

**ECOMORFOLOGÍA DE LOS OTOLITOS *SAGITTA* MEDIANTE MORFOMETRÍA
GEOMÉTRICA Y ANÁLISIS ISOTÓPICOS DE CARBONO ($\delta^{13}\text{C}$) DEL PEZ LEÓN
(*Pterois volitans*) EN EL CARIBE COLOMBIANO**

DIANA KATERINE RUBIO LANCHEROS

**UNIVERSIDAD DE BOGOTÁ JORGE TADEO LOZANO
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y AMBIENTALES
PROGRAMAS DE BIOLOGÍA MARINA Y BIOLOGÍA AMBIENTAL
SANTA MARTA
2018**

**ECOMORFOLOGÍA DE LOS OTOLITOS *SAGITTA* MEDIANTE MORFOMETRÍA
GEOMÉTRICA Y ANÁLISIS ISOTÓPICOS DE CARBONO ($\delta^{13}\text{C}$) DEL PEZ LEÓN
(*Pterois volitans*) EN EL CARIBE COLOMBIANO**

DIANA KATERINE RUBIO LANCHEROS

**Trabajo de grado para la formación en investigación para optar a los títulos de
Bióloga Marina y Bióloga Ambiental**

Director

ADOLFO SANJUAN MUÑOZ

Biólogo Marino

Magíster Gestión Ambiental en Zonas Costeras

Master en Biodiversidad

Codirectora

DIANA MILENA BUSTOS MONTES

Bióloga Marina

Magíster Biología – Línea Biología Marina

Asesora

ADRIANA BERMÚDEZ TOBÓN

Bióloga

Doctor Rerum Naturae

**UNIVERSIDAD DE BOGOTÁ JORGE TADEO LOZANO
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y AMBIENTALES
PROGRAMAS DE BIOLOGÍA MARINA Y BIOLOGÍA AMBIENTAL
SANTA MARTA
2018**

“Antes de poder vivir con otras personas tengo que vivir conmigo mismo. Lo único que no sigue la regla de la mayoría es la conciencia de la persona”

Harper Lee, Matar a un ruiseñor

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi madre Elsa Lancheros y a mis hermanos David y Ricardo Pajoy, por su apoyo en las decisiones que he tomado a lo largo de mi vida, por su amor, compañía y consejo durante estos años de estudio.

A Adolfo Sanjuán, Diana Bustos y Adriana Bermúdez por confiar en mí para la ejecución del proyecto y ser pacientes en los momentos de incertidumbre.

A los integrantes del grupo de investigación de Dinámica y Manejo de Ecosistemas Marino-Costeros (DIMARCO) por su colaboración con la extracción y procesamiento de las muestras.

A la Universidad Jorge Tadeo Lozano y todo el personal de la sede de Santa Marta, especialmente a Alfonso Gamero y Alexi Torres por su colaboración y compañía durante los días largos en el laboratorio y la biblioteca.

Al profesor Gabriel Navas y al personal de la Universidad de Cartagena por su apoyo en la parte inicial del proyecto.

A la Universidad Nacional de Colombia Sede Caribe y el Instituto de Estudios en Ciencias del Mar (CECIMAR).

Al profesor Carlos Polo por su ayuda en el análisis de las muestras de isótopos estables.

A Daniel Ortiz y Mario Correal por su aporte en la construcción del documento.

A los docentes Valeria Rodríguez y Gonzalo Fajardo por su confianza durante mi trabajo como monitora, por exigirme cada vez más.

A todos aquellos que me animaron en los momentos de desasosiego, a mis amigos en Santa Marta por ser mi segunda familia, y a Mafe Pereira, mi incondicional hermanita de corazón.

CONTENIDO

	pág.
1. INTRODUCCIÓN	1
2. JUSTIFICACIÓN	3
3. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE	4
3.1 Marco teórico	4
3.1.1 Generalidades de la especie	4
3.1.2 Otolitos	6
3.1.3 Morfometría geométrica	8
3.1.4 Isótopos estables de carbono	10
3.2 Estado del arte	10
4. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN Y OBJETIVOS	14
4.1 Problema de investigación	14
4.2 Objetivos	14
4.2.1 Objetivo general	14
4.2.2 Objetivos específicos	14
5. HIPÓTESIS	15
6. METODOLOGÍA	16
6.1 Área de estudio	16
6.1.1 Santa Marta	16
6.1.2 Cartagena	17
6.2 Fase de campo	18
6.3 Fase de laboratorio	19
6.3.1 Morfometría del pez león y obtención de otolitos	19
6.3.2 Cuantificación de las razones isotópicas de carbono	20
6.3.3 Obtención de datos ambientales	20
6.4 Fase de gabinete	20
6.4.1 Toma, edición y digitalización de fotografías	20
6.4.2 Análisis de la información	22
7. RESULTADOS	24
8. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	31
9. CONCLUSIONES	35
10. RECOMENDACIONES	36
11. BIBLIOGRAFÍA	37

LISTA DE TABLAS

		pág.
Tabla 1.	Ubicación de los lugares de muestreo.....	19
Tabla 2.	Estadígrafos de las variables longitud total (LT) y peso total (PT) de los ejemplares capturados en Santa Marta y Cartagena. N: tamaño de la muestra, MA: media aritmética, DE: desviación estándar, v: coeficiente de variación, EE: error estándar, Min: valor mínimo, Máx: valor máximo.....	24
Tabla 3.	Pruebas de normalidad y homogeneidad de varianzas para las variables longitud total (LT) y peso total (PT) de los ejemplares capturados en Santa Marta y Cartagena. N: tamaño de la muestra.....	24
Tabla 4.	Clases de talla establecidas por la regla de Sturges para los individuos de las dos localidades. LT: longitud total (cm).....	25
Tabla 5.	Media aritmética -MA-, desviación estándar -DE- y supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas de la longitud total de los peces -LT (cm)- comparando entre sexos.....	26
Tabla 6.	Resultados del análisis de función discriminante con validación cruzada para la evaluación de hipótesis.....	28
Tabla 7.	Estadígrafos de los valores isotópicos de carbono de los ejemplares capturados en Santa Marta y Cartagena. N: tamaño de la muestra, MA: media aritmética, DE: desviación estándar, v: coeficiente de variación, EE: error estándar, Min: valor mínimo, Máx: valor máximo...	29
Tabla 8.	Pruebas de normalidad y homogeneidad de varianzas de los valores isotópicos de carbono de los ejemplares capturados en Santa Marta y Cartagena. N: tamaño de la muestra.....	29
Tabla 9.	Datos históricos de temperatura y salinidad en Santa Marta y Cartagena. MA: media aritmética, Mín: valor mínimo, Máx: valor máximo.....	30
Tabla 10.	Datos históricos de la longitud total (cm) y el peso total (g) de <i>P. volitans</i> en investigaciones realizadas en el Caribe. LT: longitud total, PT: peso total, N: tamaño de la muestra, MA: media aritmética, Mín: valor mínimo, Máx: valor máximo.....	31

LISTA DE FIGURAS

		pág.
Figura 1.	Estructura y partes principales de la <i>sagitta</i> del pez león (Franco, 2017).....	7
Figura 2.	Características del otolito de <i>P. volitans</i> A. Forma oblonga, B. <i>Sulcus acusticus</i> con apertura ostial, C. <i>Sulcus acusticus</i> en posición supramediana (Tuset <i>et al.</i> , 2008).....	7
Figura 3.	Características de la <i>cauda</i> presente en <i>P. volitans</i> (Tuset <i>et al.</i> , 2008).....	8
Figura 4.	Forma de las regiones anterior y posterior del otolito de <i>P. volitans</i> (Tuset <i>et al.</i> , 2008).....	8
Figura 5.	Aplicación del método de contorno en otolitos de salmón (Cadrin y Friedland, 1999).....	9
Figura 6.	Aplicación del método de puntos de referencia en el pez luna (Cadrin y Friedland, 1999).....	9
Figura 7.	Sectores de muestreo en Santa Marta. Los distintos colores resaltan los sectores muestreados 1. Bahía de Santa Marta (Morro), 2. Sector de Taganga, 3. Sector Granate-Isla Aguja (elaborado por Santiago Millán, 2017).....	17
Figura 8.	Sectores de muestreo en Cartagena. Los distintos colores resaltan los sectores muestreados. 1. Parque Nacional Natural Corales de Profundidad, 2. Parque Nacional Natural Corales del Rosario y San Bernardo, 3. Sector de Barú, 4. Sector de Tierra Bomba, 5. Sector del Bancos de Salmedina y Burbujas (elaborado por Santiago Millán, 2017).....	18
Figura 9.	Montaje diseñado para la toma de fotografías.....	21
Figura 10.	Edición de las fotografías.....	21
Figura 11.	Digitalización de puntos de referencia (<i>landmarks</i>).....	22
Figura 12.	Morfología del otolito <i>sagitta</i> del pez león a lo largo de sus clases de talla. A. Individuos de Santa Marta -STM-. B. Individuos de Cartagena -CTG- (los otolitos de las clases 1, 9 y 10 no se muestran porque no se recolectaron peces de esas tallas. Valor de escala = 1 mm. T: clase de talla.....	26
Figura 13.	Gráficos del análisis de ACP para la evaluación de hipótesis. A. Hipótesis de alometría. B. Hipótesis de simetría. C. Hipótesis de dimorfismo sexual. D. Hipótesis de poblaciones. Los gráficos de estructura de alambre (<i>wireframe</i>) representan la forma del otolito de cada grupo. D: derecho, I: izquierdo, H: hembra, M: macho, STM: Santa Marta, CTG: Cartagena.....	27
Figura 14	Histogramas de validación cruzada para la comparación pareada entre los grupos. A. Hipótesis de simetría. B. Hipótesis de dimorfismo sexual. C. Hipótesis de poblaciones.....	28
Figura 15	Gráfico de dispersión de los valores isotópicos de carbono encontrados en muestras de músculo de pez león en Santa Marta y Cartagena.....	29

RESUMEN

Los otolitos son estructuras calcáreas que se encuentran contenidas en el oído interno de los peces y participan en procesos auditivos y vestibulares para el equilibrio y la orientación de los mismos. El estudio de su forma es de gran interés ya que su variación puede estar dada por los factores ambientales bajo los cuales se desarrollan los individuos, llegando a ser clave en la ampliación del conocimiento sobre aspectos biológicos y ecológicos de la especie invasora *Pterois volitans*. Por este motivo se analizó la influencia ambiental en el desarrollo de esta especie a partir del análisis de la morfometría geométrica de los otolitos *sagitta* y de la cuantificación de las razones isotópicas de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) en dos ambientes del Caribe colombiano (Santa Marta y Cartagena). Se realizó la extracción y limpieza de 257 otolitos *sagitta* derechos e izquierdos junto con la cuantificación de las razones isotópicas de carbono extraídas de muestras de músculo de 134 individuos. Se llevó a cabo el análisis de la morfometría geométrica por medio de la digitalización de 30 puntos de referencia (*landmarks*). Se encontró que existe un cambio en la forma de los otolitos conforme avanza el desarrollo ontogénico a causa de la relación que se da entre el crecimiento de los peces y el tamaño de las estructuras, junto con la preferencia de hábitats y alimentación. Los otolitos derechos e izquierdos presentan diferencias en su forma por efecto de la variación en las condiciones ambientales y no son herramientas útiles en la determinación del sexo de los individuos de esta especie. Finalmente, las diferencias en los otolitos de peces recolectados en Santa Marta y Cartagena están dadas por las condiciones ambientales (principalmente la temperatura), las razones isotópicas (Santa Marta: $-17,5 \pm 1,2\text{‰ } \delta^{13}\text{C}$; Cartagena: $-16,3 \pm 0,8\text{‰ } \delta^{13}\text{C}$) y el alimento disponible en cada localidad.

Palabras clave: *Pterois volitans*, otolitos, morfometría geométrica, isótopos estables.

ABSTRACT

Otoliths are calcareous structures that are contained in the inner ear of fish and participate in auditory and vestibular processes for their balance and orientation. The study of its form is of great interest because its variation can be given by the environmental factors under which individuals develop, becoming key in the expansion of knowledge about biological and ecological aspects of the invasive species *Pterois volitans*. For this reason, it was analyzed the environmental influence in the development of this species from the analysis of the geometric morphometry of the *sagitta* otoliths and the quantification of the isotopic carbon ratios ($\delta^{13}\text{C}$) in two environments of the colombian Caribbean Sea (Santa Marta and Cartagena). The extraction and cleaning of 257 right and left *sagitta* otoliths was carried out together with the quantification of isotopic carbon ratios extracted from muscle samples of 134 individuals. The analysis of geometric morphometry was carried out through the digitization of 30 landmarks. It was found that there is a change in otoliths shape as the ontogenetic development progress due to the relation between the fish growth and the structures size, together with habitat and feeding preferences. Right and left otoliths have different shape due to the environmental conditions and are not useful tools in the determination of the sex of the individuals of this species. Finally, otoliths differences in fish collected in Santa Marta and Cartagena are given by environmental conditions (mainly temperature), isotopic ratios (Santa Marta: $-17,5 \pm 1,2\text{‰}$ $\delta^{13}\text{C}$; Cartagena: $-16,3 \pm 0,8\text{‰}$ $\delta^{13}\text{C}$) and the available food in each location.

Key words: *Pterois volitans*, otoliths, geometric morphometry, stable isotopes

1. INTRODUCCIÓN

El oído interno de los peces se encuentra situado adyacente al cerebro, dentro y ocasionalmente invaginado en el neurocráneo. Cuenta con tres canales semicirculares y tres órganos otolíticos: el utrículo, la lagena y el sáculo. Los canales y las ampollas asociadas detectan aceleraciones angulares, mientras que los órganos otolíticos parecen tener función auditiva y vestibular para el equilibrio y la orientación (Popper y Lu, 2000; Campana, 2004). Cada órgano otolítico contiene un otolito calcáreo que es aproximadamente tres veces más denso que el resto del cuerpo del pez, estos otolitos (la *sagitta* en el sáculo, el *asteriscus* en la lagena y el *lapillus* en el utrículo) se encuentran cerca de un epitelio sensorial y están conectados por medio de una membrana delgada (Popper y Lu, 2000).

Los otolitos han llegado a ser una de las estructuras más importantes para entender la vida de los peces, ya que los anillos de crecimiento (*annuli*) que se forman en éstos registran la edad y el crecimiento de un pez desde que el huevo eclosiona hasta que el individuo muere (Campana, 2004). Actualmente se reconoce que el crecimiento y forma del otolito se producen bajo una doble regulación: la forma general está dada genéticamente, pero existe una fuerte variabilidad relacionada con los factores ambientales bajo los cuales se desarrollan los individuos y con los que se encuentran en constante interacción, viéndose afectados por factores tales como la profundidad, la temperatura del agua y el tipo de sustrato (Vignon y Morat, 2010). Es por esto que la información que se obtiene a partir del análisis de éstas estructuras puede ser útil en la construcción de una base sólida de información sobre especies de peces invasoras, las cuales representan una problemática ambiental que conduce a la disminución de la diversidad biológica y de la capacidad que llegan a tener los ecosistemas para brindar bienes y servicios de importancia para el ser humano (Vitousek *et al.*, 1997; Mooney y Cleland, 2001; Morris *et al.*, 2009; Rilov, 2009; Chasqui *et al.*, 2017).

