



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Sede Caribe

Determinación del rol del tiburón cazón antillano, *Rhizoprionodon porosus* (Carcharhinidae) en el flujo de metilmercurio dentro de las redes tróficas del Caribe colombiano.

**Tesis para optar al título de Magíster en Ciencias, en Biología – Línea
Biología Marina**

Estudiante: Ramiro Rueda Bernal

**Universidad Nacional de Colombia
Instituto de Estudios en Ciencias del Mar – CECIMAR, Sede Caribe
Convenio Universidad Nacional de Colombia – INVEMAR
Santa Marta, Colombia
Noviembre, 2016**



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Sede Caribe

Determinación del rol del tiburón cazón antillano, *Rhizoprionodon porosus* (Carcharhinidae) en el flujo de metilmercurio dentro de las redes tróficas del Caribe colombiano.

**Tesis para optar al título de Magíster en Ciencias, en Biología – Línea
Biología Marina**

Estudiante: Ramiro Rueda Bernal, 1.136.885.130

**Director: Ph.D., Arturo Acero P.,
Codirector: Dr. rer.nat., Néstor H. Campos**

**Universidad Nacional de Colombia
Instituto de Estudios en Ciencias del Mar – CECIMAR, Sede Caribe
Convenio Universidad Nacional de Colombia – INVEMAR
Santa Marta, Colombia
Noviembre, 2016**

A mis Viejos Queridos

Agradecimientos

Quiero agradecer en primer lugar a mis padres y mis hermanos, por su apoyo incondicional durante todo mi desarrollo académico y personal.

A mi director Arturo Acero y mi tutor y codirector Néstor Campos quienes creyeron y apoyaron este proyecto desde que era tan solo una propuesta, me guiaron durante todo este camino y lo hicieron mucho más sencillo. Hago un agradecimiento especial al profesor Sven Zea, por sus clases, recomendaciones y la coordinación del programa y al profesor Ramón Giraldo por su gran disposición a la hora de asesorar toda la parte estadística del presente estudio.

A la Universidad Nacional de Colombia por su apoyo económico e institucional y al INVEMAR por poner a nuestro servicio sus instalaciones y personal de planta. A la Universidad de Córdoba y su laboratorio de Toxicología y Gestión Ambiental, especialmente a su director, el profesor José Luis Marrugo, quien me abrió las puertas y puso dichas instalaciones a mi completa disposición.

A todos mis compañeros del programa de Maestría en Ciencias, línea Biología Marina, y mis colegas que ya se encuentran realizando su doctorado, por todos sus aportes, recomendaciones y opiniones durante las sesiones y clases compartidas. A mis compañeros que realizan actualmente su pregrado en la Universidad Jorge Tadeo Lozano pues hicieron de mi estadía en la ciudad de Santa Marta una etapa muy agradable.

Quiero hacer un reconocimiento especial a los pescadores de cada región y particularmente, al señor Justo Ramos y su familia, quienes fueron parte fundamental en la fase de campo realizada en la estación de Isla Fuerte. Finalmente agradezco a todos mis colegas cuyos esfuerzos generan conocimiento día a día y permiten soportar con argumentos científicos nuevas investigaciones.

RESUMEN:

El metilmercurio (MeHg) es la forma orgánica más tóxica en la que se puede encontrar el mercurio. Es una potente neurotoxina cuyo consumo genera graves consecuencias en la salud de los seres humanos. En Colombia diferentes actividades generan desechos con mercurio y los ecosistemas marinos suelen ser los más afectados gracias a la capacidad de bioacumulación y biomagnificación en especies de diferentes niveles tróficos. Para evaluar el estado de contaminación por MeHg del Caribe colombiano (CC) y determinar su variación espacio-temporal se analizaron ejemplares de *Rhizoprionodon porosus*, un tiburón muy común en la costa Caribe, como especie centinela. Muestras de tejido y contenido estomacal fueron colectadas durante diferentes épocas en tres sitios de distintos departamentos, La Guajira, Bolívar y Atlántico. Las muestras fueron liofilizadas, posteriormente se les realizó una extracción líquido-líquido con tolueno y cisteína y usando un analizador directo de mercurio (DMA80) se determinaron las concentraciones en los tiburones y sus presas. Una vez obtenidos los resultados se calculó el factor de biomagnificación (FB) del metal en los compartimentos estudiados de las redes tróficas del CC. En los tres sitios de estudio se detectó la presencia de MeHg, siendo los sectores adyacentes al río Magdalena y el río Sinú los mayormente afectados. A pesar de que Magdalena y Bolívar representaron los puntos más alarmantes, en los tres sitios hubo muestras cuyas concentraciones superan los niveles establecidos como seguros para el consumo según la Organización Mundial de la Salud. El estadístico de Kruskal-Wallis evidenció diferencias significativas entre las épocas de muestreo de los diferentes sitios y con la correlación de Spearman se demostró que existe una relación entre la talla del individuo y la concentración de MeHg. Se concluyó que *R. porosus* es una especie marino costera que se comporta como bioacumulador y biomagnificador de MeHg en las redes tróficas del mar Caribe colombiano.

Palabras clave: Metilmercurio, Bioacumulación, Biomagnificación, *Rhizoprionodon porosus*, Caribe colombiano.

ABSTRACT:

The methylmercury is the most toxic organic form that can be found in this metal. It's a powerful neurotoxin with its consumption generates bad consequences in human health. In Colombia, different activities generate wastes with mercury, and the marine ecosystems usually are the most affected because of the capacity of bioaccumulation in species of different trophic levels. To evaluate the state of contamination of MeHg of Colombian Caribbean (CC) and determine its space-temporal variations, there was studied individuals of *Rhizoprionodon porosus*, a very common shark in the Caribbean coast, as a sentinel species. Flesh samples and stomach content were collected during different seasons in three sites of different regions, La Guajira, Bolivar and Atlántico. The samples were lyophilized and later there was made a liquid-liquid extraction with toluene and cysteine and using a direct analyzer of mercury (DMA80) the concentrations in the sharks and their dams were determined. Once the results were found, the factor of biomagnification (FBM) was calculated on CC trophic networks. In the three sites of the study the presence of mercury (MeHg) was detected, being the adjacent sectors of Magdalena and Sinú rivers the mostly affected. Despite that Magdalena and Bolivar represented the most alarming points, in the three sites there were samples with their concentrations exceed the levels established by the World Health Organization. The statistical of Kruskal-Wallis evidenced significant differences between the season of sample on the different sites and correlation of Spearman showed that there is a relation between the size of the individual and the concentration of MeHg. It was demonstrated that *R. porosus* is a species that accumulate and magnifies MeHg inside the trophic webs of the Colombian Caribbean marine ecosystems.

Keywords: Methylmercury, bioaccumulation, biomagnification, *Rhizoprionodon porosus*, Colombian Caribbean.

Resumen

Lista de Figuras y Tablas

1. Marco Teórico:

1.1 Descripción de la especie:

1.1.1 Características generales.....	1
1.1.2 Distribución y Ecología.....	2
1.1.3 Biología reproductiva.....	4
1.1.4 Estado de conservación.....	5
1.1.5 Importancia del modelo de estudio.....	6

1.2 Mercurio orgánico:

1.2.1 Inclusión del mercurio a los ecosistemas acuáticos.....	9
1.2.2 Bioacumulación y Biomagnificación de MeHg en tiburones.....	10
1.2.3 Consecuencias de la exposición al mercurio.....	13
1.2.4 Determinación de las cantidades aptas para el consumo... 	15
1.2.5 Panorama nacional.....	15

1.3 Área de estudio:

1.3.1 Características Generales.....	16
1.3.2 Mercurio en los sitios de estudio.....	20

2. Materiales y métodos:

2.1 Identificación de la especie.....	23
2.2 Sitios de estudio.....	26
2.3 Obtención de muestras.....	29
2.4 Tratamiento de las muestras.....	29

2.5 Determinación de MeHg.....	30
2.6 Análisis estadísticos.....	31

3. Resultados:

3.1 Contenidos de MeHg.....	33
3.2 Kruskal-Wallis.....	35
3.2.1 [MeHg] en <i>R. porosus</i>.....	37
3.2.2 [MeHg] en contenidos estomacales.....	40
3.2.3 Factor de Biomagnificación.....	41
3.2.4 Talla.....	43
3.2.5 Peso.....	44
3.2 U de Mann-Whitney.....	46
3.3 Correlación de Spearman.....	47

4. Discusión:

4.1 Cabo de la Vela.....	49
4.2 Las Flores.....	52
4.3 Isla Fuerte.....	54

5. Conclusiones y recomendaciones:

5.1 Conclusiones.....	56
5.2. Recomendaciones.....	57

Bibliografía.....	58
--------------------------	-----------

Lista de Tablas:

Tabla 1. Concentraciones, sexo, talla y peso del total de los individuos muestreados.....	32
Tabla 2. Porcentaje de muestras que exceden los límites de la OMS y FAO en cada sitio de estudio.....	37
Tabla 3. Promedios, medianas y valores de significancia asintótica de las [MeHg] µg/kg en <i>R. porosus</i> según prueba de Kruskal-Wallis.....	37
Tabla 4. Promedios, medianas y valores de significancia asintótica de las [MeHg] µg/kg en contenido estomacal de <i>R. porosus</i> según prueba de Kruskal-Wallis.....	41
Tabla 5. Promedios, medianas y valores de significancia asintótica de los factores de biomagnificación según prueba de Kruskal-Wallis.....	41
Tabla 6. Promedios, medianas y valores de significancia asintótica de las tallas de <i>R. porosus</i> según prueba de Kruskal-Wallis.....	43
Tabla 7. Promedios, medianas y valores de significancia asintótica de los pesos de <i>R. porosus</i> según prueba de Kruskal-Wallis.....	45
Tabla 8. Estadísticos de prueba U de Mann-Whitney, evaluación de la variable biológica sexo como factor determinante.....	47
Tabla 9. Resultados de la correlación de Spearman.....	48

Lista de Figuras:

Fig 1. Descripción general del cazón antillano.....	2
Fig 2. Distribución global de <i>R. porosus</i>.....	3
Fig 3. Corrientes marinas superficiales en sequía.....	18
Fig 4. Corrientes marinas último meses de sequía.....	18
Fig 5. Corrientes marinas superficiales en época de lluvias.....	19
Fig 6. <i>Rhizoprionodon porosus</i>.	24
Fig 7. <i>Rhizoprionodon terranova</i>.....	24
Fig 8. <i>Rhizoprionodon lalandii</i>.....	25
Fig 9. Descripción <i>R. porosus</i> según guía “Tiburones de Sur América del Océano Atlántico.....	25
Fig 10. Mapa indicando la ubicación geográfica de los puntos de muestreo.	28
Fig. 11. Concentraciones promedio de metilmercurio en tejido de <i>R. porosus</i> según época y sitios de muestreo. Los números en rojo representan los valores promedio y los valores al interior de las barras corresponden a las desviaciones estándar.....	33

Fig. 12. Concentraciones promedio de metilmercurio en contenidos estomacales de <i>R. porosus</i> según época y sitios de muestreo. Los número en rojo representan los valores promedio y los valores al interior de las barras corresponden a las desviaciones estándar	34
Fig 13. [MeHg] $\mu\text{g/kg}$ en <i>R. porosus</i> según lugar de muestreo.....	35
Fig 14. [MeHg] $\mu\text{g/kg}$ en <i>R. porosus</i> según época de muestreo.....	35
Fig 15. [MeHg] $\mu\text{g/kg}$ en <i>R. porosus</i> según la época en cada uno de los sitios de estudio.....	39
Fig 16. [MeHg] $\mu\text{g/kg}$ en contenido estomacal de <i>R. porosus</i> según la época en cada uno de los sitios de estudio.....	40
Fig 17. Factor de Biomagnificación en <i>R. porosus</i> según la época en cada uno de los sitios de estudio.....	42
Fig 18. Talla de los individuos de <i>R. porosus</i> capturados según la época en cada uno de los sitios de estudio.....	44
Fig 19. Peso de los individuos de <i>R. porosus</i> capturados según la época en cada uno de los sitios de estudio.....	45
Fig 20. Diagrama de cajas y bigotes de las concentraciones de MeHg en <i>R. porosus</i> en el Caribe colombiano según sexo.....	46

1. Marco Teórico

1.1 Descripción de la especie *Rhizoprionodon porosus*

1.1.1 Características Generales:

El cazón antillano (*Rhizoprionodon porosus*) o tiburón tollo, como es conocido en algunas regiones de Colombia, es una especie costera del orden Carcharhiniformes y la familia Carcharhinidae cuya talla no supera los 1.1 m de longitud. Este es uno de los tiburones más abundantes en la costa Caribe colombiana y por ende una de las especies de elasmobranquios capturada con mayor frecuencia de manera incidental en anzuelos y redes de pesca artesanal. Generalmente habita aguas poco profundas. A pesar de ser una especie costera, el tiburón tollo no representa ningún tipo de amenaza para los seres humanos, pues su alimentación se basa en una gran variedad de presas pequeñas como peces y moluscos. Físicamente se distingue por tener un cuerpo fusiforme, surcos labiales muy prominentes, un hocico alargado, y una coloración dorsal que varía entre gris y café y que contrasta con su vientre totalmente blanco (Ladino, 2014).

Este tiburón suele confundirse con varias especies del genero *Rhizoprionodon*, y algunas del género *Carcharhinus*, ya que además de su aspecto físico, tanto sus rangos de distribución como su biología y hábitos de desplazamiento, son muy similares. Muchos autores proponen diferentes guías y caracteres para poder diferenciarlas, entre los cuales se destacan la coloración, la forma y la distribución dental, el número de vértebras y la disposición de todas sus aletas.

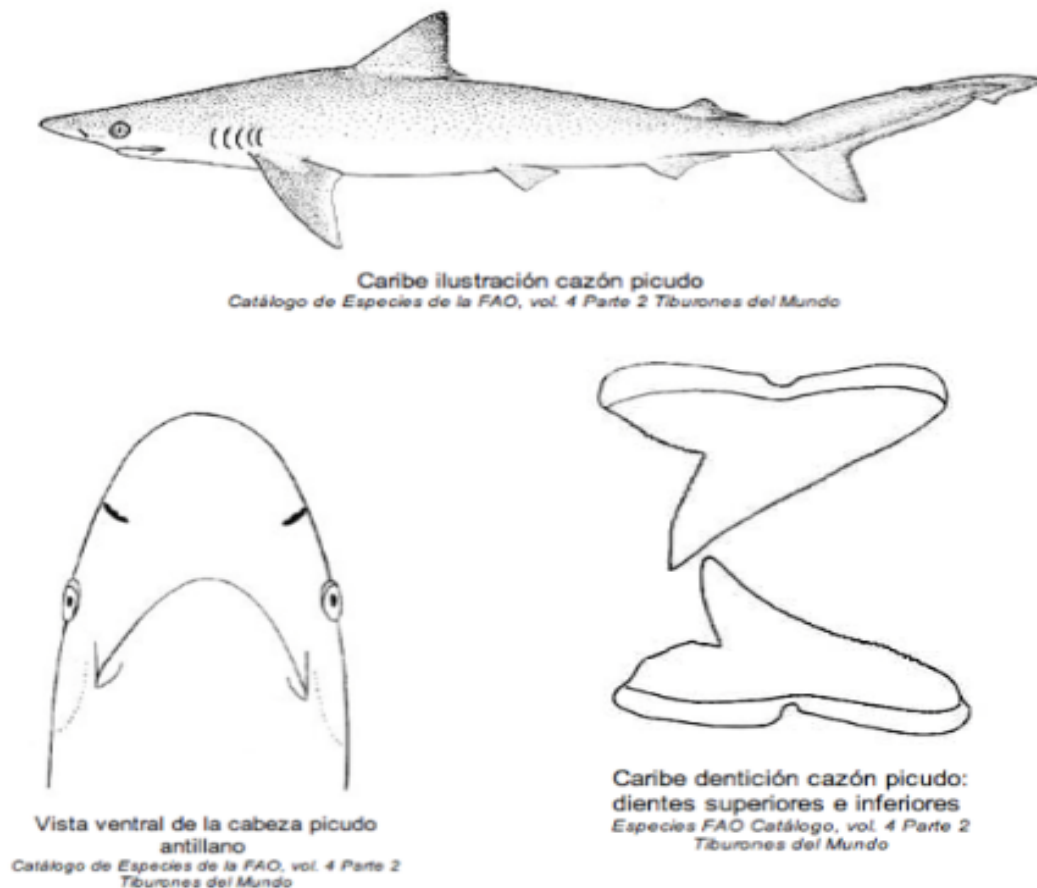


Figura 1. Descripción general del cazón antillano. Imagen tomada de: <https://www.flmnh.ufl.edu/fish/discover/species-profiles/rhizoprionodon-porosus/>

1.1.2 Distribución y Ecología

Aunque la familia Carcharhinidae y el género *Rhizoprionodon* cuentan con especies que se distribuyen alrededor de todo el planeta, el cazón antillano tiene una distribución tropical y subtropical que se limita al mar Caribe y las regiones costeras del océano Atlántico, desde el norte de las islas Bahamas y el Golfo de México, hasta el extremo sur de Uruguay (Fig.2). La dieta del tiburón cazón

antillano es bastante variada, se alimenta de peces, crustáceos y moluscos de diferentes tamaños. Al ser depredadores pequeños y bento-pelágicos, estos tiburones habitan principalmente zonas costeras, arrecifes y bahías poco profundas que raramente sobrepasan los 100 m (Navia *et al.*, 2011). Sin embargo, se han registrado excepciones de individuos en alta mar a 500 m de profundidad y en un solo caso, bastante particular, a más de 6,000 m (Lessa *et al.*, 2006).



Figura 2. Distribución global de *R. porosus*. Imagen tomada de:
<https://www.flmnh.ufl.edu/fish/discover/species-profiles/rhizoprionodon-porosus/>

De su dinámica poblacional la información aún es muy escasa y son pocos los estudios que se han realizado al respecto. Algunos autores sugieren que en Brasil las hembras realizan migraciones cortas asociadas a la época de apareamiento, mientras que otros plantean movimientos guiados por cambios climáticos y estacionales (Mattos *et al.*, 2001).

En un trabajo que buscaba conocer más sobre la estructura genética y poblacional de los cazones en costas brasileras, Mendonça *et al.*, (2011) instauraron diez puntos de muestreo para estimar la diversidad genética entre poblaciones

brasileras. Evaluando 802 nucleótidos de ADN mitocondrial en 321 individuos de *R. porosus*, lograron diferenciar más de 50 haplotipos de la especie en Brasil. Los resultados que obtuvieron son contundentes, pues los haplotipos encontrados fueron prácticamente únicos para cada sitio de estudio evidenciando una fuerte estructuración genética en cada uno de los lugares de muestreo y muy baja conectividad y flujo génico entre poblaciones.

En Colombia la especie ha sido poco estudiada, Almanza (2014) realizó una investigación de genética poblacional de la especie en diferentes locaciones de la costa Caribe colombiana. Sus resultados son similares a los que obtuvieron Mendonça *et al.* (2011) en Brasil, evidenciando una baja diversidad haplotípica en cada una de las locaciones y por ende una alta estructuración genética de la especie a lo largo del mar Caribe colombiano. Así mismo, en su estudio se presenta una diferencia genética radical entre los especímenes del norte de La Guajira y los del sur del Caribe colombiano (Magdalena, Bolívar y Córdoba).

De acuerdo con lo anterior se puede inferir que las poblaciones de cazón antillano en aguas colombianas tienen un escaso flujo genético entre sí, sugiriendo que muy probablemente la especie realiza desplazamientos cortos y que presenta un posible sedentarismo o fidelidad a una región particular.

