



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO
Facultad de Estudios Superiores Iztacala

**PATRONES ECOMORFOLÓGICOS DE LOS
OTOLITOS SAGITTAE DE CARÁNGIDOS DEL
GOLFO DE MÉXICO**

Que presenta: JACOB RUBIO MOLINA

Director:
José Antonio Martínez Pérez

Av. de Los Barrios No.1 Los Reyes Iztacala, Tlalnepantla Estado de México C.P. 54090.
jacob.rubio.27@gmail.com



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

A la Dra. Alejandra Vanina Volpedo de la Universidad de Buenos Aires, quien a pesar de que no tengo el gusto de conocerla en persona, en todo momento me ofreció el apoyo de su gran experiencia en esta rama de la ictiología tan apasionante, lo cual resultó fundamental para el correcto desarrollo de esta investigación.

Al Dr. Antoni Lombarte del ICM Instituto de Ciencias del Mar, Barcelona, España. Por haber alentado mis esfuerzos para continuar con este trabajo, en especial con el Atlas que me obsequió.

Al Dr. Massimiliano Scalici de la Universidad de Roma III. Roma Italia por el curso tan esclarecedor que impartió, todos los consejos en la etapa de planeación del trabajo, y la amistad tan espontanea brindada.

Al Dr. Francisco Xavier Chiappa Carrara de la Unidad Multidisciplinaria de Docencia e Investigación Sisal. Yucatán, México. Quién no solo me brindo todo el apoyo que era capaz de ofrecerme, si no que me lo ofreció de la manera más desinteresada y eficiente posible, lo cual solo me lleva a pensar que cuando sea grande quiero ser como usted.

Al M. en C. Héctor Espinoza del Instituto de Biología, D.F., México. Que nos ha dado todo su apoyo a todo el equipo de trabajo, para tener fácil acceso a los organismos de la colección, consejos y toda la información que necesitáramos.

Al M. en C. Jonathan Franco López de la Facultad de Estudios Superiores Iztacala. Edo. De México, México. Por haberme guiado cuando más falta hizo en el desarrollo de esta tesis para poder llevarla a buen fin, y en especial por los consejos y apoyo para que se solucionaran todos los problemas que obstaculizaban mi correcto desempeño académico.

Biól. José Antonio Martínez Pérez de la Facultad de Estudios Superiores Iztacala, Edo. De México, México. Para quien simplemente no hay palabras para poder agradecer todo lo que debería, solo puedo expresarle mi más sincera gratitud de por vida por haber sabido conducir y formar a un individuo con mucha vocación pero sin la más mínima pizca de orientación, decisión o constancia.

Al Biól. José Luis Tello Musi, al M. en C. Mario Modesto Chavez Arteaga y a todos a cada uno de los integrantes de esa segunda familia a la cual tengo el honor de pertenecer, todos esos momentos que pasamos de felicidad, frustración, locura, hambre, tristeza, euforia, relajamiento, en fin toda la vida que compartimos sin duda es una marca

absolutamente indeleble en mi ser que espero me permitan seguir acrecentando con el paso de los años.

A Ricardo Rubio Ramírez, Claudia Molina Reyes por engendrarme y guiarme de la manera necesaria en cada momento de esta vida que poseo, gracias por todo, las palabras de aliento, los regaños, los sapes y los premios, por procurarme siempre lo mejor que está a su alcance y a veces lo que no también, por preocuparse por mí, pero principalmente por dejarme ser yo mismo, por tratar de comprender mis locuras y ahora, por permitirme llegar a estudiar la carrera más bella que existe, la cual definitivamente es un paso más en la dirección adecuada para poder llegar a ser un ser humano feliz y pleno, por todo lo anterior y todo lo que ustedes saben que han sacrificado por mí, GRACIAS.

A ese trio de locos que tengo por hermanos, saben que los cuanto los quiero, aquí está el ejemplo de lo que tienen que hacer, para que vean que no solo les doy malos ejemplos, espero con ansia ver las suyas.

A ese cuarto hermano que se llama Adrian y que a pesar de no compartir el mismo apellido, siempre has sido un gran apoyo, tanto moralmente como a la hora de los hechos, ya comenzamos los proyectos, solo mantengamos la perseverancia y estoy seguro que llegaremos a donde queremos.

En especial a una mujer, con la cual he compartido casi cada minuto de los últimos 3 años, que me ha acompañado en las felicidades y amarguras de esta vida, gracias por ser ese apoyo incondicional en todo momento, por recordarme que soy un humano, y que compartir la vida no solo es más genial si no que es la única manera de sentirla plenamente, tu mejor que nadie sabes lo fundamental que fuiste para la realización de esta tesis, pues incluso en el laboratorio siempre nos hemos complementado, gracias por soportar mis locuras e inyectar en mi esa energía para seguir adelante, en fin, por todo Gracias Verónica R.

Y por ultimo gracias a la UNAM por todo lo que ha invertido en mi y por darme la oportunidad de enriquecer mi vida con lo más valioso que hay, el conocimiento, además por todo el apoyo económico emanado de los Proyectos PAPIIT (IN207609, IN213012) y FOMIX Yucatán-Conacyt. (103229).

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	5
3. HIPÓTESIS	7
4. OBJETIVO GENERAL	8
4.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	8
5. ÁREA DE ESTUDIO	9
6. MATERIALES Y METODO	11
6.1. MORFOMETRÍA TRADICIONAL	12
6.2. MORFOMETRÍA GEOMÉTRICA	13
6.3. ANALISIS ECOLÓGICO	15
7. RESULTADOS	17
7.1. MORFOMETRÍA TRADICIONAL	21
7.2. MORFOMETRÍA GEOMÉTRICA	24
8. DISCUSIÓN	30
8.1. MORFOMETRÍA TRADICIONAL	30
8.2. MORFOMETRÍA GEOMÉTRICA	32
8.3. COMPARACION ECOMORFOLOGICA	34
9. CONCLUSIONES	38
10. POSICIÓN SISTEMÁTICA DE LAS ESPECIES	39
11. BIBLIOGRAFÍA	40

RESUMEN

Los otolitos son concreciones calcáreas suspendidas en la endolinfa del sistema auditivo interno, ubicado en el neurocráneo. La relación de la morfología de los otolitos con el medio ambiente de los organismos que los portan, es de suma importancia para diversos estudios, como las reconstrucciones paleogeográficas y el establecimiento de stocks pesqueros, todo esto debido a gran cantidad de información que puede ser almacenada en su matriz. Los estudios ecomorfológicos de peces buscan encontrar la relación morfológica con una característica ecológica. El presente trabajo busca evaluar si la forma del sulco acústico y la configuración geométrica morfológica de los otolitos de 5 especies de carángidos, estarán directamente relacionados con el nicho ecológico que ocupa cada una de las especies. Se utilizaron 518 otolitos de 5 especies de carángidos, las cuales son: *Caranx crysos* (N=47), *Caranx hippos* (N=18), *Chloroscombrus chrysurus* (N=254), *Oligoplites saurus* (N=22), y *Selene setapinnis* (N=177). Para el estudio de la morfometría tradicional se utilizaron las medidas obtenidas de los 1036 otolitos, mientras que en la morfometría geométrica solo se utilizaron los datos obtenidos de *Selene setapinnis* (N=20), *Oligoplites saurus* (N=20), *Chloroscombrus chrysurus* (N=20), *Caranx hippos* (N=16), y *Caranx crysos* (N=19) en todos los casos se usaron 11 landmarks, de los cuales 8 eran puntos homólogos y 3 eran puntos pseudo homólogos. Los otolitos de las 5 especies fueron estudiadas por dos tipos de análisis de la forma, tradicional y geométrico, también se describieron, y se estableció el tipo de hábitat de cada organismo, así como los tipos alimentarios dominantes para cada especie para posteriormente dilucidar los patrones ecomorfológicos que siguen los organismos. A lo largo de todos los análisis realizados en el presente trabajo se encontró siempre las mismas agrupaciones, de tal manera que, ambas especies del género *Caranx* mantuvieron la tendencia a generar un primer grupo, de igual manera *Selene setapinnis* y *Chloroscombrus chrysurus*, mientras que *Oligoplites saurus* se separaba de ambas agrupaciones; una de las posible causas de esta separación es la filogenia en sí, como lo infiere Aguirre (2000), que podría estar marcando patrones morfológicos en estas estructuras internas, además de los ya evidentes externamente, debido a que *Oligoplites saurus* es la única especie que según la última revisión de Nelson en 2006 pertenece a una Subfamilia distinta al resto de las especies estudiadas, la Scomberoidinae.

INTRODUCCIÓN

Los peces son los vertebrados acuáticos más diversos, constituyendo alrededor del 50% de éstos, de los cuales el 60% son marinos y el resto dulceacuícolas (Lagler, 1984). La determinación específica de los peces es compleja, debido a la gran diversidad morfológica que presenta este grupo; por lo cual, se utilizan estructuras externas como: forma del cuerpo, número y posición de las aletas, número y tipo de las escamas; características internas como branquias, vejiga natatoria y otolitos para poder determinarlos.

Los otolitos son concreciones calcáreas suspendidas en la endolinfa del sistema auditivo interno, ubicado en el neurocráneo. Reciben diferentes nombres dependiendo del saco membranoso en el que se encuentren: el localizado dentro del utrículo se denomina lapillus, el de la lagena asterisco y el del sáculo sagitta (Mascareñas, 2003). Este último es el más utilizado por ser el de mayor tamaño, principalmente en trabajos relacionados con la determinación de la edad y morfología (Volpedo, 2000).

La función más importante, asociada a los otolitos de los actinopterigios, es la transducción del sonido y la participación en el mantenimiento del equilibrio estático y dinámico (Platt y Popper, 1981).

El estudio de los otolitos se remonta a la antigua Grecia, donde el ilustre pensador Aristóteles dio las primeras referencias de su existencia y ubicación. Muchos siglos después y durante la etapa correspondiente al renacimiento, continuaron los reportes acerca de su extracción en las descripciones de nuevas especies de peces.



El valor que se les ha conferido, ha variado mucho con la época, pues se ha pasado de atribuirles poderes mágicos, curativos e incluso afrodisiacos, durante la edad media, a su pleno reconocimiento hoy en día, como una valiosa herramienta de apoyo en todos los aspectos concernientes al estudio de los peces; incluso en ramas tan aparentemente disímiles como lo son la taxonomía y el establecimiento de patrones migratorios (Tuset y Lombarte, 2008).

Los otolitos están constituidos por cristales de carbonato de calcio inmersos en una matriz orgánica, consistente en una compleja red de macromoléculas (Wright *et al.*, 2002); Los cristales de carbonato de calcio comúnmente están conformados por aragonita que posee forma romboidal (Gauldie y Nelson, 1988). Existen otras formas isoméricas que pueden reemplazar total o parcialmente a la aragonita, como lo son la calcita y la vaterita, particularmente donde imperan ambientes estresantes para los peces (Gauldie, 1993).

