4.477 ± 1.8 mg/kg dw; mientras que en los machos <l.d. – 13.650 mg/kg dw, con un promedio de 3.880 ± 2.6 mg/kg dw (Fig. 15).

Con respecto a la relación entre la talla y la concentración no se encuentran diferencias que infieran una correlación entre la longitud total de la especie (r^2= 0.154 en hembras y r^2= 0.001), presento un valor de **p=0.057** para hembras y **p=0.868** para los machos lo cual indica que no hay diferencias significativas que determinen esta relación.

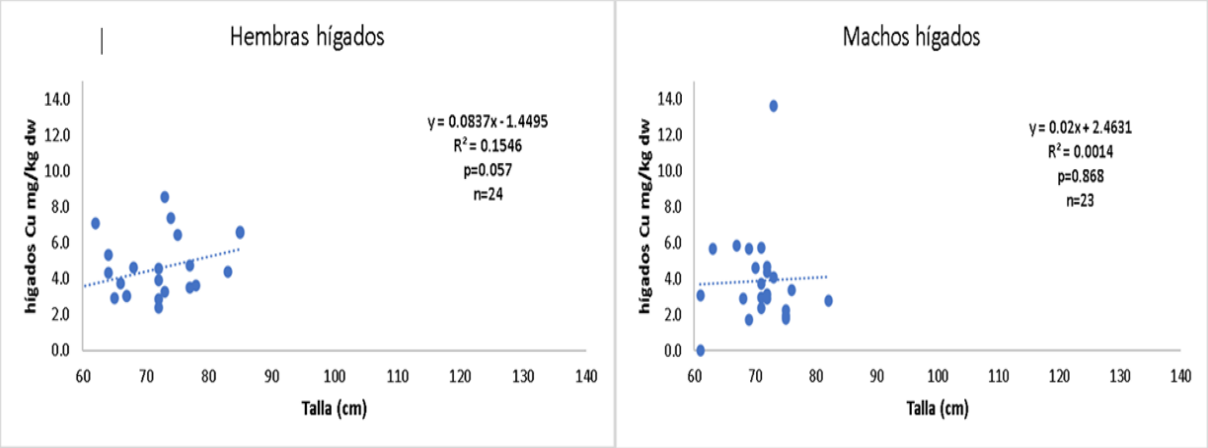

Figura 15. Concentración de Cu en hígado de machos y hembras de M. henlei en cada las cuatro áreas de estudio.

Con respecto a la bioacumulación en los hígados en cada zona de estudio se encontró que la concentración de Cu en Punta Lobos es de 2.800 – 4.100 mg/kg dw, con un promedio de 3.430 ± 0.5 mg/kg dw; en López Mateos 2.400 – 13.650 mg/kg dw un valor promedio de 5.179 ± 2.7 mg/kg dw; en Bahía Laguna San Ignacio de <l.d. – 8.550 mg/kg dw con un valor promedio de 3.246 ± 2.06; en Bahía Tortugas de 1.700 – 7.350 mg/kg dw con un valor promedio de 4.400 ± 1.9 mg/kg dw , con referencia a la bioacumulación no encontramos datos significativas que sugieran este proceso siendo Punta Lobos $r^2 = 0.483$, Adolfo López Mateos $r^2 = 0.110$, Laguna San Ignacio $r^2 = 0.095$, Bahía Tortugas $r^2 = 0.138$ (Fig. 16).

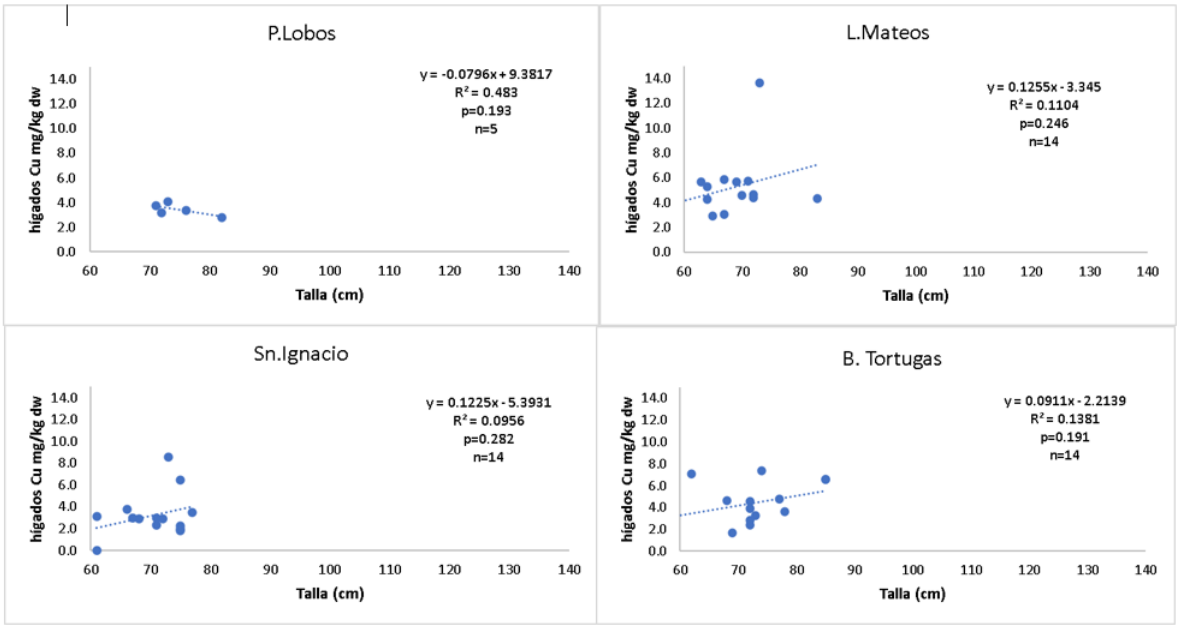

Figura 16. Bioacumulación de Cu en hígado de *M. henlei* en cada una de las áreas de estudio.