1.1.3 Biología Reproductiva:

La biología reproductiva e historia de vida es un aspecto fundamental a la hora de establecer un animal como especie centinela. El tiburón cazón es una especie vivípara placentaria que presenta un ciclo anual de reproducción y cuyo periodo de gestación tiene una duración de 9 a 12 meses llegando a desarrollar hasta ocho embriones (Almanza, 2014). Una vez realizado el parto, las hembras están aptas para la reproducción de manera inmediata y pueden hacerlo en cualquier momento del año (Mattos *et al.*, 2001), Las crías son liberadas con una talla de

aproximadamente 30 cm de longitud. Las hembras llegan a su madurez sexual al alcanzar una talla de 65 cm, correspondiente a un estimado de 2.5 años, mientras que los machos llegan a su etapa reproductiva al alcanzar una talla entre 65 y 70 cm de longitud y 2 años de edad (Lessa *et al.*, 2009). Así mismo, cabe recalcar que estos animales tienen una longevidad máxima de 9 años (Medina *et al.*, 2009).

Al igual que muchas especies de tiburones costeros, los cazones tienen zonas de cría en aguas someras e incluso estuarinas (Mendonça, 2011). Diferentes estudios sugieren que la reproducción de algunas poblaciones de *R. porosus* están fuertemente ligadas a cambios climáticos, ambientales y estacionales. En un estudio realizado por Mattos *et al.*, (2001), en Brasil, se colectó durante un año un total de 273 individuos con el fin de conocer su estado de maduración reproductiva y estimar la tasa de crecimiento de su población. A pesar de que en dicho trabajo se observó un pico en la frecuencia de copulación en el periodo de transición invierno-verano, esta especie parece estar caracterizada por una baja tasa de crecimiento poblacional que puede hacerla susceptible a la sobrepesca. Los tollos presentan un crecimiento relativamente lento, tardan hasta tres años en duplicar su tamaño de nacimiento.

1.1.4 Estado de conservación:

Al igual que en una gran cantidad de especies de condricios, las características reproductivas de los tiburones tollo pueden ser consideradas el talón de Aquiles para cualquier programa de conservación. Al tratarse de animales que se han encontrado en la cima de los niveles tróficos durante millones de años, la historia evolutiva de la mayoría de elasmobranquios no ha sido guiada para desarrollar mecanismos que puedan contrarrestar la presión de lo que parece un repentino competidor. Con el gran aumento del impacto generado por la explotación descontrolada de los recursos marinos, los tiburones son un blanco perfecto para el comienzo de la desestabilización de todo un ecosistema. Mientras los peces

óseos han desarrollado diferentes estrategias para confrontar la fuerte presión de grandes depredadores, los tiburones son realmente frágiles. Teniendo en cuenta que las edades de madurez sexual de muchas especies son bastante tardías y que el cuidado parental y el gasto energético que implica producir grandes cantidades de huevos, son estrategias totalmente ajenas a estos depredadores, el panorama de conservación es preocupante y su extinción puede llegar a ser inminente.

Según la IUCN este tiburón presenta un estado de conservación de preocupación menor, pero hay que recalcar que en Colombia se captura para comercializar tanto las aletas, como el tejido muscular y el aceite producto de su hígado (Navia *et al.*, 2011). En dos de las tres estaciones establecidas para el presente estudio, Isla Fuerte y Cabo de la Vela, los pescadores locales aseguran que la disminución en la captura de estos animales es cada vez más notoria. Así mismo, basado en un trabajo realizado por Sadowsky (1967), Gadig (2001) afirman que en los últimos 40 años las capturas de *R. porosus* registradas en las costas del estado de São Paulo, se han disminuido en más de un 50% aunque las técnicas y métodos de pesca no hayan variado significativamente. Es por esto que esta y muchas más especies de condriktios requieren ser objeto de control, estudio y monitoreo constante.

1.1.5 Importancia del modelo de estudio:

La contaminación indiscriminada de los cuerpos de agua y la posterior explotación sin control de los recursos que estos mismos proveen, evidencian el gran vacío existente en las comunidades en cuanto al conocimiento de las consecuencias, en términos de salud, que tienen estas actividades. El metilmercurio (MeHg) es la forma orgánica más tóxica en la que se puede encontrar este metal y así mismo la forma en la que es mayormente acumulada en el tejido de los peces (do Amaral *et al.*, 1998). Diferentes actividades antropogénicas generan desechos con mercurio.

Determinación del rol del tiburón cazón antillano, *Rhizoprionodon porosus* (Carcharhinidae) en el flujo de metilmercurio dentro de las redes tróficas del Caribe colombiano

La minería, la agricultura, la quema de combustibles fósiles, entre otros, corresponden a fuentes de emisión que se han sumado a las naturales y hacen de este metal hoy en día una amenaza para la salud de los seres humanos y una situación que debe ser objeto de control.

Se ha demostrado que el consumo de alimentos con altos niveles de metilmercurio trae consecuencias graves para los seres humanos. En las mujeres embarazadas el mercurio implica un riesgo en el desarrollo del embrión y en las personas adultas se ha comprobado que causa un deterioro acelerado en el sistema cardiovascular y nervioso central (Corredor, 2013).

En Colombia las fuentes contaminantes pueden ser muy variadas. La falta de educación y conciencia ambiental, la necesidad de explotar cualquier recurso que esté al alcance por parte de las clases menos favorecidas, el alto índice de actividades que manipulan este elemento de manera ilegal, entre otras muchas causas, constituyen un escenario propenso a sufrir los efectos de un ecosistema contaminado por mercurio y por ende un panorama que debe ser objeto de estudio y aun es desconocido. El Caribe colombiano presenta numerosas regiones con un alto grado de pobreza en donde la pesca artesanal y la explotación de los recursos marinos representan una alternativa de sustento para muchas familias.

Los tiburones del género *Rhizoprionodon* están entre los depredadores más importantes para la estabilidad de los ecosistemas costeros del mar Caribe (Mendonça, 2011). Lamentablemente, la pesca del cazón antillano sigue siendo usual en varias partes de esta región. Si bien es cierto que la captura de dicho tiburón no se da de forma dirigida, es frecuente encontrarlo en redes y anzuelos de pescadores artesanales debido a su tamaño pequeño. Aun así, se trata de un depredador en las redes tróficas de los ecosistemas de la costa Caribe colombiana que es consumido por los seres humanos y, por ende, puede implicar

un riesgo para la salud debido a la falta control y criterios que determinen las características de los animales aptos para el consumo.

Teniendo en cuenta los hábitos de vida del tiburón cazón antillano y con el fin de conocer más a fondo el estado del ecosistema en que éste se desenvuelve, resulta de gran utilidad entender su papel en el flujo del MeHg a través de las redes tróficas del Caribe colombiano. Así mismo, determinar la concentración de MeHg en el tejido de estos animales y conocer la forma en que éste es acumulado, no solo los hace un buen modelo de especie centinela sino que además significa un primer paso que es necesario para, basado en los criterios establecidos internacionalmente respecto a los límites de consumo de este metal, tomar medidas preventivas tanto dentro de las comunidades expuestas al consumo como en las poblaciones mayormente asociadas con las fuentes de contaminación.

Adicionalmente, es importante recalcar que, para favorecer cualquier acción en pro de la conservación de estos animales, es necesario continuar estudiando diferentes aspectos de su biología e historia de vida. Por ejemplo, de llegar a ser confirmado un comportamiento filopátrico por parte de la especie en el Caribe colombiano, urge establecer puntos exactos que eviten la sobrepesca y explotación del ecosistema ya que, como lo han demostrado diferentes autores, la conectividad genética de los cazones en el Caribe puede llegar a no ser suficiente para recuperar una población (Mendonça, 2011).

1.2 Mercurio Orgánico

1.2.1 Fuentes de contaminación e inclusión del mercurio a los ecosistemas acuáticos

Según el Departamento Nacional de Planeación (DNP), 75 toneladas de mercurio son liberadas anualmente a causa de la minería de oro artesanal y de pequeña escala en Colombia. De acuerdo con lo anterior, el director de dicho departamento afirma que después de China e Indonesia, Colombia es el país que más mercurio libera a la atmósfera afectando más de 200 fuentes hídricas (<http://es.presidencia.gov.co>). El mercurio es posible encontrarlo en tres formas: mercurio elemental o metálico, compuestos orgánicos de mercurio y compuestos inorgánicos de mercurio. Sin embargo, las fuentes emisoras de mercurio en la tierra se pueden dividir en dos grandes grupos, naturales y antropogénicas (Bose et al., 2010). Las fuentes naturales son responsables de una gran parte del mercurio que se encuentra en el ambiente, esto debido a que diferentes procesos de desgaseificación de la corteza terrestre, la actividad volcánica, el movimiento de las placas tectónicas y los incendios forestales, generan este tipo de residuos en grandes cantidades (Velasco et al., 2011). Sin embargo, las fuentes antropogénicas vienen en crecimiento rápido, tanto así que se ha estimado que la concentración de mercurio en la biosfera se ha triplicado durante los últimos 150 años, perjudicando tanto ecosistemas terrestres como acuáticos (Mason et al., 2012). Generalmente se atribuye la mayor responsabilidad a la explotación minera, principalmente de oro y carbón, y a la producción de cementos; sin embargo, la quema de combustibles fósiles, la fabricación de electrodomésticos, termómetros y amalgamas dentales también generan este tipo de desechos y deben ser tratados con cautela (Corredor, 2013).

En general, el mercurio orgánico está compuesto por un enlace químicamente estable entre mercurio y el carbono de un grupo funcional etilo, metilo o fenilo (Corredor, 2013). Pero, en los ecosistemas marinos, el mercurio es incluido inicialmente a los cuerpos de agua en compuestos inorgánicos y es posteriormente transformado en metilmercurio mediante la acción de diferentes tipos microorganismos (Park, 2012). El depósito de mercurio al océano se da principalmente por la entrada directa del mercurio atmosférico a las superficies oceánicas, aunque la contaminación mediada por las desembocaduras fluviales también es considerable debido a que estas arrastran diferentes tipos de sedimento a estuarios y regiones costeras (Mason *et al.*, 2012).

Posteriormente, la metilación del mercurio es un procedimiento que se creía que era llevado a cabo únicamente en condiciones anóxicas y a grandes profundidades, sin embargo, se ha demostrado recientemente que en las zonas costeras y en las aguas superficiales ocurre en alto grado este proceso. La producción de MeHg en las zonas costeras y aguas poco profundas se puede ver beneficiada por la incidencia de los rayos solares, la presencia de bacterioplancton y, contrario a lo que se planteaba años atrás, la presencia de mayores concentraciones de oxígeno (Monperrus *et al.*, 2012). Adicionalmente se ha justificado que las condiciones fisicoquímicas, pH y los potenciales redox, también influyen en el proceso de metilación del mercurio (Cogua *et al.*, 2012).

1.2.2 Bioacumulación y Biomagnificación de MeHg en Tiburones

Diferentes especies de elasmobranquios han sido objeto de estudio con el fin de determinar las tasas de acumulación de metales pesados en diversos tipos de ecosistemas. Muchas de estas debido a la creciente demanda en el consumo de productos derivados de este tipo de animales y el aparente riesgo que éstos implican para la salud de los consumidores. En términos de mercurio, por ejemplo,

los resultados a nivel global han sido muy variados, algunas publicaciones coinciden en concentraciones bajas que no implican un riesgo para el consumo humano, mientras que otra gran cantidad de trabajos postulan el consumo, de tiburón especialmente, como lo que podría ser el origen de ciertas enfermedades por intoxicación con MeHg.

Smith & Guentzel (2010) publicaron un estudio mediante el cual realizaron medidas de concentración de mercurio en los ácidos omega 3 de diferentes especies comerciales de camarones y peces capturados en el océano Atlántico, entre los cuales fue incluida *Rhizoprionodon terraenovae*, especie hermana y con características similares a las de *R. porosus*. En ese trabajo *R. terraenovae* presenta las concentraciones más altas de mercurio superando significativamente a otros peces más grandes, como lo son algunos atunes y peces espada. Aunque los niveles de mercurio hallados fueron bajos en relación a los registrados en las bases de datos de la FDA (Administración de medicinas y alimentos de los Estados Unidos), se pone en evidencia la capacidad de estos depredadores para bioacumular mercurio en sus tejidos.

Sin embargo, la gran mayoría de los estudios de cuantificación de metilmercurio en tiburones se han llevado a cabo con especies oceánicas. De Pinho *et al.* (2002) realizaron un trabajo en el cual midieron la concentración de metilmercurio en tejido de cinco especies de tiburones oceánicos en Brasil. Su estudio arrojó resultados alarmantes puesto que en tres de las cinco especies los niveles de mercurio sobrepasan de manera exagerada los niveles de mercurio considerados como seguros para el consumo por la legislación brasilera. Así mismo, lograron establecer una relación entre las concentraciones de MeHg en el tejido de los tiburones y algunas variables biológicas inter e intraespecíficas. Entre estas variables se destacan el tipo de dieta y los hábitos alimentarios de la especie, y la talla y el sexo de los tiburones muestreados. Es importante recalcar que de Pinho *et al.* (2002) obtuvieron la información correspondiente al tipo de dieta de cada

especie a partir de una revisión bibliográfica y no de manera empírica. Resulta interesante que las especies que consumen peces, el alimento marino más consumido por los seres humanos, exhiben las concentraciones de mercurio total y metilmercurio más altas, evidenciando así el proceso de biomagnificación en las redes tróficas. Adicionalmente, con su trabajo estos autores determinaron que las concentraciones en todas las especies estudiadas son mayores en los machos que en las hembras y en cuatro de las cinco especies se presenta una correlación positiva entre la concentración y la talla de los individuos.

En otro estudio, Hueter *et al.* (1995) trabajaron con nueve especies de tiburones de la familia Carcharhinidae evaluando la concentración de metilmercurio en el tejido de los mismos. Los tiburones fueron capturados en las costas norteamericanas del estado de Florida. De un total de 124 muestras procesadas, 44, correspondientes al 33.1% del muestreo total, excedieron los niveles de seguridad establecidos por la FDA. Observaron adicionalmente una relación directa entre la concentración de metilmercurio y la talla de los individuos, a mayor talla fue registrada una mayor concentración. La relación se observó de manera intra e interespecífica, es decir analizando especie por especie o mezclando todas las muestras en un mismo análisis, la relación tamaño/concentración fue positiva. Ahora bien, el tiburón de arrecife (*Carcharhinus perezii*) que, al igual que el cazón antillano, es un animal de hábitos alimentarios y ecológicos costeros (Rosa *et al.*, 2015), presentó los valores de metilmercurio más altos. Es de resaltar que el tiburón de arrecife del Caribe superó los niveles presentados por otras especies cuya dieta es significativamente más variada y sus ámbitos de desplazamiento son mucho más amplios. Así mismo, en un estudio de determinación de biomagnificación en México, López y Maz (2006) muestrearon cuatro especies de tiburones de la familia Carcharhinidae y cuatro de sus presas más frecuentes: calamar, macarela, langostilla y mictófido. Realizaron mediciones de las concentraciones de mercurio total tanto en tiburones como en presas y hallaron concentraciones en estas que delataban altos factores de biomagnificación en las

redes tróficas. Adicionalmente, tres de las cuatro especies de tiburón presentaron valores significativamente mayores a los postulados como aptos para el consumo por la legislación mexicana.

Al igual que otros estudios citados anteriormente, confirman la utilidad de los tiburones como posibles modelos de estudio de acumulación de metales pesados en redes tróficas y biomagnificadores de ellos en diferentes tipos de ecosistemas marinos. Aunque los tiburones han sido poco empleados como biomonitores de un lugar en específico, debido a la ecología y dinámica poblacional de estos animales cuyo ámbito de desplazamiento suele ser muy amplio, las especies costeras podrían llegar a ser muy útiles para conocer el grado de contaminación de alguna región, como se pretende demostrar con el presente estudio

1.2.3 Consecuencias de la exposición al mercurio:

El MeHg es la forma orgánica más tóxica en que puede ser encontrado el mercurio; adicionalmente y debido a su alta capacidad de acumulación y magnificación, es la más frecuente en los productos del mar y especialmente en los peces (Kraepiel, 2003). Se ha demostrado que el constante consumo de alimentos procedentes del mar pone en riesgo la salud de las personas de diferentes formas puesto que, aunque el MeHg perjudica principalmente el sistema nervioso central, éste también se comporta como una nefro e inmunotoxina (Bose *et al.*, 2010). Si bien es cierto que las etapas más propensas a sufrir las consecuencias que implican la exposición a MeHg corresponden a los primeros años de vida de los seres humanos, las secuelas en los adultos se ven pueden ver reflejadas, en los sistemas reproductivos, nerviosos y cardiovasculares aunque sea en una menor magnitud.

En las primeras etapas la susceptibilidad viene desde el periodo de gestación, en caso de que la madre sea una frecuente consumidora de estos alimentos, esto debido a que la placenta no es una barrera lo suficientemente impermeable al mercurio (EPA, 1997). Aunque una madre no presente ningún síntoma en especial, el feto es muy propenso a las malformaciones del sistema nervioso central e incluso al aborto. Se ha evidenciado, adicionalmente, que existe una correlación entre el nivel de exposición prenatal al mercurio y el desarrollo cognitivo de los niños y los puntos en términos de coeficiente intelectual que estos exhiben. En muchos casos, los niños que han sido expuestos prenatalmente en una mayor proporción al mercurio suelen presentar problemas de atención y memoria e incluso dificultades comunicativas y de uso lingüístico (Bose *et al.*, 2010).

Por otra parte, los hábitos alimentarios asociados a grandes cantidades de metilmercurio han sido, a su vez, relacionados con graves enfermedades cardiovasculares, dermatológicas y renales que se desarrollan tanto en niños como en adultos. La hipertensión, la arritmia cardiaca y la constante taquicardia son tan solo unas de las más frecuentes consecuencias del mercurio orgánico en la sangre (Bose *et al.*, 2010). Adicionalmente y según los autores el MeHg está clasificado como posible cancerígeno según la Agencia para la Investigación del Cáncer y se cree que en muchos casos está asociado con el desarrollo de leucemia.

En un estudio hecho con ranas de la especie *Rana pipiens*, Dial (1976) sometió embriones a tratamientos con diferentes concentraciones de MeHg, que iban desde los 0.5 hasta las 200 partes por billón (ppb), y notó que a medida que las concentraciones iban en aumento se presentaban diferentes defectos y anomalías en el desarrollo de los mismos. A concentraciones bajas algunos individuos presentaron tolerancia al contaminante. Sin embargo, varios de los embriones comenzaron a generar colas deformes con un desarrollo bastante pobre. Al llegar

a los tratamientos con una concentración mayor a 40 ppb, ningún embrión sobrevivió. Así mismo, recientemente Campos *et al.*, (2015) publicaron un artículo sobre la incidencia de malformaciones en cangrejos de la bahía de Cispatá y dan como posible causante del efecto teratogénico al mercurio, aunque no descartan otras posibles causas como lo plaguicidas organoclorados o hidrocarburos derivados del petróleo de alta densidad.

1.2.4 Determinación de las cantidades aptas para el consumo

Respecto a las concentraciones de mercurio y metilmercurio aptas para el consumo humano existen diferentes criterios establecidos por distintas organizaciones. La Organización Mundial de la Salud (OMS), la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), la Organización de las Naciones Unidas para Agricultura y Alimentación (FAO) y las diferentes legislaciones a nivel mundial suelen ser los marcos de referencia respecto al consumo de metales pesados para este tipo de estudios. De todos estos entes de control, el presente estudio se basará en los límites publicados por la OMS y la FAO que establecen un consumo semanal máximo de 1.6 µg de metilmercurio por cada kilogramo de peso corporal del consumidor.