Debido a que la morfología de los otolitos varía con las diferentes presiones selectivas, relacionadas con los aspectos funcionales del sistema auditivo de cada taxón, han sido utilizados como una herramienta para la identificación de peces (Popper, 1976; Gauldie, 1988). Con la cual se puede discernir entre las diferentes especies, aún entre aquellas muy cercanas si se caracteriza de manera precisa de su morfología (Volpedo y Echeverría, 1997).

La relación de la morfología de los otolitos con el medio ambiente de los organismos que los portan, es de suma importancia para diversos estudios, como las reconstrucciones paleogeográficas y el establecimiento de stocks pesqueros, todo esto debido a gran cantidad de información que puede ser almacenada en su matriz, lo cual es una



consecuencia inherente a su tipo de conformación en anillos concéntricos de deposición diaria, pero continua a lo largo de toda su ontogenia.

Los estudios ecomorfológicos de peces buscan encontrar la relación morfológica con una característica ecológica, por ejemplo: la morfología del aparato bucal con la dieta (Clifton y Motta, 1998), la longitud del tracto digestivo y la dieta (Veregina, 1991), la forma del cuerpo y localización de las aletas contra el hábitat (Belwood y Wainwright, 2001). Idealmente, el estudio de las relaciones entre las características ecológicas de las especies y las de los sistemas morfológicos requiere, para empezar, de un completo conocimiento de todos los roles biológicos que los sistemas morfológicos cumplen en el ambiente de las especies estudiadas. En otras palabras, se debe observar y conocer cuál es el rendimiento mecánico de un sistema cuando interactúa con el ambiente, para posteriormente comparar las especies que se encuentran en diferentes condiciones ecológicas, lo cual es esencial cuando se busca evaluar las potenciales ventajas del complejo carácter morfológico/ambiente. Por otra parte, un organismo no es únicamente un complejo morfológico, por el contrario, es un sistema complejo que interactúa para mejorar la aptitud del individuo en cada condición ecológica (Parmentier, 2002), lo cual complica su estudio y exige el mayor número de comparaciones, para poder comprender, de una mejor manera, los procesos que se llevan a cabo entre ciertas especies u organismos en un ambiente determinado.

Para poder correlacionar aspectos morfológicos con el ambiente, se usan diversos métodos matemáticos, dependiendo de los datos con los que se cuente o el enfoque que se desee dar a la investigación.



Las especies de la Familia Carangidae son conocidas comúnmente como jureles, pámpanos, palometas, papelillos, entre otros. (Nelson *et al.*, 2004) Son peces marinos de distribución mundial. Su estatus taxonómico actual incluye 32 géneros que a su vez agrupan a 140 especies (Smith-Vaniz, 1984; Gushiken, 1988). La forma corporal de los carángidos puede ser fusiforme a comprimida, aunque una de las características de esta familia es la gran variación morfológica corporal, por lo cual no existe un patrón plenamente establecido, con el cual se pueda describir a casi todos los organismos de este taxón; La mayoría de las especies presentan sólo escamas cicloideas de tamaño pequeño, aunque a veces presentan escamas ctenoideas. Además en muchos carángidos existe una modificación de las escamas del pedúnculo caudal, en su porción lateral, a manera de escudetes óseos. Todas las especies de carángidos presentan dos aletas dorsales, la mayoría con las espinas unidas por una membrana; la aleta caudal bifurcada con un pedúnculo caudal muy delgado; cuentan con aletas pectorales de forma falcada y dos espinas de la aleta anal libres; En cuanto a su desarrollo, algunas especies en estadios juveniles entran a sistemas lagunares estuarinos (Nelson, 2006).



ANTECEDENTES

El estudio de la ecomorfología ha sido desarrollado por diversos autores, se mencionan algunos trabajos a continuación: Klingenberg y Ekau (1996), usaron información de filogenia, crecimiento alométrico y composición de la dieta, para integrar un análisis de la diversificación ecológica y morfológica en la Familia Nototheniidae, con el cual encontraron diferencias en varias especies, debido a que las transposiciones laterales de las trayectorias de crecimiento, que indican que el desarrollo embrionario y larval es determinante y más importante en la variación morfológica que el crecimiento alométrico en los juveniles y adultos.

Aguirre y Lombarte en 1999, establecieron que la relación entre el área de la sagitta y el área del sulco acústico, en el crecimiento postlarval, está caracterizado por un crecimiento alométrico negativo, mostrando diferencias significativas entre *Mullus barbatus* y *M. surmuletus*, lo cual probablemente esté asociado con las diferencias entre el tamaño y la forma de la sagitta, el crecimiento somático y las disimilitudes entre los nichos que habitan.

En 2003, Volpedo y Echeverria estudiaron la morfología y morfometría de las sagittae de varias especies de peces asociadas con diferentes substratos de la plataforma continental de Argentina. Formaron tres grupos, dependiendo de su asociación con el substrato; después de realizar un análisis estadístico a los datos, encontraron que no había diferencias significativas en cuanto a la relación ancho/ largo del otolito (índice E); sin embargo, los valores del índice R (largo del rostro/largo del otolito) fue significativa para los grupos nadadores y frecuentadores de fondos duros, Además estos autores compararon sus resultados con los citados por la literatura y concluyeron que el índice R puede ser



utilizado para caracterizar las sagittae de los peces marinos que habitan diferentes sustratos.

En 2010 Lombarte y colaboradores observaron los patrones ecomorfológicos y la inercia filogenética de la Familia Nototheniidae, por medio del uso de técnicas basadas en imágenes digitales para el análisis morfológico de las sagittae de los organismos de esta familia. Los resultados de los análisis multivariados mostraron la existencia de una relación débil entre la forma del otolito y la filogenia; sin embargo, existe una clara correspondencia entre el tamaño relativo y la forma del otolito con el nicho ecológico de cada pez; con lo cual concluyen que es útil y recomendable analizar el tamaño y forma del otolito en trabajos ecomorfológicos.

Como puede observarse, a nivel mundial en los últimos años se han desarrollado diferentes trabajos asociando la morfología y morfometría de los otolitos con el hábitat que utilizan los peces (Volpedo *et al.* 2000, Volpedo y Echeverria, 2003; Lombarte y Cruz, 2007, Volpedo y Fuchs, 2010), principalmente en el hemisferio sur y en Europa. Sin embargo, en México estos antecedentes son muy escasos. Esto aunado a la necesidad de esclarecimiento de las posibles asociaciones existentes entre los organismos y su ambiente, originadas por la gran heterogeneidad de las especies que conforman la Familia Carangidae, tanto de carácter morfológico como de hábitat, dan pie a la formulación de los siguientes objetivos:



HIPÓTESIS

Las particularidades en la morfología de todas las estructuras, tanto externas como internas de los peces, así como el comportamiento, definen la afinidad de un organismo por un nicho ecológico; de igual manera, estas cualidades son directamente afectadas por la disponibilidad de los recursos del medio, por lo que es evidente la existencia de un vínculo entre la forma, la función y el impacto en el desempeño del organismo, lo cual redundará en adaptaciones a uno u otro medio. Se considera, en este sentido, que la morfología de los otolitos de las especies de carángidos, la forma del sulco acústico y la configuración geométrica, estarán directamente relacionados con el nicho ecológico que ocupa cada una de las especies.



OBJETIVO

Analizar los patrones ecomorfológicos de los otolitos sagitta de cinco especies de carángidos del Golfo de México.

OBJETIVOS PARTICULARES

- Determinar los patrones morfológicos de los otolitos sagitta de las 5 especies de carángidos del Golfo de México.
- Establecer la relación merística entre la morfología del otolito y las diferentes especies.
- Analizar la relación entre la forma de vida y tipo alimentario contra la forma del otolito.
- Comparar los patrones ecomorfológicos de las especies estudiadas.



ÁREA DE ESTUDIO

La República Mexicana posee 11 592 Km de costas, de los cuales 8475.06 corresponden al litoral del Pacífico y 3 117.71 al del golfo de México; al establecerse, en 1976, el régimen de 200 millas náuticas de Zona Económica Exclusiva, quedan bajo jurisdicción nacional 771 500 km² en su porción atlántica, de esa área 234 695 km² pertenecen a la plataforma continental. (INEGI, 2012)

La plataforma continental presenta un declive suave y su profundidad normalmente no excede los 200 m, por lo que es la zona de mayor riqueza biológica del océano. El Golfo de México se caracteriza por contar con la plataforma continental más amplia de todo el litoral mexicano, alcanzando su mayor extensión frente a Campeche y Yucatán, lo cual ubica al estado de Veracruz, en un nivel medio en cuanto a cantidad de plataforma continental frente a sus costas, con 23 700 km².

El material ictiológico se obtuvo de 5 localidades del estado de Veracruz: Punta Gorda, el Puerto de Veracruz, Antón Lizardo, La Barranca, y Puerto de Alvarado; la playa de Punta gorda se localiza en las coordenadas 19° 13' 10.86" N y 96°09'57.33" O; el puerto de Veracruz se encuentra en las coordenadas 19° 11' 48.37" N y 96°07'43.81" O; Antón Lizardo en 19° 03' 40.48" N y 95° 59'48.12" O; La Barranca a 19° 00' 41.20" N y 95°57'59.66" O y Alvarado a los 18° 47' 30.74" N y 95°45'18.59" O. (Fig.1)