Al comparar entre sexos la prueba de U Mann-Whitney indica que no existen diferencias significativas (T= 486.000; p= 0.163) entre sexos con relación a la concentración de Cd de machos y hembras. Sin embargo, se puede observar que los machos presentaron una mayor concentración de Cu en el músculo; 0.492 ± 0.60 mg/kg ww, al comparar estos valores con las normas internacionales se puede notar que, considerando el valor marcado por la EPA, 2002, la concentración de Cu se encuentra por encima del valor permitido, Sin embargo, al considerar el valor marcado por la FAO (1983), estos valores se encontrarían por debajo de los límites permisibles (Fig. 17).

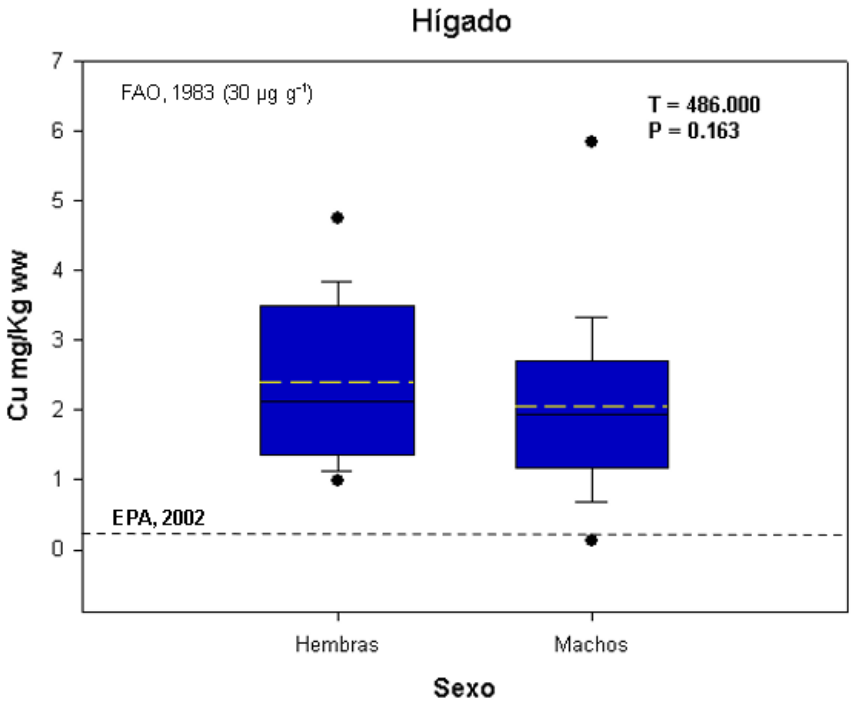

Figura 17. Comparación entre hembras y machos respecto a la concentración de cadmio en el hígado, la FAO,1983 marca (30 mg/kg) como límite y la línea negra discontinua marca los límites permitidos por la EPA,2002 (0.2 mg/kg).

Al comparar entre las cuatro localidades; Punta Lobos, López Mateos, Laguna San Ignacio y Bahía Tortugas la prueba de variancia de una vía (ANOVA *One Way*) mostró diferencias significativas (p=<0.001, F= 12.991), las concentraciones de Cu en el hígado de las cuatro localidades fueron: Punta Lobos 2.158 ± 0.32 mg/kg ww; López Mateos 2.863 ± 1.23 mg/kg ww; Laguna San Ignacio 1.333 ± .090; Bahía Tortugas 2.517 ± 1.35 mg/kg ww (Fig. 18).

Al comparar con las normas internacionales se observa que dependiendo de la norma puede estar por encima de la norma internacional (FAO, 1983) y por debajo del límite de consumo marcado por la EPA (2002); sin embargo, al tener comportamiento de nutrientes y ser un elemento esencial se puede inferir que estos valores no representan un riesgo a la salud.