1.2.5 Panorama Nacional

La legislación colombiana y la Autoridad Nacional de Pesca y Acuicultura, bajo la resolución 744 de 2012, prohibió definitivamente la pesca dirigida a todo tipo de elasmobranquio. Sin embargo, dicha ley se limita a regular el uso de palangres en el territorio nacional y no realiza ningún tipo de control sobre el producto de las faenas de pesca. Aunque el marco legal dice ser estricto en el cumplimiento de sus leyes, durante las diferentes visitas realizadas en el presente estudio, fue posible observar que los pescadores artesanales de todos los lugares de muestreo

emplean esta técnica con bastante frecuencia. Además, teniendo en cuenta que *R. porosus* es un tiburón pequeño que se enreda fácilmente en redes de pesca y trasmallos, técnicas completamente legales, esta especie está totalmente desprotegida por la ley y hace parte de diferentes recetas y platos autóctonos de dichas regiones.

En cuanto al uso y el manejo del mercurio, el gobierno colombiano se ha venido percatando en los últimos años sobre el gran impacto que este metal genera sobre el medio ambiente y las diferentes comunidades expuestas. De esta forma, el 15 de julio de 2013, se expidió la Ley 1658 en la que se prohíbe la ubicación de nuevas minas productoras de oro que empleen mercurio y la técnica de la quema de amalgama de mercurio-oro, en zonas de uso residencial, comercial, institucional o recreativo (Ministerio de Medio Ambiente, 2013).

Sin embargo, la minería ilegal en Colombia sigue generando graves problemas. Se estima que el 86.7% de la minería de oro en Colombia es ilegal, lo cual corresponde a un total de 3584 minas de constatación de vertimiento de los residuos a los cuerpos de agua (Correa, 2016).

1.3 Área de estudio

1.3.1 Características Generales

La región Caribe colombiana está constituida por ocho departamentos y se caracteriza por presentar una gran riqueza de ecosistemas que van desde los paisajes desérticos y bosques húmedos hasta los picos y nevados a más de 5000 msnm. En cuanto a su constitución hídrica, el Caribe colombiano también es muy diverso. Los arrecifes coralinos, las playas y fondos arenosos y las grandes

praderas de pastos marinos son de los ecosistemas más conocidos de la región. Sin embargo, gracias a la influencia y descarga fluvial de sus siete ríos principales (Magdalena, Sinú, Cauca, San Jorge, Atrato, Rancherías y Cesar) esta región cuenta con cuatro estuarios muy importantes formados en el área de Bocas de Ceniza, Canal del Dique y desembocaduras del Sinú y Atrato y enormes lagunas como lo es la Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM) (INVEMAR,2004).

Caracterizado por sus aguas cálidas y poco turbias, el Caribe colombiano cuenta con dos periodos estacionales, una época de lluvias entre los meses de mayo y noviembre y una época seca que se extiende desde diciembre hasta abril. Debido a su relativa estabilidad climática (Guzmán *et al.*, 2001), los cambios en las variables fisicoquímicos están ligados a las lluvias y corrientes marinas, que en el caso del Caribe colombiano son principalmente de dos tipos, superficiales y ascensionales (Jimeno & Gerardo, 1994).

Las corrientes superficiales son la corriente Caribe, que fluye en sentido este-oeste y la contracorriente de Colombia, que como su nombre lo indica, va en dirección contraria. A pesar de estar guiadas por el estado de los vientos de cada época, estas corrientes no suelen coincidir cerca de la costa. Mientras la corriente Caribe tiene un patrón cercano al litoral en la época de verano y de presencia de los vientos Alisios, la contracorriente afecta, las costas de la Guajira principalmente, en épocas de lluvia. Respecto a la corriente ascensional, esta es denominada corriente de surgencia, y tiene un efecto exclusivo entre los departamentos del Atlántico y la Guajira (Tigreros, 2013), aunque la ENAP (2005) reportó su presencia en Bancos de Salmedina, Bolívar. Esta corriente es de suma importancia en el Caribe colombiano debido a que su dinámica es la que activa el aprovechamiento de los nutrientes que se encuentran en aguas profundas. De no producirse el fenómeno de surgencia, estos nutrientes se depositarán en la profundidad donde las condiciones lumínicas no son aptas para el desarrollo de algas y plantas que aprovechen y reincorporen esta materia orgánica al

ecosistema y las redes tróficas que lo componen (Jimeno & Gerardo, s.f).

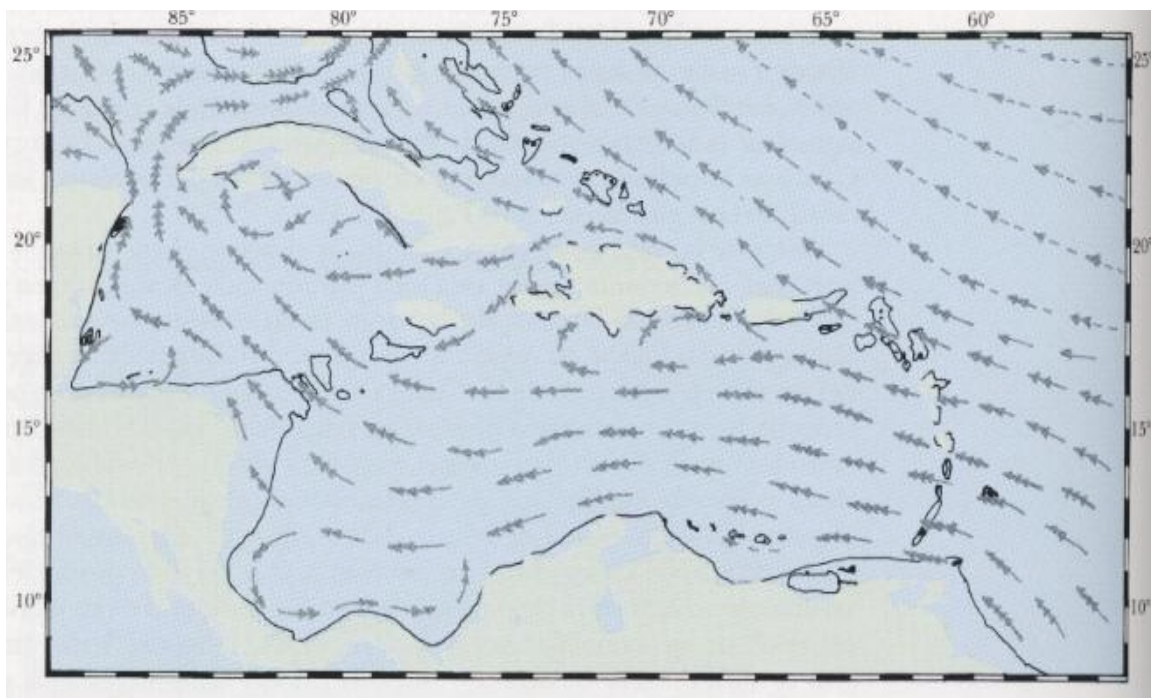


Figura 3. Corrientes superficiales en estación de sequía. Tomado de:
<http://www.banrepcultural.org/blaavirtual/geografia/carcol/oceano.htm>

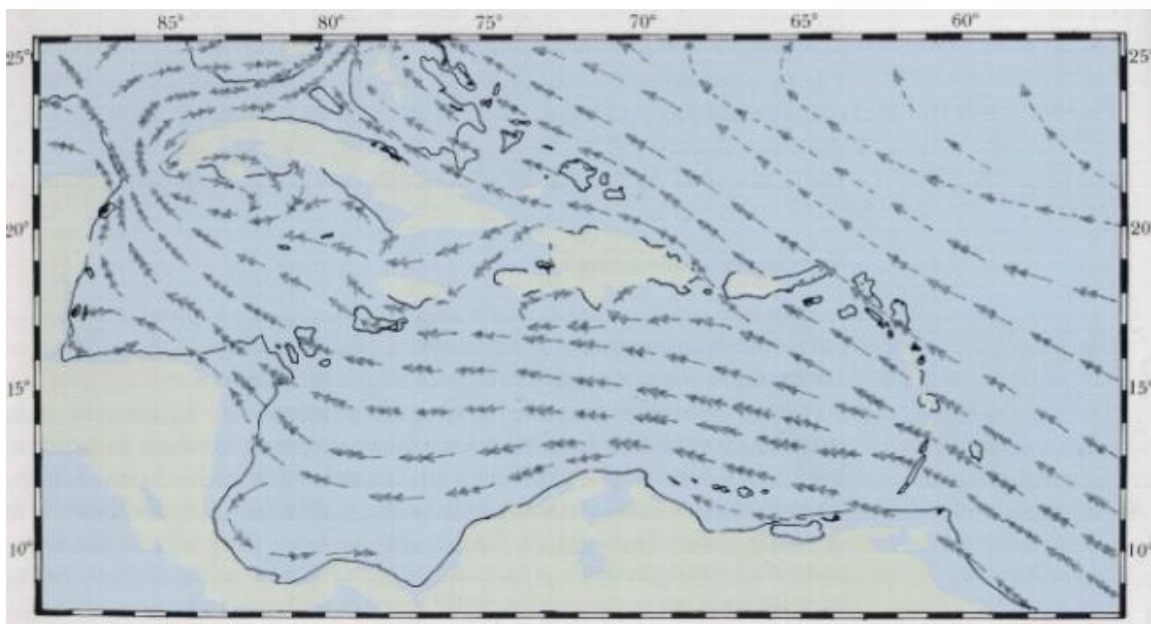


Figura 4. Corrientes último mes de estación de sequía. Tomado de:
<http://www.banrepcultural.org/blaavirtual/geografia/carcol/oceano.htm>

Determinación del rol del tiburón cazón antillano, *Rhizoprionodon porosus* (Carcharhinidae) en el flujo de metilmercurio dentro de las redes tróficas del Caribe colombiano

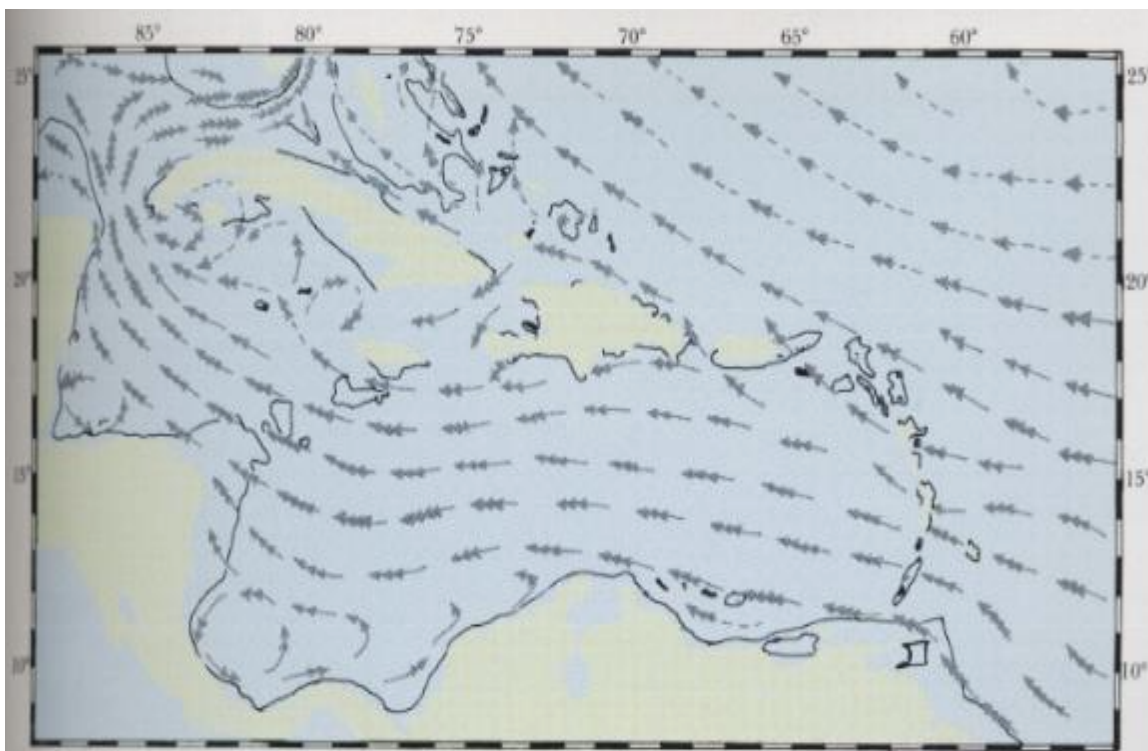


Figura 5. Corrientes superficiales en época de lluvias. Tomado de:
<http://www.banrepcultural.org/blaavirtual/geografia/carcol/oceano.htm>.

Basados en estas características oceanográficas, la región Caribe colombiana puede ser dividida en cuatro subregiones.

Primero se puede delimitar una subregión que se ve afectada por la corriente de surgencia y por consiguiente abarca el área que va desde la Guajira hasta Punta Gloria en Santa Marta. Debido a la gran influencia que significa la descarga del río Magdalena y la CGSM en el mar Caribe, una segunda subregión se ve demarcada desde Punta Gloria hasta Punta Galeras en el departamento de Atlántico. La tercera subregión se origina gracias a la contracorriente de Colombia, cuyas aguas poco fértiles van desde Punta Galeras hasta los límites con Panamá. La última, es la subregión que comprende toda el área insular y oceánica que rodea al archipiélago de San Andrés caracterizada por la ausencia de influencias terrestres y descargas fluviales (Jimeno & Gerardo, s.f).

1.3.2 Mercurio en los sitios de estudio

La costa Caribe colombiana ha sido objeto de diferentes estudios de bioacumulación de mercurio en teleósteos, crustáceos, sedimentos e incluso humanos. Sin embargo, con la excepción de la Ciénaga Grande de Santa Marta y su cercanía al río Magdalena, los sitios de muestreo que se visitaron en el presente estudio siguen siendo una incógnita en términos de acumulación de MeHg en sus ecosistemas marinos.

Isla Fuerte, Bolívar, es una pequeña isla ubicada a tan solo 11 km de la costa continental del departamento de Córdoba, Colombia. En la región no se han llevado a cabo estudios de cuantificación de Hg y MeHg, pero en ciénagas distantes ubicadas más al norte del país y cuerpos de agua dulce éste si ha sido un tema de interés para algunos investigadores. La bahía de Cispatá, ubicada al norte del departamento de Córdoba y cercana al límite con el departamento de Sucre, ha sido estudiada en términos de acumulación y cuantificación de mercurio en repetidas ocasiones y con diferentes especies modelo. Una de ellas es el pelicano común (*Pelecanus occidentalis*), ave marina cuya dieta se basa fundamentalmente en el consumo de peces. Burgos *et al.* (2010) realizaron un estudio mediante el cual determinaron la concentración de mercurio en las plumas y el hígado de 10 ejemplares residentes en la bahía de Cispatá. Sus resultados arrojan altas concentraciones de este metal en ambos tipos de tejido, evidenciando la presencia del contaminante en la región y el ecosistema.

El área de las Flores y Bocas de Ceniza, aún no han sido objeto de estudio de contaminación por mercurio, aunque a 50 km de distancia se encuentra la Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM) en donde ya se ha trabajado en la cuantificación de este metal. Alonso *et al.* (2000), en un trabajo realizado con el fin de determinar

la concentración de este metal en dos especies de peces y sedimentos de la CGSM y la Bahía de Cartagena, encontraron que en la ciénaga los niveles estaban significativamente por debajo a los estipulados como peligrosos por la Organización Mundial de la Salud. La CGSM reflejó un buen estado en términos de contaminación por mercurio, tanto que las muestras de sedimento, obtenidas en diferentes puntos de la ciénaga, mostraron homogeneidad en la presencia del metal. En el caso de los peces, las dos especies estudiadas presentaron una gran variación en los niveles de mercurio en los tejidos, sin embargo, estos fueron niveles muy bajos y no representan ninguna amenaza para un consumidor.

Así mismo, en la Bahía de Cartagena desemboca el Canal del Dique, un brazo artificial del río Magdalena en el que recientemente se han llevado a cabo diferentes estudios de contaminación por mercurio empleando distintas metodologías y resultados similares. Oliveros (1997) realizó un estudio basado en el análisis de tejido de cuatro especies de peces con diferentes tipos de dieta. Por medio de espectrometría de absorción atómica cuantificó las cantidades de mercurio total presente en los individuos colectados y aunque se demostró, como era de esperar, que los animales carnívoros presentaron concentraciones más altas, ninguna de estas sobrepasó los límites establecidos como seguros por la Organización Mundial de la Salud.

Torres & Torres (s.f) determinaron las cantidades tanto de cadmio como de plomo y mercurio en colonias de corales (*Diploria clivosa*). Sus muestras consistieron de tres colonias que fueron obtenidas en los arrecifes costeros de la isla Barú, a 45 min de Cartagena. Los resultados mostraron concentraciones promedio de 0.783 ppm de Hg, 0.810 ppm de Pb y 0.033 ppm de Cd. La presencia del mercurio es relacionada por los autores con las descargas que generan algunas empresas, como lo fue la Álcali de Colombia (Planta de Soda).

Más recientemente en el trabajo de Espitia (2014) se midió, entre otros metales, la

cantidad de mercurio presente en sedimentos superficiales. Sorprendentemente, los niveles de mercurio hallados fueron totalmente normales e inofensivos pese a la gran influencia que significa la conexión con el río Magdalena y las zonas mineras cercanas. En su estudio se observó que el mayor contaminante de la bahía fue la planta de Alcalis en Mamonal.

En el Cabo de la Vela, La Guajira, uno de los puntos de constante aparición del tiburón cazón antillano, aun no se ha registrado ningún estudio que brinde información respecto al estado de contaminación por mercurio. Las playas de Riohacha, La Guajira, ubicadas a 100 km de distancia del Cabo, sí han sido un punto de muestreo de estudios de concentración de mercurio, en organismos pertenecientes a niveles basales de las redes tróficas. Valdelamar *et al.* (2014) realizaron un trabajo en el que determinaron y compararon las concentraciones de mercurio en tres playas del Caribe colombiano, empleando como modelo de estudio una especie de bivalvo (*Donax denticulatus*) que es frecuentemente consumida por los seres humanos. Recolectaron muestras en Riohacha, Cartagena y las playas de Berruga (departamento de Sucre). En este estudio, aunque según sus resultados el consumo de los moluscos en las tres regiones no representa ninguna amenaza para la salud, hay que tener en cuenta que se trata de un nivel trófico basal. Además de los tres sitios de muestreo, Riohacha, la Guajira, presentó las concentraciones más altas de mercurio.

Según estos estudios, la región Caribe colombiana pareciera no estar contaminada gravemente por mercurio, sin embargo, en algunos lugares se ha evidenciado la presencia de este metal por lo que esta región debe ser objeto de constante monitoreo. Cuando se habla de contaminación, de todo tipo, en el Caribe es fundamental estudiar y analizar la situación que presente el departamento del Atlántico, esto debido a que allí se encuentra la desembocadura del río Magdalena, uno de los cuerpos de agua más extensos del país y por ende relacionado a una gran cantidad de actividades antrópicas (Cedeño *et al.*, 2001).

Hay que recalcar que, en Las Flores, el tránsito de buques y lanchas es permanente lo cual hace de este punto una localidad de obligatoria supervisión.

2. Materiales y métodos

2.1 Identificación de la especie

Si bien es cierto que, por su tamaño, forma y aspecto, el género *Rhizoprionodon* es un grupo relativamente fácil de reconocer entre los demás elasmobranquios, las especies que constituyen este género son físicamente muy parecidas a tal punto que pueden llegar a generar confusión a la hora de su identificación. Para la identificación de los ejemplares de *R. porosus* este estudio se basó en las características físicas de la guía taxonómica “Peces: Gran Caribe. Una Guía para Peces Costeros del Caribe y cercanías” elaborada por Robertson *et al.* (2012).