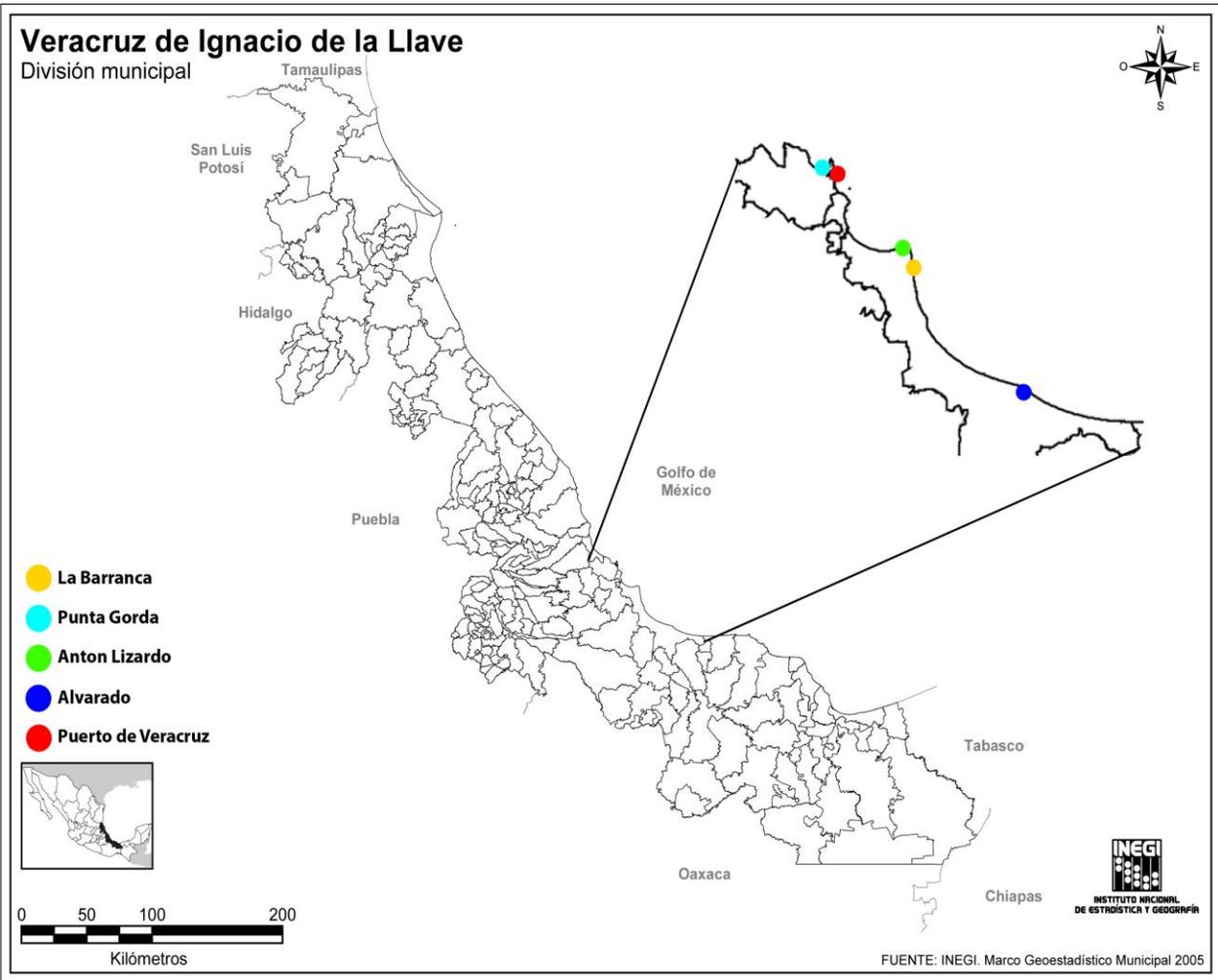


Fig. 1 Mapa donde se ubican las estaciones de muestreo.



MATERIALES Y MÉTODO

Los peces fueron obtenidos con ayuda de un chinchorro playero de 800 m de longitud, con abertura de malla de dos pulgadas y caída de 2 m; posteriormente se tomó fotografía de cada especie, con la finalidad de evitar la pérdida de coloración *postmortem*. Después fueron congelados y depositados en bolsas de plástico para su traslado al laboratorio de Zoología de la FES Iztacala, UNAM.

Se obtuvieron los datos merísticos y morfométricos de los peces; identificándose a los mismos mediante las claves de Hoesse y Moore (1977), Fischer (1978) y Castro-Aguirre, *et al.* (1999). Posteriormente, se procedió a la extracción y limpieza (eliminación de tejidos blandos y restos de materiales no cementados) de los otolitos.

Morfometría es el estudio de la forma y tamaño mediante el uso de descriptores cuantitativos, en el análisis de la forma de los otolitos existen dos grandes ramas, que tienen diferentes enfoques y por ende métodos distintos, la morfometría tradicional o euclidiana y la morfometría geométrica, la primera utiliza la variación combinada de tamaño y forma mediante distancias (d) entre marcas (m) y ubican las muestras (n) como puntos ($P_{i,n}$) en espacios euclidianos (Marcus, 1990). La diferencia entre muestras P_i y P_{ii} es la distancia euclidiana entre esos dos puntos ($P_i - P_{ii}$) en un espacio multivariado, definido por la colección de las variables medidas ($d_{i,k}$), como lo son la longitud patrón, amplitud máxima, etc.; mientras que en la segunda, se usan programas especiales cuyos algoritmos se basan en el ajuste de distancias Procrustes y otros métodos que describen la forma y tamaño a través de coordenadas "x,y" de un conjunto de marcas ($m_{i,k}$) los cuales separan y examinan el cambio entre formas en espacios matemáticos lineales



(Rohlf y Marcus, 1993). En este caso, la diferencia entre formas P_i y P_{ii} es la distancia Procrustes entre esos dos puntos, pero en un espacio curvo dimensionado por la colección de marcas (m_i, k) .

Dado lo anterior, es claro que la morfometría tradicional y la morfometría geométrica son dos tipos de análisis que abordan el estudio de la forma desde perspectivas diferentes; sin embargo, se consideran complementarias, por lo cual en el presente trabajo se decidió usar ambas, para ello la obtención y procesamiento de medidas y datos relativas a la forma de los otolitos se dividió en dos grandes fases; la primera fue el análisis de la morfometría tradicional, para el cual se obtuvo una fotografía de cada uno de los dos otolitos sagitta, por medio de una cámara Sony Cybershot, acoplada a un microscopio óptico marca Zeiss, para después obtener el área total, área ostial, área caudal, área sulcal, ancho y largo de cada otolito, por medio del software especializado de medición DIGIMIZER Versión 3.7.0.

Morfometría tradicional

Posterior a la obtención de las medidas, se calcularon las siguientes relaciones: A_t - A_s , A_o - L_o , A_o - L_p , L_o - L_p , P - L_o y P - L_p , donde A_t = área total, A_s = área sulcal, A_o = ancho del otolito, L_p = longitud patrón, L_o = longitud del otolito y P = peso. Todas las medidas de longitud fueron obtenidas con un calibrador vernier en milímetros y con una precisión de 0.1 mm, mientras que las mediciones de peso se observaron en gramos por medio de una balanza semianalítica con una precisión de 0.001 g. Por medio del programa XLstat, se



realizaron regresiones lineales de cada una de las relaciones establecidas para las medidas lineales; adicionalmente, se generó un análisis de escalamiento multidimensional (Sookal y Rhol, 1995).

Morfometría Geométrica

La segunda fase fue el análisis de morfometría geométrica, para ello primero se digitalizaron los landmarks, a partir de una imagen de microscopía electrónica de barrido (SEM), solo del otolito derecho de 20 organismos, escogidos al azar, de las muestras de cada una de las cinco especies.

En este tipo de estudios, la captura de datos se basa en el establecimiento de dos tipos de “marcas”, los primordiales son los denominados landmarks, su cualidad absolutamente indispensable, para el correcto análisis de la forma, son puntos homólogos por lo que deben de estar presentes en la totalidad de las muestras analizadas; el segundo tipo se conoce como semilandmark, o punto deslizante, debido a que su colocación está asociada a la mejor apreciación del cambio de tamaño en una estructura en específico. Para cumplir con las cualidades estipuladas para el establecimiento de landmarks y semilandmarks, primero se marcó un “peine digital” en cada foto con el programa MakeFan6, para colocar los semilandmarks de manera más eficiente y homogénea, en la intersección de cada una de las líneas del peine digital se colocó un semilandmark con el borde del sulco acústico. La ubicación de los landmarks fue ejecutada manualmente, observando la morfología de las estructuras. Para capturar la configuración geométrica de cada uno de los puntos anatómicos marcados con landmarks y semilandmarks, se



convirtieron en coordenadas en un plano bidimensional mediante la ayuda del programa tpsDig2 (Rolhf, 2008).

En total se usaron 8 landmarks (enumerados del 1 al 8) y 3 semilandmarks (números 9 al 11); las localizaciones de cada uno son las siguientes: el punto 1 en el cruce del borde exterior y la crista ventral del ostio; el punto 2 sobre la crista del sulco en la porción ventral o inferior del cuello; el punto 3 sobre el borde de la cauda al comienzo de la primera curva descendente; el punto 4 sobre el borde de la cauda al principio de la 2^{da} curva descendente; el punto 5 al comienzo de la curva ascendente; el punto 6 al final de la curva ascendente; el punto 7 sobre la crista del sulco en la porción dorsal o superior del cuello; el punto 8 en la punta del antirrostro; el punto 9 en la intersección de la línea del peine digital (que se encuentra a la mitad de la distancia y a 90° de la línea formada entre el punto 1 y 2) con la crista o borde ventral del ostio; el punto 10 en la intersección de la línea del peine digital (que se encuentra a la mitad de la distancia y a 90° de la línea formada entre el punto 2 y 3), con la crista o borde ventral de la cauda, y por último, el punto 11 se encuentra en la prolongación de la línea del peine digital con la que se formó el punto 10, pero en la intersección con la crista o borde dorsal de la cauda (Fig. 2). La matriz de coordenadas, que representaba las configuraciones geométricas de los sulcos acústicos, se procesó usando el análisis generalizado de Procrustes, con la ayuda del programa computacional MorphoJ, con el cual se efectuaron los análisis a las configuraciones geométricas expresadas en coordenadas, que se almacenaron dentro de una archivo .tps por cada especie; los análisis ejecutados fueron, uno de variables canónicas y otro de componentes principales, para posteriormente comparar las



agrupaciones de las especies con las generadas en los análisis de medidas euclidianas y las de tipo ecológico.

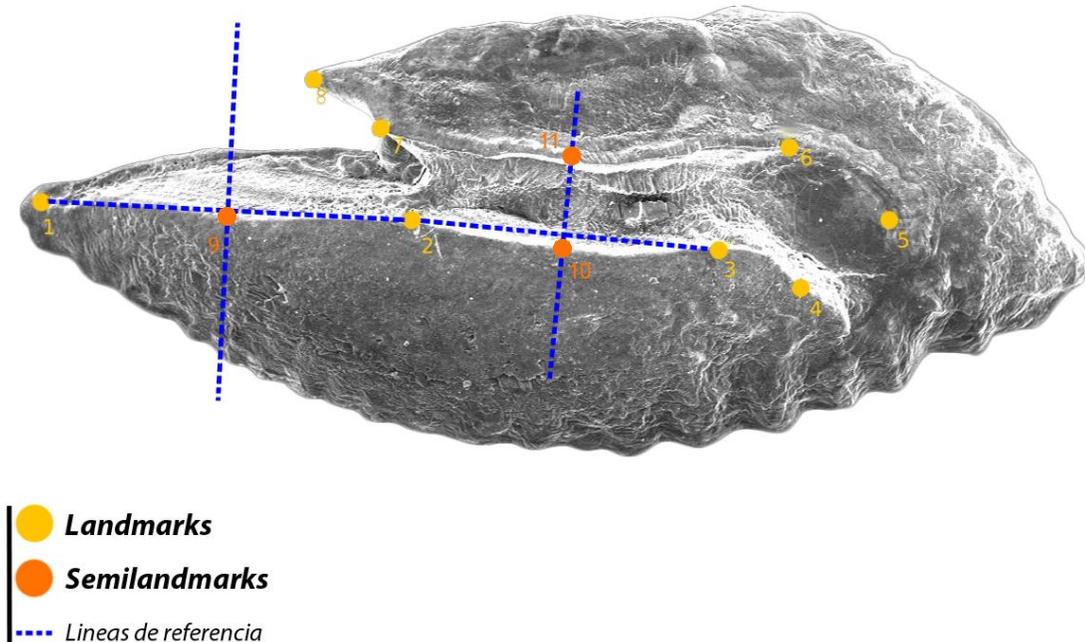


Fig. 2 Esquema con la localización de los puntos de digitalización en el otolito.