Como resultado de la introducción de especies a causa de algunas actividades humanas, la composición de las especies de diversos ecosistemas en el Caribe está siendo homogenizada, causando una grave amenaza a la salud del ecosistema y efectos dramáticos en la pérdida de biodiversidad y el deterioro de hábitats (Mack *et al.*, 2000). De

forma particular, en Colombia la presencia de la especie exótica invasora *Pterois volitans* (pez león) fue registrada por primera vez en la Isla de Providencia a finales del año 2008 (Schofield, 2009), y en el 2009 se documentó en la costa continental colombiana (González *et al.*, 2009). Se espera que las densidades de pez león varíen dependiendo de factores tales como la estacionalidad, reclutamiento local, disponibilidad de nichos locales y presión de pesca, llegando a representar cambios importantes en la diversidad marina (Morris *et al.*, 2009; González-Corredor, 2014). Ejemplares de esta especie han llegado a encontrarse en diferentes ecosistemas, como arrecifes coralinos, fanerógamas marinas y manglares, que dan refugio y son zona de desove y crianza de diferentes organismos, y en los cuales la presencia del pez león puede generar impactos negativos al ser un depredador activo que consume especies de importancia comercial y ecológica (Arbeláez y Acero, 2011; Barbour *et al.*, 2011).

Por lo anterior, en esta investigación se analizó la ecomorfología de los otolitos *sagitta* y las razones isotópicas de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) en ejemplares de *P. volitans* de Santa Marta y Cartagena, en el marco del proyecto "Biología y ecología del pez león en dos ambientes del Caribe colombiano. Fase V" (convocatoria interna 15 de la Dirección de Investigación, Creación y Extensión -DICE- de la Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano) del grupo de investigación Dinámica y Manejo de Ecosistemas Marino-Costeros -DIMARCO-, como fundamento del trabajo de grado para la formación en investigación para optar a los títulos de Bióloga Marina y Bióloga Ambiental, articulando el conocimiento adquirido en ambos programas con el fin de generar información valiosa y requerida en la actualidad para los dos campos de acción y aportar a futuros estudios sobre el manejo de esta especie.

2. JUSTIFICACIÓN

La presencia del pez león a lo largo de la costa este de Norteamérica representa la primera introducción exitosa de un pez marino desde el Pacífico occidental, y en general para el Atlántico noroccidental y el Caribe es una de las invasiones marinas más rápidas de la historia (Whitfield *et al.*, 2002; Morris *et al.*, 2009). Su establecimiento ha llegado a ser una amenaza potencial para los recursos pesqueros, las comunidades de peces nativos y la salud humana -particularmente para pescadores, buzos y turistas-, debido a sus espinas venenosas, estilo de depredación y la ausencia de depredadores que regulen efectivamente sus números (Whitfield *et al.*, 2002; Morris *et al.*, 2009; González *et al.*, 2011). La introducción de especies exóticas en un entorno nuevo puede tener consecuencias negativas graves para el medio ambiente, para la economía y para la salud de los seres humanos (Mack *et al.*, 2000; Briggs, 2007; Gracia *et al.*, 2011; Moonsammy *et al.*, 2011). Llega a representar altos costos respecto a pérdidas e impactos que a largo plazo pueden causar la extinción de especies nativas por competencia de recursos, depredación, transferencia de patógenos, hibridación y alteración del hábitat (Mack *et al.*, 2000; Gutiérrez, 2006; Briggs, 2007).

En Colombia, la Resolución 207 del 3 de febrero de 2010 incluye a *P. volitans* en el listado de especies exóticas invasoras y posteriormente, de acuerdo con la Resolución 0132 del 4 de agosto de 2010 se adopta el “Protocolo para la extracción y control de la especie exótica invasora pez león (*Pterois volitans*) en las áreas del Sistema de Parques Nacionales Naturales” (MAVDT, 2010a; 2010b). Es por esto que diferentes instituciones y grupos de investigación han llevado a cabo iniciativas de educación ambiental, investigación, control, divulgación y socialización de la presencia de la especie, evaluando métodos de extracción y manipulación que han permitido adquirir experiencia para su control a nivel local y regional (MADS, 2013). Los estudios han resaltado la necesidad de implementar medidas de acción y control así como incrementar las investigaciones enfocadas en la alimentación, hábitat, crecimiento, reproducción, desarrollo y dispersión larval, y evaluar los factores que controlan su densidad en hábitats específicos (Morris *et al.*, 2009; Arbeláez y Acero, 2011). Es por esto que el presente trabajo resulta útil para ampliar el conocimiento sobre aspectos biológicos y ecológicos de esta especie como herramientas para diseñar planes y acciones de manejo y control en el Caribe colombiano.

3. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

3.1 Marco teórico

3.1.1 Generalidades de la especie

La especie *P. volitans* pertenece a la familia Scorpaenidae y se conoce comúnmente como pez león. En su hábitat nativo se encuentra solitario, asociado a rocas, corales y sustratos arenosos (Schultz, 1986), y ha llegado a ser ampliamente comercializado por su gran popularidad en el negocio de acuarios ornamentales (Freshwater *et al.*, 2009).

Naturalmente se distribuye a lo largo del Pacífico occidental desde Japón hasta Australia, en Australia Occidental y en el Pacífico sur (Schultz, 1986). Su invasión en el océano Atlántico inició en las costas de Norteamérica, específicamente en Florida, a lo largo de la porción latitudinal de la plataforma continental del sudeste de Estados Unidos, desde donde empezó a distribuirse hacia el mar Caribe (Whitfield *et al.*, 2002), encontrando ambientes con hábitats coralinos, formaciones rocosas y sustratos arenosos, temperaturas entre los 18-30 °C, pH de 8,0 a 8,5 y salinidad de 30 a 40 (Baptiste *et al.*, 2010).

Antiguamente esta especie fue catalogada como un sinónimo de *Pterois miles* hasta que fueron separadas y reconocidas como especies independientes mediante la implementación de morfometría, merística y biología molecular (Schultz, 1986; Freshwater *et al.*, 2009). Estudios como los de Betancur *et al.* (2011) y Valdez-Moreno *et al.* (2012) han demostrado, a partir de análisis molecular, que la especie presente en el Caribe corresponde con *P. volitans*.

3.1.1.1 Características morfológicas

Presenta bandas oscuras a lo largo de la cabeza y el cuerpo que incrementan en número con el crecimiento del individuo, estas pueden ser de color rojo-café, café oscuro o negro en un fondo pálido. Sobre la línea lateral tienen de uno a siete puntos blancos (especialmente en las tallas más grandes), pueden presentar puntos adicionales o rayas por debajo y en la base interna de los radios de las aletas superiores (Schultz, 1986).

Ostentan 13 espinas en las aletas dorsales, 11 radios dorsales, 7 radios anales y un tentáculo supraorbital. En aguas más profundas usualmente no tienen bandas en la parte

inferior de la cabeza, y las aletas pectorales y pélvicas son más transparentes, con pigmentos oscuros más concentrados (Schultz, 1986). Poseen glándulas venenosas en las 13 espinas dorsales, 3 espinas anales y 2 espinas pélvicas, que sirven como protección para los elementos glandulares blandos y como un medio mecánico para introducir veneno en tejidos extraños (Halstead *et al.*, 1955).

En la caracterización taxonómica realizada por González *et al.* (2011) encontraron que para la población residente en el Caribe colombiano la aleta dorsal junto con sus 13 espinas venenosas alcanza el 44,5% de la longitud estándar (LE) del cuerpo del animal, y la aleta pectoral el 99,8% de la LE.

3.1.1.2 Reproducción

Fishelson (1975) precisa que la mayoría de sus comportamientos reproductivos se dan cuando hay oscuridad, son gonocóricos y sólo presentan aparente dimorfismo sexual en eventos reproductivos. Durante las etapas iniciales del cortejo se les puede encontrar en grupos de 3 a 8 individuos.

Los machos toman una coloración más oscura que las hembras, desarrollan comportamientos reproductivos de *searching*, *head-up*, *circling* y *lateral pressing* durante el cortejo, y conducen a las hembras hacia la superficie para realizar el desove (Fishelson, 1975). Según observaciones realizadas en las costas de Carolina del Norte y las Bahamas se ha encontrado que esta especie es capaz de reproducirse en todas las temporadas del año (Morris *et al.*, 2009).

3.1.1.3 Alimentación

Al momento de cazar, después de que se ha fijado en una presa, se mueve lentamente hacia ella utilizando sus aletas pectorales como un escudo que impide que la presa vea el movimiento de la aleta caudal. Lo anterior, junto con su patrón de coloración, permite que se reduzca al mínimo la posibilidad de ser visto por la presa. También suele dirigirse hacia la superficie, permaneciendo inmóvil aproximadamente entre 20 y 30 cm de profundidad, esperando la llegada de cardúmenes de los cuales se puede alimentar (Fishelson, 1975). Sobre la población residente en el Caribe colombiano se ha documentado que practica una

estrategia de acorralamiento, viéndose favorecida por la forma de sus aletas pectorales (González *et al.*, 2011).

En su composición dietaria se ha encontrado preferencia por peces teleósteos (principalmente las familias Labridae, Pomacentridae, Haemulidae y Gobiidae con las especies *Thalassoma bisfaciatum*, *Haemulon flavolineatum*, *H. aurolineatum*, *Apogon quadrisquamatus* y *Stegastes partitus* en el Magdalena y *T. bisfaciatum*, *S. planifrons* y *Scarus* sp. en Bolívar) y crustáceos (principalmente las familias Palaemonidae y Squillidae), siendo algunas de ellas de importancia ecológica y económica a nivel local (Valdez-Moreno *et al.*, 2012; Gómez-Pardo, 2014). Además, se ha evidenciado canibalismo con aparente preferencia por individuos de estadios juveniles (Valdez-Moreno *et al.*, 2012).

Gómez-Pardo (2014) afirma que la alta riqueza de presas de *P. volitans* indica es una especie generalista que se alimenta de una amplia variedad de presas disponibles, encontrando crustáceos en la dieta de individuos pequeños, y peces como componente principal de la dieta de especímenes de tallas mediana y grande.

3.1.2 Otolitos

Los otolitos son formaciones de carbonato de calcio y otras sales inorgánicas que se desarrollan dentro de una matriz proteica en el oído medio de los peces teleósteos (Tuset *et al.*, 2008), se encuentran contenidos en tres órganos otolíticos, la *sagitta* en el sáculo, el *asteriscus* en la lagena y el *lapillus* en el utrículo, siendo la *sagitta* por lo general el más grande y más utilizado para evaluaciones de microestructura (Campana y Neilson, 1985; Popper y Lu, 2000). Tuset *et al.* (2008) describen que la *sagitta* es una estructura comprimida lateralmente, más larga que ancha y más ancha que gruesa, con una depresión longitudinal estrecha a lo largo de su cara media, conocida como el *sulcus acusticus* (Figura 1).

El *sulcus* se encuentra dividido en dos secciones: el *ostium* y la *cauda*, las cuales están limitadas por un borde más o menos desarrollado y evidente (la cresta), y tienen por lo general una elevación llamada *collicullum*. El *ostium* se encuentra en posición anterior, por lo general hasta el borde anterior del otolito, en donde se abre en la *excisura ostii*, y la *cauda*

es posterior, frecuentemente cerrada, por lo general con una punta curvada ventralmente que no alcanza el margen posterior del otolito (Tuset *et al.*, 2008).

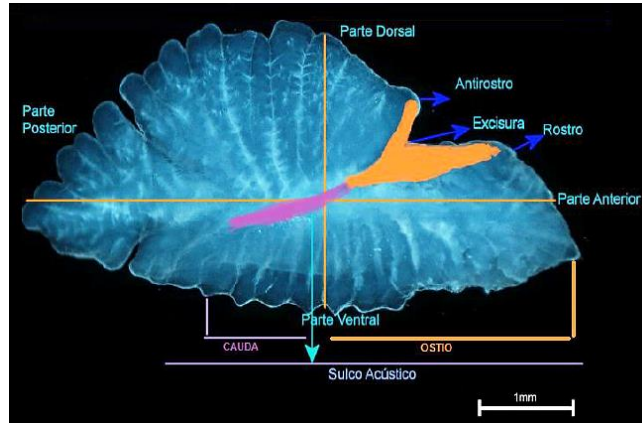


Figura 1. Estructura y partes principales de la *sagitta* del pez león (Franco, 2017).

En el *sulcus acusticus* el tipo de apertura que se presenta, su posición y la relación morfológica entre el *ostium* y la *cauda*, son particularmente importantes en la identificación de especies (Tuset *et al.*, 2008). De acuerdo con Aguilar-Perera y Quijano-Puerto (2016) el otolito de *P. volitans* es oblongo, con un *sulcus acusticus* heterosulcoide con apertura ostial en posición supramedia (Figura 2).

Lo anterior quiere decir que el *ostium* y la *cauda* se encuentran claramente diferenciados, el primero está abierto ampliamente en el margen anterior del otolito, y la *cauda* está cerrada lejos del margen posterior; la posición supramedia indica que se encuentra generalmente colocado por encima de la línea media longitudinal del otolito y que el área ventral es notablemente más grande que el área dorsal (Figura 2C; Tuset *et al.*, 2008). La *cauda* es tubular y recta (Figura 3; Aguilar-Perera y Quijano-Puerto, 2016).

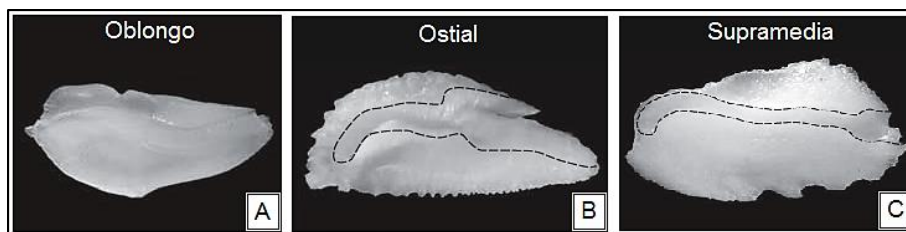


Figura 2. Características del otolito de *P. volitans* **A.** Forma oblonga, **B.** *Sulcus acusticus* con apertura ostial, **C.** *Sulcus acusticus* en posición supramediana (Tuset *et al.*, 2008).

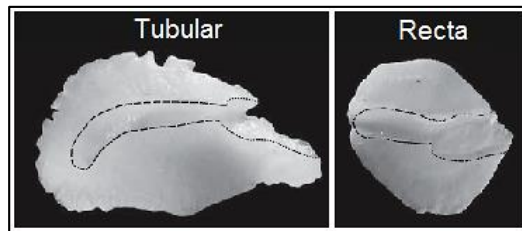


Figura 3. Características de la *cauda* presente en *P. volitans* (Tuset *et al.*, 2008).

En la región anterior se pueden encontrar el *rostrum*, el *antirostrum* y la *excisura ostii*. El *rostrum* es una protuberancia ubicada en el margen anterior del otolito bajo la apertura del *ostium*, y frecuentemente incluye el punto más anterior del otolito. El *antirostrum*, más pequeño que el *rostrum*, se desarrolla sobre la apertura del *ostium* cuando la *excisura* forma un corte. La *excisura ostii* es la porción del margen anterior del otolito en donde se abre el *ostium* (Tuset *et al.*, 2008). En *P. volitans* las regiones anterior y posterior son puntiagudas y de márgenes crenados (Figura 4; Aguilar-Perera y Quijano-Puerto, 2016), lo que quiere decir que la región tiene solamente una extremidad conspicua, bien desarrollada, que forma un ángulo claramente agudo, y que los márgenes son ondulados y se encuentran formando crenaciones más o menos redondas y superficiales (Tuset *et al.*, 2008).