Las características que la identifican son las siguientes:

En primer lugar, el género *Rhizoprionodon* se caracteriza por su tamaño pequeño, que rara vez sobrepasa los 110 cm de longitud y color pardo y grisáceo. Las especies que conforman este género presentan un hocico alargado con surcos labiales bien pronunciados y particularmente prolongados, la longitud de estos pliegues suele ser igual al diámetro del ojo del ejemplar (Fig. 9). Poseen cinco aperturas branquiales, las últimas dos se encuentran ubicadas sobre la aleta pectoral. Así mismo, estos tiburones tienen membrana ocular nictitante. A diferencia de otras especies del género, estos animales no poseen manchas blancas en el lomo, tienen los dientes muy oblicuos y finamente aserrados. El origen de la primera aleta dorsal se encuentra sobre el margen pectoral y la aleta pectoral deprimida alcanza el centro de la base de la primera aleta dorsal.

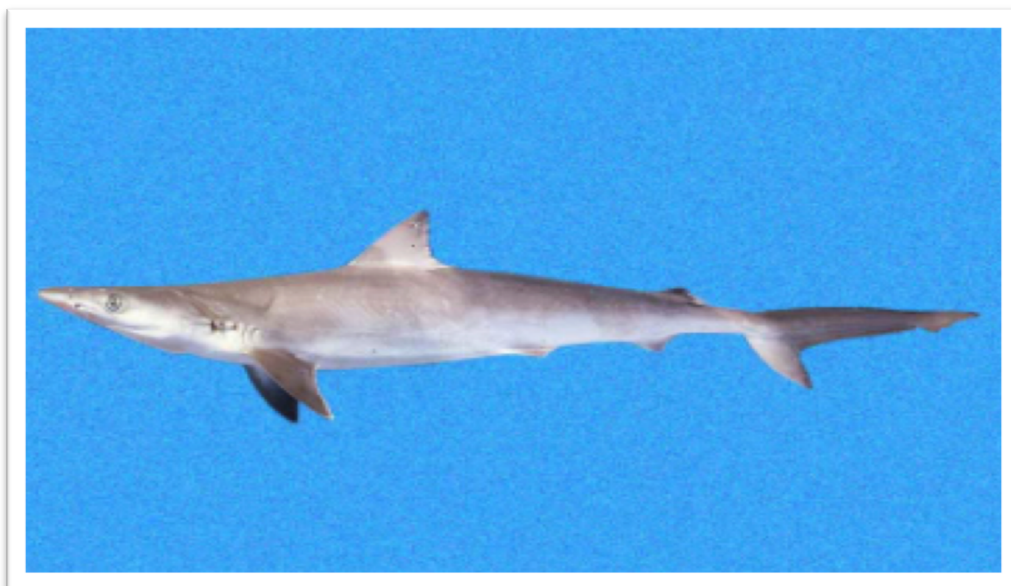


Figura 6. *Rhizoprionodon porosus*. Robertson et. al 2012

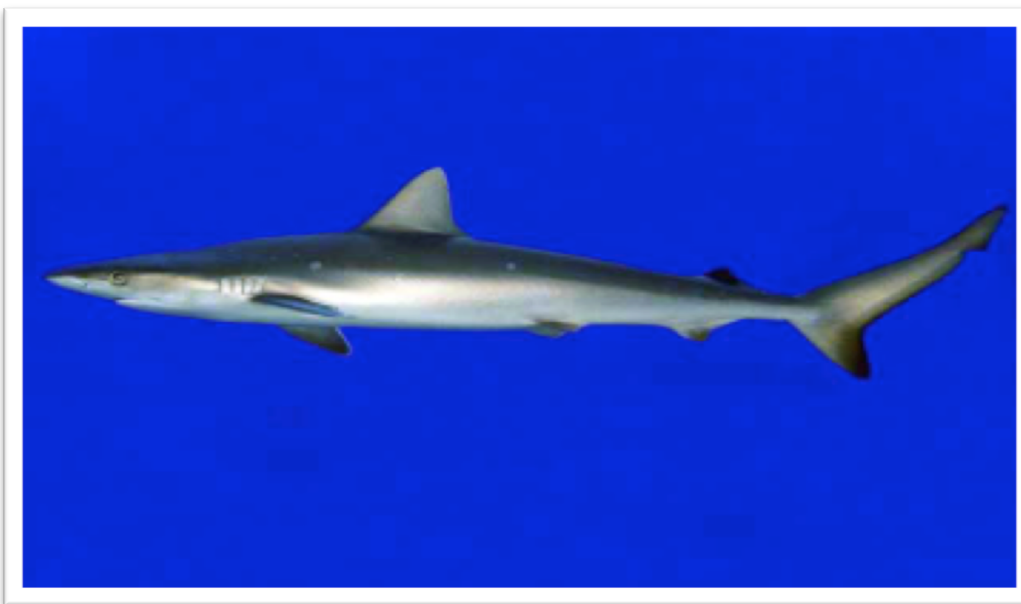


Figura 7. *Rhizoprionodon terranova* Robertson et. al 2012

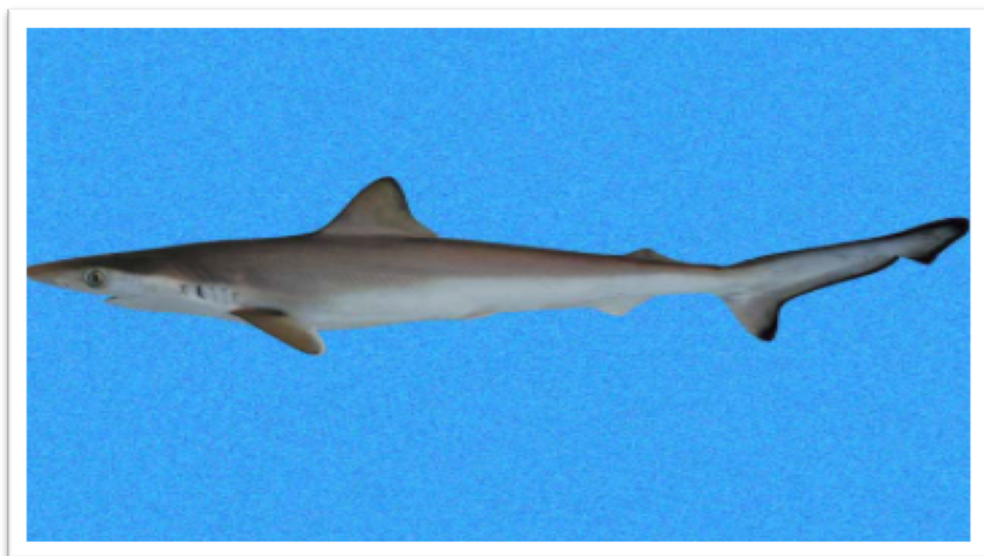


Figura 8. *Rhizoprionodon lalandii* Robertson et. al 2012

Adicionalmente, se tuvo en cuenta la descripción realizada por Cantú (s.f). en la guía “Tiburones de Sur América del Océano Atlántico” (Fig. 9).

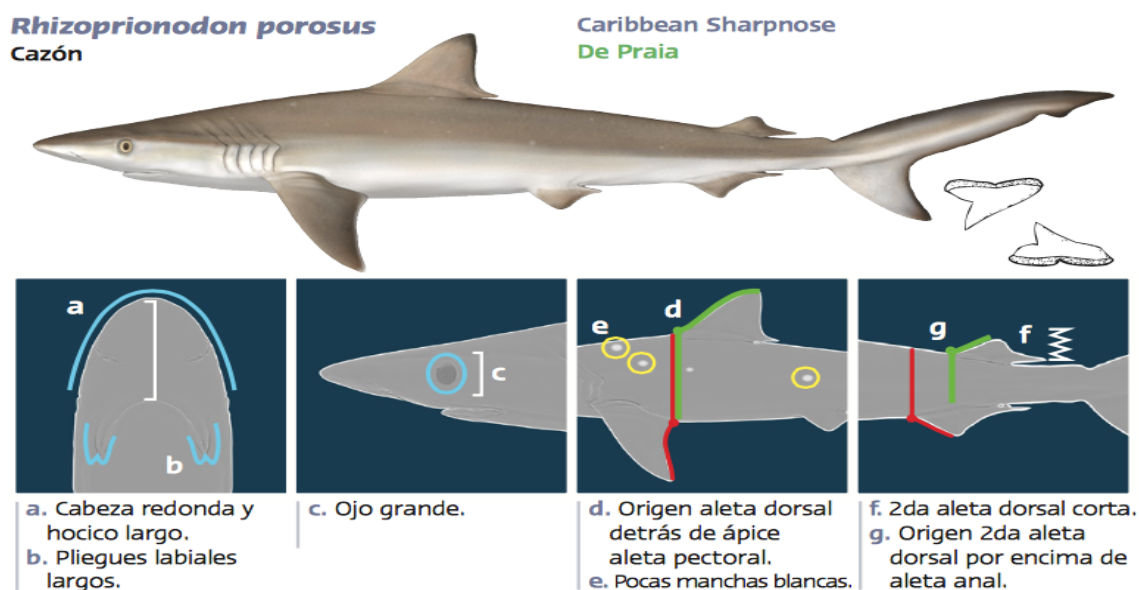


Figura 9. Descripción *R. porosus* según guía “Tiburones de Sur América del Océano Atlántico. Tomado de:

https://cites.org/sites/default/files/sharks_id_material/1.7c%20Guia%20SAatlantico_0.pdf

2.2 Sitios de estudio

Para la realización de este trabajo se establecieron tres sitios de muestreo ubicados a lo largo de la costa Caribe colombiana. El primer punto de colecta fue Isla Fuerte, una pequeña isla cuya área es de tan solo 3.25 km², perteneciente al departamento de Bolívar, aunque se encuentra situada a tan solo 11 km de Paso Nuevo, Córdoba, y 30 km de la desembocadura del río Sinú.

En términos biológicos, la isla se caracteriza por su temperatura promedio de 27°C y por albergar diferentes tipos de ecosistemas marinos, siendo las zonas estuarinas y los arrecifes de coral los más atractivos para el denominado “turismo ecológico”. A pesar de no ser una isla de gran reconocimiento a nivel nacional, todas sus playas están copadas de pequeños hoteles o cabañas dispuestas para albergar una considerable cantidad de visitantes. Sin embargo, debido a la efímera actividad turística que hay durante el año, el sustento de la gran mayoría de los isleños proviene de la pesca artesanal, que en muchos casos es totalmente indiscriminada.

Sus características pluviométricas indican una precipitación anual de 1300 mm aproximadamente; se caracteriza por presentar un periodo de aguas bajas cuya precipitación mensual es menor a los 50 mm. La época seca de la isla se presenta desde el mes de enero hasta julio mientras que los días lluviosos se extienden desde el mes de agosto hasta finales de diciembre. Es en el periodo de abril-noviembre cuando los vientos se tornan con dirección sur norte y por ende es el periodo cuando se presentan los días con mayor influencia de la pluma proveniente del río Sinú (Ladino, 2014).

Para la obtención de las muestras se monitorearon los arribos a puerto de más de 30 lanchas diarias que hicieron recorridos diurnos entre 9 y 18 km de distancia desde la costa. Allí, los cazones obtenidos fueron capturados con cordel.

Aproximadamente 150 km más al norte se encuentra la desembocadura del principal y más importante cuerpo fluvial de Colombia, el río Magdalena, y es justo allí donde se ubica la comunidad pesquera de Las Flores, Atlántico, que representa el segundo punto de estudio establecido en este trabajo. Tratándose de la desembocadura de un río cuyo cauce se extiende a lo largo de 12 departamentos, el resultado de la pesca en Las Flores y Bocas de Ceniza fue de suma importancia para esta investigación. Allí la temperatura del agua tiene un promedio anual de 28.2°C (Caiafa *et al.*, 2011). El bajo Magdalena, como es denominado este sector del río, presenta caudales bajos durante el periodo comprendido entre enero y marzo, caudales altos de octubre a diciembre y caudales medios durante el resto del año. Su caudal promedio es de 7100 m³ s⁻¹ arrastrando 200 millones de toneladas de sedimentos limos y arcillosos anualmente. Esta descarga lo convierte en el octavo río con mayor arrastre de sedimento a nivel mundial (Restrepo, 2005).

El tercer y último punto de muestreo fue el Cabo de la Vela en La Guajira, un sitio mucho más reconocido por los turistas, pero con un menor número de habitantes que en los casos anteriores. El aislamiento social y la lejanía respecto a los centros urbanos hacen de éste un punto de muestreo bastante particular, pues el pueblo más cercano, Uríbia, se encuentra a 60 km de distancia del Cabo de la Vela y la ciudad más próxima es Riohacha, a unos 100 km. La población del Cabo, indígenas en su mayoría, también practican la pesca artesanal de forma intensiva para sustentar la dieta de sus hogares. La langosta espinosa, el atún, la sierra y el pargo son los animales más capturados, pero, no discriminan, comercializando productos provenientes de diferentes tipos de animales como las tortugas, las rayas y los tiburones (Álvarez, 1995).

En La Guajira, las faenas de pesca se realizaron durante la noche y la madrugada a no más de 18 km de la costa. Las playas del Cabo se caracterizan por sus arenas claras y gruesas y la presencia de una variedad de algas calcáreas. Además, a pesar de las altas temperaturas que se registran en el Cabo de la Vela, sus aguas son relativamente frías y con salinidades superficiales altas, esto se hace más evidente durante el periodo de surgencia. Los trasmallos fueron ubicados en diferentes puntos de la costa del Cabo, el parque eólico Jepírachi y Puerto Bolívar, en donde, según la Organización Colparques, la precipitación anual oscila entre 140 mm y 394 mm y la temperatura del aire por lo general ronda los 28°C llegando en algunas ocasiones a 39°C Al igual que en Isla Fuerte, los viajes se realizaron en pequeñas lanchas de fibra de vidrio y motores fuera de borda.



Figura 10. Mapa indicando la ubicación geográfica de los puntos de muestreo, tomado de Google Earth 7.1.5.1557.

2.3 Obtención de muestras

Se realizaron tres visitas a cada uno de los sitios de estudio en tres épocas diferentes del año. La primera visita se llevó a cabo durante el mes de noviembre de 2015 (época de lluvias). En abril de 2016 (época de sequía) se realizó una segunda colecta, y finalmente en agosto del mismo año (transición). Se extrajo una porción de aproximadamente 100 g del tejido muscular ubicado frente al origen de la aleta dorsal de los ejemplares y la totalidad del contenido estomacal. Para cada periodo de muestreo se recolectaron 10 muestras por sitio de estudio, cinco correspondientes al tejido de tiburón y cinco a su contenido estomacal.

De esta forma, el trabajo realizado está basado en el análisis de un total de 48 individuos con sus respectivos contenidos estomacales.

2.4 Tratamiento de las muestras

Una vez los animales se encontraban en el puerto, se registró el peso, la talla y el sexo de cada individuo. Utilizando un cuchillo cerámico y guantes de nitrilo se extrajo una porción de 100 g de tejido muscular de cada tiburón y empleando bolsas marcadas y herméticamente selladas, las muestras se almacenaron individualmente en un cuarto frío a una temperatura de -20°C. Así mismo, en bolsas herméticas y separadas se depositó el resultado de la disección del contenido estomacal de cada individuo, teniendo en cuenta su procedencia, e igualmente fueron sometidas a una temperatura de -20°C hasta finalizar el periodo de muestreo. Posteriormente, neveras de poliestireno y con hielo fueron transportadas hasta el Laboratorio de Toxicología y Gestión Ambiental de la

Universidad de Córdoba en donde las muestras fueron liofilizadas para poder realizar la cuantificación de MeHg.

2.5 Determinación de MeHg

Una vez realizada la liofilización de las muestras, estas se maceraron en un mortero de porcelana. El contenido estomacal de cada individuo también fue liofilizado y posteriormente macerado y homogenizado. De esta forma cada uno de los ejemplares de *R. porosus* generó una muestra de tejido y su respectivo homogenizado estomacal.

Para preparar cada muestra fue necesario realizar una extracción líquido-líquido empleando HBr, Tolueno y L-Cisteína. La cuantificación de las concentraciones de MeHg se hizo por medio de un analizador directo de mercurio DMA-80 marca MILESTONE, siguiendo las recomendaciones del método 7473 de la EPA y validado para determinación de mercurio total y MeHg. El principio fundamental de esta técnica es la descomposición térmica, amalgamación y espectroscopia de absorción atómica.

La exactitud se evaluó como porcentaje de recuperación (%R), este se determinó adicionándole a muestras de peces solución estándar, con concentraciones conocidas, se sometieron al proceso de extracción y medición. Los resultados mostraron que el %R de este procedimiento estuvo entre 93.91-95.62%. Así mismo, la precisión evaluada como repetitividad y reproducibilidad (coeficiente de variación - %CV) de las muestras analizadas estuvo entre 1.94-3.68 y 1.92-4.07%, respectivamente.

2.6 Análisis estadísticos

Con el fin de cumplir todos los objetivos planteados en el presente estudio, las pruebas estadísticas que se ajustaron a este modelo fueron muy variadas y se realizaron empleando la versión 0.99.903 del software RStudio para la plataforma Mac OS X Yosemite y SPSS Statistics for Mac OS X Yosemite. Inicialmente, para evaluar la normalidad de los datos se realizó la prueba de Shapiro-Wilk obteniendo un resultado negativo que evidenció la existencia de anormalidad en todos los grupos establecidos, sexo, épocas y sitios de muestreo. Así mismo, para determinar heterocedasticidad en los datos se realizaron pruebas de Bartlett y Levene cuyos resultados afirman que las mediciones realizadas durante este estudio no presentaron homogeneidad de varianzas. Debido al incumplimiento de estos dos supuestos básicos para la realización de pruebas paramétricas se procedió a realizar análisis no paramétrico, como el test de Mann-Whitney, Kruskal-Wallis y Correlaciones de Spearman principalmente.

3. Resultados

Se analizó un total de 45 individuos, correspondientes a 31 hembras y 14 machos.

Tabla 1. Concentraciones, sexo ,talla y peso del total de los individuos muestreados.