Análisis ecológico

Se describió la forma del otolito sagitta de las cinco especies, para posteriormente contrastar estos aspectos descriptivos con el tipo de nicho ecológico y el tipo de hábito alimenticio de cada uno de los organismos obtenidos, a partir de una extensiva revisión bibliográfica.

De igual manera se obtuvieron los índices E y R para todas las especies, el E ($E = AO/LO$ %) que sirve para visualizar la tendencia en la forma de la sagitta y el R ($R = LR/LO$ %) en la cual se observa el porcentaje de la longitud de la sagitta que corresponde al rostro propuestos por Volpedo y Echeverria (2003).



Con la intención de estandarizar y sustentar, de manera apropiada, las comparaciones descriptivas de la forma de los otolitos, la nomenclatura utilizada como base, es la publicada por Tuset *et. al.* (2008) (fig. 3)

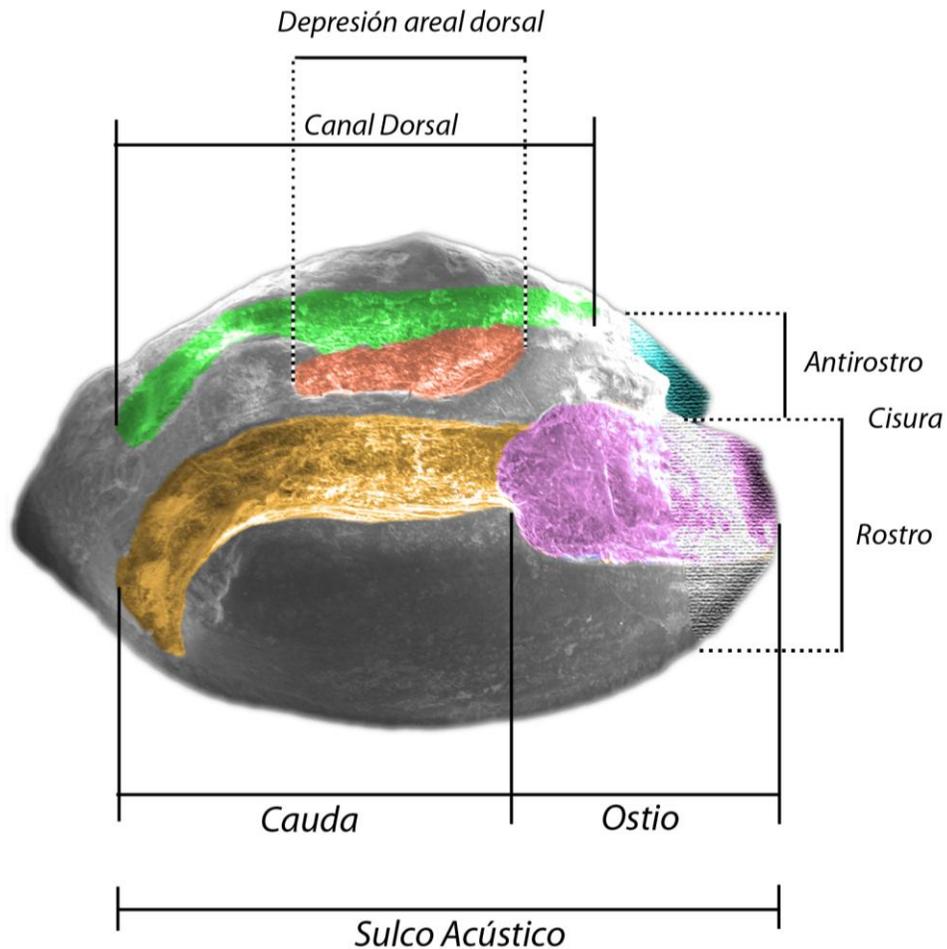


Fig. 3 Esquema con los nombres de las zonas del otolito.



RESULTADOS

En el presente trabajo se utilizaron 518 otolitos de 5 especies de carángidos, las cuales son: *Caranx crysos* (N=47), *Caranx hippos* (N=18), *Chloroscombrus chrysurus* (N=254), *Oligoplites saurus* (N=22), y *Selene setapinnis* (N=177).

Para el estudio de la morfometría tradicional se utilizaron las medidas obtenidas de los 1036 otolitos, mientras que en la morfometría geométrica solo se utilizaron los datos obtenidos de *Selene setapinnis* (N=20), *Oligoplites saurus* (N=20), *Chloroscombrus chrysurus* (N=20), *Caranx hippos* (N=16), y *Caranx crysos* (N=19) en todos los casos se usaron 11 landmarks, de los cuales 8 eran puntos homólogos y 3 eran puntos pseudo homólogos.

A continuación se describe la forma de los otolitos de las 5 especies.

La primera especie es ***Oligoplites saurus***, su otolito sagitta es de forma trapezoidal; el borde anterior es puntiagudo y sinuado y el borde posterior es oblicuo e irregular, el borde dorsal es irregular y el ventral es liso. El sulco acústico es de tipo heterosulcoide, con modo de abertura ostial en posición medial; el ostio tiene forma oblonga y un tamaño de aproximadamente dos terceras partes de la longitud de la cauda, la cisura es muy marcada, casi del tamaño del ostio, lo cual genera un rostro puntiagudo prominente y un antirrostro pequeño, el cuello es muy reducido y difuso en forma de “U”. La cauda es tubular, ligeramente curvada y profunda. Presenta una depresión areal dorsal bastante evidente.

El otolito de ***Caranx crysos*** es de forma oblonga; el borde anterior es puntiagudo y sinuado, mientras que el borde posterior es oblicuo y crinado; tanto el borde dorsal como



el ventral son crinados. El sulco acústico es de tipo heterosulcoide, con modo de abertura de tipo ostial y en posición supramedial; la longitud del ostio es igual a la de la cauda, es de forma alargada, el rostro tiene forma de punta y el antirrostro también es puntiagudo, pero aproximadamente de un cuarto del tamaño del rostro; presenta un cuello triangular con un claro desfase entre el fondo del ostio y el de la cauda. La cauda es tubular, fuertemente curvada y profunda; la presencia de las cristas es clara en la porción recta de la cauda y desaparecen la curvatura de la parte final.

Caranx hippos tiene una sagitta de forma oblonga; el borde anterior es puntiagudo y sinuado, mientras que el borde posterior es oblicuo y recto; el borde dorsal es sinuado y el ventral es crinado. El sulco acústico es de tipo heterosulcoide, con modo de abertura de tipo ostial y en posición supramedial; el área ostial es del mismo tamaño que el área de la cisura, que es de forma triangular, la cual genera un rostro alargado en forma de punta y un antirrostro también puntiagudo, pero más reducido; el tamaño del ostio es un tercio del de la cauda; presenta un cuello cuneiforme, por lo que el ostio se une a la cauda diagonalmente. La cauda es tubular, fuertemente curvada, bastante profunda en casi toda su extensión, aunque muestra una tendencia a disminuir su profundidad hacia el final; las cristas de la cauda están bien desarrolladas excepto en el final, donde desaparecen. De igual manera, se observa una depresión areal ventral, poco profunda, cerca del borde.

La sagitta de ***Chloroscombrus chrysurus*** es de forma lanceolada; el borde anterior es puntiagudo y sinuado, mientras que el borde posterior es oblicuo y recto; el borde dorsal es sinuado al igual que el borde ventral. El sulco acústico es heterosulcoide, con modo de abertura de tipo ostial y posición supramedial; el área ostial es muy reducida, debido a la presencia de una cisura amplia, el rostro es alargado en forma de punta, el antirrostro es triangular y más pequeño. La cauda es tubular, fuertemente curvada y con una

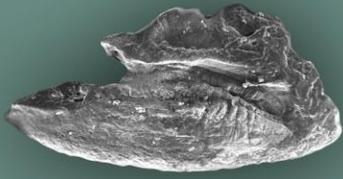


profundidad bastante marcada y constante a lo largo de la misma, ambas cristas de la cauda están poco desarrolladas.

Por último, ***Selene setapinnis*** cuenta con una sagitta que es de forma rectangular; el borde anterior es oblicuo y crinado, mientras que el borde posterior es oblicuo y sinuado; por otra parte, el borde dorsal es sinuado y el ventral es crinado. El sulco acústico es de tipo heterosulcoide, con modo de abertura de tipo ostial y en posición supramedial; el área ostial es muy reducida, debido a la presencia de una cisura amplia, de forma angular; el rostro tiene una anchura casi igual a la del mismo otolito que termina en punta y un antirrostro puntiagudo muy reducido; el cuello cuneiforme hace patente la transición entre el ostio y la cauda. La cauda es tubular, poco curvada, con una profundidad marcada y sus cristas están bien desarrolladas a lo largo de dos tercios de la longitud de la misma, para desaparecer a partir de la curvatura presente en el último tercio.

En la fig.4 se muestran las fotografías de los organismos de las 5 especies con sus respectivos otolitos, en las cuales se pueden observar las marcadas diferencias interespecíficas en cuanto a forma, tanto corporal como del otolito.

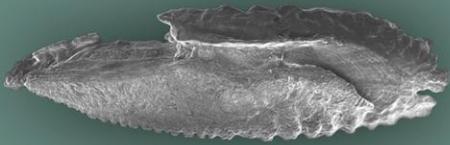




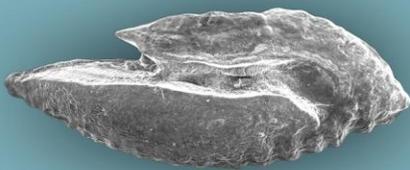
Oligoplites saurus



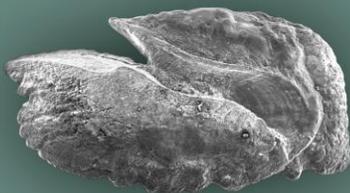
Caranx crysos



Caranx hippos



Choloroscombrus crysurus



Selene setapinnis



Fig. 4 Esquema con las fotografías de los peces y sus respectivos otolitos en imágenes del SEM de las 5 especies utilizadas.