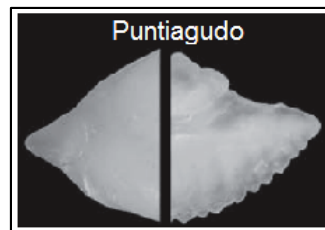


Figura 4. Forma de las regiones anterior y posterior del otolito de *P. volitans* (Tuset *et al.*, 2008).

3.1.3 Morfometría geométrica

La morfometría geométrica es una herramienta cuantitativa que permite llevar a cabo análisis de forma para dilucidar la manera en que diferentes procesos biológicos generan cambios en individuos o partes de los mismos, p. ej. el desarrollo ontogénico, la adaptación a factores geográficos locales, la presencia de enfermedades, etc. (Zelditch *et al.*, 2004). La forma se ha definido matemáticamente como toda la información geométrica sobre las propiedades que son invariantes a la escala, translación y rotación de un objeto. Debido a que se requieren múltiples características geométricas para caracterizar la forma de una

figura, incluso si es muy simple, ésta resulta ser un fenotipo inherentemente multidimensional (Klingenberg y Monteiro, 2005).

Las modificaciones en la forma de una estructura pueden ser indicadores de roles funcionales, respuestas a un factor específico o diferencias en procesos de crecimiento y morfogénesis (Zelditch *et al.*, 2004). La morfometría geométrica puede dividirse en dos categorías generales: (I) métodos de contorno *-outlines-* (Figura 5) y (II) métodos de puntos de referencia *-landmarks-* (Figura 6). Los primeros utilizan funciones trigonométricas u otras funciones empíricas para representar las coordenadas del contorno de la forma, tales como polinómicas y series de Fourier, mientras que los puntos de referencia cuantifican la deformación de una forma a otra a partir de un sistema de coordenadas, implementando grillas biortogonales, ajuste rotacional y análisis de Procrustes (Cadrin y Friedland, 1999).

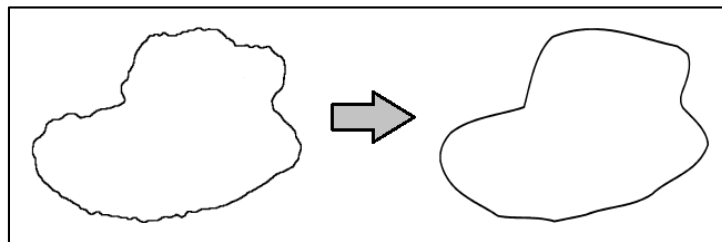


Figura 5. Aplicación del método de contorno en otolitos de salmón (Cadrin y Friedland, 1999).

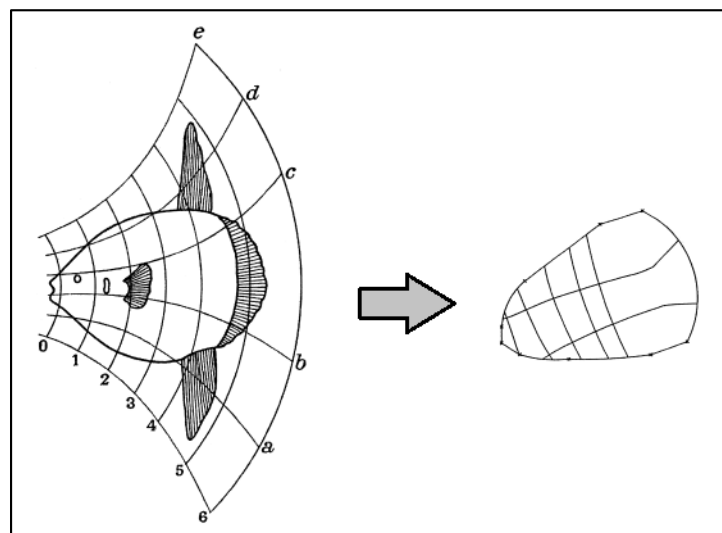


Figura 6. Aplicación del método de puntos de referencia en el pez luna (Cadrin y Friedland, 1999).

3.1.4 Isótopos estables de carbono

Los isótopos estables son átomos que además de presentar el mismo número de protones y electrones pero diferente número de neutrones, son energéticamente estables, no se descomponen y no son radioactivos. Son medidos por la técnica de espectrometría de masas de relaciones isotópicas (IRMS), con la cual se separan los átomos o moléculas cargadas en función de su relación masa/carga (Michener y Lajtha, 2007). En ecología son utilizados aquellos isótopos que pertenecen a los elementos más ligeros (p. ej. C, N, H, S, O), ya que se encuentran ampliamente distribuidos en los compuestos biológicos. En los ecosistemas marinos, en el flujo de materia orgánica y la estructura de las redes alimenticias, los isótopos estables han llegado a ser un medio importante para caracterizar estructuras tróficas ya que registran la información de la fuente y el nivel trófico (Peterson y Fry, 1987; Michener y Lajtha, 2007).

Los isótopos de carbono reflejan la dieta de los animales en un 1‰, ya que se presenta un enriquecimiento sobre el isótopo más pesado en el animal (^{13}C). Este proceso se denomina “Factor de enriquecimiento trófico” (TEF por sus siglas en inglés), y puede ser atribuido a la pérdida de ^{12}C durante la respiración, la absorción de compuestos enriquecidos en ^{13}C durante la digestión y/o asimilación, o el fraccionamiento metabólico durante la síntesis de diferentes tipos de tejidos (Michener y Lajtha, 2007).

3.2 Estado del arte

El primer avistamiento de *P. volitans* en el Caribe colombiano se dio en 2008 en la Isla de Providencia (Schofield, 2009). Posteriormente González *et al.* (2009) reportaron seis individuos en el Parque Nacional Natural Tayrona (PNN Tayrona) y aguas adyacentes del área de Santa Marta. Arbeláez y Acero (2011) hallaron cuatro especímenes de entre 3 y 10 cm de longitud total (LT) asociados a raíces de mangle alrededor del complejo lagunar al sur de la bahía de Chengue (PNN Tayrona). Martínez-Viloria *et al.* (2011) documentaron la captura de un ejemplar de 26 cm LT y 253 g frente al Santuario de Fauna y Flora Los Flamencos en el municipio de Riohacha. Viloria y Acero (2015) reportaron la captura de un ejemplar de 28,5 cm LT y 500 g en la Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM).

Betancur *et al.* (2011) reconstruyeron la invasión del pez león al Gran Caribe mediante el ADN mitocondrial de individuos recolectados en Bermudas, Carolina del Norte, Bahamas,

Gran Caimán, San Andrés y Santa Marta. De los 755 ejemplares analizados, 734 fueron especímenes de *P. volitans* y solo 21 de *P. miles*. Esta última especie solo se circunscribió a USA y Bermuda, no encontrándose en el Caribe. Encontraron nueve haplotipos de *P. volitans*, tres de los cuales se detectaron en Colombia. La menor diversidad genética encontrada en el Atlántico occidental con respecto a su hábitat nativo en el Pacífico confirmó que la introducción en el Atlántico es resultado de un fuerte efecto fundador en Florida y no de múltiples introducciones independientes en diversos lugares. González *et al.* (2011) realizaron la caracterización taxonómica de la población residente en los arrecifes de la región de Santa Marta usando herramientas merísticas y morfométricas. Fueron colectados 280 ejemplares correspondientes en su totalidad con la especie *P. volitans*, en los que fue observado que la aleta dorsal (conformada por 13 espinas venenosas) representa el 44,5% de la longitud estándar (LE) del cuerpo del animal y la aleta pectoral corresponde con el 99,81% de la LE.

Por otro lado, Muñoz *et al.* (2011) determinaron la dieta inmediata y la dieta a largo plazo de *P. volitans* en Carolina del Norte (Estados Unidos), analizando el contenido estomacal (que representa la dieta del animal durante las últimas horas o días) y los isótopos estables (ofrecen información sobre el estado trófico del pez león al proporcionar una integración de la dieta en semanas anteriores o meses). Encontraron que el pez león posee una dieta carnívora generalista. Entre sus presas predominan los peces de 16 familias, principalmente Serranidae, Scaridae, Haemulidae y Carangidae, a pesar de esto la importancia de las presas depende en mayor medida de su disponibilidad.

Con el fin de hacer una aproximación a la ecología trófica de ésta especie en Colombia, Muñoz-Escobar y Gil-Agudelo (2012) recolectaron 65 individuos de *P. volitans* en bahías protegidas del PNN Tayrona y en las bahías de Taganga, Santa Marta y Gaira. Llevaron a cabo la identificación de las presas presentes en los contenidos estomacales de los especímenes por medio de claves especializadas, y realizaron un análisis depredador-presa para determinar el tamaño máximo de las presas del pez león. Encontraron que *P. volitans* se alimenta principalmente de peces, muchos de importancia ecológica y económica, especialmente de las familias Serranidae, Apogonidae, Gobiidae, Clupeidae y Pomacentridae.

Después Gómez-Pardo (2014) realizó el análisis del contenido estomacal a 810 estómagos de pez león con el objetivo de determinar sus hábitos tróficos en los departamentos de Magdalena, Bolívar y Chocó, encontrando que éste se alimenta de peces y crustáceos, principalmente de las familias Labridae, Pomacentridae, Haemulidae, Gobiidae, Palaemonidae y Squillidae, concluyendo que es de hábitos generalistas y se alimenta de una amplia variedad de presas disponibles. Seguido a esto Gómez (2015) estudió los hábitos tróficos y la estructura de tallas de 203 individuos capturados en Santa Marta y Cartagena, determinando, mediante el índice de importancia relativa, que las presas más importantes son *Decapterus punctatus*, *Stegastes planifrons*, *Thalassoma bifasciatum* y *Apogon affinis*.

Recientemente Romero (2018) llevó a cabo la evaluación de la dieta de *P. volitans* en Santa Marta y Cartagena, analizando el contenido estomacal de 568 individuos. Identificó 56 especies/taxones de presas entre peces y crustáceos, y encontró que las presas de mayor preferencia en las dos localidades son *Stegastes* sp., *T. bifasciatum*, *D. punctatus* y el crustáceo *Eugonatonotus crassus*. Estableció ocho clases de talla (entre 12,3 y 44,3 cm) y encontró la mayor diversidad de presas en las tallas 16,3 y 24,2 cm.

Bayraktarov *et al.* (2014) estimaron la abundancia mensual de *P. volitans* y su longitud corporal durante el año 2012 en cuatro bahías del PNN Tayrona con el fin de determinar si las abundancias de esta especie cambian con el tiempo, y si existen diferencias entre la estación seca y la lluviosa. Encontraron abundancias de $2,9 \pm 0,9$ individuos ha^{-1} , las cuales resultan ser muy similares a las reportadas para el Indo-Pacífico, longitudes de 20 a 25 cm, y diferencias espaciales en las abundancias y las longitudes corporales entre las diferentes bahías, sugiriendo que existe preferencia de hábitat.

Posteriormente Hernández-Abello *et al.* (2015), con el fin de documentar la preferencia al sustrato por parte del pez león en zonas arrecifales de Santa Marta así como su estructura de tallas, a través de censos visuales delimitaron cuatro clases de talla de acuerdo con la distribución de frecuencia (entre 8 y 35 cm), y evidenciaron que la abundancia de esta especie puede estar marcada por el tipo de estructura en las formaciones arrecifales, a pesar de que puedan presentar una posible adaptación a todo tipo de condición arrecifal.

Los estudios sobre otolitos son escasos en el pez león. El primero lo realizó Rubio (2015), quien recolectó 110 peces león con el fin de analizar la ecomorfología de los otolitos *sagitta* de la población presente en el Área Natural Protegida Arrecifes de Puerto Morelos. Por medio de morfometría tradicional y morfometría geométrica encontró que la morfología y topografía de la *sagitta* varía de acuerdo con el desarrollo de los individuos, los cambios más importantes en la forma de los otolitos ocurren en las clases de talla mayores y esta misma variable resulta diferente dependiendo de la coloración de los organismos (clara, intermedia u oscura), adicionalmente, que los individuos de esta especie presentan hábitos de vida epipelágica y hábitos que los asocia a fondos blandos. Aguilar-Perera y Quijano-Puerto (2016), con el objetivo de describir las relaciones entre longitud, peso y dimensiones de otolitos *sagitta* del pez león del Parque Nacional Arrecife Alacranes (al norte de la península de Yucatán, México), recolectaron 472 peces con los que calcularon las relaciones longitud otolito – longitud pez, peso otolito – peso pez, peso otolito – longitud pez y peso otolito – longitud otolito. Encontraron que la variable más relacionada con la longitud del pez es el peso de los otolitos, y caracterizaron al otolito del pez león como oblongo, con regiones anterior y posterior puntiagudas y de márgenes crenados, heterosulcoide con apertura ostial en posición supramedia y *cauda* tubular y recta.

Finalmente, el único trabajo adelantado en Colombia fue realizado por Franco (2017), quien caracterizó morfológica y morfométricamente los otolitos *sagitta* de 137 ejemplares de *P. volitans* provenientes de dos ambientes arrecifales en los departamentos del Magdalena y Bolívar en el Caribe colombiano. Determinó siete clases de talla y no encontró diferencias morfológicas significativas entre los otolitos derecho e izquierdo. Las formas circulares tienden a estar en las primeras tallas y se hacen más rectangulares conforme avanza la ontogenia. La morfología de los otolitos *sagitta* muestra tendencia a una forma oblonga-fusiforame con una cisura no muy desarrollada, un rostro marcado, un atirrostro presente, márgenes lobulados o crenados y alta variación en la parte posterior. También evidenció diferencias morfométricas entre tallas y lugares, y documentó que la caracterización morfológica y morfométrica de ésta especie presenta dificultades dado que hay una alta variabilidad entre coespecíficos, posiblemente por la plasticidad que se pueda presentar al colonizar diversos ambientes.

4. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN Y OBJETIVOS

4.1 Problema de investigación

Considerando los potenciales efectos producidos por la especie invasora *P. volitans* sobre los ecosistemas marinos y la necesidad de información sobre su biología y ecología, la evaluación de la morfometría geométrica de los otolitos *sagitta* y la cuantificación de las razones isotópicas de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) ampliará la información de esta especie para que las autoridades pertinentes actualicen las herramientas de manejo y control en el Caribe colombiano. Por eso se pretende responder la siguiente pregunta ¿Existen diferencias en los patrones morfométricos de los otolitos *sagitta* del pez león, dadas por la etapa del desarrollo ontogénico, la simetría, el sexo y la localidad de los individuos?

4.2 Objetivos

4.2.1 Objetivo general

Evaluar la influencia ambiental en el desarrollo de la especie invasora *P. volitans* a partir del análisis de la morfometría geométrica de los otolitos *sagitta* y de la cuantificación de las razones isotópicas de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) en ejemplares provenientes de Santa Marta y Cartagena en el Caribe colombiano.