Época	Sitio	Sexo	Talla (cm)	Peso (g)	[MeHg] (µg/kg) en <i>R. porosus</i>	[MeHg] (µg/kg) en contenido estomacal
Lluviosa	Cabo de la Vela	Macho	56	860	202,14	45,35
Lluviosa	Cabo de la Vela	Hembra	49	360	200,23	26,67
Lluviosa	Cabo de la Vela	Hembra	57	752	275,61	190,32
Lluviosa	Cabo de la Vela	Hembra	50	625	233,15	109,96
Lluviosa	Cabo de la Vela	Hembra	50	545	174,37	106,84
Lluviosa	Isla Fuerte	Hembra	70	1500	1548,56	100,76
Lluviosa	Isla Fuerte	Hembra	80	1700	1484,32	92,87
Lluviosa	Isla Fuerte	Hembra	80	2100	1483,09	80,9
Lluviosa	Isla Fuerte	Macho	52	550	1651,14	85,23
Lluviosa	Isla Fuerte	Hembra	49	600	1272,54	155,16
Lluviosa	Las Flores	Hembra	73	2400	2809,88	42,13
Lluviosa	Las Flores	Macho	72	1660	1016,98	154,29
Lluviosa	Las Flores	Hembra	74	2000	1818,59	123,79
Lluviosa	Las Flores	Macho	67	1330	1272,54	155,16
Lluviosa	Las Flores	Hembra	79	2355	1982,12	243,77
Seca	Cabo de la Vela	Hembra	72	1200	967,98	897,58
Seca	Cabo de la Vela	Hembra	58	820	918,7	49,57
Seca	Cabo de la Vela	Hembra	56	700	603,65	44,67
Seca	Cabo de la Vela	Hembra	52	540	615,67	98,85
Seca	Cabo de la Vela	Hembra	50	480	630,89	59,12
Seca	Isla Fuerte	Hembra	80	1600	1471,99	97,94
Seca	Isla Fuerte	Hembra	83	1800	525,39	93,74
Seca	Isla Fuerte	Hembra	74	1400	1516,63	38,64
Seca	Isla Fuerte	Hembra	69	1400	3268,99	143,58
Seca	Isla Fuerte	Macho	50	900	1787,87	60,26
Seca	Las Flores	Macho	75	2100	2669,54	615,61
Seca	Las Flores	Macho	78	1850	1654,4	118,77
Seca	Las Flores	Macho	83	2350	950,77	284,96
Seca	Las Flores	Macho	80	2200	1102,52	941,65
Seca	Las Flores	Macho	83	2600	1807,53	81,93
Transición	Cabo de la Vela	Hembra	52	475	589,8	97,82
Transición	Cabo de la Vela	Macho	51	470	189,93	126,67
Transición	Cabo de la Vela	Hembra	55	515	138,67	146,89
Transición	Cabo de la Vela	Hembra	58	730	499,89	58,23
Transición	Cabo de la Vela	Hembra	55	585	128,13	106,18
Transición	Isla Fuerte	Hembra	74	1350	1403,08	127,45
Transición	Isla Fuerte	Hembra	84	2400	550,51	256,47
Transición	Isla Fuerte	Macho	73	1300	709,56	75,32
Transición	Isla Fuerte	Macho	52	550	795,56	127,08
Transición	Isla Fuerte	Hembra	49	600	782,06	66,73
Transición	Las Flores	Macho	76	1700	194,97	86,38
Transición	Las Flores	Hembra	72	1200	150,86	56,43
Transición	Las Flores	Hembra	58	800	198,95	96,07
Transición	Las Flores	Hembra	56	700	124,27	34,21
Transición	Las Flores	Hembra	52	540	144,08	21,23

3.1 Contenidos de MeHg

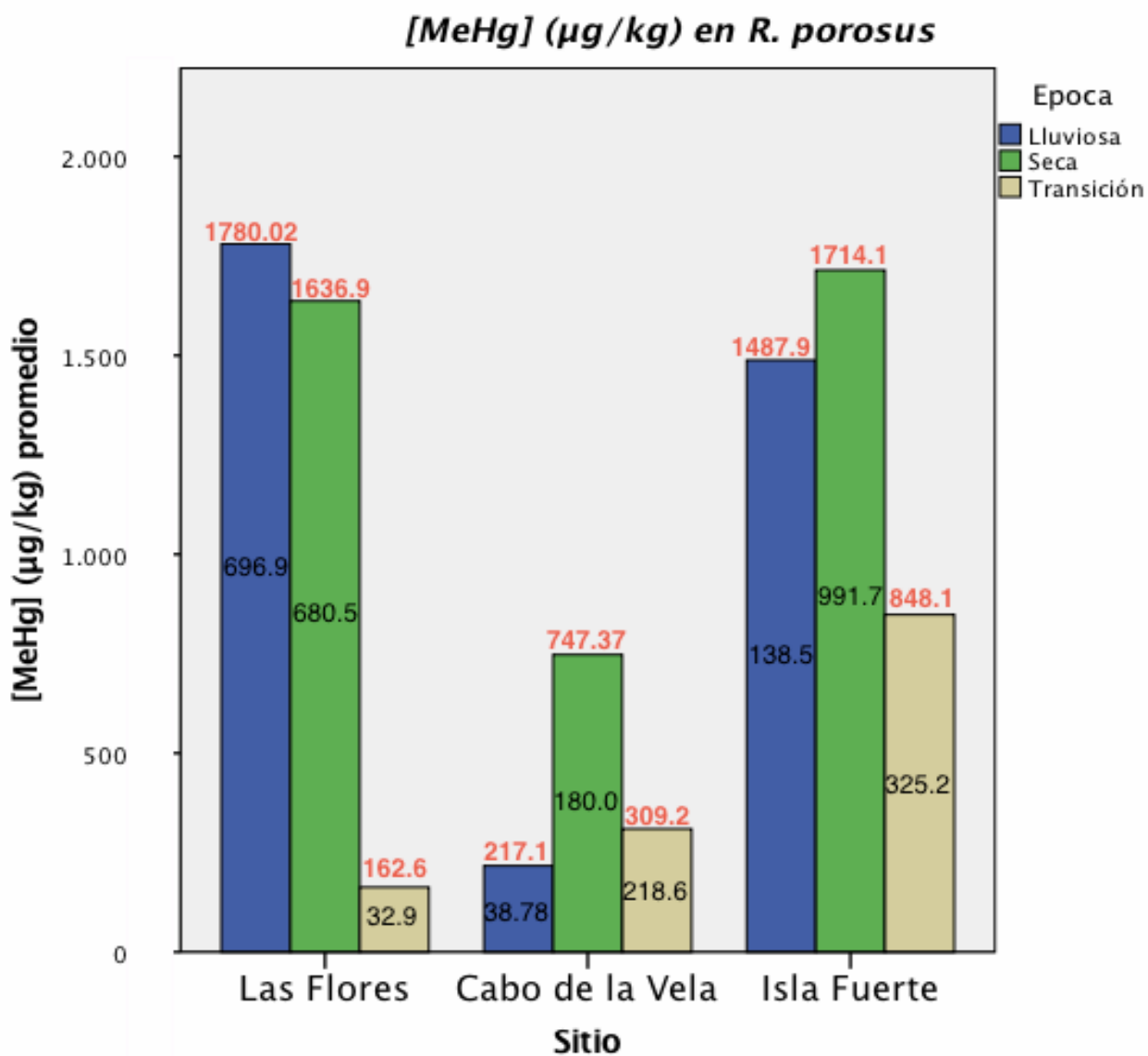


Figura 11. Concentraciones promedio de metilmercurio en tejido de *R. porosus* según época y sitios de muestreo. Los números en rojo representan los valores promedio y los valores al interior de las barras corresponden a las desviaciones estándar.

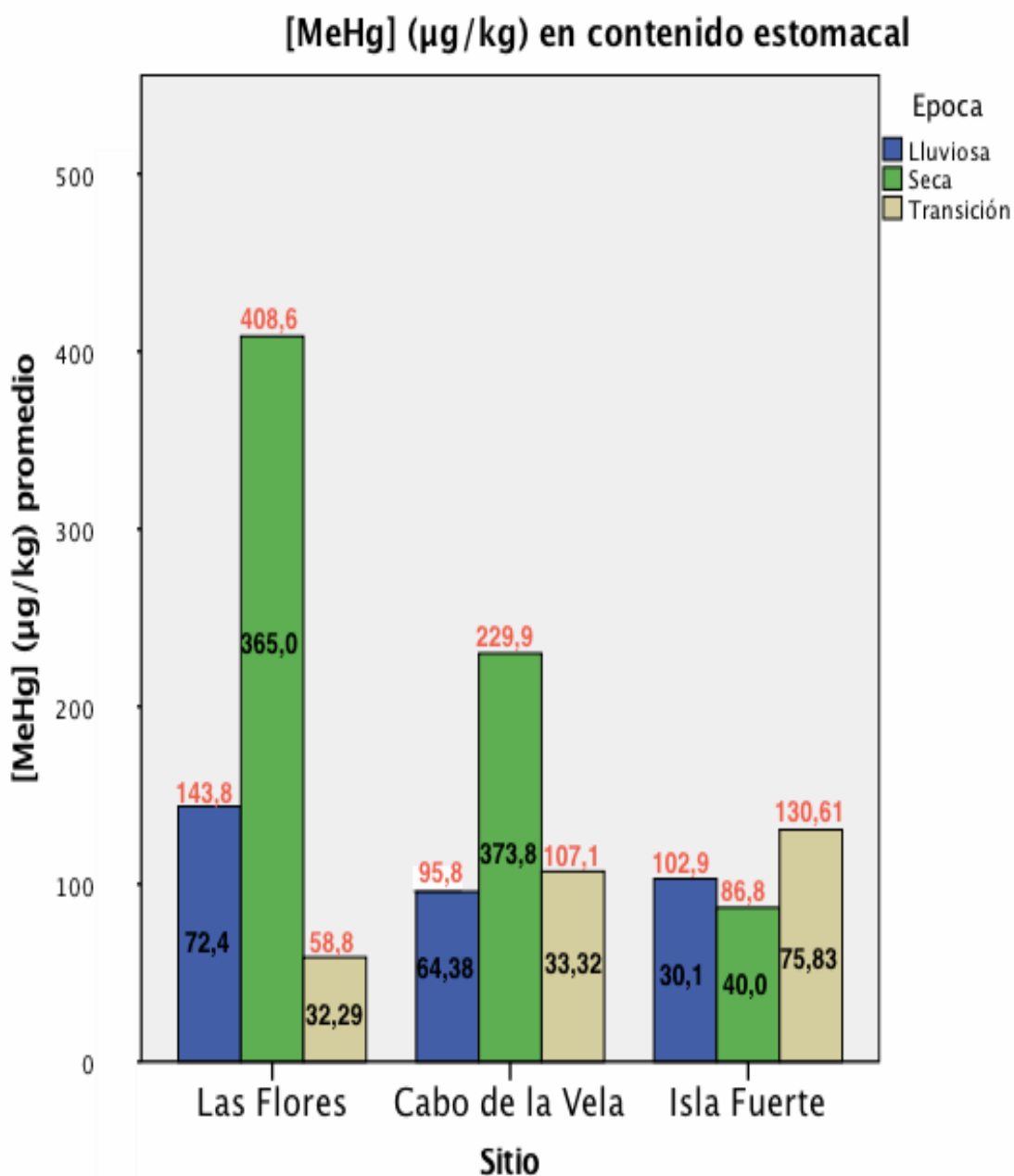


Figura 12. Concentraciones promedio de metilmercurio en presas de *R. porosus* según época y sitios de muestreo. Los número en rojo representan los valores promedio y los valores al interior de las barras corresponden a las desviaciones estándar. NOTA: Es importante denotar que, debido a los valores obtenidos, la escala del eje Y es distinta para las figuras 4 y 5.

3.2 KRUSKAL-WALLIS

Mediante la prueba de Kruskal-Wallis fue posible comprobar que existen diferencias significativas en el peso, la talla, las concentraciones de MeHg y el FB de los tiburones presentes en los diferentes lugares de muestreo. Así mismo, se pudo evidenciar que la época también es un factor determinante, pues la concentración de MeHg en *R. porosus* y el FB fueron dos variables que presentaron diferencias significativas a lo largo del año de muestreo.

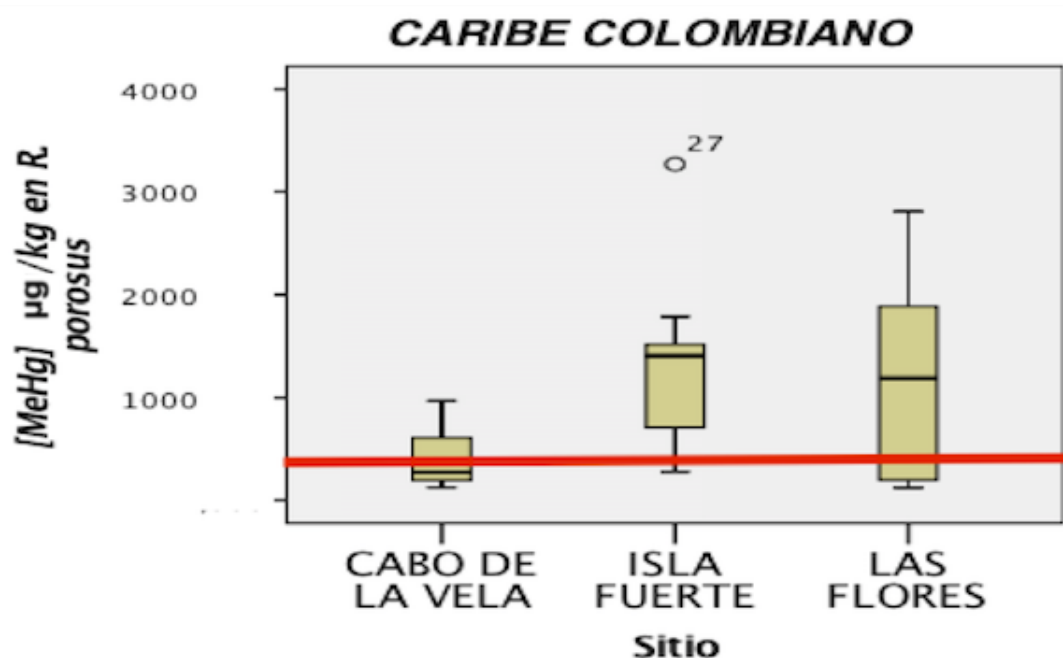


Figura 13. Contenidos de MeHg en $\mu\text{g/kg}$ en peso húmedo en *R. porosus* según lugar de muestreo. Línea roja indicando la concentración máxima recomendada por la OMS y la FAO para el consumo de alimentos. Círculo correspondiente a un individuo con concentraciones anormales respecto a su lugar de muestreo.

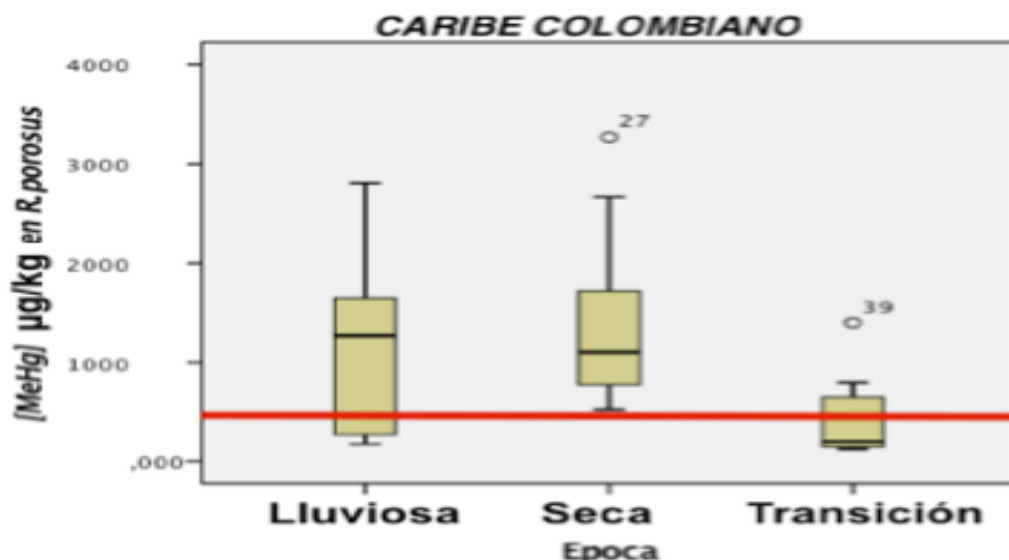


Figura 14. Contenidos de MeHg en µg /kg en peso húmedo en *R. porosus* según época de muestreo. Línea roja indicando la concentración máxima recomendada por la OMS y la FAO para el consumo de alimentos. Círculos correspondientes a individuos con concentraciones anormales respecto a su época de muestreo.

Por otro lado, los niveles máximos admitidos por la OMS en alimentos son de 0.5 µg /g. Se recomienda una ingesta máxima semanal de 1.6 µg por cada kg de peso corporal. Para el análisis de riesgo al consumidor y basado en la observación realizada en fase de campo, en el presente estudio se estableció un supuesto que indica que una persona, con un peso promedio de 70 kg consume aproximadamente 1000 g de este tipo de tejido al mes. Teniendo en cuenta este análisis, es posible observar que los valores promedios tanto de hembras como machos, exceden los valores establecidos como seguros por la OMS y FAO correspondientes a un consumo mensual de 448 µg para una persona con este peso corporal (Tab. 1).

Como se puede observar en las figuras 13 y 14, basado en el total de los datos, los valores más bajos en las concentraciones de metilmercurio en tejido de tiburón se presentaron durante el periodo de transición (julio-agosto), mientras que los

Determinación del rol del tiburón cazón antillano, *Rhizoprionodon porosus* (Carcharhinidae) en el flujo de metilmercurio dentro de las redes tróficas del Caribe colombiano

más altos se midieron en la época de sequía. En cuanto a la relación con los sitios, la prueba de Kruskal-Wallis mostró las mayores concentraciones de MeHg en los tiburones de Isla Fuerte, seguidos por la localidad de Las Flores y los menores en el Cabo de la Vela, en La Guajira.

Sin embargo, estos resultados arrojan conclusiones muy amplias, por lo que es importante realizar un análisis más profundo y detallado que permita comparar este modelo general con el comportamiento de todas estas variables en cada sitio y sus respectivas épocas.

Tabla 2. Porcentaje de muestras que exceden los límites de la OMS y FAO en cada sitio de estudio.

	n	n con [MeHg]>448 µg /kg	% muestras [MeHg] >448 µg /kg
Cabo de la Vela	15	7	47%
Las Flores	15	11	73%
Isla Fuerte	15	15	100%
Caribe Colombiano	45	33	73%

3.2.1 [MeHg] en *R. porosus*:

Tabla 3. Promedios, medianas y valores de significancia asintótica de las [MeHg] µg /kg en peso húmedo en *R. porosus* según prueba de Kruskal-Wallis.

	LLUVIAS		TRANSICIÓN		SEQUÍA		SIG.
	MEDIA	MEDIANA	MEDIA	MEDIANA	MEDIA	MEDIANA	
Cabo de La Vela	217.1	202.14	309.3	189.9	747.4	630.9	0.009
Las Flores	1809.9	1888.9	162.6	150.9	1637.0	1654.4	0.006
Isla Fuerte	1115.8	1483.1	848.2	782.1	1714.2	1516.3	0.215
Caribe Colombiano	1111.5	1272.5	440.0	199.0	1366.2	1102.5	0.001

Las concentraciones de MeHg en el tejido de los tiburones en las diferentes locaciones variaron entre los períodos de muestreo; las pruebas realizadas revelaron diferencias significativas durante el año en el sitio de Las Flores y el Cabo de la Vela. Por su parte, en Isla Fuerte no se evidenció ninguna diferencia que pueda atribuirse a la época en la que fueron capturados los animales. Los valores promedio del Cabo de la Vela fueron los más bajos, sin embargo, en la época seca se elevó el contenido de una manera drástica de tal manera que el 100% de muestras de esa época en el Cabo de la Vela presentó valores críticos, en el sentido que superan los valores límites recomendados por la FAO y la OMS (Tab. 1). En Las Flores se presentó el cambio más sobresaliente y se dio en el periodo de transición, durante el cual ninguna muestra sobrepasó los niveles permisibles y la disminución en las concentraciones promedio llegó a ser más de diez veces menor en comparación a el resto del año. En Isla Fuerte, como lo indican los valores de significancia, a pesar de apreciarse una disminución en la época de transición, el MeHg excedió notablemente los niveles establecidos como seguros por la FAO y la OMS durante todo el año, con un 100% de las muestras en un estado altamente tóxico.