MORFOMETRÍA TRADICIONAL

Se calculó el tipo de crecimiento en la relación entre el peso del pez y el tamaño del otolito con una *t* de Student, en la cual *b* es el coeficiente de alometría y si ($b < 3$, $p < 0.05$) la relación será considerada como isométrica (tabla 1), la ecuación utilizada fue:

En donde:

$$t = \frac{b-3}{Sb}$$

t = valor de *t*- Student *b* = pendiente *Sb* = error estándar

Especie	<i>b</i>	<i>Sb</i>	<i>t</i>	Tipo de crecimiento
<i>Caranx crysos</i>	3.014	0.121	0.116	isométrico
<i>Caranx hippos</i>	3.052	0.108	0.481	isométrico
<i>Chloroscombrus chrysurus</i>	2.654	0.042	-8.238	isométrico
<i>Selene setapinnis</i>	3.035	0.080	0.438	isométrico
<i>Oligoplites saurus</i>	3.746	0.169	4.414	alométrico (+)

Tabla 1. Intervalos de longitud y peso de las 5 especies.

Volpedo (2001), confirma que las sagitta, derecha e izquierda de los peces simétricos, no sólo son imágenes especulares morfológicamente, si no que son iguales morfométricamente, esto permite utilizar indistintamente cualquiera de los otolitos en estudios posteriores; sin embargo, se utilizó los promedios de ambos otolitos, porque se logra minimizar aun mas las diferencias entre las dos sagitta, aunque sean estadísticamente iguales. A continuación se muestran los intervalos de peso y de longitud patrón de las cinco especies:

Especie	Intervalo de Lp	Intervalo de peso
<i>Caranx crysos</i>	115mm - 217mm	25.5g - 192.7g
<i>Caranx hippos</i>	136mm - 265mm	54.7g - 450.5g
<i>Chloroscombrus chrysurus</i>	123mm - 215mm	32.9g - 148g
<i>Oligoplites saurus</i>	136mm - 259mm	17.7g - 124.3g
<i>Selene setappinis</i>	116mm - 222mm	138.8g - 284.2g



Tabla 2. Intervalos de longitud y peso de las 5 especies.

Con estas medidas se calcularon las relaciones antes mencionadas para cada especie, con su respectivo número de organismos, ecuación, coeficiente de correlación y se agruparon en las tablas 3, 4 y 5.

Especie	Relación	n	Ecuación	R
<i>Caranx crysos</i>	P-Lp	44	$W = 3.014 x^{-4.688}$	0.967
	P-Lo		$W = 3.146 x^{-0.031}$	0.827
<i>Caranx hippos</i>	P-Lp	18	$W = 3.052 x^{-4.734}$	0.989
	P-Lo		$W = 3.677 x^{-0.511}$	0.963
<i>Chloroscombrus chrysurus</i>	P-Lp	245	$W = 2.655 x^{-4.016}$	0.970
	P-Lo		$W = 2.771 x^{-0.013}$	0.752
<i>Oligoplites saurus</i>	P-Lp	20	$W = 3.747 x^{-6.713}$	0.981
	P-Lo		$W = 3.161 x^{0.515}$	0.925
<i>Selene setapinnis</i>	P-Lp	171	$W = (3.038 x^{-4.722})$	0.956
	P-Lo		$W = (2.569 x^{0.242})$	0.843

Tabla 3. Condensado de relaciones peso-longitud de todas las especies y sus coeficientes.

Especie	Relación	n	Ecuación	R
<i>Caranx crysos</i>	Lo-Lp	44	$Y = 1.561 + 0.018 x$	0.806
	Ao-Lo		$Y = 0.816 + 0.215 x$	0.733
	Ao-Lp		$Y = 0.891 + 0.005 x$	0.820
<i>Caranx hippos</i>	Lo-Lp	18	$Y = 1.563 + 0.021 x$	0.909
	Ao-Lo		$Y = 0.498 + 0.259 x$	0.882
	Ao-Lp		$Y = 0.706 + 0.006 x$	0.931
<i>Chloroscombrus chrysurus</i>	Lo-Lp	245	$Y = 2.140 + 0.015 x$	0.723
	Ao-Lo		$Y = 0.790 + 0.292 x$	0.700
	Ao-Lp		$Y = 1.272 + 0.005 x$	0.604
<i>Oligoplites saurus</i>	Lo-Lp	20	$Y = -0.122 + 0.015 x$	0.883
	Ao-Lo		$Y = 0.315 + 0.426 x$	0.794
	Ao-Lp		$Y = -0.146 + 0.008 x$	0.913
<i>Selene setapinnis</i>	Lo-Lp	171	$Y = 0.522 + 0.026 x$	0.801
	Ao-Lo		$Y = -0.164 + 0.653 x$	0.942
	Ao-Lp		$Y = 0.118 + 0.017 x$	0.782

Tabla 4. Condensado de relaciones lineales de todas las especies y sus coeficientes.



Especie	Relación	n	Ecuación	R
<i>Caranx crysos</i>	At-As	44	$Y = -0.150 + 0.304 x$	0.928
<i>Caranx hippos</i>	At-As	18	$Y = 1.336 + 2.837 x$	0.962
<i>Chloroscombrus chrysurus</i>	At-As	245	$Y = 1.863 + 3.078 x$	0.915
<i>Oligoplites saurus</i>	At-As	20	$Y = 0.066 + 3.586 x$	0.932
<i>Selene setapinnis</i>	At-As	171	$Y = 3.285 + 3.664 x$	0.951

Tabla 5. Condensado de relaciones de áreas de todas las especies y sus coeficientes.

Se puede observar el comportamiento de las 5 especies de acuerdo únicamente con los valores de la relación Área total/Área sulcal (fig.5) donde el orden de las especies es decreciente, según el tamaño de su sulco acústico, dado que el valor de relación es inversamente proporcional al tamaño del otolito; los organismos del género *Caranx* son los que cuentan con menor área sulcal, mientras que la especie con mayor tamaño de sulco acústico, en relación al del propio otolito, es *Selene setapinnis*.

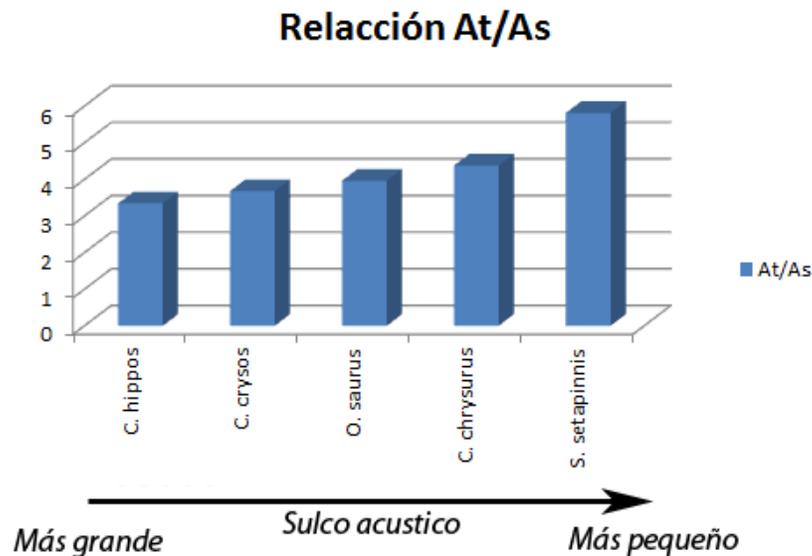


Fig. 5 Promedios de At/As por cada especie.

Posteriormente, se llevó a cabo un análisis de escalamiento multidimensional (MDS), en el cual se utilizó la matriz de medidas lineales de todas las especies para probar la similitud entre especies; el resultado fueron tres grupos distribuidos en plano cartesiano (fig. 6).



MDS-10 MEDIDAS EN OTOLITOS CARANGIDOS (stress: 0.018)

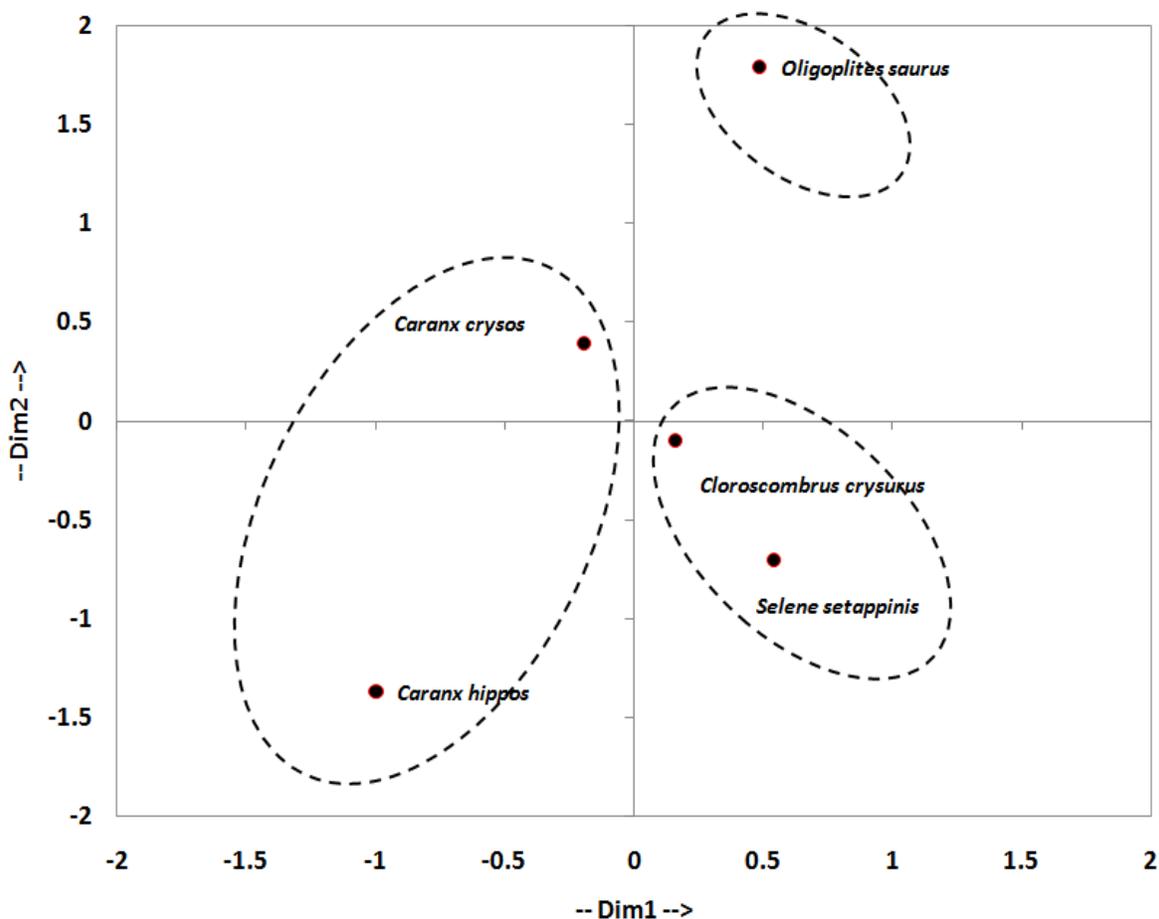


Fig. 6 Cuadrante obtenido por MDS, donde se ubica a las especies de acuerdo a su similitud morfométrica.