4.2.2 Objetivos específicos

- ✓ Determinar las variaciones en la forma de los otolitos *sagitta* del pez león en distintas etapas de su desarrollo ontogénico.
- ✓ Evaluar si existe desigualdad entre los otolitos *sagitta* derecho e izquierdo del pez león.
- ✓ Determinar si existen diferencias en los otolitos *sagitta* del pez león entre sexos y entre localidades (Santa Marta y Cartagena).
- ✓ Determinar si existen diferencias entre las razones isotópicas de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) de especímenes de Santa Marta y Cartagena.

5. HIPÓTESIS

- ✓ Se presentará variación de los otolitos *sagitta* en relación al desarrollo ontogénico de la especie.
- ✓ Se encontrará simetría entre los otolitos *sagitta* derecho e izquierdo del pez león.
- ✓ Se encontrarán diferencias en los otolitos *sagitta* dadas por el sexo y las localidades.
- ✓ Se espera que en Santa Marta se presenten valores isotópicos de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) más altos debido al evento de surgencia que genera una mayor disponibilidad de nutrientes y por ende mayor biomasa de presas.

6. METODOLOGÍA

6.1 Área de estudio

El territorio marino y costero del Caribe colombiano se encuentra en el extremo noroccidental de Suramérica. Posee cerca de 1.600 km de costas y un área marítima aproximada de 532.154 km² (Tabares *et al.*, 2009; Prato y Reyna, 2015). La plataforma continental se caracteriza por la presencia de bajos arrecifales y archipiélagos con formaciones coralinas (Rangel-Buitrago e Idárraga-García, 2010). En la zona insular se presentan islas, bajos e islas cayos, y se destacan numerosas elevaciones, colinas y montes submarinos, en los que se encuentran diferentes formaciones arrecifales (Tabares *et al.*, 2009).

6.1.1 Santa Marta

El área de Santa Marta (departamento del Magdalena) está ubicada en el sector central de la costa Caribe colombiana, entre los 11°15'-11°22' N y 73°57'-74°12' O, e incluye las bahías de Taganga, Santa Marta y el PNN Tayrona (Figura 7). A nivel geomorfológico se encuentra determinada por el macizo montañoso de la Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM) cuyas estribaciones llegan hasta el mar alternando bahías con playas arenosas y cabos rocosos con acantilados. En esta zona la plataforma continental es corta, prácticamente ausente, llegando a encontrar profundidades de más de 500 m a distancias cortas desde la línea de costa (Díaz *et al.*, 2000).

Las condiciones climáticas están determinadas por el desplazamiento norte-sur de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), definiendo, según Franco-Herrera (2005), una época lluviosa y una seca a lo largo del año y dos fases transicionales: seca mayor (diciembre-abril), lluviosa menor (mayo-junio), seca menor (julio-agosto) y lluviosa mayor (septiembre-noviembre). Además, se presenta la influencia de los vientos alisios del noreste durante la época seca, que producen el fenómeno local de surgencia disminuyendo la temperatura superficial del agua a 21°C e incrementando la concentración de nutrientes. Durante la temporada de lluvias la escorrentía continental reduce la salinidad e incrementa la turbidez de forma considerable (Garzón-Ferreira y Díaz, 2003).

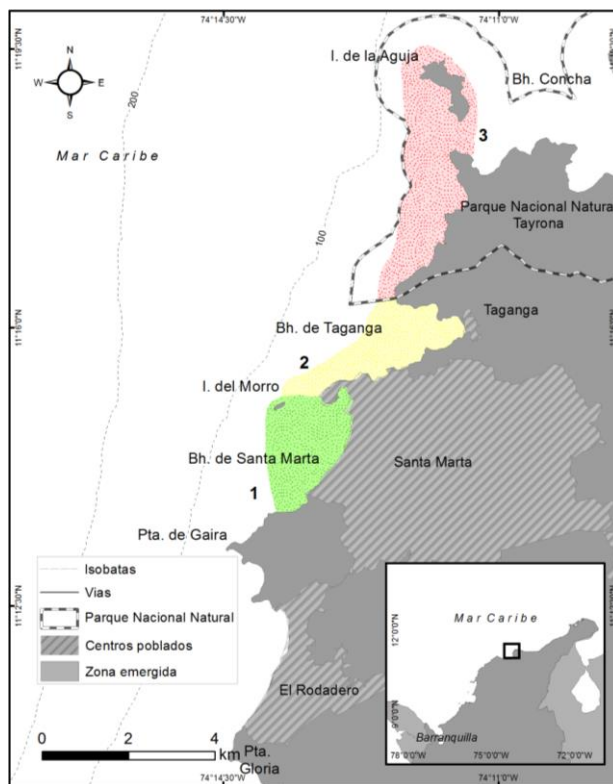


Figura 7. Sectores de muestreo en Santa Marta. Los distintos colores resaltan los sectores muestreados **1.** Bahía de Santa Marta (Morro), **2.** Sector de Taganga, **3.** Sector Granate-Isla Aguja (elaborado por Santiago Millán, 2017).

6.1.2 Cartagena

El área de Cartagena (departamento del Bolívar) también está ubicada en el sector central de la costa Caribe colombiana, entre los $10^{\circ}07' - 10^{\circ}14' N$ y $75^{\circ}37' - 75^{\circ}57' O$, e incluye la bahía de Cartagena, la península de Barú, Islas del Rosario y bajos aledaños (Figura 8). Los fondos submarinos de toda el área y la porción emergida de las Islas del Rosario hacen parte del Parque Nacional Natural Corales del Rosario y San Bernardo (Díaz *et al.*, 2000).

Su localización con respecto al régimen de vientos y corrientes ha dado lugar a variados ambientes y asociaciones bióticas que hacen que se trate de una de las áreas coralinas más desarrolladas geomorfológica y estructuralmente del Caribe colombiano (Díaz *et al.*, 2000), a pesar de esto las Islas se ven afectadas por los aportes de agua dulce y sedimentos continentales arrastrados por el río Magdalena, principalmente en los meses de octubre y noviembre (DIMAR - CIOH, 2009).

En este sector, al igual que en Santa Marta, la plataforma se ve influenciada por la acción de los vientos Alisios del NE que modulan el patrón de oleaje y la intensidad de la contracorriente de Panamá, generando una estacionalidad climática marcada con presencia de épocas secas y lluviosas (Cendales *et al.*, 2002).

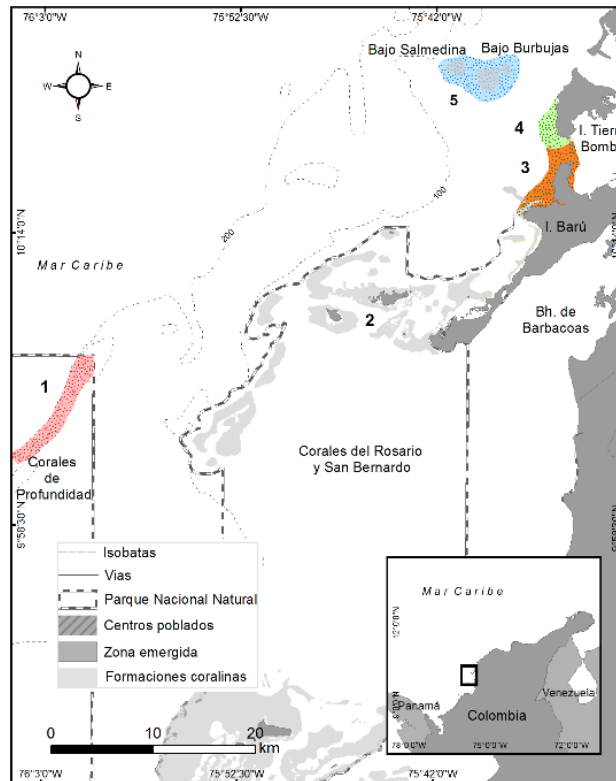


Figura 8. Sectores de muestreo en Cartagena. Los distintos colores resaltan los sectores muestreados. **1.** Parque Nacional Natural Corales de Profundidad, **2.** Parque Nacional Natural Corales del Rosario y San Bernardo, **3.** Sector de Barú, **4.** Sector de Tierra Bomba, **5.** Sector del Bancos de Salmedina y Burbujas (elaborado por Santiago Millán, 2017).

6.2 Fase de campo

Se hicieron muestreos bimestrales en Santa Marta y Cartagena entre marzo de 2016 y agosto de 2017 en los sitios indicados en la Tabla 1. Esta fase fue realizada por Franco (2017) para hacer la caracterización morfológica y morfométrica de otolitos del pez león, por lo cual se describe tanto lo llevado a cabo en campo y en laboratorio por Franco (2017) como lo que se realizó en el presente estudio.

Tabla 1. Ubicación de los lugares de muestreo.

Localidad	Sector	Lugares de muestreo	Coordenadas del sector
Santa Marta	Bahía de Taganga	Caga Buzo	11°15'09" - 11°16'02" N 74°13'17" - 74°11'28" O
		Remanso	
	Punta Venado-Isla Aguja	Granate	11°16'16" - 11°18'15" N 74°13'24" - 74°11'30" O
		Isla Aguja	
Cartagena	Banco Salmedina	Bajo Salmedina	10°21'15" - 10°23'10" N 75°38'05" - 75°41'45" O
		Bajo Burbujas	
	Tierra Bomba	El Bongo	10°16'23" - 10°22'55" N 75°38'43" - 75°38'15" O
		El Horno	
	Barú	Punta Gigante	10°19' - 10°18' N 75°42' - 75°31' O
	PNNCP	Parque Nacional Natural Corales de Profundidad	09°43'16" - 10°07'30" N 76°00'16" - 76°17'41" O

Los ejemplares fueron recolectados siguiendo lo recomendado por el “Protocolo de extracción y control de la especie exótica invasora pez león *Pterois volitans*”, utilizando equipo autónomo de buceo y arpones hawaianos para minimizar el daño a corales y otros componentes del arrecife (MAVDT, 2010a). Posterior a la captura se cortaron las espinas dorsales, pélvicas y anales para evitar accidentes. Los individuos recolectados fueron trasladados a los laboratorios de la Universidad Jorge Tadeo Lozano en Santa Marta o a la Universidad de Cartagena en Cartagena (Franco, 2017).

6.3 Fase de laboratorio

6.3.1 Morfometría del pez león y obtención de otolitos

A cada ejemplar se le midió la longitud total -LT- y el peso total -PT- con un ictiómetro (precisión ± 1 mm) y una balanza analítica (precisión de 0,001 g) respectivamente. Se llevó a cabo la disección haciendo un corte vertical antes de la primera espina de la aleta dorsal, siguiendo a lo largo del opérculo y justo antes de la aleta pectoral. Se despejó el área branquial cortando la unión entre las branquias y el techo de la cavidad oral. Finalmente se hizo un corte a través de la cámara ótica, y con ayuda de unas pinzas de relojero se sacaron los otolitos de forma cuidadosa, evitando que se quebraran y teniendo en cuenta su pertenencia al hemisferio derecho o izquierdo de cada individuo (Secor *et al.*, 1991; Green *et al.*, 2012; Franco, 2017).

Las estructuras se pusieron en jabón líquido y se enjuagaron en agua colocándolas entre los dedos índice y pulgar, frotando suavemente en círculos con el fin de remover todo residuo orgánico (Díaz, 2010). Finalmente se dispusieron sobre papel secante y se almacenaron en seco dentro de bolsas ziploc y bolsas de papel rotuladas (Franco, 2017).

6.3.2 Cuantificación de las razones isotópicas de carbono

Se colocaron en viales muestras de músculo de los ejemplares y se llevaron al horno a 60°C durante 48 h para ser secadas por completo. Se utilizó la técnica descrita por Kim *et al.* (2012) para la extracción de lípidos en músculo, la cual consiste en colocar en cada muestra 25 mL de éter-petróleo, llevarlas en un sonicador por 15 min y centrifugarlas a 2.200 RPM a baja temperatura, este procedimiento se realizó dos veces para asegurar una extracción completa. Posteriormente las muestras fueron lavadas tres veces con agua des-ionizada y colocadas nuevamente en el sonicador por 10 min para remover la urea (Kim y Koch, 2012). Finalmente se maceró cada muestra en un mortero de vidrio con el fin de conseguir un tejido deshidratado, fino y homogéneo del cual se obtuvo una submuestra de 0,6 a 1,0 mg. Las muestras fueron analizadas en un espectrómetro de masas cuantificando las razones isotópicas de carbono ($\delta^{13}\text{C}$).

6.3.3 Obtención de datos ambientales

Los datos históricos de los factores fisicoquímicos de temperatura y salinidad del agua asociados a las localidades de Santa Marta y Cartagena fueron obtenidos a partir de una revisión bibliográfica.

6.4 Fase de gabinete

6.4.1 Toma, edición y digitalización de fotografías

En un estereoscopio Nikon de referencia SMZ 745T equipado con un adaptador para cámara integrada de referencia Nikon Digital Sight-D5-fit y utilizando el programa NIS-Elements F, se tomaron fotografías de los otolitos de cada espécimen colocándolos en una caja de Petri pequeña sobre un fondo negro, ubicando las muestras en el mismo punto y ajustando la escala después de hacer cambios en el aumento y el enfoque del equipo (Figura 9).



Figura 9. Montaje diseñado para la toma de fotografías.

Las fotografías fueron editadas en Adobe Photoshop CS6 de Adobe® con el fin de generar una silueta de los otolitos y facilitar el reconocimiento de los puntos de contorno en el software tpsDig2 (Figura 10).

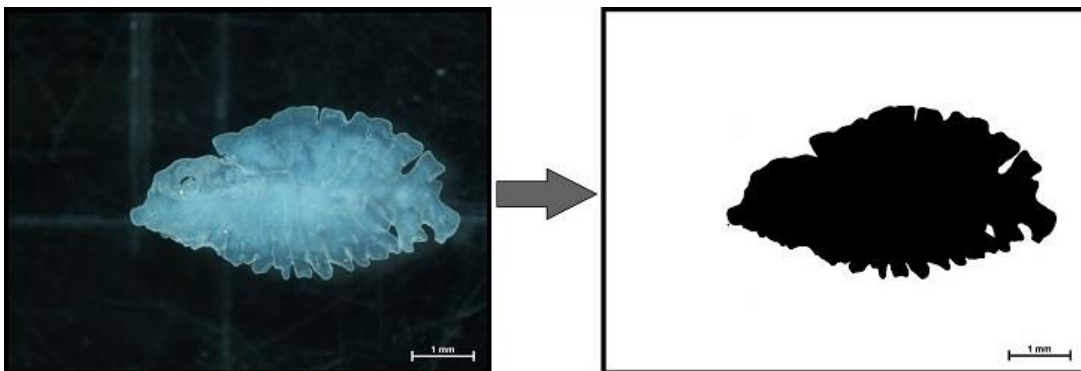


Figura 10. Edición de las fotografías.

Se utilizó el programa tpsUtil de la serie TPS de Rohlf (2015), con el fin de construir el archivo de extensión tps inicial a ser reconocido por el programa tpsDig2, el cual permite capturar las coordenadas de los dos tipos de puntos necesarios para llevar a cabo el análisis: puntos de referencia *–landmarks–* y contornos *–outlines–*. En cada imagen se generó un contorno sobre el cual se digitalizaron 30 puntos de referencia (Figura 11).