Determinación del rol del tiburón cazón antillano, *Rhizoprionodon porosus* (Carcharhinidae) en el flujo de metilmercurio dentro de las redes tróficas del Caribe colombiano

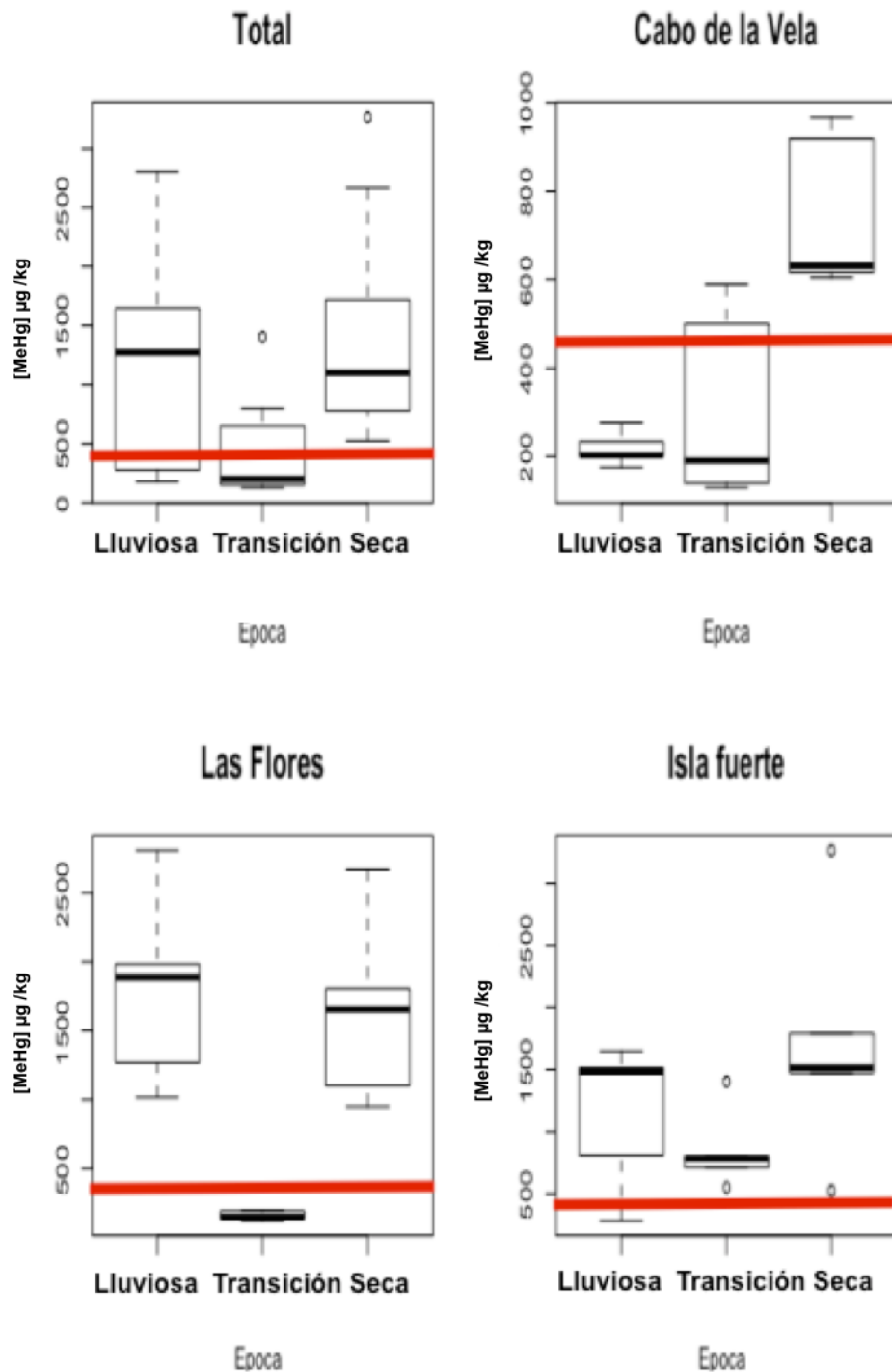


Figura 15. MeHg $\mu\text{g/kg}$ en peso húmedo en *R. porosus* según la época en cada uno de los sitios de estudio.

3.2.2 [MeHg] en contenidos estomacales de *R. porosus*:

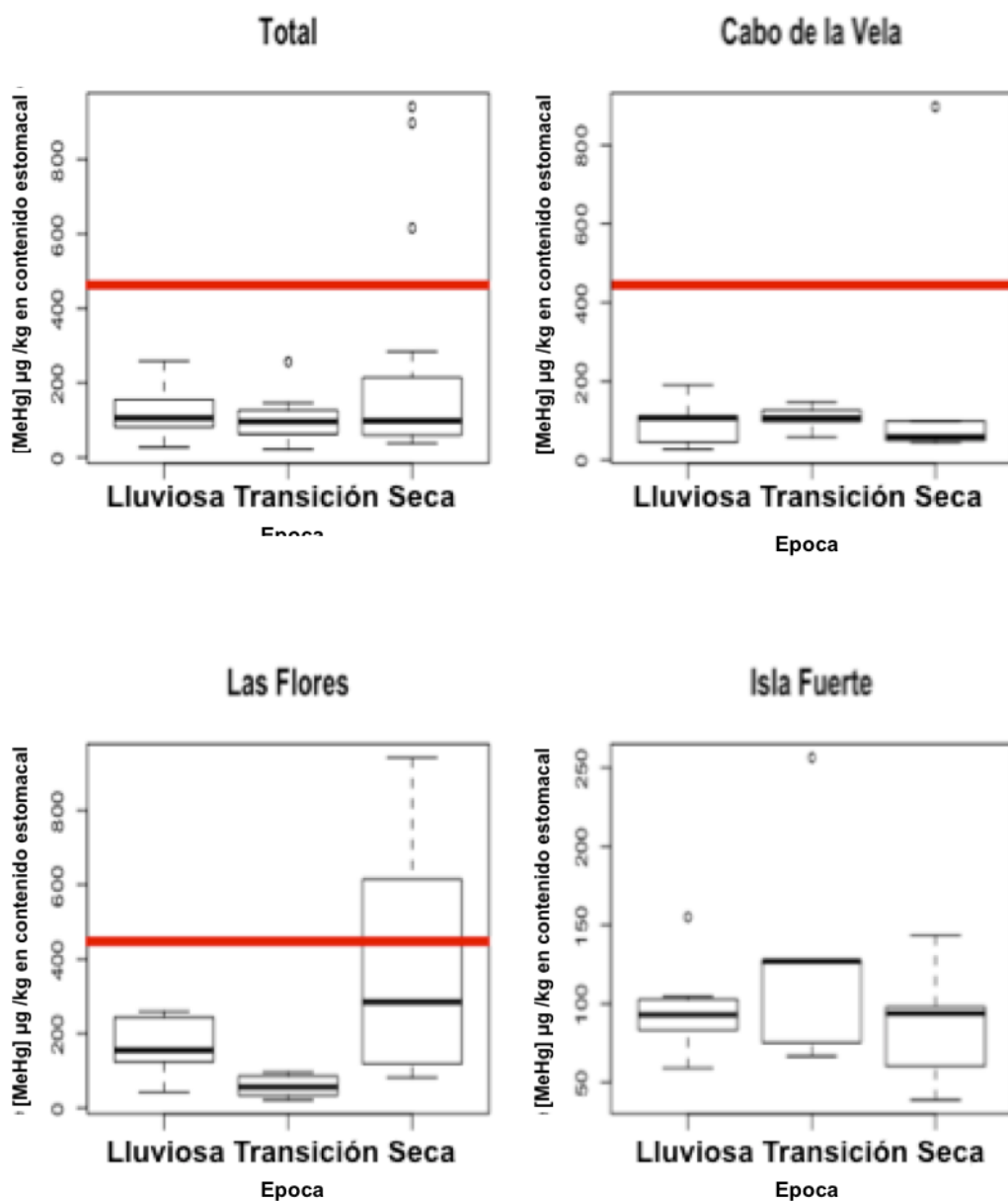


Figura 16. [MeHg] $\mu\text{g/kg}$ en peso húmedo en contenido estomacal de *R. porosus* según la época en cada uno de los sitios de estudio. Línea roja indicando la concentración máxima recomendada por la OMS y la FAO para el consumo de alimentos. Nota: En Isla Fuerte todos los valores se encuentran por debajo de los límites establecidos por la OMS y la FAO.

Determinación del rol del tiburón cazón antillano, *Rhizoprionodon porosus* (Carcharhinidae) en el flujo de metilmercurio dentro de las redes tróficas del Caribe colombiano

En general, el MeHg medido en los contenidos estomacales fue bajo (Tab. 4, Fig. 16) siendo muy pocos los casos en los que las concentraciones excedieron los valores de la FAO y la OMS. Dichos casos se presentaron en época de sequía en Las Flores, lugar donde además el nivel de significancia aprueba la hipótesis alterna que establece diferencias significativas entre las épocas en cuanto a los valores de [MeHg] en contenidos estomacales.

Tabla 4. Valores promedios, medianas y valores de significancia asintótica de las [MeHg] µg /kg en peso húmedo en contenido estomacal de *R. porosus* según prueba de Kruskal-Wallis.

	LLUVIAS		TRANSICIÓN		SEQUÍA		SIG.
	MEDIA	MEDIANA	MEDIA	MEDIANA	MEDIA	MEDIANA	
Cabo de La Vela	95.3	106.84	107.2	106.18	229.0	59.12	0.733
Las Flores	163.1	154.7	58.9	56.84	408.6	284.9	0.031
Isla Fuerte	96.9	92.8	130.6	127.1	86.8	93.7	0.64
C.C	118.7	105.7	98.9	96.1	241.8	97.9	0.651

3.2.3 Factor de Biomagnificación (FB):

Tabla 5. Promedios, medianas y valores de significancia asintótica de los factores de biomagnificación según prueba de Kruskal-Wallis.

	LLUVIAS		TRANSICIÓN		SECA		SIG.
	MEDIA	MEDIANA	MEDIA	MEDIANA	MEDIA	MEDIANA	
Cabo de La Vela	3.43	2.12	6.37	6.01	10.0	10.67	0.379
Las Flores	53.04	66.35	3.48	2.7	11.1	11.7	0.006
Isla Fuerte	12.9	15.4	8.22	10.01	29.8	29.7	0.124
Caribe colombiano	23.4	11.45	6.02	6.01	17.0	13.51	0.045

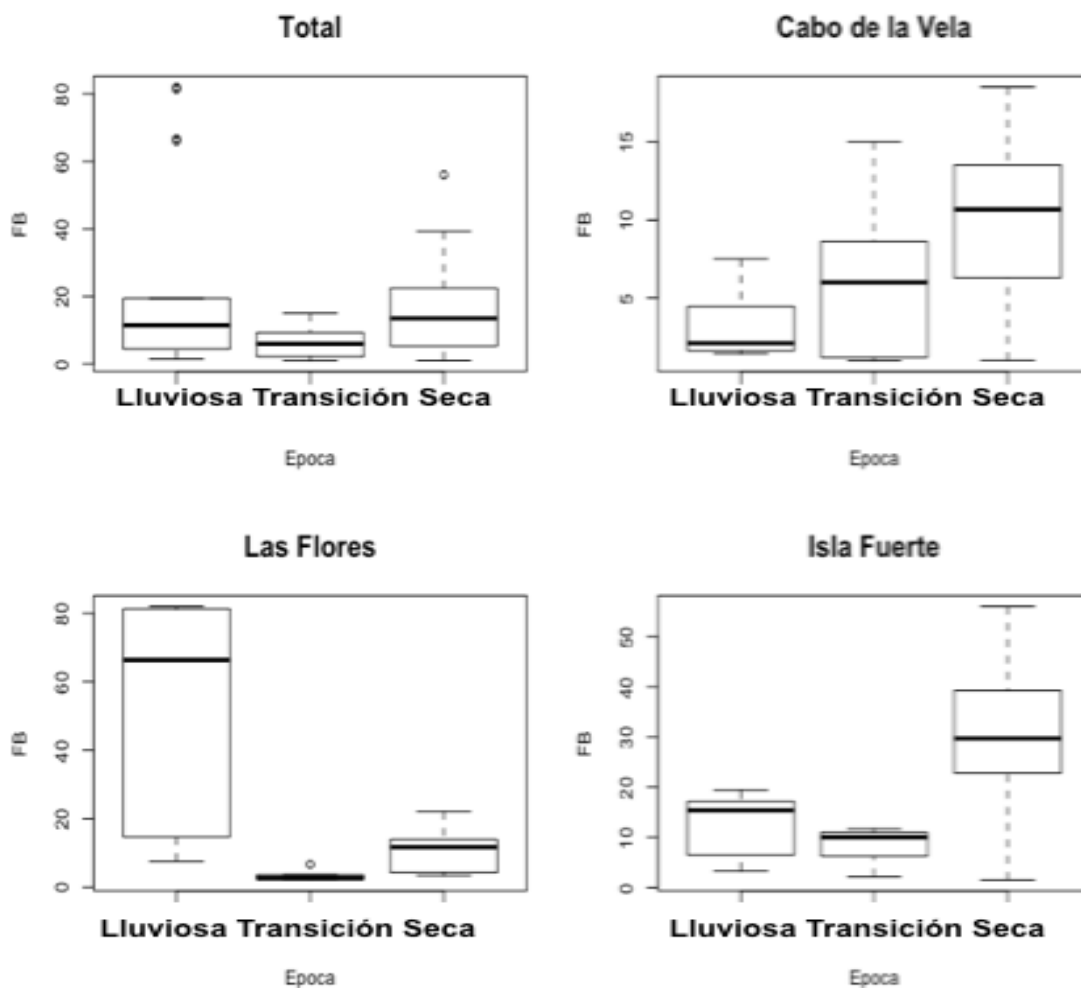


Figura 17. Factor de Biomagnificación en *R. porosus* según la época en cada uno de los sitios de estudio.

A partir de las concentraciones de metilmercurio en tejido de los tiburones y en los contenidos estomacales fue posible determinar los factores de biomagnificación para cada uno de los sitios de muestreo (Fig.17, Tab. 5). Para el total de los datos del Caribe colombiano, en el presente estudio la prueba de Kruskal-Wallis arrojó diferencias significativas entre los valores de los factores de biomagnificación en las diferentes épocas. Sin embargo, al discriminar el análisis con los datos de cada sitio por separado, el único lugar que concuerda con los resultados del Caribe en general es la estación de Las Flores. En el Cabo de la Vela e Isla Fuerte, la

variación temporal no fue estadísticamente significativa, aunque al analizar los valores promedio de cada sitio en sus respectivas temporadas estos concuerdan en un notable aumento durante el verano.

3.2.4 Talla:

Realizando un análisis de muestras independientes fue posible evidenciar que estas diferencias se deben a las tallas de las capturas en la Guajira puesto que entre Las Flores e Isla Fuerte los tamaños promedio no fueron muy variables (Tab. 6). Al comparar los tamaños de los tiburones capturados en los tres sitios se obtuvo un valor de significancia asintótica de 0.003, lo cual indica que existen diferencias notorias entre las tallas de las tres poblaciones (Tab.6). Así mismo, y a pesar de que solo en las Flores se presenta una variación estadísticamente significativa, los tres sitios concuerdan en capturas de mayor tamaño en el periodo de sequía. Durante todo el año, los tamaños en los tiburones de el Cabo de la Vela fueron los menores.

Tabla 6. Promedios, medianas y valores de significancia asintótica de las tallas de *R. porosus* según épocas prueba de Kruskal-Wallis.

	LLUVIAS		TRANSICIÓN		SECA		SIG.
	MEDIA	MEDIANA	MEDIA	MEDIANA	MEDIA	MEDIANA	
Cabo de La Vela	52.0	50.1	54.2	55.0	57.6	56.0	0.388
Las Flores	72.16	72.15	62.8	58.0	79.8	80.0	0.013
Isla Fuerte	59.7	52.1	66.4	73.0	71.2	74.0	0.414
Caribe colombiano	61.8	62.0	61.13	56.0	69.5	74.0	0.111

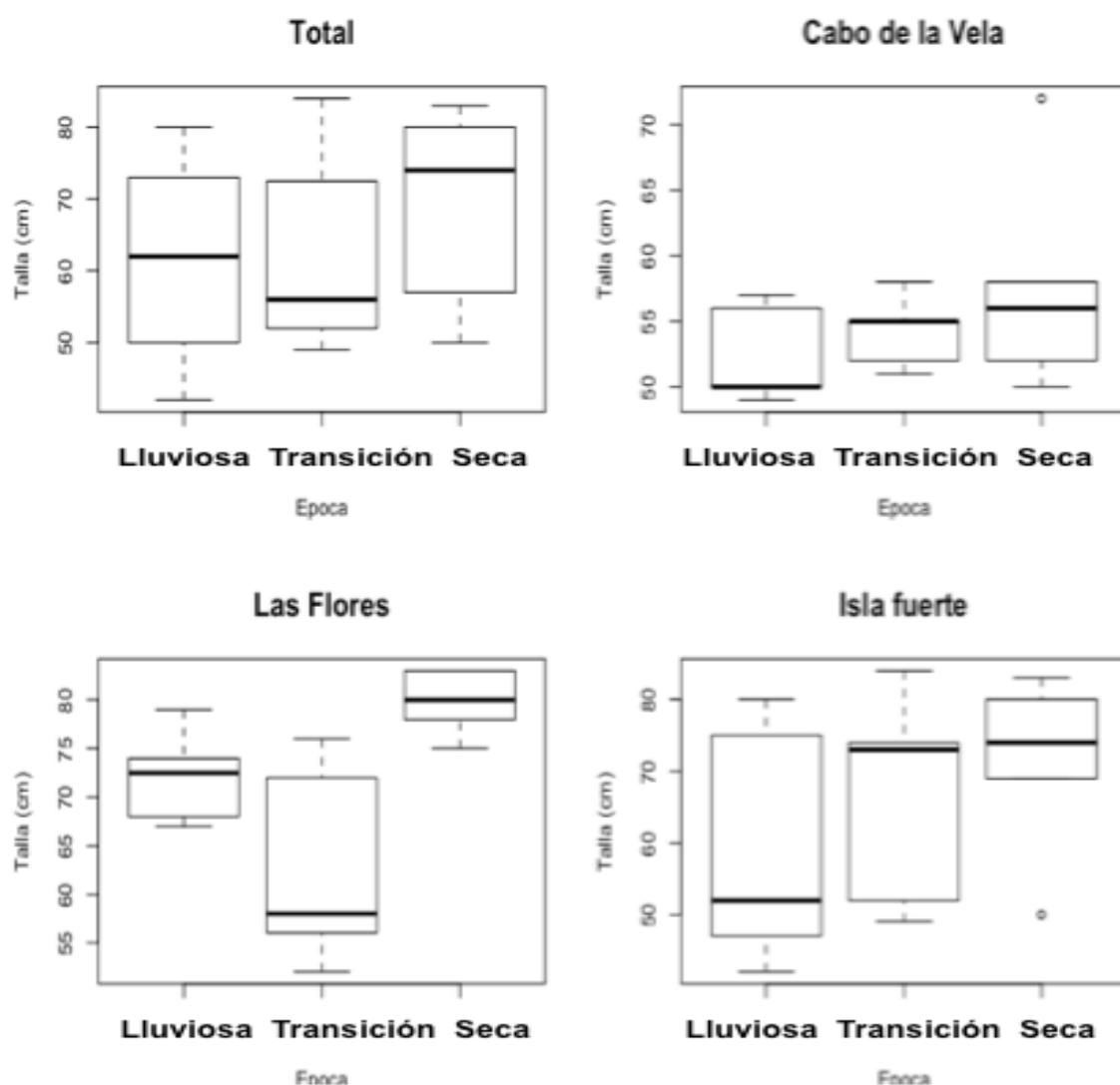


Figura 18. Talla (longitud) de los individuos de *R. porosus* capturados según la época en cada uno de los sitios de estudio.