MORFOMETRÍA GEOMÉTRICA

Podemos observar los 1045 landmarks digitalizados en total, en azul se observan los landmarks considerados como “consenso” de las coordenadas de todas las especies, las nubes de puntos que rodean a cada uno representan a cada una de las coordenadas de todos los organismos y la distancia a la cual se encuentran de su respectivo punto azul, es el grado de variación morfológica con respecto al mismo (fig. 7).



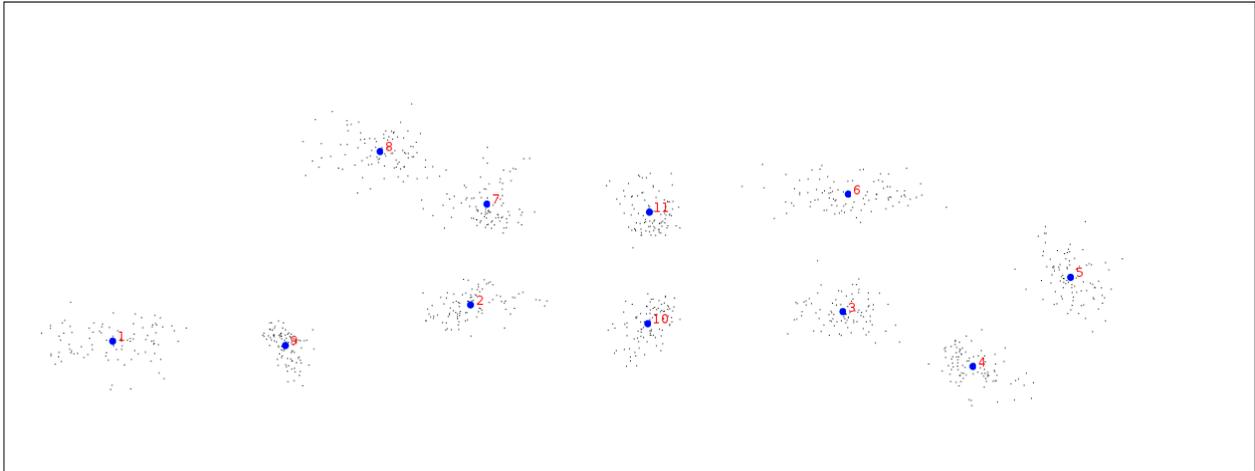


Fig. 7 Acomodo de landmarks y semilandmarks de todas las especies.

Una vez que se hizo el compendio de todos los landmarks, se ajustaron mediante el procedimiento de Procrustes y después se realizó un análisis de componentes principales o PCA por sus siglas en ingles. En la fig.8, se observa la malla de deformación generada con el programa MorphoJ, el cambio en la forma de la rejilla se enfatiza en el segundo tercio, además se puede ver una línea que sale de cada landmark azul, esta representa la dirección o tendencia en la cual ocurrió el cambio de forma para ese determinado punto, de tal manera que si se usan ambos patrones juntos, se puede visualizar de una manera más acertada la porción del sulco acústico, que resulta más modificada, en este caso el landmark no.1 observa un patrón de deformación lineal hacia la derecha, al igual que la rejilla de deformación, es importante resaltar que los puntos 2, 7 y 8 presentan un patrón direccional con tendencia hacia la izquierda, y que el punto 9 tiene un cambio muy pequeño en su posición, con lo cual se puede establecer que el área del ostio sufre una contracción proporcional en su tamaño con tendencia al centro del mismo. Los puntos 10 y 11 son semilandmarks y la razón por la que se colocaron en esas posiciones es para observar el cambio en el grosor de la cauda, el cual ocurre principalmente en dirección del



eje X, y en menor medida en el eje Y, con lo cual se denota un alargamiento en el primer tercio de la cauda y una variación en el grosor de la misma. El punto 6 se encuentra en el borde dorsal del sulco, justo en donde comienza la curva descendente y tiene una dirección de cambio hacia la derecha bastante evidente; por su parte, el punto 3 se localiza en la misma región, pero en el borde ventral y presenta un cambio de patrón muy reducido, tanto el punto 4 como el 5 tienen un cambio casi nulo.

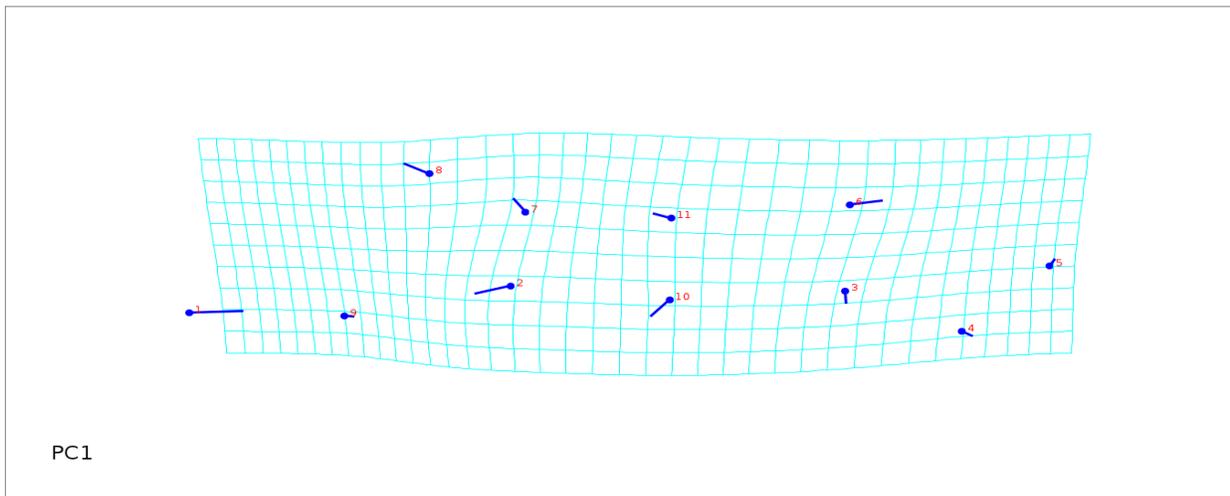


Fig. 8 Malla de deformación con la configuración geométrica obtenida por PCA.

Una manera de apreciar la formación de grupos de especies, con características morfológicas afines, es graficar sobre el plano cartesiano con valores positivos y negativos, todos los puntos de cada organismo de cada especie y asociar a cada especie con un color distintivo (fig.9); se puede observar un primer grupo conformado por las nubes de puntos morados y rojos asociadas a las especies *Caranx hippos* y *Caranx crysos*, un segundo conformado por los puntos amarillos y azules de *Chloroscombrus chrysurus* y *Selene setapinnis* respectivamente y la tercer nube un poco más alejada del resto de *Oligoplites saurus* con puntos verdes.



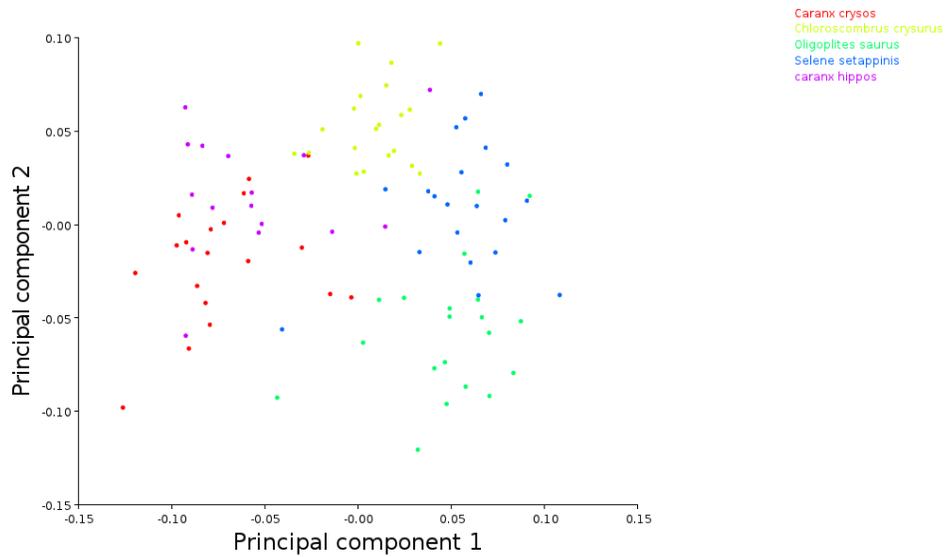


Fig. 9 Disposición de coordenadas geométricas de todos los organismos de las 5 especies obtenidas por PCA.

Los eigenvalores que se desprenden del PCA generan una gráfica de barras que muestra el porcentaje de variación de cada uno de los componentes, en ella se observa que el componente no.1 tiene una variación de 34.4%, el componente no.2 de 22.2% y el componente 3 de 11.6%, sumando un porcentaje de variación acumulativa de 68.4 en los primeros tres componentes, lo cual denota que en estos primeros 3 pasos se encuentra alrededor de 3/4 partes de la variación morfológica (fig. 10).

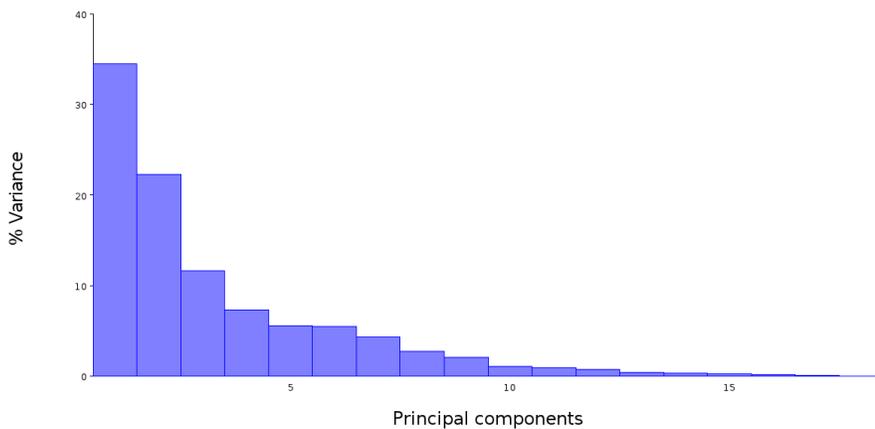


Fig. 10 Grafica de barras de los eigenvalores.