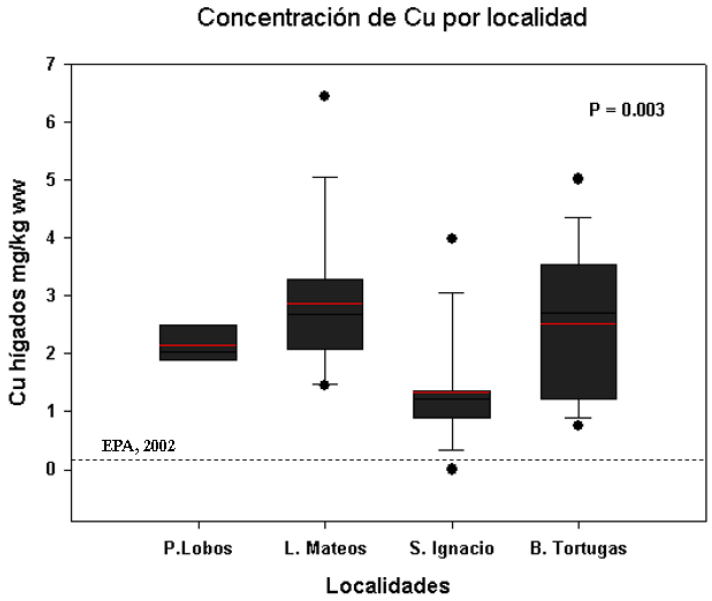

Figura 18. Comparación de la concentración de Cu en el hígado de *M. henlei* en las cuatro áreas de estudio.

9. Discusión

Al analizar las concentraciones de Cd y Cu en los tejidos de una especie de alto consumo en México, se realizó una comparativa con diferentes estudios a nivel mundial y otros en Baja California (Tabla 5) observando que las concentraciones en tejido hepático y tejido muscular que se reportan son similares a las del presente estudio. Estas diferencias que se presentan podrían estar relacionadas con el tipo de hábitos alimenticios que presentan y la oceanografía del lugar. Al comparar estos valores con especies de tiburones con alimentación similar (crustáceos, peces y cefalópodos), se observa que estas concentraciones mantienen un promedio parecido a los resultados de *M. henlei* en este estudio.

Tabla 5.- tabla comparativa de diferentes estudios referentes a las concentraciones de Cd y Cu en tejido muscular y hepático de tiburones.

Lugar	Especie	Tejido	Sexo	Cd (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Referencia
Baja California Sur	***Mustelus henlei***	**Músculo**	**M**	**0.412**	**0.411**	**Presente Estudio**
			H	**0.927**	**0.582**	
		Hígado	**M**	**0.084**	**0.868**	
			H	**0.052**	**0.057**	
Baja california sur	*Rhizoprionodon longurio*	Músculo	H	0.095	1.42	**Baró-Camarasa et al. (2023)**
			Emb	0.031	0.017	
		Hígado	H	1.04	1.44	
			Emb	3.59	17.9	
Baja California Sur	*Rhizoprionodon longurio*	Músculo	~	0.17	0.66	**Martinez-Ayala et al.(2022)**
Baja California Sur	*Mustelus henlei*	Músculo	~	0.04	~	**Pantoja-Echevarría et al. (2020)**
		Hígado	~	0.96	~	
Campeche	*Rhizoprionodon terranovae*	Músculo	~	~	0.39	**Baño-Baños et al. (2023)**
		Hígado	~	~	2.32	
Jalísco	*Charcharinus falciformis*	Músculo	M	0.68	0.77	**Vega-Barba et al. (2022)**
			H	0.57	1.43	
		Hígado	M	142.85	0.656	
			H	259.96	3.92	
Veracruz	*Charcharinus limbatus*	Músculo	~	0.44	0.12	**Montoya-Mendoza et al. (2023)**
		Hígado	~	0.45	0.033	
Arabia	*Charcharinus leiodon*	Músculo	~	<0.0005	0.74	**Moore et al. 82015)**
		Hígado	~	7.31	0.37	
Australia	*Mustelus antarticus*	Músculo	~	<0.01-0.08	~	**Glover (1979)**
Italia	*Mustelus mustelus*	Músculo	~	0.1-0.6	0.33-2.23	**Storelli et al. (2010)**
Taiwan	*Megachasma pelagios*	Músculo	M	0.059	0.86	**Yun-Ru Ju et al. (2021)**
			H	6.05	5.08	

En *M. henlei* han sido evaluados Hg, Se, Cd en la zona de Las Barrancas ubicada en el municipio de Comondú entre Laguna San Ignacio y el puerto Adolfo López Mateos por Pantoja-Echevarría, *et al*. (2020, 2021, 2023),.

Para Las Barrancas se reportaron tallas entre los 60 y 109 cm para los machos y 64 a 88 cm para las hembras (Pantoja-Echevarría *et al*., 2020). Cabe destacar que en nuestro estudio las tallas reportadas van de los 51cm hasta los 96 cm para las hembras con la diferencia que en Bahía Tortugas se encontró una hembra de 140 cm, y para los machos las tallas se encuentran entre los 51 y 88 cm, por lo que se observa qué no hay gran diferencia en cuanto a las tallas reportadas por Pantoja-Echevarría *et al.,* 2020. Esto puede deberse a que *M. henlei* es una especie que presenta tallas máximas de 100 cm (Yudin & Cailliet, 1990) aunque se han reportado tallas de 153 cm en Soto-López (2018) en la costa occidental de B.C.S.

En relación con el sexo, Pantoja-Echevarría, *et al*. (2020) analizó un total de 62 hembras y 21 machos. Para esta investigación se determinó Cd en 66 hembras y 64 machos. La diferencia encontrada con los machos puede deberse a la temporada

y al esfuerzo de pesca ya que las muestras son proporcionadas por las cooperativas pesqueras y no se puede controlar el número de muestras que se utilizan para los análisis.