Figura 11. Digitalización de puntos de referencia (*landmarks*).

6.4.2 Análisis de la información

Se llevó a cabo un análisis exploratorio de las variables morfométricas de los individuos (longitud total -LT- y peso total -PT-) utilizando medidas de tendencia central (media aritmética -MA-) y medidas de variabilidad (desviación estándar -DE-, coeficiente de variación -v-, error estándar -EE-, valores mínimos -Mín- y valores máximos -Máx-) (Zar, 2010). Posteriormente fueron evaluados los supuestos de normalidad (prueba de Shapiro-Wilk) y homogeneidad de varianzas (prueba de Levene), y fueron determinadas las diferencias en la longitud total y el peso total entre las localidades llevando a cabo la prueba de Mood y la de Mann-Whitney respectivamente (Zar, 2010; McDonald, 2014).

Para representar fielmente los datos, se calculó el número de clases necesarias para describir la agrupación por clases de tallas mediante la regla de Sturges (1926):

$$c = \frac{R}{1 + 3,322 \times \log N}$$

En donde c son las clases de talla, R es el intervalo de los valores de longitud total -LT- y N es el tamaño de la muestra.

Para los aspectos de morfometría geométrica se utilizó el programa MorphoJ con el fin de comprobar las hipótesis de alometría (H_0 = No hay diferencias en la forma de los otolitos

por efecto de alometría), simetría (H_0 = No hay diferencias entre el otolito derecho y el otolito izquierdo), dimorfismo sexual (H_0 = No hay diferencias en los otolitos debido al sexo de los individuos) y poblaciones (H_0 = No hay diferencias en los otolitos debido a la localidad de la que provienen).

La configuración de marcas fue superpuesta mediante un análisis generalizado de Procustes, a partir del cual se generó una matriz de covarianza con la que se realizaron pruebas de análisis de varianza (ANOVA), análisis de componentes principales (ACP) y análisis discriminante con validación cruzada por cada hipótesis (Klingenberg, 2011). Se asignaron los clasificadores clase de talla (1 a 10), lado (D: derecho, I: izquierdo), sexo (H: hembra, M: macho) y localidad (STM: Santa Marta, CTG: Cartagena). No todos los ejemplares contaron con sus dos otolitos, por lo que dependiendo del análisis a realizar fueron seleccionados únicamente otolitos pares u otolitos de un solo lado sin tener en cuenta si contaban o no con su pareja (análisis de alometría: otolitos derechos pares, análisis de simetría: otolitos derechos e izquierdos pares, análisis de dimorfismo sexual y de poblaciones: otolitos derechos).

Los valores de los isótopos estables (δ) fueron calculados a partir de la fórmula propuesta por Park y Epstein (1961):

$$\delta^{13}C (\text{‰}) = \left[\left(\frac{R \text{ muestra}}{R \text{ estándar}} \right) - 1 \right] \times 1000$$

En donde $R \text{ muestra}$ de $\delta^{13}C$ es la proporción entre sus isótopos $^{13}C/^{12}C$ y $R \text{ estándar}$ es *Pee Dee Belemnite* (PDB).

A los datos de $\delta^{13}C$ obtenidos se les aplicó un análisis exploratorio utilizando medidas de tendencia central (MA) y medidas de variabilidad (DE, v , EE, Mín y Máx). Adicionalmente fueron evaluados los supuestos de normalidad (prueba de Shapiro-Wilk) y homogeneidad de varianzas (prueba de Levene), y se determinó si existen o no diferencias en los valores de $\delta^{13}C$ entre las localidades llevando a cabo una prueba t de Welch (Zar, 2010).

7. RESULTADOS

Fueron capturados 259 ejemplares de pez león, de los cuales 158 se encontraron en Santa Marta y 101 en Cartagena. En Santa Marta presentaron una longitud total promedio de $21,1 \pm 7,0$ cm y un peso total promedio de $175,0 \pm 192,9$ g. En Cartagena fueron más grandes ($24,1 \pm 5,0$ cm) y pesados ($200,5 \pm 144,3$ g) (Tabla 2).

Tabla 2. Estadígrafos de las variables longitud total (LT) y peso total (PT) de los ejemplares capturados en Santa Marta y Cartagena. N: tamaño de la muestra, MA: media aritmética, DE: desviación estándar, v: coeficiente de variación, EE: error estándar, Min: valor mínimo, Máx: valor máximo.

Localidad	N	Variable	MA	DE	v (%)	EE	Mín	Máx
Santa Marta	158	LT (cm)	21,1	7,0	33,1	0,6	9,5	43,0
		PT (g)	175,0	192,9	110,2	15,3	5,2	1011,8
Cartagena	101	LT (cm)	24,1	5,0	20,9	0,5	14,0	36,5
		PT (g)	200,5	144,3	72,0	14,4	25,0	720,0
General	259	LT (cm)	22,3	6,5	29,0	0,4	9,5	43,0
		PT (g)	185,0	175,7	95,0	10,9	5,2	1011,8

Se determinó que ninguna de las dos variables se ajusta a una distribución normal (LT y PT), y para el caso de la homogeneidad de varianzas se encontró que sólo el peso total cumple con este supuesto (Tabla 3). Se hallaron diferencias en la longitud total y en el peso total entre las regiones (Mood = 7,978; gl = 1; $p = 0,005$ y Mann-Whitney U = 6.122,5; $n_1 = 158$; $n_2 = 101$; $p = 0,002$).

Tabla 3. Pruebas de normalidad y homogeneidad de varianzas para las variables longitud total (LT) y peso total (PT) de los ejemplares capturados en Santa Marta y Cartagena. N: tamaño de la muestra.

Localidad	N	Variable	Prueba	Estadístico	p
Santa Marta	158	LT (cm)	Shapiro-Wilk	0,960	0,002
		PT (g)		0,770	< 0,001
Cartagena	101	LT (cm)	Shapiro-Wilk	0,952	0,004
		PT (g)		0,839	< 0,001
General	259	LT (cm)	Shapiro-Wilk	0,974	0,037
		PT (g)		0,809	< 0,001
		LT (cm)	Levene	11,992	0,001
		PT (g)		2,254	0,134

Por medio de la regla de Sturges fueron establecidas 10 clases de talla con intervalos de 3,5 cm, teniendo en cuenta individuos desde 9,5 a 44,5 cm. La mayoría presentó una talla entre 20 y 27 cm (Tabla 4).

Tabla 4. Clases de talla establecidas por la regla de Sturges para los individuos de las dos localidades. LT: longitud total (cm).

Clase de talla	Intervalo de LT	Santa Marta	Cartagena	General
1	9,5-13,0	17	0	17
2	13,0-16,5	30	2	32
3	16,5-20,0	20	20	40
4	20,0-23,5	34	27	61
5	23,5-27,0	27	26	53
6	27,0-30,5	13	11	24
7	30,5-34,0	11	9	20
8	34,0-37,5	2	6	8
9	37,5-41,0	2	0	2
10	41,0-44,5	2	0	2
Total		158	101	259

En total fueron extraídos y analizados 257 otolitos *sagitta* derechos e izquierdos, 169 de individuos de Santa Marta y 88 de Cartagena. Por medio de las fotografías se pudo observar que existe un crecimiento diferencial a lo largo de su ontogenia, encontrando estructuras circulares y simples en las primeras clases de talla, y alargadas y complejas conforme se va dando el crecimiento (Figura 12).

En la evaluación de la morfometría geométrica se encontró que alométricamente existen diferencias entre las clases de talla tanto en el tamaño del centroide ($F = 71,0$; $gl_1 = 8$; $gl_2 = 74$; $p = < 0,001$), como en la forma del otolito ($F = 2,1$; $gl_1 = 448$; $gl_2 = 4144$; $p = < 0,001$), lo que confirma la hipótesis de que hay diferencias en la morfología del otolito en relación con la alometría. Al comparar la simetría entre los otolitos derecho e izquierdo se encontraron diferencias entre la forma ($F = 1,5$; $gl_1 = 56$; $gl_2 = 9184$; $p = 0,015$) pero no en el tamaño del centroide ($F = 0$; $gl_1 = 1$; $gl_2 = 164$; $p = 0,952$), indicando que a pesar de los cambios en la forma la proporción de la periferia con respecto al centro es similar.

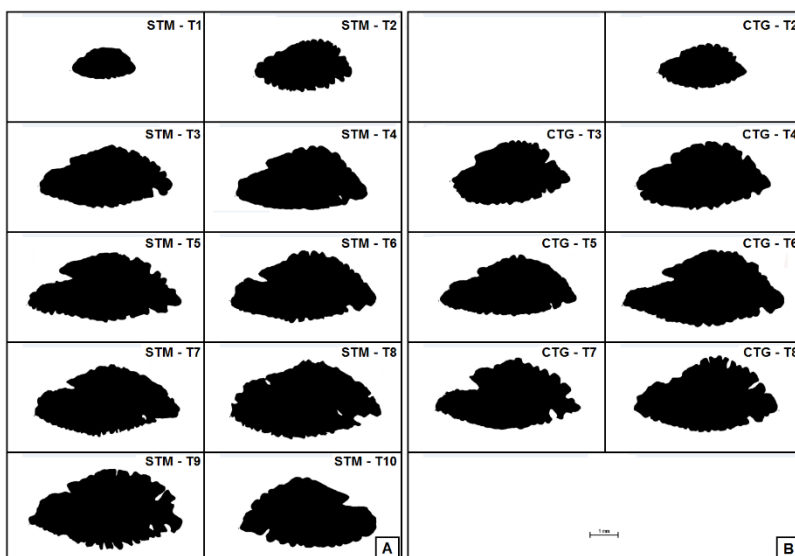


Figura 12. Morfología del otolito *sagitta* del pez león a lo largo de sus clases de talla. **A.** Individuos de Santa Marta -STM-. **B.** Individuos de Cartagena -CTG- (los otolitos de las clases 1, 9 y 10 no se muestran dado que no se recolectaron peces de esas tallas. Valor de escala = 1 mm. T: clase de talla.

En la hipótesis de dimorfismo sexual se presentaron diferencias entre el tamaño del centroide ($F = 5,7$; $gl_1 = 1$; $gl_2 = 53$; $p = 0,020$) pero no en la forma entre los machos y las hembras ($F = 1,2$; $gl_1 = 56$; $gl_2 = 2968$; $p = 0,162$). Contrariamente no se presentaron diferencias entre el tamaño del centroide ($F = 0$; $gl_1 = 1$; $gl_2 = 83$; $p = 0,974$) pero si en la forma de los otolitos entre Santa Marta y Cartagena ($F = 1,6$; $gl_1 = 56$; $gl_2 = 4648$; $p = 0,003$)

Teniendo en cuenta estos resultados se determinaron la media aritmética -MA- y la desviación estándar -DE-, junto con los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas de la longitud total de los peces, comparando entre sexos con el fin de observar si existen diferencias que puedan estar influyendo en lo obtenido (Tabla 5). Se encontraron diferencias en la longitud total entre los sexos de los individuos (Mood = 5,190; $gl = 1$; $p = 0,023$).

Tabla 5. Media aritmética -MA-, desviación estándar -DE- y supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas de la longitud total de los peces -LT (cm)- comparando entre sexos.

Sexo	N	MA	DE	Prueba	Estadístico	p
Macho	68	26,3	4,4	Shapiro-Wilk	0,920	<0,001
Hembra	33	23,8	3,4	Shapiro-Wilk	0,843	<0,001
General	101	25,5	4,3	Levene	5,055	0,027

No se observó una separación evidente a nivel de clases de talla, simetría y localidad (Figura 13-A, B y D). Sin embargo, en el sexo, los machos mostraron un rango de coordenadas más amplio con respecto al segundo componente en comparación con las hembras (Figura 13-C).

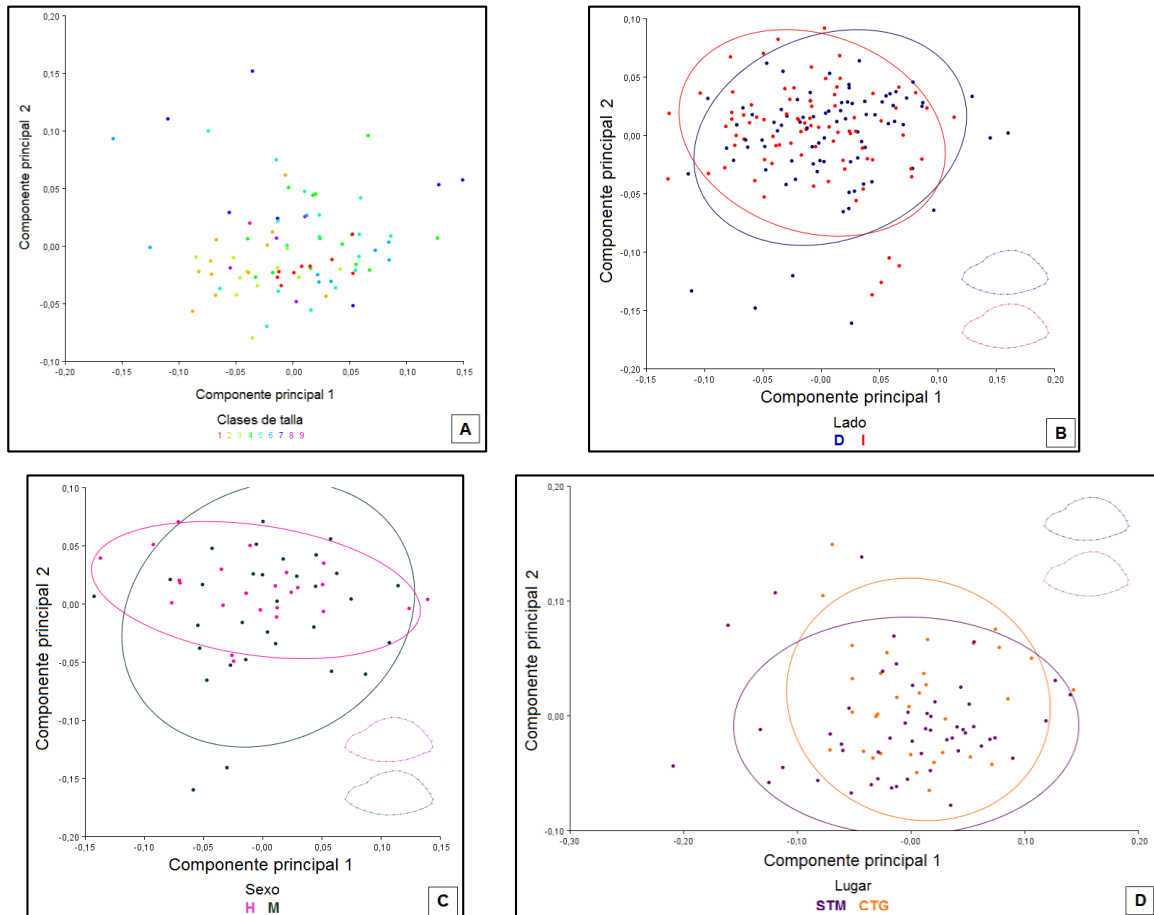


Figura 13. Gráficos del análisis de ACP para la evaluación de hipótesis. **A.** Hipótesis de alometría. **B.** Hipótesis de simetría. **C.** Hipótesis de dimorfismo sexual. **D.** Hipótesis de poblaciones. Los gráficos de estructura de alambre (*wireframe*) representan la forma del otolito de cada grupo. D: derecho, I: izquierdo, H: hembra, M: macho, STM: Santa Marta, CTG: Cartagena.