Posteriormente se realizó un análisis de variables canónicas o CVA por sus siglas en inglés, con el cual también se obtuvo una imagen de malla de deformación, en ella, al igual que en la generada por PCA, el cambio más evidente en la forma se localiza en la parte media del sulco, y aunque en este procedimiento se enfatiza el cambio en el grosor del sulco acústico en la porción recta de la cauda (fig.11), también se apoya la reducción en área del ostio mostrada en la imagen de componentes principales.

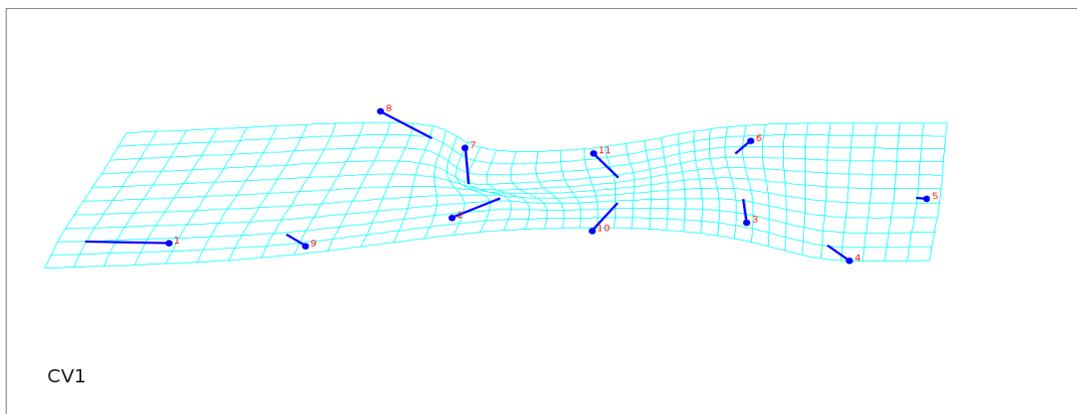


Fig. 11 Malla de deformación con la configuración geométrica obtenida por CVA.

Después se colocaron los puntos analizados por CVA en un plano cartesiano (fig. 12), para observar las agrupaciones generadas por las nubes de puntos, y de nuevo se encontró que *Caranx hippos* y *Caranx crysos* formaban una agrupación, *Chloroscombrus chrysurus* y *Selene setapinnis* con puntos verdes y morados eran un segundo grupo y *Oligoplites saurus* en azul se apartaba una vez más.



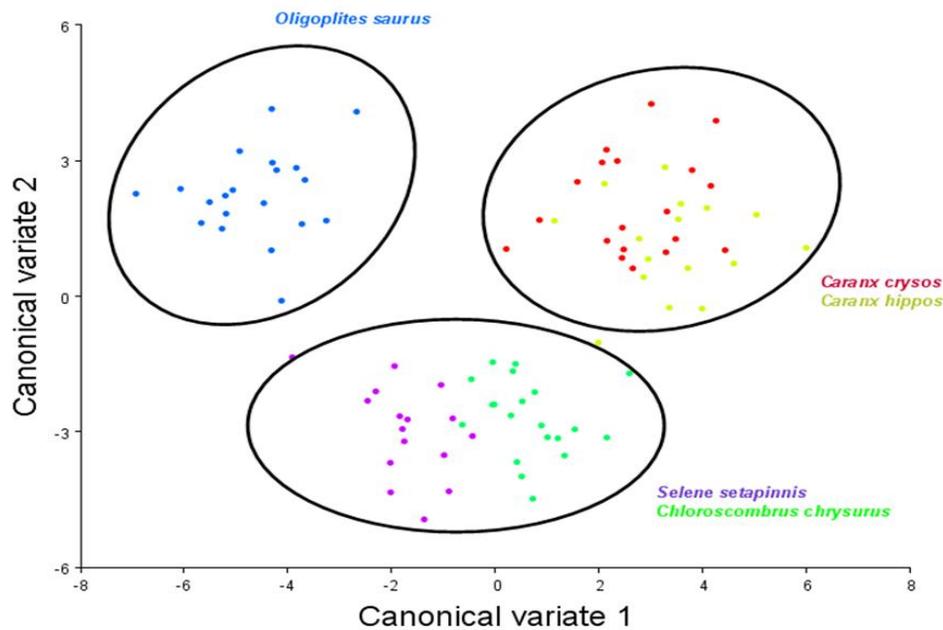


Fig. 12 Disposición de coordenadas geométricas de todos los organismos de las 5 especies obtenidas por CVA

Basados en la información de la FishBase se realizó una recopilación bibliográfica de los principales componentes de la dieta y tipo de hábitat de cada especie, para su posterior comparación.

Especie	Tipos alimentarios	Tipo de hábitat
<i>Caranx crysos</i>	Peces, camarones y otros invertebrados	Pelágico- No lejos de la costa
<i>Caranx hippos</i>	Pequeños peces, camarones y otros invertebrados	Pelágico- En aguas neríticas sobre la plataforma continental
<i>Chloroscombrus chrysurus</i>	Peces, cefalópodos, zooplancton y detritos	Demersal- Asociado a fondos blandos de la plataforma continental
<i>Oligoplites saurus</i>	peces y crustáceos	Pelágico- A lo largo de las playas de arena, en las bahías y ensenadas
<i>Selene setapinnis</i>	Peces pequeños y crustáceos	Demersal- Cerca del fondo en aguas costeras al menos a 54 m de profundidad

Tabla 3. Relación entre tipo alimentario y hábitat de cada especie según (FishBase, 2012).



DISCUSIÓN

Morfometría Tradicional

El peso contra la longitud patrón es la relación más estable de todas las generadas con un valor mínimo de correlación de 0.956 y un máximo de 0.989, además el tipo de crecimiento de *C. hippos*, *C. crysos*, *C. chrysurus* y *S. setapinnis* es isométrico con lo cual se confirma que al tratar de hacer una inferencia sobre el peso del organismo, basado únicamente en la longitud patrón, el valor estimado tendría un error muy reducido, (tablas 1 y 3).

Para Lo-Lp el valor mínimo entre las 5 especies fue de 0.723 y el máximo de .909 en este caso la única especie que presentó una R menor de 8 fue *C. chrysurus*, debido a que la diferencia es reducida puede ser explicada por el mayor número de organismos colectados; sin embargo, todas las especies son estadísticamente bien representadas por sus respectivas ecuaciones.

Para la relación Ao-Lo los valores fluctuaron entre 0.700 y 0.942. *Caranx crysos* y *Chloroscombrus chrysurus* fueron las 2 especies que presentaron los registros más bajos, por debajo de 0.8; en las 3 especies restantes si fue significativo, la discrepancia que existe puede ser explicada por que la misma naturaleza de las mediciones lineales las hace susceptibles de ser fuertemente influenciadas por la pequeña variación intraespecifica en la morfología del borde de los otolitos, situación que si bien mirándose desde un contexto general, no aporta mucho error estadístico, cuando se realizan análisis más focalizados, sobre un par de variables en particular, como el largo y ancho, puede



elegir su grado de representatividad, en especial en el caso de *C. chrysurus*, debido al mayor número de muestras analizadas.

En la relación Ao-Lp el intervalo fue de 0.604 a 0.913. *Chloroscombrus chrysurus* y *Selene setapinnis* obtuvieron los valores más bajos, situación que se puede explicar visualizando que son las dos especies con el mayor número de organismos colectados (tabla 4), tomando en cuenta que en esta relación interviene la longitud patrón, el decremento en los niveles de significancia se puede asociar directamente a la dificultad inherente a la obtención de dicha medida, debido a que como lo plantean (Yigin y Ismen, 2009), puede ser influenciada por una gran variedad de factores, tanto endógenos como exógenos, como los son: sexo, fase de crecimiento, estado de salud, e incluso método de preservación.

La relación At-As se encuentra en un rango de entre 0.915 y 0.962 de correlación, con lo cual queda de manifiesto que la ecuación que describe el comportamiento de la relación en todas las especies, es aplicable para despejar cualquiera de las dos variables; además, confirma que la relación entre el área del otolito y el área del sulco acústico es proporcional y se mantiene entre la gran mayoría de los organismos de la misma especie, por lo cual, se puede utilizar para estimar, por ejemplo, el área del otolito a partir del área sulcal, aun cuando la estructura presente rupturas o daños que imposibiliten la obtención del área total (tabla 5)

En el análisis de escalamiento multidimensional (MDS) se encontraron tres grupos distribuidos en plano cartesiano, el primero compuesto por las especies *C. hippos* y *C.*



crysos, el segundo por *C. chrysurus* y *S. setapinnis* y el tercero por *O. saurus*; cabe hacer notar que el estrés de la prueba es de 0.018.

Morfometría Geométrica

El borde de los otolitos sagitta, de las cinco especies estudiadas, tienen una clara disimilitud morfométrica interespecífica, por lo que su análisis claramente las separaría, y debido a que el objetivo que se busca es visualizar, de una mejor manera, las posibles homologías que agrupen a dos o más de las especies estudiadas, en el presente trabajo solo se analizó por medio de técnicas de morfometría geométrica la forma del sulco acústico de los otolitos sagitta.

Tras aplicar el primer procedimiento matemático que se aplica a los datos crudos, que es el análisis generalizado de Procrustes, en el cual se ejecutan sus tres pasos iterativos, se calculó una configuración geométrica de referencia, que progresivamente se va precisando con cada repetición. Al final, se obtuvieron las variables que incorporan las desviaciones de cada configuración respecto a la de referencia. Estas variables son libres de la variación que no es biológica y no se ven afectadas por los cambios de tamaño, posición y orientación de las configuraciones en el espacio. (Bookstein, 1997). Por lo tanto, contienen toda la información de la conformación del sulco acústico del otolito y se pueden utilizar para comparar las especies mediante análisis estadísticos multivariados.



Como resultado del análisis de componentes principales, se obtuvieron tres gráficos, el primero es una rejilla que es deformada en el área que el programa encuentre cambios en la forma entre cada una de las especies, además se muestran los landmarks en el mismo orden en el que se digitalizaron, con marcas que indican la dirección del cambio; el orden de análisis es de la parte anterior del otolito hacia la posterior, el primer aspecto que se observa es la marcada reducción en el tamaño del ostio, lo cual, en principio, nos indica que el tamaño del área del ostio del otolito es muy variable entre las especies, después se puede ver que aumenta la longitud de la cauda en su primer tercio, mientras que el grosor varía, pero en menor medida, el último punto que se debe resaltar es el corrimiento de la posición de la curvatura dorsal de la cauda.