9.1 concentración de Cd en músculo

Las concentraciones de Cd en el músculo para hembras y machos reportadas por Pantoja-Echevarría (2020) mostraron un promedio 0.651 mg/kg ± 0.44 para las hembras y 1.899 mg/kg ± 1.6 para los machos. Los valores (mg/kg) encontrados en dos localidades cercanas a Las Barrancas, fueron para las hembras en López Mateos < l.d.-0.089 mg/kg dw con un valor promedio de 0.006 ± 0.0.088; en Bahía Laguna San Ignacio (0.046 – 0.488 mg/kg d.w.) con un valor promedio de 0.274 ± 0.1. Para los machos en López Mateos se encontraron por debajo del límite de detección (<l.d.) y en Bahía Laguna San Ignacio (<l.d. – 1.700 mg/kg) y un valor promedio (0.577 ± 0.4), los cuales se muestran más bajos con respecto a los ya reportados sin embargo estos datos se pueden ver influenciados por la temporada y año de pesca, así como del forzamiento oceanográfico y la oceanografía de cada una de las áreas de muestreo. Por lo anterior, es importante resaltar es que los valores máximos se encuentran dentro de los rangos ya evaluados por Pantoja-Echevarría *et al*. (2020) por lo cual se infiere qué el Cd se concentra en promedios similares dentro de la costa occidental de B.C.S.

Al analizar Cd en Punta Lobos y Bahía Tortugas, los resultados fueron similares a las cuatro áreas de estudio (Tabla 2), al comparar entre las zonas se observó que no existen diferencias significativas (p= 0.520). En cuanto a la concentración de Cd en el músculo, tras analizar la correlación entre la talla y la concentración no encontramos datos que infieran una bioacumulación en *M. henlei* tejido. Al comprar las concentraciones de Cd entre sexos con la prueba U Mann-Whitney, se muestra que no existen diferencias en la concentración de Cd en el músculo con relación al sexo (Fig. 3) lo cual indica que se concentra de manera similar en hembras y machos.

La regresión lineal indicó que no existe relación entre la longitud total de *M. henlei* y la concentración de Cd en el músculo, se reportó una concentración para las hembras (r^2 = 0.00004, fig. 1) y en machos (r^2=0.0169, Fig. 1). De manera similar, se realizó un análisis independiente para cada localidad (Fig. 2). Lo cual indica que el Cd no se está bioacumulando en el músculo en acuerdo con lo reportado por Pantoja-Echevarría *et al*. (2020).

Por otra parte, las concentraciones de Cd obtenidas en este estudio en comparación con la Norma Oficial Mexicana se pueden observar que la concentración de Cd en el músculo se encuentra por debajo del límite permisible para consumo humano (Fig.3). Los resultados obtenidos en los organismos capturados en las cuatro zonas de este estudio son similares a la comparación hecha en la zona de las barrancas por Pantoja-Echevarría *et al*. (2020).

9.2 Concentración de Cd en Hígado

En cuanto a las concentraciones de Cd en los hígados de hembras y machos se observaron diferencias significativas con respecto a los sexos. La prueba U Mann-Whitney mostró que el hígado de los machos acumula mayor concentración Cd (Fig.9) las hembras mostraron una concentración de 0.052mg/kg, en el caso de los machos (0.084mg/kg) con respecto a los datos reportados por antoja-Echevarría (2020). Estas pueden estar relacionadas ya que se mueven y alimentan en la costa occidental de Baja California Sur. Aunque cabe precisar que Las Barrancas es un área pequeña comparada con las cuatro zonas analizadas, se encuentra dentro de las áreas por la cual *M. henlei* realiza sus movimientos.

En comparación con las dos localidades cercanas a Las Barrancas (Puerto Adolfo López Mateos y Laguna San Ignacio), se encontró que el rango de concentraciones de Cd (dw) en las hembras de López Mateos fue de 0.704 – 1.694 mg/kg con un valor promedio 1.220 ± 0.4 mg/kg; en Laguna San Ignacio (0.376 – 2.155 mg/kg) con un valor promedio 1.164 ± 0.7. En el caso de los machos de López Mateos las concentraciones fueron más elevadas. Se encontraron valores de 3.548 – 8.142 mg/kg dw con un valor promedio de 4.696 ± 1.1 mg/kg dw y en Laguna San Ignacio 0.000 – 3.952 mg/kg) y un valor promedio 1.562 ± 1.2 mg/kg, los cuales se muestran

más altos con respecto a los ya reportados. Por tanto, nuevamente podemos decir, que estas diferencias podrían deberse a al área donde se alimenta, las condiciones oceanográficas, así como la temporada de captura.

La regresión lineal entre longitud total y la concentración de Cd, indica que no existe relación entre la longitud total de *M. henlei* y la concentración de Cd en el hígado, se reportó una concentración para las hembras (r^2 = 0.1613; Fig. 4) y en machos (r^2=0.1355, Fig. 4). De manera similar, se realizó un análisis independiente para cada localidad (Fig. 5). Lo cual indica que el Cd no se está bioacumulando en el músculo en acuerdo con lo reportado por Pantoja-Echevarría *et al*. (2020).

Al comparar con la Norma Oficial Mexicana se puede observar que la concentración de Cd en el músculo se encuentra por encima del límite permisible para consumo humano esto corroborando los datos obtenidos por Pantoja-Echevarría *et al*. (2020) la cual muestra que en el hígado la concentración se encuentra por encima de los límites marcados por las normas mexicanas e internacionales.