En el análisis de función discriminante, la asignación cruzada para la mayoría de los grupos pareados presenta valores entre 54 y 59%, lo cual indica que a nivel general no se está dando una correcta asignación de éstos (Tabla 6). En los histogramas de validación cruzada la mayoría de casos se sobrepone en los análisis de las hipótesis (Figura 14).

Tabla 6. Resultados del análisis de función discriminante con validación cruzada para la evaluación de hipótesis.

Grupos	Asignación cruzada			
	Derecho	Izquierdo	Total	%
Derecho	47	36	83	56,6
Izquierdo	38	45	83	54,2
	Hembras	Machos	Total	%
Hembras	14	10	24	58,3
Machos	19	12	31	38,7
	Santa Marta	Cartagena	Total	%
Santa Marta	35	17	52	67,3
Cartagena	14	19	33	57,6

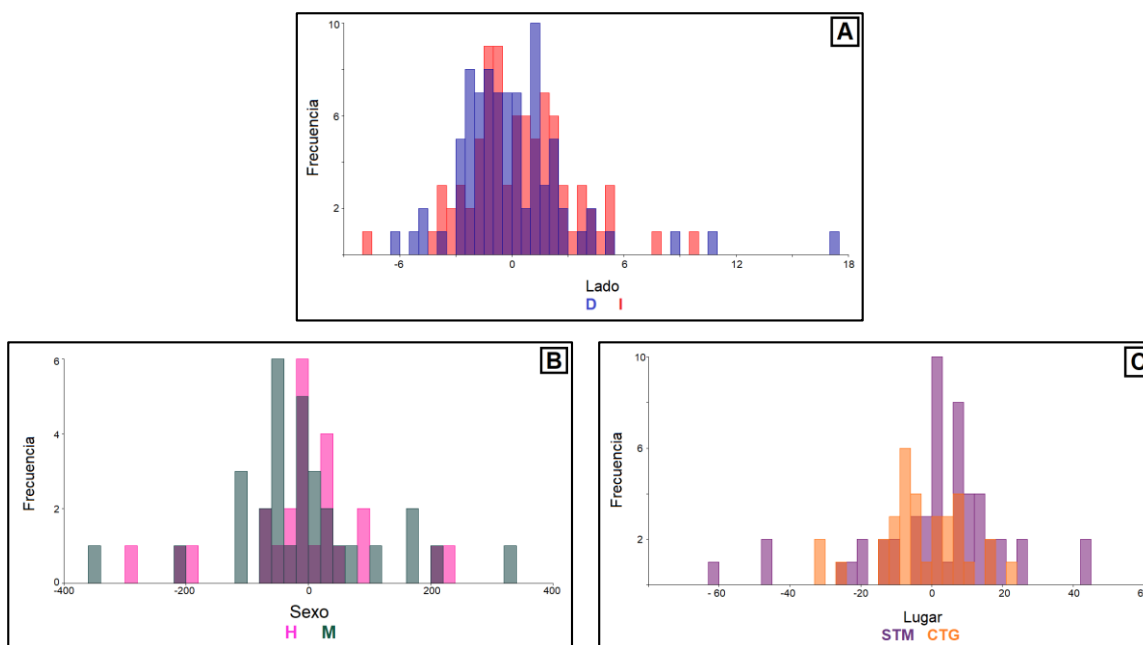


Figura 14. Histogramas de validación cruzada para la comparación pareada entre los grupos. **A.** Hipótesis de simetría. **B.** Hipótesis de dimorfismo sexual. **C.** Hipótesis de poblaciones.

Para el análisis de isótopos estables de carbono fueron tomadas 134 muestras, 84 de individuos de Santa Marta y 50 de Cartagena. Los peces de la primera localidad presentaron valores isotópicos menores ($-17,5 \pm 1,2\text{‰ } \delta^{13}\text{C}$) que la segunda ($-16,3 \pm 0,8\text{‰ } \delta^{13}\text{C}$). Los valores de $\delta^{13}\text{C}$ variaron entre $-20,1$ y $-14,0\text{‰ } \delta^{13}\text{C}$ (Tabla 7).

Se encontró que las concentraciones de isótopos estables entre las dos localidades son diferentes se ajustan a una distribución normal pero no cumplen con el supuesto de homogeneidad de varianzas (Tabla 8), y se hallaron diferencias en los valores isotópicos de carbono entre los individuos de cada localidad (t de Welch = $-6,853$; $gl = 127,340$; $p =$

<0,001). En el gráfico de dispersión se observa que las muestras que provienen de Santa Marta presentan valores isotópicos más bajos, con una tendencia a agruparse entre -20,0 y -16,0‰ $\delta^{13}\text{C}$, con respecto a los de Cartagena (Figura 15).

Tabla 7. Estadígrafos de los valores isotópicos de carbono de los ejemplares capturados en Santa Marta y Cartagena. N: tamaño de la muestra, MA: media aritmética, DE: desviación estándar, v : coeficiente de variación, EE: error estándar, Min: valor mínimo, Máx: valor máximo.

Localidad	N	MA	DE	v (%)	EE	Min	Máx
Santa Marta	84	-17,5	1,2	-6,6	0,1	-20,1	-14,0
Cartagena	50	-16,3	0,8	-5,1	0,1	-18,1	-14,0
General	134	-17,0	1,2	-7,0	0,1	-20,1	-14,0

Tabla 8. Pruebas de normalidad y homogeneidad de varianzas de los valores isotópicos de carbono de los ejemplares capturados en Santa Marta y Cartagena. N: tamaño de la muestra.

Localidad	N	Prueba	Estadístico	p
Santa Marta	84	Shapiro-Wilk	0,977	0,433
Cartagena	50	Shapiro-Wilk	0,975	0,551
General	134	Shapiro-Wilk	0,983	0,605
		Levene	4,511	0,036

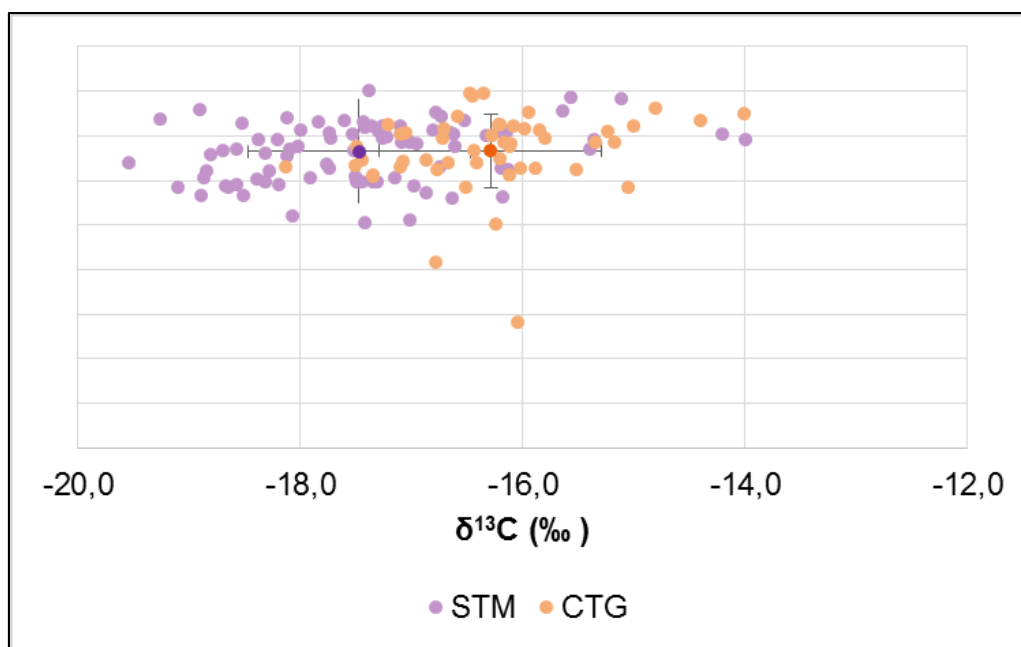


Figura 15. Gráfico de dispersión de los valores isotópicos de carbono encontrados en muestras de músculo de pez león en Santa Marta y Cartagena.

En la recopilación de datos de los factores fisicoquímicos de temperatura y salinidad del agua en las dos localidades (Tabla 9), se encontró que Santa Marta presenta valores promedio menores de temperatura ($26,9 \pm 2,1$ °C - $28,3 \pm 1,7$ °C) y mayores de salinidad ($28,7 \pm 15,2$ - $36,5 \pm 0,5$) que Cartagena, en donde la temperatura es mayor ($29,1 \pm 1,2$ °C - $30,5 \pm 0,9$ °C) y la salinidad es menor ($21,8 \pm 13,3$ - $27,0 \pm 14,6$).

Tabla 9. Datos históricos de temperatura y salinidad en Santa Marta y Cartagena. MA: media aritmética, Mín: valor mínimo, Máx: valor máximo.

Localidad	Año Época	Temperatura (°C)			Salinidad			Autor
		MA	Mín	Máx	MA	Mín	Máx	
Santa Marta	2003 - Sc	-	21,0	26,4	-	36,1	37,4	Mejía-Niño y Garzón-Ferreira (2003)
	2003 - LI	-	27,4	28,6	-	35,1	36,4	Mejía-Niño y Garzón-Ferreira (2003)
	2006 - Sc	$27,1 \pm 1,4$	24,8	29,7	$36,2 \pm 0,9$	34,7	38,0	Arévalo-Martínez y Franco-Herrera (2008)
	2013 - Sc	$26,9 \pm 2,1$	23,6	32,6	$36,5 \pm 0,5$	34,5	37,3	Vivas-Aguas <i>et al.</i> (2014)
	2013 - LI	$27,0 \pm 2,1$	23,6	32,6	$28,7 \pm 15,2$	0	37,3	Vivas-Aguas <i>et al.</i> (2015)
	2014 - Sc	$28,3 \pm 1,7$	24,5	32,2	$28,8 \pm 14,7$	0	37,0	Vivas-Aguas <i>et al.</i> (2015)
Cartagena	2006	-	29,6	32,4	-	15,1	21,0	Cogua <i>et al.</i> (2012)
	2013 - Sc	$29,1 \pm 1,6$	26,8	31,2	-	0,7	39,3	Vivas-Aguas <i>et al.</i> (2014)
	2013 - LI	$30,5 \pm 0,9$	27,6	32,2	$21,8 \pm 13,3$	0	13,3	Vivas-Aguas <i>et al.</i> (2015)
	2014 - Sc	$30,2 \pm 1,6$	27,5	32,4	$27,0 \pm 14,6$	0,1	40,6	Vivas-Aguas <i>et al.</i> (2015)
	2014 - LI	$30,2 \pm 1,0$	-	-	-	-	-	Garcés-Ordóñez <i>et al.</i> (2016)
	2015 - Sc	$29,1 \pm 1,2$	-	-	-	-	-	Garcés-Ordóñez <i>et al.</i> (2016)

8. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La longitud total promedio del pez león en este estudio es similar a la reportada en el Caribe por otros investigadores, a excepción de lo presentado por Layman y Allgeier (2012), Muñoz-Escobar y Gil-Agudelo (2012) y Hernández-Abello *et al.* (2015) quienes encontraron menores tamaños. A nivel general se observa que las tallas de los individuos se encuentran dentro de lo registrado, pero cabe destacar que el ejemplar de menor longitud total (9,5 cm) es uno de los más grandes con respecto a las tallas mínimas de los otros estudios. Por otro lado, el peso total promedio en este caso resulta menor en comparación con lo reportado por otros autores (Tabla 10).

Tabla 10. Datos históricos de la longitud total (cm) y el peso total (g) de *P. volitans* en investigaciones realizadas en el Caribe. LT: longitud total, PT: peso total, N: tamaño de la muestra, MA: media aritmética, Mín: valor mínimo, Máx: valor máximo.

Variable	N	MA	Mín	Máx	Área de estudio	Autor
LT	1069	21,7 ± 7,0	6,2	42,4	Bahamas	Morris y Akins (2009)
LT	96	-	13,0	39,0	Bahamas	Côté y Maljkovic (2010)
LT	280	-	5,1	24,8	Caribe colombiano	González <i>et al.</i> (2011)
LT	122	14,3	6,0	20,8	Bahamas	Layman y Allgeier (2012)
LT	65	16,2 ± 4,6	6,4	26,5	Caribe colombiano	Muñoz-Escobar y Gil-Agudelo (2012)
LT	130	-	12,2	37,2	Bahamas	Côté <i>et al.</i> (2013)
LT	1042	23,8 ± 0,2	4,5	41,0	Caribe colombiano	Gómez-Pardo (2014)
PT	1039	222,3 ± 6,0	1,0	1380,0		
LT	203	25,2 ± 6,6	4,3	43,0	Caribe colombiano	Gómez (2015)
PT	203	255,6 ± 216,4	0,7	1079,6		
LT	92	18,0 ± 5,3	-	-	Caribe colombiano	Hernández-Abello <i>et al.</i> (2015)
LT	110	24,8	8,1	33,7	México	Rubio (2015)
LT	137	22,7 ± 7,1	6,6	42,0	Caribe colombiano	Franco (2017)
PT	137	194,9 ± 183,1	2,5	926,0		
LT	564	24,0 ± 7,0	4,3	43,2	Caribe colombiano	Romero (2018)
PT	564	227,6 ± 214,7	0,7	1361,3		
LT	259	22,3 ± 6,5	9,5	43,0	Caribe colombiano	Presente estudio (2018)
PT	259	185,0 ± 175,7	5,2	1011,8		

La cantidad de clases de talla dadas superan a las establecidas en estudios como los de Gómez-Pardo (2014), Gómez (2015), Hernández-Abello *et al.* (2015), Rubio (2015), Franco (2017) y Romero (2018), quienes proponen entre 4 y 9 clases de talla; sin embargo, los intervalos que incluyen a la mayor parte de las muestras corresponden para todos los casos con longitudes entre los 20 y 30 cm aproximadamente. Cabe resaltar que de acuerdo con Pusack *et al.* (2016) *P. volitans* crece entre 1,25 a 2,25 veces más rápido en aguas del

océano Atlántico que en las del Pacífico, por lo que las tallas y pesos alcanzados llegan a ser mayores en el primero. Estas variaciones en su crecimiento son atribuidas a las diferencias entre las cuencas oceánicas, la capacidad que tienen las poblaciones invasoras para consumir presas más grandes, tener mayor fecundidad y un mejor rendimiento reproductivo, junto con la posibilidad de disminuir interacciones inter-específicas, tales como la depredación, el parasitismo y la competencia (Pusack *et al.*, 2016).

En la evaluación de la morfometría geométrica por medio de las cuatro hipótesis propuestas, con la de alometría se pudo evidenciar que existe un cambio en los otolitos en relación al desarrollo ontogénico de la especie. Este resultado concuerda con lo propuesto por Campana (1990; 2004), quien afirma que hay una relación proporcional entre el crecimiento de los peces, el tamaño y la forma de los otolitos, por lo que a través del análisis de forma del otolito se podría conocer la talla del organismo. Así mismo, se ha registrado que el crecimiento y la forma de los otolitos se dan bajo una doble regulación, en donde la forma general se fija genéticamente pero existe una fuerte variabilidad relacionada con factores ambientales junto con aspectos como la edad y la clase anual, y por el contrario, los que no varían de una forma significativa son el sexo y la simetría (Castonguay *et al.*, 1991; Hüsey, 2008, Vignon y Morat, 2010).