3.2.5 Peso:

Como es de esperarse, los resultados del peso de los individuos de *R. porosus* siguen un patrón muy similar al de las tallas.

Determinación del rol del tiburón cazón antillano, *Rhizoprionodon porosus* (Carcharhinidae) en el flujo de metilmercurio dentro de las redes tróficas del Caribe colombiano

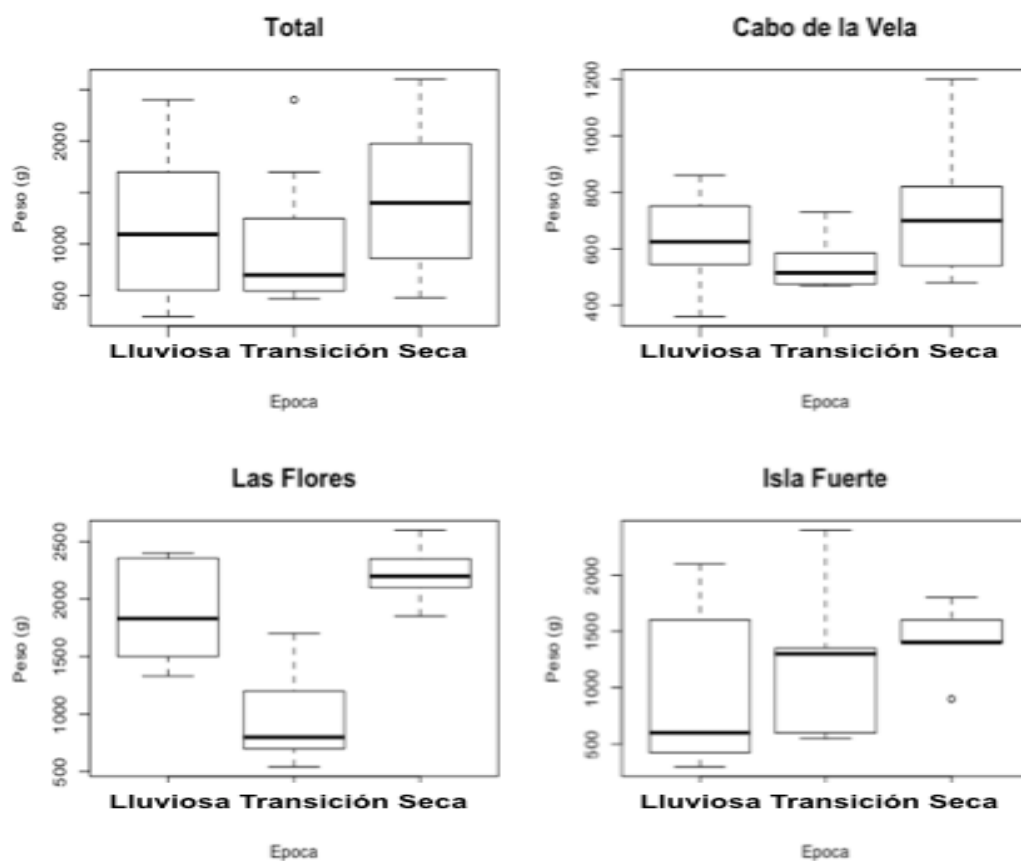


Figura 19. Peso en gramos (g) de los individuos de *R. porosus* capturados según la época en cada uno de los sitios de estudio.

Tabla 7. Promedios, medianas y valores de significancia asintótica de los pesos de *R. porosus* según prueba de Kruskal-Wallis.

	LLUVIAS		TRANSICIÓN		SECA		SIG.
	MEDIA	MEDIANA	MEDIA	MEDIANA	MEDIA	MEDIANA	
Cabo de La Vela	628.4	625.0	555.0	515.0	748.0	700.0	0.379
Las Flores	1874.0	1830.0	988.0	800.0	2220.0	2200.0	0.014
Isla Fuerte	1006.4	600.0	1240.0	1300.0	1420.0	1400.0	0.487
Caribe colombiano	1190.7	1095.0	927.7	700.0	1462.7	1400.0	0.094

3.3 U DE MANN-WHITNEY

Con el fin de conocer la relación entre el sexo y las variables talla, peso, factor de biomagnificación y concentración de MeHg en el tejido de los tiburones, se llevó a cabo una prueba de Mann-Whitney obteniendo los siguientes resultados:

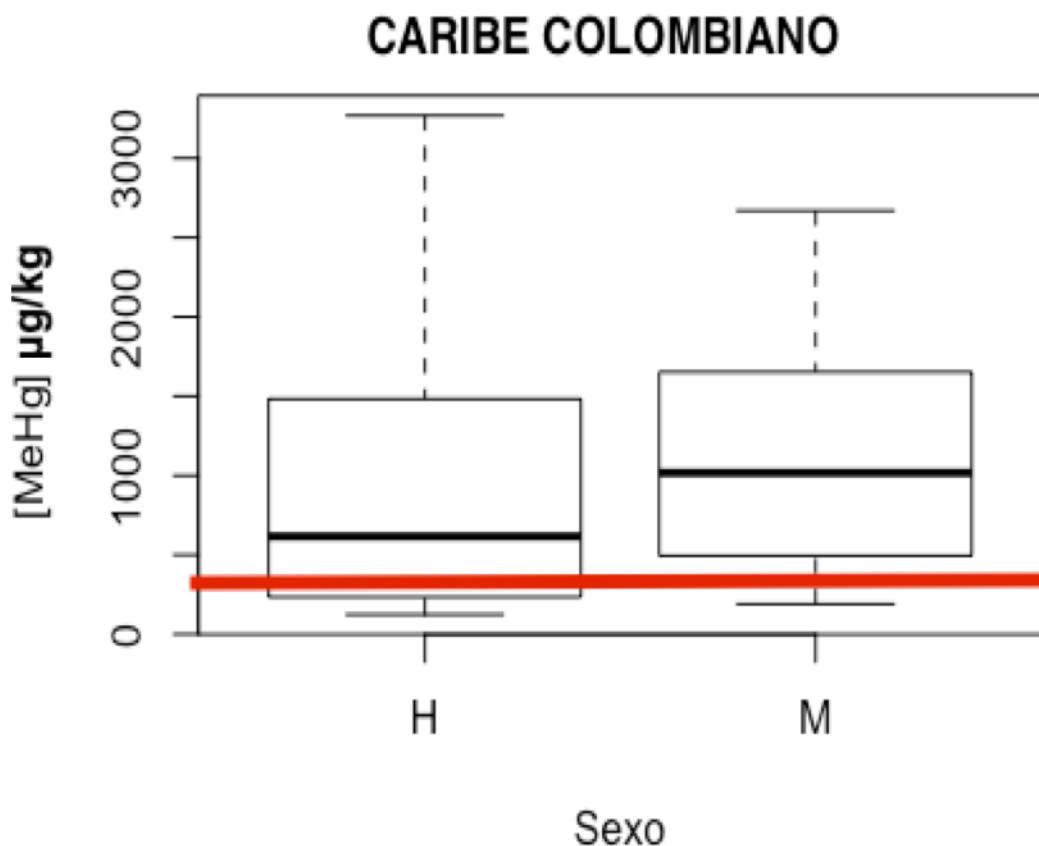


Figura 20. Diagrama de cajas y bigotes de las concentraciones de MeHg en peso húmedo en *R. porosus* en el Caribe colombiano.

H=hembra ([MeHg] promedio=933.8 µg /kg, mediana=615.7)

M=macho. ([MeHg] promedio=1085.6 µg /kg, mediana=1017.0)

Tabla 8. Estadísticos de prueba. Tomado de SPSS Statistics.

Estadísticos de prueba^a

	[MeHg]	FB	Talla	Peso
U de Mann-Whitney	202,500	209,000	229,500	217,000
W de Wilcoxon	763,500	329,000	790,500	778,000
Z	-1,001	-0,856	-0,401	-0,679
sig. Asintótica (bilateral)	0,317	0,392	0,688	0,497

a. Variable de agrupación:Sexo

Como se puede ver ninguno de los valores de significancia asintótica está por debajo de 0.05 (Tab.8) por lo cual no hay evidencia que permita afirmar que el sexo de los individuos influye en alguna de estas variables.

3.4 Correlación de Spearman:

El coeficiente de correlación de Spearman fue fundamental para el análisis de los datos obtenidos durante este proyecto. Inicialmente, basado en un intervalo de confianza del 99%, esta prueba confirmó la estrecha relación existente entre las variables biológicas peso y talla y descartó por completo la influencia del sexo sobre las concentraciones de MeHg en los tiburones de los diferentes sitios (Tab. 9). Por otro lado, lo más importante que dejó la realización de esta prueba es la evidencia de una correlación clara entre la talla, el peso, el FB y las concentraciones de MeHg en el tejido de la especie *R. porosus* del Caribe colombiano.

Determinación del rol del tiburón cazón antillano, *Rhizoprionodon porosus* (Carcharhinidae) en el flujo de metilmercurio dentro de las redes tróficas del Caribe colombiano

Tabla 9. Resultados de la correlación de Spearman.

Tiburón= [MeHg] en *R. porosus*

Presa= [MeHg] en contenido estomacal.

Correlaciones						
Rho de Spearman	Talla	Coeficiente de correlación	Tiburón			
			Talla	n	Peso	Presa FB
			1,000	,437**	,916*	0,268 0,225
		Sig. (bilateral)	.	0,002	0,000	0,066 0,124
		N	48	48	48	48 48
	Tiburón	Coeficiente de correlación	,437*	1,000	,615*	0,272 ,632*
		Sig. (bilateral)	0,002	.	0,000	0,061 0,000
		N	48	48	48	48 48
	Peso	Coeficiente de correlación	,916*	,615**	1,000	,292* ,359*
		Sig. (bilateral)	0,000	0,000	.	0,044 0,012
		N	48	48	48	48 48
	Presa	Coeficiente de correlación	0,268	0,272	,292*	1,000 -0,171
		Sig. (bilateral)	0,066	0,061	0,044	. 0,244
		N	48	48	48	48 48
	FB	Coeficiente de correlación	0,225	,632**	,359*	0,171 1,000
		Sig. (bilateral)	0,124	0,000	0,012	0,244 .
		N	48	48	48	48 48

** .La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

*.La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral).

4. Discusión

Como resultado de este estudio fue posible registrar altas concentraciones de MeHg a lo largo del mar Caribe colombiano. La prueba de Kruskal-Wallis permitió concluir que existen diferencias significativas en los valores de MeHg de cada época. . El muestreo realizado en la época seca (abril) fue el que presentó la mayor variación por la presencia de esta forma orgánica del metal para el mar Caribe colombiano en general. La correlación de Spearman permitió comprobar que existe una relación entre las concentraciones de MeHg, el FB y la talla de los individuos. Con el desarrollo industrial y la explotación masiva de los recursos naturales las fuentes de contaminación que perjudican la región Caribe pueden ser muy variadas por lo que es de gran utilidad analizar cada uno de los lugares por separado.

4.1 Cabo de la Vela

El Cabo de la Vela fue el sitio que exhibió menores problemas de contaminación por MeHg y tratándose de una zona desértica alejada de la civilización este no fue un resultado inesperado. Sin embargo, un promedio anual de 424.3 µg/g de MeHg en el músculo no es un valor de menor preocupación, teniendo en cuenta que los contenidos se encuentran justo en el límite de los valores de alta toxicidad establecidos como aptos para el consumo humano por la FAO y la OMS. Adicionalmente, es importante resaltar que en este lugar los tiburones capturados presentaron los pesos y las tallas menores, por debajo de los 60 cm, a excepción de un ejemplar. En *R. porosus* esas tallas corporales corresponden a un rango de edad que no sobrepasa los 3 años de vida, lo cual puede verse reflejado en las menores concentraciones de MeHg en relación a los tiburones

capturados en Las Flores e Isla Fuerte, en donde los individuos analizados pueden tener hasta 5 años.

Se debe tener en cuenta que el promedio de concentración de MeHg en el Cabo de la Vela se vio alterado por los valores que se presentaron en el periodo de muestreo entre los meses de marzo y abril, los cinco ejemplares capturados en esta época excedieron notablemente los límites mínimos permisibles. El estadístico Kruskal-Wallis arrojó un valor de 0.009 indicando que en el Cabo de la Vela se presentan diferencias significativas entre las concentraciones presentes en el tejido de *R. porosus* en las épocas de lluvia, transición y seca. Durante los periodos de lluvias y transición las concentraciones de MeHg en los individuos fueron los menores en relación con los contenidos determinados en las otras muestras.

Los resultados obtenidos evidenciaron un fuerte incremento en las concentraciones de MeHg en los tiburones del Cabo de la Vela en la época de sequía, llegando a superar en más de 70% los niveles establecidos como seguros por la OMS y la FAO. Es posible que esta gran diferencia entre la época de sequía y el resto del año se encuentre ligada al fenómeno de surgencia que se presenta anualmente en esta región del Caribe entre diciembre y marzo (Paramo *et al.*, 2011). Teniendo en cuenta que la mayor tasa de metilación de Hg se da en las zonas de profundidad, en donde las concentraciones de oxígeno son muy limitadas (Roldán *et al.*, 2005), durante el periodo de surgencia grandes cantidades de MeHg pueden ser arrastradas a lo largo de la columna de agua y entrar a ser parte de las redes tróficas costeras y superficiales de manera acelerada. Adicionalmente, este afloramiento anual viene acompañado no solo con el ascenso del producto de la metilación sino también de cianobacterias y fitoplancton que, al permanecer en aguas superficiales, realizan la inclusión del mercurio orgánico directamente a las redes tróficas pelágicas y mesopelágicas (Heimbürger *et al.*, 2010). Así mismo, aunque las diferencias no

son estadísticamente significativas, existe una concordancia entre el patrón de distribución de MeHg de los tiburones y sus contenidos estomacales a lo largo del año, pues en estos últimos los valores de mayores concentraciones también se presentaron durante la sequía (época de máxima surgencia).

El factor de biomagnificación promedio para el Cabo de la Vela fue de 6.7. Galván (2007) registró un FB de 5.0 entre peces de la especie *Symbolophorus evermanni* y tiburones de la especie *Isurus oxyrinchus* en el sur de Baja California. Teniendo en cuenta que el estudio en California trata con peces de aproximadamente 8 cm y tiburones que llegan a medir hasta 4.5 m, se puede pensar que la situación descrita por un FB de 6.7 en tiburones de 60-70 cm en el Cabo de la Vela puede ser crítico.

Las probables fuentes de contaminación por MeHg en la Alta Guajira son difíciles de establecer debido a que, como se mencionó anteriormente, se trata de una zona desértica alejada de centros urbanos desarrollados y de posible descarga de contaminantes, se debe tener en cuenta que en el caso del Hg se trata de contaminación global que significa que las fuentes son lejanas y que prima el transporte por las redes tróficas. Uribia y Manaure, son los pueblos más cercanos y están localizados a más de 70 km de distancia del Cabo de la Vela y de 100 km de Puerto Bolívar, un puerto de tráfico pesado para la exportación de carbón y por tanto, de uso significativo de combustibles. El departamento de la Guajira siempre se ha caracterizado por la explotación minera de carbón a cielo abierto. A pesar de que las principales minas se encuentran al interior del país, este mineral es transportado mediante una vía férrea que atraviesa el departamento con un cargamento de más de 45,000 toneladas. La línea del tren realiza su desembarco en el sector de Puerto Bolívar, al sur de bahía Portete, en donde arriban buques con capacidades de carga de hasta 180.000 toneladas (www.cerrejon.com) y cuyo tránsito podría estar afectando el ecosistema en términos de contaminación por MeHg.

Uno de los principales ríos de la Guajira es el Rancherías. Este es un cuerpo fluvial cuyo cauce se nutre de la descarga de diferentes arroyos, algunos directamente relacionados con la minería de carbón, y desemboca en un delta de seis brazos al norte de la ciudad de Riohacha, a un poco menos de 100 km de distancias en línea recta de las playas del Cabo de la Vela. A pesar de que, por la lejanía, este no es un río con mayor influencia sobre el agua del Caribe de la Alta Guajira, al encontrarse tan relacionado con las minas mencionadas anteriormente, vale la pena mencionar que en algunos de sus arroyos ya se ha encontrado carbón con trazas de Hg que sobrepasan las concentraciones promedio halladas en el carbón a nivel mundial (Morales y Carmona, 2007). El flujo constante de enormes embarcaciones, los desechos de la quema de combustibles fósiles por parte de locomotoras y más de 100 lanchas de pesca artesanal y la descarga de algunos ríos al mar Caribe son los principales factores que pueden ser asociados a los niveles de MeHg hallados en el Cabo de la Vela durante el presente estudio.

4.2 Las Flores

Al igual que en el Cabo de la Vela el valor de significancia asintótica arrojado por la prueba de Krsukal-Wallis, en este caso de 0.006, soporta la hipótesis de que existe una variación temporal en las concentraciones de MeHg en el tejido de *R. porosus* para la localidad de Las Flores. Estos resultados son relevantes debido a la gran influencia que posee la desembocadura del río Magdalena en los ecosistemas costeros de esta región del Caribe. Teniendo en cuenta que se trata de la principal arteria fluvial de Colombia, para realizar el análisis de estos resultados es importante recalcar que por este río circulan desechos provenientes de más de 12 departamentos. En esta estación el 66% de las muestras excediendo los 448 µg de MeHg. Aquí los tiburones capturados tuvieron una talla

promedio de 71 cm, lo que corresponde a aproximadamente unos cuatro años de edad (Lessa *et al.*, 2009).

Los valores de MeHg más altos fueron registrados en los ejemplares capturados durante noviembre y diciembre, época correspondiente a los últimos días de lluvias del año 2015., durante septiembre, octubre y noviembre del mismo año, el río Magdalena a la altura de Calamar, Bolívar, experimentó varias crecientes y niveles altos, según lo indica la Corporación Autónoma Regional del Río Magdalena.

Así mismo, según CORMAGDALENA, el río Cauca, uno de los cuerpos fluviales que genera un mayor aporte hídrico al cauce del Magdalena, coincidió con este aumento de caudal en la temporada comprendida entre septiembre y noviembre. Es importante mencionar el comportamiento de este efluente del Magdalena debido a que sus cuencas son las más afectadas por la minería de oro (Olivero & Acosta, 1998). Según un estudio realizado por las Fuerzas Militares de Colombia en enero del 2016, el río Sambingo y San Jorge son los dos más perjudicadas por el mal manejo del mercurio en la minería ilegal de oro lo cual permite pensar que un aumento en su caudal lleva consigo una gran cantidad de sedimentos y residuos contaminados. Adicionalmente, junto con el invierno y la creciente en los niveles de los ríos, sobretudo en ríos tan productivos económicamente como lo es el Magdalena, la navegabilidad aumenta siendo mayor el tamaño de las embarcaciones y la cantidad de botes que circulan por el río generando residuos mercuriados provenientes de la quema de combustibles fósiles (Ospina, 2008).

Por otra parte, Las Flores es una localidad propensa no solo a la influencia de los desechos acarreados por el río Magdalena y provenientes del interior del país, sino que adicionalmente se encuentra influenciada por uno de los mayores centros urbanos e industriales de Colombia como lo es Barranquilla (Atlántico). Adicionalmente a un poco más de 40 km hacia el norte, se ubica una seguidilla de

cascos urbanos municipales cuyo manejo de aguas residuales es precario (Vivas *et al.*, 2013) y probablemente contribuya a la contaminación de los ecosistemas costeros.