9.3 Concentración de Cu en músculo e hígado

Las concentraciones de cobre han sido poco evaluadas en los tejidos de los tiburones. Para el caso de *M. henlei* en la costa del Pacífico Occidental no ha sido evaluado.

Con respecto a la acumulación del Cu en los tiburones se ha reportado que son susceptibles a acumular concentraciones de cobre y zinc principalmente en el hígado (Lowmanm *et al*., 1996). Estudios en *R. longurio* muestran transferencia materna de Cu en hígado y músculo (Baró-Camarasa *et al*., 2023).

Otros estudios en *C. falciformis* Vega-Barba *et al*. (2022), muestran las más altas concentraciones de Cu de 2.34 mg/kg ww, Por el contrario, los valores máximos de este estudio fueron de 15.12 mg/kg para el músculo en hembras, y 38.8 mg/kg en machos. En el hígado se obtuvieron valores máximos de 8.6 mg/kg en una hembra,

y 13.7mg/kg para un macho. Obteniendo promedios de 4.5mg/kg hígados de las hembras y 3.9 mg/kg en hígados de los machos.

En el trabajo realizado por Baño-Baños *et al*. (2023), reportaron concentraciones de Cu y Zn en el hígado y músculo de la especie *Rhizoprionodon terranovae,* siendo los adultos los que presentaron una mayor concentración (mg/kg ww), en el hígado 2.32 ± 0.84 y en el músculo 0.39 ± 0.14, para *M. henlei* presentó una concentración promedio en el hígado 2.395 ± 1.809 y en el músculo 2.347 ± 7.032. La diferencia en las concentraciones de Cu en el músculo puede deberse a las diferencias biológicas de la especie, al lugar de residencia ya que esta especie fue evaluada para el Golfo de México.

Las tallas (cm) promedio de esta especie (LT = 89.8 ± 13.7), sin embargo, las tallas en este artículo son similares a las que presenta *M. henlei* para este estudio en el presente estudio (LT = 69.3 ± 20.7), el rango se puede ver en la Fig. 11. Sin embargo, aunque son especies diferentes presentan tallas máximas de 110 cm (Marín-Osorno, 1992; Guitart-Manday,1998) por lo cual podemos inferir que las concentraciones del Cu tienen la misma ruta metabólica en el hígado, también es importante mencionar que el Cu se encuentra de manera natural en el sedimento y es integrado a los organismos principalmente por la dieta la cual es similar ya que en ambas especies sus presas principales son crustáceos, cefalópodos y peces y los tiburones pueden actuar como bioindicadores de contaminación ambiental (Marcovecchio *et al*., 1991; Vas, 1991).

Con respecto a la Norma Oficial Mexicana, no se establece un límite máximo el cual sea un riesgo potencialmente tóxico, pero al comparar con las normas internacionales se puede observar que, para el caso de la FAO, 1983 las concentraciones de Cu se encuentran por encima del límite permisible (Fig. 11). Al utilizar las normas establecidas por la EPA, 2002, se puede observar que se encuentran muy por debajo del límite permisible mostrando que la concentración del Cu en esta especie en la costa occidental de B.C.S no representa un riesgo para la salud humana.

Cabe destacar que la información presentada en este trabajo con respecto al Cu puede marcar un antecedente para futuras evaluaciones respecto a la bioacumulación en los tiburones de Baja California Sur, México.

10.- Conclusiones

10.1. Cadmio

Las concentraciones de Cd se encontraron en algunas muestras por encima de lo que marca las normas mexicanas e internacionales, por lo que se debe sentar los antecedentes para poner especial atención en la pesquería de *M. henlei* y en cuanto a su consumo ya que en algunas zonas de la costa occidental la presencia de este elemento potencialmente tóxico superó por mucho los límites que marca la Norma Oficial Mexicana.

Con respecto a la bioacumulación, no se encontró una relación significativa entre Cd y Cu con la talla. Por lo cual se puede concluir que no importa la talla del organismo ya que acumulara este elemento en ambos tejidos.

Al comparar entre sexos no se observó diferencias significativas por lo cual *M. henlei* tanto hembras como machos se encuentran concentrando Cd y Cu de manera similar en los tejidos.

Al comparar entre zonas, si se encontraron diferencias con respecto a la presencia del Cd en las zonas de estudio, lo cual es importante tomar en cuenta ya que en Punta Lobos se encuentran las mayores concentraciones de Cd en el Hígado, lo cual debe representar un foco rojo respecto a esta zona debido a su cercanía de le pueblo de Todos Santos y a la pesquería de *M. henlei* ya que pudiera presentar efectos negativos en la salud.

10.2. Cobre

Las concentraciones del Cu no se encontraron por encima de lo que marcan las normas mexicanas e internacionales, por lo que se debe sentar los antecedentes para poner especial atención en la pesquería de *M. henlei.*

Con respecto a la bioacumulación, no se encontró una relación significativa por lo cual se puede concluir que no importa la talla del organismo, acumula Cu en los tejidos sin presentar una bioacumulación.

Al comparar entre sexos no se observaron diferencias significativas por lo cual *M. henlei* tanto hembras como machos se encuentran concentrando de manera similar en los tejidos.