El efecto alométrico se debe principalmente al crecimiento de algunas regiones específicas que se ven involucradas en el área ocupada por el *ostium*, modificando los márgenes anterior y posterior de la estructura (Monteiro *et al.*, 2005), lo cual se puede observar en los cambios en la forma de los otolitos a través de las clases de talla que se exponen en la Figura 10. Adicionalmente, los hábitats en los que se encuentran las etapas juveniles del pez león normalmente difieren de los que ocupan etapas más avanzadas, resultando en cambios en la forma de los otolitos por los procesos de deposición de las matrices de carbonato de calcio que varían dependiendo de las condiciones ambientales del nicho ecológico (Rubio, 2015).

En la hipótesis de simetría el encontrar diferencias entre la forma de los otolitos derecho e izquierdo pero no en el tamaño del centroide, muestra que la proporción de las estructuras es la misma pero la forma general es diferente. Esta condición puede estar dada por el efecto de la asimetría fluctuante, la cual corresponde con un indicador de estrés genético y

ambiental en estructuras simétricas (Somarakis *et al.*, 1997), y para el caso de los otolitos, a pesar de que los dos proveen la misma información, las diferencias entre las condiciones ambientales de las dos localidades pueden estar influyendo sobre la variación en la forma general (Campana y Casselman, 1993; Aguirre y Lombarte, 1999; Vignon y Morat, 2010).

Con respecto a la hipótesis de dimorfismo sexual, el no encontrar variación en la forma de los otolitos de machos y hembras pero sí en el tamaño del centroide, puede estar dado por diferencias en la longitud total de estos dos grupos, ya que los machos alcanzan tallas mayores y por lo tanto el cambio en la forma de los otolitos estaría dado por el desarrollo ontogénico y no por una diferencia entre los sexos. Este resultado se ha encontrado también en estudios sobre otras especies, en donde los otolitos de sexos diferentes no muestran variaciones en su forma (Cardinale *et al.*, 2004; Doering-Arjes *et al.*, 2008).

En la hipótesis de poblaciones las diferencias encontradas entre los otolitos de individuos de Santa Marta y Cartagena pero no en el tamaño del centroide, al igual que en la evaluación de simetría, expresan que la proporción de la estructura es la misma en las dos poblaciones aunque la forma general sea diferente. En este caso es probable que los peces estén respondiendo al ambiente con un cambio de forma, ya que las diferencias genéticas influyen en la forma del otolito *per se* y los factores ambientales alteran las tasas de crecimiento y modifican la forma, teniendo en cuenta también la complejidad de las formaciones coralinas y las posibles fuentes de alimento (Cardinale *et al.*, 2004; Bayraktarov *et al.*, 2014). Gracias a que pueden regular la cantidad de material depositado durante la formación del otolito en términos de expresión metabólica, la temperatura y el alimento han sido reconocidos como las principales fuentes de variación (Campana y Casselman, 1993; Lombarte y Lleonart, 1993; Aguirre y Lombarte, 1999; Cardinale *et al.*, 2004; Burke *et al.*, 2008; Vignon y Morat, 2010).

El tamaño relativo de los otolitos es mayor conforme aumenta la temperatura del agua debido a que los procesos químicos implicados en el crecimiento se ven afectados por esta variable, así como sucede en otros taxa que contienen estructuras de material calcáreo (Lombarte y Lleonart, 1993), por lo tanto es probable que las altas temperaturas y bajas salinidades presentes en Cartagena estén potenciando el crecimiento de los otolitos, y con

esto, generando mayor variación en la forma de los mismos. En el caso de la alimentación ésta puede llegar a afectar el área y la relación longitud-ancho del otolito, y actuar de forma indirecta en su tamaño a través del crecimiento somático (Hüssy, 2008). De acuerdo con lo encontrado por Romero (2018) en Santa Marta, la dieta del pez león se compone principalmente de peces (90,2%) y en menor medida de crustáceos (9,8%), contrario a la dieta de los individuos de Cartagena, en donde la proporción de peces es menor (72,5%) y la de crustáceos es mayor (27,5%). Así mismo, las presas más importantes en cada localidad son diferentes (Santa Marta: los peces *Stegastes* sp., *S. partitus* y *T. bifasciatum*. Cartagena: el crustáceo *E. crassus* y los peces *T. bifasciatum* y *Stegastes* sp.), y de las 56 especies encontradas en total, sólo 13 son comunes para los dos lugares. Por lo anterior se podría afirmar que los cambios en la forma de los otolitos a nivel poblacional están dados tanto por las diferencias en la temperatura y salinidad de ambas localidades, como por la alimentación de los individuos.

Los valores isotópicos de carbono son cercanos a los obtenidos por Muñoz *et al.* (2011) para individuos de pez león presentes en Carolina del Norte. Los autores reportaron un valor promedio de $-16,6 \pm 0,02\text{‰ } \delta^{13}\text{C}$, el cual es muy cercano al encontrado para Cartagena ($-16,3 \pm 0,8\text{‰ } \delta^{13}\text{C}$), y valores mínimos y máximos de $-17,2$ y $-16,0\text{‰ } \delta^{13}\text{C}$ respectivamente, los cuales corresponden con un rango más estrecho que el aquí reportado ($-20,1$ y $-14\text{‰ } \delta^{13}\text{C}$). Se pudo observar que en Santa Marta los niveles isotópicos son menores a los de Cartagena, lo cual puede estar dado por el aporte de agua dulce, sedimentos y nutrientes provenientes del Canal del Dique y la escorrentía continental (Beltrán, 2011; Dorado, 2015). De igual forma los altos valores del $\delta^{13}\text{C}$ encontrado en los especímenes de Cartagena permiten inferir que en esta zona se genera una mayor remineralización de nutrientes a pesar de no presentar eventos de surgencia, permitiendo así que el isotopo ligero ($\delta^{12}\text{C}$) sea consumido en mayores proporciones y se dé una mayor disponibilidad del $\delta^{13}\text{C}$ que se acumula en los tejidos de los peces, entre estos los otolitos. Como se mencionó previamente, en la zona de Cartagena las temperaturas son mayores y la proporción de presas es diferente, lo cual influye directamente en el crecimiento y la forma de los otolitos, adicionalmente si la concentración de $\delta^{13}\text{C}$ en el ambiente es mayor, esto se verá reflejado a lo largo de la trama trófica hasta llegar al pez león.

9. CONCLUSIONES

- ✓ Existe un cambio en la forma de los otolitos *sagitta* conforme avanza el desarrollo ontogénico debido a la relación proporcional que se da entre el crecimiento de los peces y el tamaño de los otolitos, junto con la preferencia de hábitats y alimentación en las diferentes etapas de su vida.
- ✓ Los otolitos derechos e izquierdos crecen bajo una misma proporción, pero pueden presentar variaciones en su forma como consecuencia de cambios en las condiciones ambientales.
- ✓ Los otolitos *sagitta* no son herramientas útiles en la determinación del sexo en *P. volitans* porque las diferencias que se encuentran entre estos corresponden con factores alométricos de los individuos.
- ✓ Hay diferencias entre la forma de los otolitos de peces recolectados en Santa Marta y Cartagena. Las principales fuentes de variación están dadas por temperaturas y valores isotópicos más altos en Cartagena, y un cambio en las presas que consumen los peces en cada localidad.
- ✓ Las razones isotópicas de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) son mayores en los individuos de Cartagena a causa de una mayor remineralización de nutrientes que permite gran disponibilidad de $\delta^{13}\text{C}$ en el ambiente.

10. RECOMENDACIONES

- ✓ La manipulación de los otolitos se debe hacer de forma delicada, ya que las estructuras son delgadas y tienden a quebrarse o a desprender parte de sus bordes.
- ✓ Es aconsejable que la manipulación de las muestras sea realizada por una sola persona, ya que posterior a la extracción éstas pueden ser intercambiadas por error y generar incertidumbre sobre su origen.
- ✓ Durante la toma de fotografías es importante ajustar la escala cada vez que se modifique el aumento, y mantener siempre un mismo punto de referencia en la ubicación de las muestras para que en los análisis posteriores éstas puedan ser comparables.
- ✓ En la digitalización de las fotografías es fundamental seleccionar un punto inicial que pueda ser común en todas las muestras.

11. BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar-Perera, A. y L. Quijano-Puerto. 2016. Relations between fish length to weight, and otolith length and weight, of the lionfish *Pterois volitans* in the Parque Nacional Arrecife Alacranes, southern Gulf of Mexico. *Rev. Biol. Mar. Oceanogr.*, 51(2): 469-474.
- Aguirre, H. y A. Lombarte. 1999. Ecomorphological comparisons of sagittae in *Mullus barbatus* and *M. surmuletus*. *J. Fish. Biol.*, 55: 105-114.
- Arbeláez, N. y A. Acero. 2011. Presencia del pez león *Pterois volitans* (Linnaeus) en el manglar de la Bahía de Chengue, Caribe colombiano. *Bol. Invest. Mar. Cost.*, 40(2): 431-435.
- Arévalo-Martínez, D. y A. Franco-Herrera. 2008. Características oceanográficas de la surgencia frente a la ensenada de Gaira, departamento de Magdalena, época seca menor de 2006. *Bol. Invest. Mar. Cost.*, 37(2): 131-162.
- Baptiste, M. P., N. Castaño, D. Cárdenas, F. P. Gutiérrez, D. L. Gil y C. A. Lasso (Eds.). 2010. Análisis de riesgo y propuesta de categorización de especies introducidas para Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Bogotá. 200 p.
- Barbour, A. B., M. S. Allen, T. K. Frazer y K. D. Sherman. 2011. Evaluating the potential efficacy of invasive lionfish (*Pterois volitans*) removals. *PLoS ONE*, 6(5).
- Bayraktarov, E., J. Alarcón-Moscoso, A. Polanco y C. Wild. 2014. Spatial and temporal distribution of the invasive lionfish *Pterois volitans* in coral reefs of Tayrona National Natural Park, Colombian Caribbean. *PeerJ*. 15 p.
- Beltrán, J. M. 2011. Relación entre la comunidad fitoplanctónica y el entorno abiótico de la Bahía de Cartagena, para establecer un índice de calidad de agua y su variación espacio-temporal. Tesis de grado en Biología Marina, UTADEO, Santa Marta. 120 p.
- Betancur-R., R., A. Acero, A. Hines, G. Ortí, A. Wilbur y W. Freshwater. 2011. Reconstructing the lionfish invasion: Insights into Greater Caribbean biogeography. *J. Biogeogr.*, 38: 1281-1293.
- Briggs, J. C. 2007. Marine biogeography and ecology: Invasions and introductions. *J. Biogeogr.*, 34(2): 193-198.
- Burke, N., D. Brophy y P. A. King. 2008. Shape analysis of otolith annuli in Atlantic herring (*Clupea harengus*); a new method for tracking fish populations. *Fish. Res.*, 91: 133-143.
- Cadrin, S. X. y K. D. Friedland. 1999. The utility of image processing techniques for morphometric analysis and stock identification. *Fish. Res.*, 43: 129-139.
- Campana, S. E. 1990. How reliable are growth back-calculations based on otoliths? *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 47: 2219-2227.
- Campana, S. E. 2004. Photographic atlas of fish otoliths of the Northwest Atlantic Ocean. NRC Research Press, Ottawa. 284 p.
- Campana, S. E. y J. D. Neilson. 1985. Microstructure of fish otoliths. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 42: 1014-1032.
- Campana, S. E. y J. M. Casselman. 1993. Stock discrimination using otolith shape analysis. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 50: 1062-1083.

- Cardinale, M., P. Doering-Arjes, M. Kastowsky, and H. Mosegaard. 2004. Effects of sex, stock, and environment on the shape of known-age Atlantic cod (*Gadus morhua*) otoliths. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 61: 158-167.
- Castonguay, M., P. Simard y P. Gagnon. 1991. Usefulness of fourier analysis of otolith shape for Atlantic mackerel (*Scomber scombrus*) stock discrimination. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 48: 296-302.
- Cendales, M. H., S. Sea y J. M. Díaz. 2002. Geomorfología y unidades ecológicas del complejo de arrecifes de las Islas del Rosario e Isla Barú (Mar Caribe, Colombia). *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, 26(101): 497-510.
- Chasqui, L., A. Polanco, A. Acero, P. A. Mejía-Falla, A. Navia, L. A. Zapata y J. P. Caldas. (Eds.). 2017. Libro rojo de peces marinos de Colombia. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. INVEMAR, Serie Publicaciones Generales No. 93, Santa Marta. 552 p.
- Cogua, P., N. Campos-Campos y G. Duque. 2012. Concentración de mercurio total y metilmercurio en sedimento y seston de la Bahía de Cartagena, Caribe colombiano. *Bol. Invest. Mar. Cost.*, 41(2): 267-285.
- Côté, I. M. y A. Maljkovic. 2010. Predation rates of Indo-Pacific lionfish on Bahamian coral reefs. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 404: 219-225.
- Côté, I. M., S. J. Green, J. A. Morris, J. L. Akins y D. Steinke. 2013. Diet richness of invasive Indo-Pacific lionfish revealed by DNA barcoding. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 472: 249-256.
- Díaz, B. 2010. Otolitos *sagitta* de especies selectas de Gerreidae (Teleostei: Perciformes): Variación interespecífica y su aplicación taxonómica. Tesis de Maestría en Manejo de Recursos Marinos, CICIMAR-IPN, La Paz. 81 p.
- Díaz, J. M., L. M. Barrios, M. H. Cendales, J. Garzón-Ferreira, J. Geister, M. López-Victoria, G. H. Ospina, F. Parra-Velándia, J. Pinzón, B. Vargas-Ángel, F. A. Zapata y S. Zea. 2000. Áreas coralinas de Colombia. INVEMAR, Serie Publicaciones Especiales No. 5, Santa Marta, 176 p.
- DIMAR - CIOH. 2009. Geografía submarina del Caribe colombiano. DIMAR, Serie Publicaciones Especiales CIOH Vol. 4, Cartagena de Indias, 150 p.
- Doering-Arjes, P., M. Cardinale y H. Mosegaard. 2008. Estimating population age structure using otolith morphometrics: a test with known-age Atlantic cod (*Gadus morhua*) individuals. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 65: 2342-2350.
- Dorado, E. F. 2015. Estructura del zooplacton en la Bahía de Cartagena (Caribe colombiano) en las tres épocas climáticas de 2010. Tesis de grado en Biología Marina, UTADCO, Santa Marta. 108 p.
- Fishelson, L. 1975. Ethology and reproduction of pteroid fishes found in the Gulf of Aqaba (Red Sea), especially *Dendrochirus brachypterus* (Cuvier), (Pteroidae, Teleostei). *Pubbl. Staz. Napoli.*, 39: 635-656.
- Franco, L. C. 2017. Morfología y morfometría de los otolitos *sagittae* del pez león (*Pterois volitans*) en dos ambientes del Caribe colombiano. Tesis de grado en Biología Marina, UTADCO, Santa Marta. 66 p.