En esta localidad los FB presentaron una gran variación y oscilaron entre los valores 3.0 y 80.0. Los FB más altos se determinaron en la época lluviosa. La variación alta entre los FB en la localidad de Las Flores puede deberse a la gran cantidad de materia orgánica arrastrada por el río que atrae gran variedad de consumidores potenciales.

4.3 Isla Fuerte

Por su parte, Isla Fuerte no presentó diferencias significativas entre las diferentes épocas del año en ninguna de las variables de estudio. Sin embargo, esa uniformidad está asociada al estado crítico de contaminación por MeHg registrado en el presente estudio. El 100% de las muestras de tejido de tiburón excedieron notablemente los límites dados por la FAO y la OMS para el consumo humano. Las mayores concentraciones de MeHg en *R. porosus* se determinaron en la época seca, seguidas por las muestras de época lluviosa y la época de transición. En Isla Fuerte desde el mes de diciembre hasta abril los vientos alisios provenientes del noreste generan un fuerte oleaje y la pluma de sedimentos del río Sinú, en los que ya se han detectado niveles significativos de mercurio (Feria *et al.*, 2010) es mucho más intensa que en el resto del año (Ladino, 2014).

En un estudio de modelación energética, Trudel y Rasmussen (2006) evaluaron la relación existente entre diferentes variables biológicas y la dinámica del mercurio presente en el tejido de los peces. Una de las conclusiones principales de su estudio es que existe una relación directa entre la tasa y el costo metabólico y la concentración de mercurio presente en el tejido de los animales, pues

evidenciaron que con el incremento de la tasa metabólica en los peces el mercurio es acumulado más rápidamente.

Por otra parte, Dowd *et al.* (2006) realizaron un estudio evaluando la relación entre la tasa metabólica, la temperatura y el tamaño y peso de tiburones de la familia Carcharhinidae del océano Atlántico Norte y encontraron que los tiburones en época de verano presentan un aumento significativo en sus ritmos cardiacos que genera un costo energético más elevado. Así mismo, Lowe (2002) llevó a cabo un estudio similar con tiburones juveniles de la familia Sphyrnidae, tiburones martillo, observando que durante los periodos de aguas cálidas estos animales incrementan sus patrones de movilidad y desplazamiento generando un costo energético elevado en comparación a las temporadas de lluvias.

De acuerdo con lo anterior, es posible asociar las altas concentraciones de MeHg presentes en *R. porosus* en la época de sequía de Isla Fuerte con el cambio de temperatura en las aguas superficiales de la región. Sin embargo, la carencia de registros bibliográficos que soporten esta variación térmica espaciotemporal no permite que este argumento sea una justificación trascendente. Ahora bien, teniendo en cuenta la relación entre gastos energéticos y tasa de acumulación de MeHg mencionada previamente, es innegable que el muestreo de verano fue fuertemente influenciado por este factor, pues las capturas en dicha época consistieron de cuatro hembras preñadas y un macho de talla considerable. El desarrollo de los embriones en una hembra tarda hasta 12 meses y es un periodo de tiempo en el que el gasto energético incrementa exponencialmente con el paso de los días. Los tiempos de caza, la cantidad y el tamaño de las presas y el peso corporal con el que debe lidiar en todos sus movimientos son factores que hacen de las hembras preñadas sean mucho más propensos a acumular MeHg en sus tejidos.

5. Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones

- En varios sectores de la región Caribe colombiana se presenta un alto grado de contaminación por MeHg.
- Existe variación espaciotemporal de las concentraciones de MeHg en el tejido de los tiburones de la especie *Rhizoprionodon porosus* y su contenido estomacal.
- El Hg es un metal pesado altamente tóxico que está siendo rápidamente acumulado y magnificado en las redes tróficas del Caribe colombiano.
- Las localidades de Las Flores e Isla Fuerte representan dos puntos de alta contaminación por MeHg.
- El Cabo de la Vela presenta un estado poco alarmante respecto a los demás sitios de muestreo, pero debe continuar siendo objeto de control y monitoreo.
- *Rhizoprionodon porosus* es una especie que acumula MeHg con facilidad en sus tejidos y puede ser empleado como biomonitor.
- El frecuente consumo de tiburón cazón en la costa Caribe colombiana puede traer graves consecuencias para la salud de los seres humanos.
- *R. porosus* es un biomagnificador de las concentraciones de MeHg en las redes tróficas del Caribe colombiano, al encontrarse en el tope de la trama se convierte en el registro final del proceso de biomagnificación.

5.2 Recomendaciones

- Es importante recurrir a acciones de educación ambiental, campañas de limpieza y divulgación de información en los sectores más afectados por MeHg.
- El Caribe colombiano debe continuar siendo un foco de atención para estudios de ecotoxicología.
- La pesca de condriictios es una actividad que debe ser regulada de manera estricta en la región Caribe de Colombia.

Bibliografía:

Acero A. 1985. Zoogeographical implications of the distribution of selected families of Caribbean coral reef fishes. Proceedings of the Fifth International Coral Reef Congress, Tahiti. 5: 433-438.

Almanza, MA. (2014). Análisis genético poblacional del tiburón cazón antillano, *Rhizoprionodon porosus* (Carcharhinidae), en el Caribe colombiano. Trabajo de Grado. Programa Magíster en Ciencias-Biología-Línea Biología Marina. Universidad Nacional de Colombia. 7 p.

Almanza MA. (2009). Caracterización de la pesca artesanal de peces cartilaginosos, con énfasis en sus aspectos tróficos y reproductivos en Isla Fuerte, Caribe colombiano. Trabajo de Grado. Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. 87 p.

Álvarez, R., Aguilera, J., Andrade, C., & Nowak, P. (1995). Caracterización general de la zona de surgencia en la Guajira colombiana. *Revista Academia Colombiana*. 19 (75), 679-694.

Bose-O'Reilly, S., McCarty, K. M., Steckling, N., & Lettmeier, B. (2010). Mercury exposure and children's health. *Current problems in pediatric and adolescent health care*, 40(8), 186-215

Branco, V., Vale, C., Canário, J., & dos Santos, M. N. (2007). Mercury and selenium in blue shark (*Prionace glauca*, L. 1758) and swordfish (*Xiphias gladius*, L. 1758) from two areas of the Atlantic Ocean. *Environmental Pollution*, 150(3), 373-380.

Caiafa, I., Narváez, J., & Borrero, S. (2011, May). Algunos Aspectos de la Dinámica Poblacional del Jurel *Caranx hippos* en Bocas de Ceniza, Caribe colombiano. *Revista MVZ Córdoba*. 16 (1), 2324-2335.

Campos C., N. H., Dueñas-Ramírez, P. R., & Genes, N. (2015). Malformación en cangrejos de la superfamilia Xanthoidea (Crustacea: Brachyura) en la bahía de Cispatá (Córdoba, Colombia). *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 39(150), 91-99.

Cogua, P., Campos, N., & Duque, G. (2012). Concentración de Mercurio Total y Metilmercurio en Sedimento y Seston de la Bahía de Cartagena, Caribe Colombiano. *Boletín De Investigaciones Marinas Y Costeras*, 267-285.

Consejo Nacional De Política Económica Y Social. 2013. Plan para restablecer la navegabilidad del río Magdalena." [Http://www.supertransporte.gov.co/](http://www.supertransporte.gov.co/). República De Colombia Departamento Nacional De Planeación, Web. 19 Nov. 2016.

Cormagdalena.(29 de octubre del 2016) Niveles del Río. Colombia: Corporación Autónoma regional del rio Magdalena. Tomado de: niveles.cormagdalena.gov.co

Correa, M. V. (Ed.). (2016, September 22). Antioquia, con los índices más altos de intoxicación por mercurio. *El Colombiano*. Tomado de: <http://m.elcolombiano.com/antioquia-con-los-indices-mas-altos-de-intoxicacion-por-mercurio-DD5027104>

Corredor Rodríguez, C. (2013). Estado del arte sobre la presencia de mercurio en peces y su efecto en la salud. Trabajo de Grado. Pontificia Universidad Javeriana

ENAP - Escuela Naval Almirante Padilla, 2005. Estudio oceanográfico de los Bancos de Salmedina Caribe colombiano. CIOH, COLCIENCIAS Colombia, Universidad Nacional de Colombia, SENA. Colombia. 111 p.

Dial, N. A. (1976). Methylmercury: teratogenic and lethal effects in frog embryos. *Teratology*, 13(3), 327-333.

Do Amaral Kehrig, H. do, Malm, O., Akagi, H., Guimarães, J. R., & Torres, J. P. M. (1998). Methylmercury in fish and hair samples from the Balbina Reservoir, Brazilian Amazon. *Environmental Research*, 77(2), 84-90.

Dowd, W. W., Brill, R. W., Bushnell, P. G., & Musick, J. A. (2006). Standard and routine metabolic rates of juvenile sandbar sharks (*Carcharhinus plumbeus*), including the effects of body mass and acute temperature change. *Fishery Bulletin*, 104(3), 323-331.

INVEMAR. (2004). Estado de los Estuarios y Manglares en Colombia. *Informe del Estado de los Ambientes Marinos y Costeros en Colombia*, 125-145. Tomado de: http://www.invemar.org.co/redcostera1/invemar/docs/EAMC_2004/06Estuariosmanglares.pdf

Feria, J., Marrugo, J., & González, H. (2010). Heavy metals in Sinú river, department of Córdoba, Colombia, South America. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (55), 35-44.

Galván, F. (2007). *Bioacumulación de Mercurio en tiburones de Baja California Sur*. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas.

Gilbert, J. M., Reichelt-Brushett, A. J., Butcher, P. A., Mcgrath, S. P., Peddemors, V. M., Bowling, A. C., & Christidis, L. (2015). Metal and metalloid concentrations in the tissues of dusky *Carcharhinus obscurus*, sandbar *C. plumbeus* and white *Carcharodon carcharias* sharks from south-eastern Australian waters, and the implications for human consumption. *Marine Pollution Bulletin*, 92(1), 186-194.

González, O. H. V., Almeida, S. E., López, M. E. P., & Fierro, I. V. Contenido de Mercurio y Arsénico en atún y sardinas enlatadas mexicanas. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 17(1), 31-35.

Guzmán, A., Solano, O., Cordoba, M., & López, A. (2001). Comunidad Macroinfaunal de Fondos Blandos Someros Tropicales (Caribe Colombiano). *Boletín De Investigaciones Marinas Y Costeras*, 39-66.

Heimbürger, L., Cossa, D., Marty, J., Migon, C., Averty, B., Dafour, A., & Ras, J. (2010, October). Methyl mercury distributions in relation to the presence of nano- and picophytoplankton in an oceanic water column (Ligurian Sea, North-western Mediterranean). *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 74(19), 5549-5559.

Hueter, R. E., Fong, W. G., Henderson, G., French, M. F., & Manire, C. A. (1995). Methylmercury concentration in shark muscle by species, size and distribution of sharks in Florida coastal waters. In *Mercury as a Global Pollutant* (pp. 893-899). Springer Netherlands.

Jimeno, M., & Gerardo, R. (2005) *Caribe Colombia*. digitalizado por: Biblioteca Virtual del Banco de la República. Tomado de:
<http://www.banrepcultural.org/blaavirtual/geografia/carcol/oceano.htm>

Kraepiel, A. M., Keller, K., Chin, H. B., Malcolm, E. G., & Morel, F. M. (2003). Sources and variations of mercury in tuna. *Environmental science & technology*, 37(24), 5551-5558

Ladino, F. (2014). Metaanálisis de la población del tiburón tollo (*Rhizoprionodon porosus*) en Isla Fuerte Caribe Colombiano. Trabajo de Grado. Pontificia Universidad Javeriana, 10-19.

Lessa, R., Quijano, S.M., Santana, F.M. & Monzini, J. 2006. *Rhizoprionodon porosus*. The IUCN Red List of Threatened Species 2006.

Lessa, R., Santana, F., & DE Almeida, Z. (2009). Age and growth of the Brazilian sharpnose shark, *Rhizoprionodon lalandii* and Caribbean sharpnose shark, *R.*

porosus (Elasmobranchii, Carcharhinidae) on the northern coast of Brazil (Maranhão) [Abstract]. *Pan-American Journal of Aquatic Sciences*, 532-544.

López, C., & Maz, A. (2006). Biomagnificación y bioacumulación de mercurio total en cuatro especies de tiburón de la península de Baja California Sur, México. Bogotá, D.C.: Universidad Jorge Tadeo Lozano. 20-37.

Lowe, C. G. (2002). Bioenergetics of free-ranging juvenile scalloped hammerhead sharks (*Sphyrna lewini*) in Kāne'ohe Bay, Ō'ahu, HI. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 278(2), 141-156.

Machado, M. R. B., Almeida, Z. da S. de da & Castro, A. C. L. de. 2000. Estudo da biologia reprodutiva de *Rhizoprionodon porosus* Poey, 1861 (Chondrichthyes: Carcharhinidae) na plataforma continental do estado do Maranhão, Brasil. *Boletim do Laboratório de Hidrobiologia, São Luís*, 13: 51-65.

Marrugo-Negrete, J., Verbel, J. O., Ceballos, E. L., & Benitez, L. N. (2008). Total mercury and methylmercury concentrations in fish from the Mojana region of Colombia. *Environmental geochemistry and health*, 30(1), 21-30.

Mason, R. P., Choi, A. L., Fitzgerald, W. F., Hammerschmidt, C. R., Lamborg, C. H., Soerensen, A. L., & Sunderland, E. M. (2012). Mercury biogeochemical cycling in the ocean and policy implications. *Environmental research*, 119, 101-117.

Mattos, S. M., Broadhurst, M., Hazin, F. H., & Jonnes, D. M. (2001). Reproductive biology of the Caribbean sharpnose shark, *Rhizoprionodon porosus*, from northern Brazil. *Marine and Freshwater Research*, 52(5), 745-752.

Medina, E., Tavares, R., & Posada, J. (2010, November). Resultados Preliminares Sobre la Edad y Crecimiento del Cazón Playón, *Rhizoprionodon porosus* (Poey, 1861), en la Región Nororiental de Venezuela. *Proceedings of the 62nd Gulf and Caribbean Fisheries Institute*, 441-445.

Mendonça, F. F., Oliveira, C., Gadig, O. B., & Foresti, F. (2011). Phylogeography and genetic population structure of Caribbean sharpnose shark *Rhizoprionodon porosus*. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 21(4), 799-814.

Ministerio de Ambiente. (2016). Ley 1658 de 2013. Colombia. Ministerio de Ambiente. Tomado de:

<http://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article?id=600:plantilla-asuntos-ambientales-y-sectorial-y-urbana-sin-galeria-51#ley>.

Monperrus, M., Tessier, E., Amouroux, D., Leynaert, A., Huonnic, P., & Donard, O. F. X. (2007). Mercury methylation, demethylation and reduction rates in coastal

and marine surface waters of the Mediterranean Sea. *Marine Chemistry*, 107(1), 49-63.

Morales, Y. & Carmona, L. (2007). Estudio de algunos elementos traza en carbones de la cuenca Cesar-Ranchería, Colombia. *Boletín de Ciencias de la Tierra*- Número 20. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. 75-88.

Navia, A.F., Hleap, J.S., Ramírez, V., Gaitán, J.D., Tobón, M.A., Familia Hexanchidae. En: Guía para la identificación de especies de tiburones, rayas y quimeras de Colombia. Bogotá, D.C.: Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible; Corporación para el Desarrollo Sostenible del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina – CORALINA; Gobernación de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, Fundación SQUALUS, 2011. p. 11-19.

Olivero, J., Solano, B., & Acosta, I. (1998, June 16). Total Mercury in Muscle of Fish from Two Marshes in Goldfields, Colombia. *Bulletin Environmental Contamination and Toxicology*, 182-187.

Ospina, M. (2008) La Navegación fluvial en Colombia. Organization of American States OAS. Tomado de:
https://www.oas.org/cip/docs/areas_tecnicas/11.../10_la_nav_fluv_colombia.ppt.

Paramo, J., Correa, M., & Núñez, S. (2011, December). Evidencias de desacople físico-biológico en el sistema de surgencia en La Guajira, Caribe colombiano. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 46, 421-430.

Park Jung-Duck. 2012. Human Exposure and Health Effects of Inorganic and Elemental Mercury. *Journal of Preventive Medicine and Public Health*, 45:344-352.

Pinho, A. P. de, Guimarães, J. R. D., Martins, A. S., Costa, P. A. S., Olavo, G., & Valentin, J. (2002). Total mercury in muscle tissue of five shark species from Brazilian offshore waters: effects of feeding habit, sex, and length. *Environmental Research*, 89(3), 250-258.

Raigoza, Y. 2015. Análisis del Proyecto Sobre los Alcances Bioéticos de la Desviación del Arroyo Bruno en el Departamento de la Guajira (Colombia). *Congreso Global De Investigadores*, 369-387. Tomado de:
http://www.uniguajira.edu.co/descargas/pdf/noticias/memoria_congreso_global_investigacion_2015.pdf#page=369 Consultado el 10 de diciembre del 2015.

Ramos, C., Estévez, S., & Giraldo, E. (2000). Nivel de contaminación por metilmercurio en la región de La Mojana”: *Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental (CIIA)*, Bogotá: Universidad de los Andes. 4 p.

ELTIEMPO.COM. (2016). Primeras capturas por participar en la desaparición del río Sambingo. Tomado de: <http://www.eltiempo.com/politica/justicia/rio-sambingo-capturas-por-mineria-ilegal/16555187>. Consultado el 16 de Julio del 2016.

Restrepo, J. (2005), *Los sedimentos del río Magdalena: Reflejo de la crisis ambiental*, Medellín, Colombia, Universidad Eafit. 53-69.

Roldán, M., Blasco, R., Huertas, M., Caballero, F., Conrado, V., & Martínez, M. (Agosto de 2014). *Biología Ambiental*. Arbor. 190 (768), p. 2.

Rosa, R.S., Mancini, P., Caldas, J.P. & Graham, R.T. 2006. *Carcharhinus perezii*. The IUCN Red List of Threatened Species 2006: e.T60217A12323052. . Consultado el 09 de septiembre de 2015.

Tigres, P. C. (2013). La dinámica del CO_2 en el Caribe centro-norte colombiano y su Efecto sobre la Comunidad Fitoplanctónica. Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, 6 p.

Torres, H., & Torres, C. (n.d.). Determinación de Cadmio, Plomo y Mercurio mediante Espectro fotometría de Absorción Atómica (EAA) en las estructuras calcáreas del coral *Diploria clivosa*, del Sotavento de la isla de Barú (Caribe Colombiano). *Ingenio Libre*, 49-53.

Trudel, M., & Rasmussen, J. (2011, April 12). Bioenergetics and mercury dynamics in fish: A modelling perspective. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1890-1902. Visitado el: Octubre 10, 2016, Tomado de: <http://www.nrcresearchpress.com/doi/abs/10.1139/f06-081?journalCode=cjfas#.WCiaVOHhDok> . Consultado el 30 de octubre de 2015.

United States Environmental Protection Agency. 1997. Mercury Study Report to Congress. Volume V: Health Effects of Mercury and Mercury Compounds. 1997; Disponible en: <http://www.epa.gov/hg/report.htm> Consultado el 24 de Febrero de 2016.

Velasco-Gonzalez, O. H., Echavarría-Almeida, S., Pérez-López, M. E., & Villanueva-Fierro, I. (2001). Contenido de mercurio y arsénico en atún y sardinas enlatadas mexicanas. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 17(1), 31-35.

Vivas, L., Espinosa, L., & Parra, L. (2013). Identificación de Fuentes Terrestres de contaminación y cálculo de las cargas de contaminantes en el área de Influencia de La Ciénaga Grande de Santa Marta, Caribe Colombiano*. *Boletín De Investigaciones Marinas Y Costeras*. 42(1), 7-30.