A pesar de que en Laguna San Ignacio se encontró una menor concentración de Cd, no presentan diferencias en cuanto a las zonas, por lo cual el comportamiento del Cd es similar con respecto a cada área de estudio.

10.3. De acuerdo con los resultados obtenidos en este estudio, la concentración de cadmio fue diferente en los diferentes hígados de *M. henlei* de cada zona de estudio, siendo mayor en Punta Lobos, la cual tiene menor plataforma continental que López Mateos, Laguna San Ignacio y Bahía Tortugas. Además, en Punta Lobos desemboca por el río Hondo-Las Gallinas-El Carrizal, una zona minera, siendo de todas las zonas, la que se encuentra más urbanizada. En caso de cobre, no se observaron diferencias porque fueron pocos tejidos, pero se observó que fue mayor en Punta Lobos y en Laguna San Ignacio la concentración fue menor.

11. Bibliografía.

Alarcón-Corredor, M. O., (2009). Los elementos traza. *Revista Médica de la Extensión Portuguesa - ULA*. Vol 4, No.3.

Alec B.M. Moore a, , Thi Bolam , Brett P. Lyons , Jim R. Ellis. (2015). Concentrations of trace elements in a rare and threatened coastal shark from the Arabian Gulf (smoothtooth blacktip *Carcharhinus leiodon). Marine Pollution bulletin*. 100, 646-650. http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.06.005

Babu, S.S. (2017). Análisis geoquímico-ambiental del Complejo Lagunar de Bahía Magdalena, B.C.S., México*. Tesis (CIIEMAD-IPN).*

Baño-Baños, J.J., Bojórquez-Sánchez, C., Bergés-Tiznado, M. E., Paéz-Ozuna, F., Torres-Rojas Y. E. (2023). Concentration of trace elements (Copper and Zinc) in muscle and liver of the Atlantic sharpnose shark (*Rhizoprionodon terraenovae*), captured off the coast of Campeche, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 94 (2023): e944265 2. https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2023.94.4265

Baró-Camarasa, I., Galván-Magaña, F., Cobelo-García, A., Marmolejo-Rodriguez, A.J., (2023). Major, minor and trace element concentrations in the muscle and liver of a pregnant female Pacific sharpnose shark (*Rhizoprionodon longurio*) and its embryos. *Marine Pollution Bulletin*, Vol.188. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.114619

Bruland, K.W., Lohan M.C. (2004). Treatise on geochemistry. The ocean and marin geochemistry. Control of trace metals in seawater. *Elsevier,* (6.02) 23-48.

Boldrocchi G., Spanu D., Mazzoni M., Omar M., Baneschi I., Boschi C., Zinzula L., Bettinetti R., Monticelli D., 2021. Bioaccumulation and biomagnification in elasmobranchs: A concurrent assessment of trophic transfer of trace elements in 12 species from the Indian Ocean. *Marine Pollution Bulletin* 172, 112853 DOI: https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112853

Boye, M., Wake, B. D., López Garcia, R., Bown, J., Baker, A. R., Achterberg, E. P., (2012). Distributions of dissolved trace metals (Cd, Cu, Mn, Pb, Ag) in the Southeastern Atlantic and the Southern Ocean. *Biogeosciences,* 9, 3231 – 3246.

Chester, R., Jickells, T. (2012). Marine Geochemistry. Willey-Blackwell. 3ª ed.

CNDH. (2018). Recomendación 46/2018. Comisión Nacional de los Derechos Humanos.

Compagno, L. J. V., Krupp, F. y Schneider, W. (1995). Tiburones. En: *Guía FAO para la identificación de especies para los fines de la pesca. Pacífico Centro-Oriental*. Volumen II. Vertebrados-parte 1. (eds)

El Sudcaliforniano. (2021). Cerro del Gallo: el proyecto minero más importante de la península. https://www.elsudcaliforniano.com.mx/local/cerro-del-gallo-el-proyecto-minero-mas-importante-de-la-peninsula-6803553.html

EPA (Environmental Protection Agency), 2000. Method 823-B-00-007. Guidance for assessing chemical contaminant data for use in fish advisories. *Fish Sampling and Analysis.* vol. 1.

FAO, F. Agricultural organization 1983a Compilation of legal limits for hazardous substances in fish and fishery products. *Fisheries circular*, (764).

Gutiérrez -Galindo, E.A., Flores-Muñoz, G., Ortega-Lara, V., Villaescusa-Celaya, J.A. (1994). Metales pesados en sedimentos de la costa fronteriza Baja California (México)-California (USA). *Ciencias Marinas*. 20(1), 105-124.

Filice, M.; Reinero, F.R.; Cerra, M.C.; Faggio, C.; Leonetti, F.L.; Micarelli, P.; Giglio, G.; Sperone, E.; Barca, D.; Imbrogno, S.,(2023) Contamination by Trace Elements and Oxidative Stress in the Skeletal Muscle of Scyliorhinus canicula from the Central Tyrrhenian Sea. *Antioxidants* (12), 524. https:// doi.org/10.3390/antiox12020524

Fischer, W., F. Krupp, W. Schneider, C. Sommer, K. Carpenter & V. H. Niem. 1995a. Guía FAO para la identificación de especies para los fines de pesca. Pacífico

Centro Oriental, Volumen 1. *Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma*, 1–646 pp.