- Franco-Herrera, A. 2005. Oceanografía de la Ensenada de Gaira: El Rodadero, más que un centro turístico en el Caribe colombiano. Servigraphics Ltda., Bogotá. 56 p.
- Freshwater, D. W., R. M. Hamner, S. Parham y A. E. Wilbur. 2009. Molecular evidence that the lionfishes *Pterois miles* and *Pterois volitans* are distinct species. J. N. C. Acad. Sci., 125(2): 39-46.
- Garcés-Ordóñez, O., L. J. Vivas-Aguas, M. Martínez, T. Córdoba, A. Contreras, P. Obando, Y. Moreno, J. Muñoz, Y. Nieto, M. Ríos, J. Sánchez y D. Sánchez. 2016. Diagnóstico y Evaluación de la Calidad de las Aguas Marinas y Costeras del Caribe y Pacífico colombianos. Serie de Publicaciones Periódicas del Invemar No. 4 (2016). Red de vigilancia para la conservación y protección de las aguas marinas y costeras de Colombia (REDCAM), Santa Marta. 377 p.
- Garzón-Ferreira, J. y J. M. Díaz. 2003. The Caribbean coral reefs of Colombia. 275-301. En: Cortés, J. (Ed.). Latin American Coral Reefs. Elsevier Science B.V., Ámsterdam.
- Gómez-Pardo, H. M. 2014. Ecología trófica del pez león *Pterois volitans* (Linnaeus, 1758) en tres formaciones coralinas del Caribe colombiano. Tesis de grado en Biología Marina, UTADEO, Santa Marta. 53 p.
- Gómez, S. 2015. Descripción de los hábitos tróficos y la estructura de tallas del pez león *Pterois volitans* (Linnaeus 1758) en dos sectores del Caribe colombiano: Santa Marta y Cartagena. Tesis de grado en Biología Marina, UTADEO, Santa Marta. 36 p.
- González, J., M. Grijalba-Bendeck, A. Acero y R. Betancur-R. 2009. The invasive red lionfish, *Pterois volitans* (Linnaeus 1758), in the southwestern Caribbean Sea. Aquat. Invasions., 4(3): 507-510.
- González, J. D., A. Acero, A. Serrat-LL. y R. Betancur-R. 2011. Caracterización taxonómica de la población del pez león *Pterois volitans* (Linnaeus 1758) (Scorpaenidae) residente en el Caribe colombiano: merística y morfometría. Biota Colombiana, 12(2): 15-21.
- González-Corredor, J. 2014. El pez león *Pterois volitans* (Scorpaenidae) como estudio de caso de invasiones biológicas marinas: aspectos biológicos y ecológicos en el Caribe occidental insular colombiano. Tesis de Maestría en Biología. UNAL, Sede Caribe. 74 p.
- Gracia, A., J. Medellín-Mora, D. L. Gil-Agudelo y V. Puentes (Eds.). 2011. Guía de las especies introducidas marinas y costeras de Colombia. INVEMAR, Serie Publicaciones Especiales No. 23., Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Bogotá. 136 p.
- Green, S. J., J. L. Akins y J. A. Morris. 2012. Lionfish dissection: Techniques and applications. NOAA Technical Memorandum NOS NCCOS 139. 24 p.
- Gutiérrez, F. 2006. Estado de conocimiento de especies invasoras: Propuesta de lineamientos para el control de los impactos. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Bogotá. 158 p.
- Halstead, B. W., M. J. Chitwood y F. R. Mogglin. 1955. The anatomy of the venom apparatus of the zebrafish, *Pterois volitans* (Linnaeus). Anatomical Record, 122: 317-333.
- Hernández-Abello, J. M., R. P. García-Ureña y A. Acero. 2015. Estructura de tallas y preferencia al sustrato del pez león (*Pterois volitans*) (Scorpaeniformes: Scorpaenidae) en Santa Marta (Colombia). Acta Biol. Colomb., 20(2):175-182.

- Hüssy, K. 2008. Otolith shape in juvenile cod (*Gadus morhua*): Ontogenetic and environmental effects. *J. Exp. Mar. Bio. Ecol.*, 364: 35-41
- Kim, S. L., C. M. del Río, D. Casper y P. L. Koch. 2012. Isotopic incorporation rates for shark tissues from a long-term captive feeding study. *J. Exp. Biol.*, 215(14): 2495-2500.
- Kim, S.L. y P. L. Koch. 2012. Methods to collect, preserve, and prepare elasmobranch tissues for stable isotope analysis. *Environ. Biol. Fishes.*, 1: 53-63.
- Klingenberg, C. P. 2011. MorphoJ: an integrated software package for geometric morphometrics. *Mol. Ecol. Resour.*, 11: 353-357.
- Klingenberg, C. P. y L. R. Monteiro. 2005. Distances and Directions in Multidimensional Shape Spaces: Implications for Morphometric Applications. *Syst. Biol.*, 54(4): 678–688.
- Layman, C. A. y J. E. Allgeier. 2012. Characterizing trophic ecology of generalist consumers: a case study of the invasive lionfish in The Bahamas. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 448: 131-141.
- Lombarte, A. y J. Lleonart. 1993. Otolith size changes related with body growth, habitat depth and temperature. *Environ. Biol. Fish.*, 37: 297-306.
- Mack, R. N., D. Simberloff, W. M. Lonsdale, H. Evans, M. Clout y F. A. Bazzaz. 2000. Biotic invasions: causes, epidemiology, global consequences and control. *Ecol. App.*, 10: 689-710.
- MADS. 2013. Protocolo para la captura, extracción y disposición final del pez león (*Pterois volitans*) en Colombia. Convenio No. 023-2012 suscrito entre Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible MADS y la Corporación para el Desarrollo Sostenible del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina -CORALINA. 38 p. + anexos.
- Martínez-Viloria, H., A. Rosado y A. Acero. 2011. Presencia del pez león, *Pterois volitans* (Actinopterygii: Scorpaenidae), en el departamento de La Guajira, mar Caribe de Colombia. *Bol. Invest. Mar. Cost.*, 40(2): 445-447.
- MAVDT. 2010a. Resolución 0132 del 4 de agosto de 2010 por la cual se establece el protocolo de extracción y control de la especie exótica invasora pez león (*Pterois volitans*) presente en las áreas del Sistema de Parques Nacionales Naturales. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. República de Colombia. 6 p.
- MAVDT. 2010b. Resolución 0207 del 3 de febrero de 2010 por la cual se adiciona el listado de especies exóticas invasoras declaradas por el Artículo 1 de la Resolución 848 de 2008 y se toman otras determinaciones. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. República de Colombia. 7 p.
- McDonald, J. 2014. Handbook of biological statistics. 3 Ed. Sparky House Publishing, Baltimore. 299 p.
- Mejía-Niño, N. y J. Garzón-Ferreira. 2003. Dinámica de las interacciones alga-coral en dos bahías de la región de Santa Marta (Caribe colombiano) con distinto grado de influencia antropogénica. *Bol. Inv. Mar. Cost.*, 32: 243-261.
- Michener, R. y K. Lajtha (Eds). 2007. Stable isotopes in ecology and environmental science. 2 Ed. Blackwell Publishing, Massachusetts. 566 p.

- Monteiro, L. R., A. P. M. Di Benedetto, L. H. Guillermo y L. A. Rivera. 2005. Allometric changes and shape differentiation of *sagitta* otoliths in sciaenid fishes. *Fish. Res.*, 74: 288–299.
- Mooney, H. y E. Cleland. 2001. The evolutionary impact of invasive species. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 98: 5446-5451.
- Moonsammy, S., D. Boodoo y G. Seepersad. 2011. Assessment of the economic impacts of the lion fish (*Pterois volitans*) invasion in Jamaica. 64 th Gulf Caribb. Fish. Inst., 50-54.
- Morris, J. A. y J. L. Akins. 2009. Feeding ecology of invasive lionfish (*Pterois volitans*) in the Bahamian archipelago. *Environ. Biol. Fish.*, 86: 389-398.
- Morris, J. A., J. L. Akins, A. Barse, D. Cerino, D. W. Freshwater, S. J. Green, R. C. Muñoz, C. Paris y P. E. Whitfield. 2009. Biology and ecology of the invasive lionfishes, *Pterois miles* and *Pterois volitans*. *Proc. Annu. Gulf Caribb. Fish. Inst.*, 61: 409-414.
- Muñoz, R. C., C. A. Currin y P. E. Whitfield. 2011. Diet of invasive lionfish on hard bottom reefs of the Southeast USA: insights from stomach contents and stable isotopes. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 432: 181-193.
- Muñoz-Escobar, L. y D. L. Gil-Agudelo. 2012. Composición dietaria del pez león, *Pterois volitans* (Pisces: Scorpaenidae), en Santa Marta y el Parque Nacional Natural Tayrona. *Bol. Invest. Mar. Cost.*, 41(2): 471-477.
- Park, R. y S. Epstein, S. 1961. Metabolic fractionation of ^{13}C and ^{12}C in plants. *Plant Physiology*, 36: 133-138.
- Peterson, B. J. y B. Fry. 1987. Stable isotopes in ecosystem studies. *Annu. Rev. Ecol. Syst.*, 18: 293-320.
- Popper, A. N. y Z. Lu. 2000. Structure-function relationships in fish otolith organs. *Fisheries Research*, 46: 15-25.
- Prato, J. y J. Reyna. 2015. Aproximación a la valoración económica de la zona marina y costera del Caribe colombiano. Secretaría Ejecutiva de la Comisión Colombiana del Océano, Bogotá. 184 p.
- Pusack, T. J., C. E. Benkwitt, K. Cure y T. L. Kindinger. 2016. Invasive Red Lionfish (*Pterois volitans*) grow faster in the Atlantic Ocean than in their native Pacific range. *Environ. Biol. Fish.*, 99: 571-579.
- Rangel-Buitrago, N. e Idárraga-García, J. 2010. Geología general, morfología submarina y facies sedimentarias en el margen continental y los fondos oceánicos del mar Caribe colombiano. 29-51. En: INVEMAR (Eds). Biodiversidad del margen continental del Caribe colombiano. INVEMAR, Serie Publicaciones Especiales No. 20, Santa Marta. 458 p.
- Rilov, G. 2009. Predator-prey interactions of marine invaders. En: Rilov, G. y J. A. Crooks (Eds.). *Biological invasion in marine ecosystems*. Springer-Verlag, Berlin. 261-285.
- Rohlf, F. J. 2015. The tps series of software. Hystrix, It. J. Mamm. DOI: 10.4404/hystrix-26.1-11264.
- Romero, D. A. 2018. Dieta del pez león (*Pterois volitans*) en dos ambientes del Caribe colombiano. Tesis de grado en Biología Marina, UTADEO, Santa Marta. 64 p.

- Rubio, J. 2015. Ecomorfología de los otolitos *sagittae* de *Pterois volitans* en el área natural protegida "Arrecifes de Puerto Morelos". Tesis de Maestría en Ciencias, UNAM, Yucatán. 59 p.
- Schofield, P. 2009. Geographic extent and chronology of the invasion of non-native lionfish (*Pterois volitans* [Linnaeus 1758] and *P. miles* [Bennett 1828]) in the Western North Atlantic and Caribbean Sea. *Aquat. Invasions*, 4(3): 443-449.
- Schultz, E. T. 1986. *Pterois volitans* and *Pterois miles*: Two valid species. *Copeia*, 1986(3): 686-690.
- Secor, D. H., J. M. Dean y E. H. Laban. 1991. Manual for otolith removal and preparation for microstructural examination. Columbia, SC: Electric Power Research Institute and the Belle W. Baruch Institute for Marine Biology and Coastal Research. 85 p.
- Somarakis, S., I. Kostikas y N. Tsimenides. 1997. Fluctuating asymmetry in the otoliths of larval fish as an indicator of condition: Conceptual and methodological aspects. *J. Fish Biol.*, 51(Supplement A): 30-38.
- Sturges, H. A. 1926. The choice of a class interval. *J. Am. Stat. Assoc.*, 21(153): 65-66.
- Tabares, N., J. Soltau, J. Díaz, D. David y E. Landazabal. 2009. Características geomorfológicas del relieve submarino en el Caribe colombiano. 61-116. En: DIMAR-CIOH. Geografía submarina del Caribe colombiano. Dirección General Marítima - Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe, Serie de publicaciones especiales CIOH Vol 4., Cartagena de Indias. 150 p.
- Tuset, V. M., A. Lombarte y C. A. Assis. 2008. Otolith atlas for the western Mediterranean, north and central eastern Atlantic. *Sci. Mar.*, 72: 7-198.
- Valdez-Moreno, M., C. Quintal-Lizama, R. Gómez-Lozano y M. García. 2012. Monitoring an alien invasion: DNA Barcoding and the identification of lionfish and their prey on coral reefs of the mexican Caribbean. *PLoS ONE*, 7(6): 1-8.
- Vignon, M. y F. Morat. 2010. Environmental and genetic determinant of otolith shape revealed by a non-indigenous tropical fish. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 411: 231-241.
- Viloria, E. A. y A. Acero. 2015. Aparición del pez león, *Pterois volitans* (Actinopterygii: Scorpaenidae), en la Ciénaga Grande de Santa Marta: Caída del último reducto. *Bol. Invest. Mar. Cost.*, 44(2): 391-394.
- Vitousek, P. M., H. A. Mooney, J. Lubchenco y J. M. Melillo. 1997. Human domination of Earth's ecosystems. *Science*, 277: 494-499.
- Vivas-Aguas, L. J., J. Sánchez, J. Betancourt, M. Quintero, Y. Moreno, C. Santana, I. Cuadrado, K. Ibarra, M. Ríos, P. Obando y D. Sánchez. 2014. Diagnóstico y Evaluación de la Calidad de las Aguas Marinas y Costeras del Caribe y Pacífico colombianos. Serie de Publicaciones Periódicas del Invermar No. 4 (2014), Red de vigilancia para la conservación y protección de las aguas marinas y costeras de Colombia (REDCAM), Santa Marta. 314 p.
- Vivas-Aguas, L. J., K. Ibarra, J. Sánchez, M. Martínez, Y. Nieto, Y. Moreno, I. Cuadrado, P. Obando, O. Garces, D. Sánchez, M. Villarraga y O. Sierra. 2015. Diagnóstico y Evaluación de la Calidad de las Aguas Marinas y Costeras del Caribe y Pacífico colombianos. Serie de Publicaciones Periódicas del Invermar No. 4 (2015), Red de

vigilancia para la conservación y protección de las aguas marinas y costeras de Colombia (REDCAM), Santa Marta. 320 p.

- Whitfield, P. E., T. Gardner, S. P. Vives, M. R. Gilligan, W. R. Courtenay Jr., G. C. Ray y J. A. Hare. 2002. Biological invasion of the Indo-Pacific lionfish *Pterois volitans* along the Atlantic coast of North America. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 235: 289-297.
- Zar, J. H. 2010. *Biostatistical analysis*. Upper Saddle River. N. J., Prentice-Hall/ Pearson.
- Zelditch, M. L., D. L. Swiderski, H. D. Sheets y W. L. Fink. 2004. *Geometric Morphometrics for Biologists: A Primer*. Academic Press, Massachusetts. 416 p.