Fischer, W., F. Krupp, W. Schneider, C. Sommer, K. Carpenter & V. H. Niem. 1995b. Guía FAO para la identificación de especies para los fines de pesca. Pacífico Centro Oriental, Volumen 2. *Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma*, 670–1200 pp.

Fischer, W., F. Krupp, W. Schneider, C. Sommer, K. Carpenter & V. H. Niem. 1995c. Guía FAO para la identificación de especies para losfines de pesca. Pacífico Centro Oriental, Volumen 3. *Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma*, 1201–1813 pp.

Guitart-Manday, D. (1998). Field guide to requiem sharks (Elasmobranchiomorphi: Charcharinidae) of the Western North Atlantic. *NOAA Tech. Rep. NMFS*. 153. p.

Hambleton, E. (2015). Proyecto de Investigación: Diagnóstico socioeconómico y cultural de la comunidad pesquera de Punta Lobos, Todos Santos. *Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología* (CONACYT).

Lara A., Galván-Magaña F., Elorriaga-Verplancken F.R., Marmolejo-Rodríguez A.J., Gonzáles-Armas R., Arreola-Mendoza L., Sujitha S.B., Jhonathan M.P., Pantoja-Echevarría L.M., (2022). Mercury, selenium and cadmium in juvenile blue (Prionace glauca) and smooth hammerhead (Sphyrna zygaena) sharks from the Northwest Mexican Pacific coast. *Marine Pollution bulletin* 175, 113311. DOI: https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.113311

Lara A., Galván-Magaña F., Elorriaga-Verplancken F.R., Marmolejo-Rodríguez A.J., Gonzáles-Armas R., Arreola-Mendoza L., Sujitha S.B., Jhonathan M.P., (2020). Bioaccumulation and trophic transfer of potentially toxic elements in the pelagic thresher shark Alopias pelagicus in Baja California Sur, Mexico.

Lara A., Galván-Magaña F., Elorriaga-Verplancken F.R., Marmolejo-Rodríguez A.J., Gonzáles-Armas R., Arreola-Mendoza L., Sujitha S.B., Jhonathan M.P., Pantoja-Echevarría L.M., 2022. Mercury, selenium and cadmium in juvenile

blue (Prionace glauca) and smooth hammerhead (Sphyrna zygaena) sharks from the Northwest Mexican Pacific coast. *Marine Pollution bulletin* 175, 113311. DOI: https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.113311 Marine Pollution bulletin 156, 111192.

Londoño-franco, L.F.; Londoño-Muñoz, P.T. y Muñoz-García, F.G. 2016. Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. *Biotecnología en el sector agropecuario y agroindustrial*. v. 14. n 2. (145-153).

Luoma, S. N. (1990). Processes affecting metal concentrations in estuarine and coastal sediments. *In Chemical Processes in Lakes* (pp. 227-287)

Mann, H. B. & D. R. Whitney. 1947. On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. *Ann. Math. Stat*., 50-60.

Marcovecchio, J. E., Moreno, V. J., & Pérez, A. (1991). Metal accumulation in tissues of sharks from the Bahía Blanca estuary, Argentina*. Marine Environmental Research*, 31, 263–274.

Marmolejo-Rodríguez, A. J., Sánchez-Martínez, M. A., Romero-Guadarrama, J. A., Sánchez-González, A., & Magallanes-Ordóñez, V. R. (2011). Migration of As, Hg, Pb, and Zn in arroyo sediments from a semiarid coastal system influenced by the abandoned gold mining district at El Triunfo, Baja California Sur, Mexico. *Journal of Environmental Monitoring*, 13(8), 2182. doi:10.1039/c1em10058k

Martínez-Ayala, J.C., Galvan-Magaña, F., Tripp-Valdez, A., Marmolejo-Rodríguez, A.J., Piñón-Gimate, A., Huerta-Díaz, M. A., Sánchez-González, A., (2022). Heavy metal concentration in the Pacific sharpnose shark *Rhizoprionodon longurio* from the Santa Rosalia mining zone, Baja California Sur, México. *Marine Pollution Bulletin*, (182), 114018.

Marín-Osorno, R. (1992). Clave para la determinación de los Tiburones del Golfo de México*. Universidad Veracruzana, Facultad de biología, Xalapa, Ver. Méx*. 31 p.

Méndez, L., B. Acosta, S. T. Álvarez-Castañeda y C. H. Lechuga-Devéze. 1998. Trace metal distribution along the southern coast of Bahía de la Paz (Gulf of California), Mexico*. Environmental Contamination and Toxicology*, 61, 616-622.

Moore, A.B., Bolam, T., Lyons B.P., Lyons, J.R. 2015. Concentrations of trace elements in rare and threatened coastal shark from Arabian Gulf (smoothhound blacktip *Carcharhinus leiodon*). Mar. Pollut. Bulletin. 100 (2), 646-650.

Norma Oficial Mexicana NOM-242-SSA1-2009. Bienes y Servicios. Productos de la pesca. Moluscos bivalvos frescos-refrigerados y congelados. Especificaciones Sanitarias y métodos de prueba.

Pantoja-Echevarría L.M., Marmolejo-Rodríguez A.J., Galvan-Magaña F., Elorriaga-Verplancken F.R., Tripp-Valdez A., Tamburin E., Lara A., Jhonathan M.P., Sujitha S.B., Arreola-Mendoza L., 2021. Mercury and selenium concentration in different tissues of brown smooth-hound shark (Mustelus henlei) from the western coast of Baja California Sur, México. *Marine Pollution Bulletin* 170,112609. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112609

Pantoja-Echevarría L.M., Marmolejo-Rodríguez A.J.,Galvan-Magaña F., Arreola-Mendoza L.,Tripp-Valdez A., Elorriaga-Verplancken F.R., Sujitha S.B., Jhonathan M.P., 2020. Bioaccumulation and trophic transfer of Cd in commercially sought brown smoothhound Mustelus henlei in the western coast of Baja California Sur, Mexico. *Marine Pollution Bulletin*. 151, 110879: https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110879

Pantoja-Echevarría L.M., Marmolejo-Rodríguez A.J.,Galvan-Magaña F., Elorriaga-Verplancken F.R., Tripp-Valdez A., Tamburin E., Lara A., Jhonathan M.P., Sujitha S.B., Delgado-Huertas A., Arreola-Mendoza L.,2023. Trophic structure and biomagnification of cadmium, mercury and selenium in brown smooth hound shark (Mustelus henlei) within a trophic web. *Food Webs* 34, e00263. https://doi.org/10.1016/j.fooweb.2022.e00263

Reyes, C.; Vergara, I.; E. Torres, O. y E. Gonzales, E. 2016. Contaminación por metales pesados: Implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Revista de Ingeniería, Investigación y Desarrollo*. v 16. n 2, 66-77.

Sánchez, J. E., & Aparicio, A. (2013). Toxicología ambiental. *En Toxicología ambiental* (pp. 13-32). Elsevier España.

Sany S. B. T., Salleh A., Rezayi M., Saadati N., Narimany L. y Tehrani G. M. (2013). Distribution and contamination of heavy metal in the coastal sediments of Port Klang, Selangor, Malaysia. *Water Air Soil Poll*. 224, 1-18. DOI: 10.1007/s11270-013-1476-6

SEMARNAT. (2018). Diagnóstico de la calidad del agua y sedimentos en la zona costera de Baja California Sur. *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.*

Storelli, M. M., Cuttone, G., Marcotrigiano, G.O. (2010). Distribution of trace elements in the tissues of smooth hound *Mustelus mustelus* (Linnaeus, 1758) from the southern–eastern waters of Mediterranean Sea (Italy). *Environ Monit Assess*. 174:271–281. DOI 10.1007/s10661-010-1456-x

Pérez-Jímenez, J. c., Sosa-Nishizaki, O. (2008). Biología reproductiva del tiburón galgo pardo *Mustelus henlei*, en el norte del Golfo de California México. *Journal of Fish Biology*. 73,782–792. doi.10.1111/j.1095-8649.2008.0193

Soto-López K. 2018. Demografía del tiburón mamón pardo Mustelus henlei (Grill, 1983) en la costa occidental de Baja California Sur, México. Tesis de Doctorado. *Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas-Instituto Politécnico Nacional* 139 pp.

Soto-López K., R. I. Ochoa-Báez, J. Tovar-Ávila & Galván-Magaña. 2018. Reproductive biology of the brown smooth-hound shark, Mustelus henlei (Chondrichthyes: Triakidae) based on macroscopic and histological analysis in the northwest of Mexico. *Ciencias Marinas*., 44 (2): 125-139.

Sun T., Wu H., Wang X., Ji Ch., Shan X. & Li F. (2020). Evaluation on the biomagnification or biodilution of trace metals in global marine food webs by meta-analysis. *Environmental Pollution*. 264, 113856

Valle-Padilla, E. (2008). Aprovechamiento de recursos marinos en áreas naturales protegidas de Baja California Sur: Los casos de Laguna San Ignacio e Isla Natividad, en la biosfera de El Vizcaíno, y Cabo Pulmo en el parque nacional Cabo Pulmo. *Universidad Autónoma de Baja California Sur.* Tesis.

Vas, P. (1991). Trace metal levels in sharks from British and Atlantic Waters. Marine *Pollution Bulletin,* 22, 67–72.

Vas, P., Gordon, J. D. M. (1993). Trace metals in deepsea sharks from the Rockall Trough. *Marine Pollution Bulletin*, 26, 400–402.

Vega-Barba, C., Paéz-Ozuna, F., Galvan-Magaña, F., Camarasa-Baró, I., Aguilar-Palomino, B., Galvan-Piña, V.H., Marmolejo-Rodríguez, A.J. (2022). Trace elements in the silky shark Carcharhinus falciformis in the Central Pacific Mexican Shelf. *Marine Pollution Bulletin*. 185, 114263

Villavicencio-Garayzar, C. J. (1996). Pesquería de tiburón y cazón. *Estudio del potencial pesquero y acuícola de Baja California Sur*, *1*, 305-316.

Wang, S. L., X. R. Xu, Y. X. Sun, J. L. Liu & H. B. Li. 2013. Heavy metal pollution in coastal areas of South China: A review. *Marine Pollution Bulletin*. 76: 7-15.

Yudin, K. G. & G. M. Cailliet. 1990. Age and growth of the gray smoothhound, Mustelus californicus, and the brown smoothhound, M. henlei, sharks from central California. *Copeia*, 191-204.