En la figura 9 se puede apreciar la distribución de las especies dentro del morfoespacio, delimitado por el plano cartesiano, las agrupaciones ocurren de la siguiente manera; las dos especies del género *Caranx* se transponen, mientras que *Chloroscombrus chrysurus* y *Selene setapinnis* se encuentran muy juntos, sin llegar a mezclarse; por último, el más alejado de los demás es *Oligoplites saurus*, aunque algunos puntos muestran cierta similitud con *Selene setapinnis*. Dado que el análisis, por medio de morfometría geométrica, discrimina cualquier tipo de tendencia que no sea estrictamente el patrón de su forma, se puede afirmar que las dos especies del género *Caranx* presentan otolitos de forma muy similar, lo cual es lógico si se toma en cuenta que son especies filogenéticamente muy cercanas (Nelson 2006); si bien *C. chrysurus* y *S. setapinnis* no son especies tan cercanas como las anteriores, ambos géneros pertenecen a la misma subfamilia; además, dado el elevado número de organismos en particular de estas dos especies, que se obtuvieron en cada colecta, se puede inferir que existe cierta afinidad de



carácter etológico, por el cual, cardúmenes de ambas especies conviven muy cercanamente; *O. saurus* es la especie con menos semejanzas con las demás especies, es la única que pertenece a una Subfamilia diferente, Scomberoidinae, lo cual le confiere cualidades muy diferentes en cuanto a la forma a su otolito y se refleja en su distancia con las demás especies en el plano cartesiano.

Con el mismo dataset ajustado, se llevó a cabo el CVA, en el cual se generó otra rejilla de deformación, en esta, tanto la región del ostio que muestra un patrón de contracción, como la zona terminal de la cauda, que tiene un desfase en el inicio de la curvatura descendente, habían sido observados en el PCA; sin embargo, en este análisis de covarianza, resulta evidente una contracción en la malla de deformación en la región media del otolito y por tanto, en el grosor del sulco acústico, mientras que las líneas que indican la dirección del cambio muestran que la porción recta de la cauda se comprime; basados en estas observaciones, se puede inferir que el área sulcal varía en tamaño entre las especies, lo cual respalda los resultados mostrados en la figura 5, en la cual se visualiza el ordenamiento de las especies dada su relación entre At y As.

Comparación Ecomorfológica

Volpedo y Echeverría (2003), proponen que el índice E puede ser utilizado para discriminar entre las sagitta de los peces asociados al substrato y de las de los peces pelágicos, mientras que el índice R puede ser usado para discriminar entre las sagitta de diferentes ecotipos atendiendo los siguientes parámetros: índices por encima de 30 son



encontrados en peces pelágicos y los índices por debajo de 30 se encuentran en todos los peces asociados a los fondos. Altos valores de R están relacionados con hábitat pelágico, mientras que valores bajos los relacionan con sustratos suaves.

Los valores teóricos establecidos por la literatura para las cinco especies son los siguientes; para *Caranx hippos* E=45 R=36, *Caranx crysos* E=33 R=34, *Oligoplites saurus* E=56 R=32, *Chloroscombrus chrysurus* E=49 R=31, *Selene setapinnis* E=68 R=31 (Albihôa and Correa, 1993), por lo cual, todas las especies entran dentro de la categoría de peces pelágicos. Cabe denotar que este carácter ya estaba establecido para todas las especies desde hace mucho tiempo, la diferencia es que era atribuido por las características morfológicas externas del pez, por lo que en el presente trabajo se confirma la gran utilidad de estos índices, puesto que se puede inferir el ecotipo de los peces de manera acertada, por medio la obtención de los otolitos.

Además, otro procedimiento que determina, de otra manera, el posible ecotipo es el propuesto por (Gauldie, 1988), que establece que la proporción del área de la mácula versus el área del otolito y por consecuencia la proporción entre el área del sulco acústico y el área del otolito de peces pelágicos, es más baja que en los peces asociados a los fondos, de tal manera que observando el gradiente mostrado en la fig 5 se puede afirmar que las dos especies del Género *Caranx* pertenecen a hábitats completamente de media agua, mientras que *Selene setapinnis* mantiene cierto vínculo con el fondo.

Como lo menciona De la cruz Agüero *et. al.* (2011), las diferencias en los valores de b son atribuidas en otros trabajos a muchos factores como: el sexo, la madurez gonádica, la fase de crecimiento, la temperatura, la temporada, salinidad e incluso la técnica de



preservación, con lo cual puede explicarse la disminución en este valor en la especie *C. chrysurus*.

Los otolitos de las 5 especies fueron estudiadas por dos tipos de análisis de la forma, tradicional y geométrico, también se describieron, y se estableció el tipo de hábitat de cada organismo, así como los tipos alimentarios dominantes para cada especie para posteriormente dilucidar los patrones ecomorfológicos que siguen los organismos.

C. hippos y *C. crysos* son las especies más cercanas filogenéticamente del estudio, y como tales siempre se mantuvieron muy cercanas en todos los gráficos realizados, sin embargo, la similitud encontrada en todos análisis de la forma del otolito así como el claro parecido externo de ambos peces, se puede asociar a que las dos son catalogadas como pelágicas y principalmente ictiófagas, razones por las que la evolución de un sistema sensorial tan fundamental como les resulta el oído, haya propiciado otolitos parecidos.

A pesar de que siempre se concentraban los organismos de *S. setapinnis* y *C. chrysurus* por análisis morfométricos de los sulcos acústicos de los otolitos, las diferencias en la forma externa del pez denotan una clara disimilitud, la cual puede ser explicada por adaptaciones al nicho en específico, que explotan dentro de la columna de agua, porque si bien ambas especies se encuentran en el límite de ser consideradas como pelágicas, tanto por la literatura basada en características externas, como por el análisis de los índices E y R de datos de los otolitos, los tipos alimentarios aportan información que resulta valiosa para ubicar, de una manera más precisa, la zona o nicho dentro del hábitat donde predominan ambas especies, con lo cual se logra identificar a ambas como demersales dado su vínculo con el fondo marino.



Oligoplites saurus es una especie con características externas propias de peces de nado muy activo, razón por la que, tal vez, dados sus requerimientos calóricos, la mayoría sean ictiófagos, lo anterior está soportado por los índices E y R así como los tipos alimentarios predominantes, de tal manera que la diferencia encontrada en las fases de morfometría tradicional y geométrica, respecto del resto de los organismos analizados, deben ser atribuidas a otros factores.

A lo largo de todos los análisis realizados en el presente trabajo se encontró siempre las mismas agrupaciones, de tal manera que, ambas especies del género *Caranx* mantuvieron la tendencia a generar un primer grupo, de igual manera *Selene setapinnis* y *Chloroscombrus chrysurus*, mientras que *Oligoplites saurus* se separaba de ambas agrupaciones; una de las posibles causas de esta separación es la filogenia en sí, como lo infiere Aguirre (2000), que podría estar marcando patrones morfológicos en estas estructuras internas, además de los ya evidentes externamente, debido a que *Oligoplites saurus* es la única especie que según la última revisión de Nelson en 2006 pertenece a una Subfamilia distinta al resto de las especies estudiadas, la Scomberoidinae.



CONCLUSIONES

Se confirma que existe un vínculo entre la forma oblonga del otolito y la explotación del medio pelágico como nicho.

Los índices E y R son de gran utilidad para separar a los organismos que guardan cierta asociación con el fondo de los organismos netamente pelágicos.

Se confirma que la relación propuesta por Gauldie, que indica que la proporción entre el área del sulco acústico y el área del otolito es mas baja en peces pelágicos que en peces asociados al fondo marino.

El estudio de los otolitos con técnicas morfométricas y su posterior cotejo con información ecológica del organismo al que pertenecen permite establecer patrones de similitud interespecíficos bastante robustos dada la inclusión de una amplia gama de variables, lo cual puede respaldar estudios de filogenia de los mismos organismos generados por otras vías, como la molecular.

En trabajos enfocados en encontrar las posibles similitudes entre un grupo de otolitos muy disimiles en cuanto a características del borde, el estudio de los cambios de proporciones entre medidas lineales, áreas y forma del sulco acústico y sus diferentes regiones aporta valiosa información que es susceptible de ser conjugada o contrapuesta con información de cualquier otra naturaleza, según las necesidades particulares del estudio.



Posición sistemática de las especies

Reino.....Animalia

Filo.....Chordata

Subfilo.....Vertebrata

Superclase.....Osteichthyes

Clase.....Actinopterygii

Subclase.....Neopterygii

Infraclase.....Teleostei

Superorden.....Acanthopterygii

Orden.....Perciformes

Suborden.....Percoidei

Familia.....Carangidae

Subfamilia..... Scomberoidinae*, Caranginae

Género*.....Oligoplites

Especie*.....***Oligoplites saurus***

Género.....Caranx

Especie.....***Cranx hippos***

Género.....Caranx

Especie.....***Caranx crysos***

Género.....Chloroscombrus

Especie.....***Chloroscombrus crysurus***

Género.....Selene

Especie.....***Selene setapinnis***



BIBLIOGRAFÍA

Aguirre H. y Lombarte A. 1999. Ecomorphological comparisons of sagittae in *Mullus barbatus* and *M. surmuletus* 55: 105–114.

Aguirre, H., 2000. Aspectos biológicos y ecológicos del salmonete de fango *Mullus barbatus* L. 1758 y del salmonete de roca *Mullus surmuletus* L.1758, del Mediterráneo Noroccidental. Tesis doctoral Universidad Politécnica de Cataluña. 261pp.

Albihôa, V., Correa, M.F.M., 1993. Catálogo de otolitos de Carangidae (Osteicties, Perciformes) do litoral da Estado do Paraná Brasil. Neritica Curitiba 7, 119-131.

Bellwood, D.R. y Wainwright, P.C. 2001. Locomotion in labrid fishes : implications for habitat use and cross-shelf biogeography on the Great Barrier Reef. Coral reefs 20: 139-150.

Bookstein, F.L. 1997. Landmark methods for forms without landmarks: localizing group differences in outline shape. Med. Image Anal. 1: 225-243.

Clifton, K.B. y Motta, P.J. 1998. Feeding morphology, diet, and ecomorphological relationships among five caribbean labrids (Teleostei, Labridae). Copeia 1998 : 953-966.

Fishbase (eds.) 2012. [version 01/2012] <http://www.fishbase.org>

Gauldie, R.W., 1988, Function, form and time-keeping properties of fish otholits, Comp. Biochem. Physiol. A 91: 395-402 pp.

Gauldie, R.W., Nelson, D.G.A., 1988. Aragonite twinning and neuro-protein secretion are the cause of daily growth rings in fish otoliths. 90, 501–509.

Gauldie, R.W., 1993. Polymorphic crystalline structure of fish otoliths. 218, 1–28.



Gushiken, S. 1988. Phylogenetic relationships of the Perciform genera of the family Carangidae. Japanese Journal Ichthyology. 34: 443-461.

José De La Cruz Agüero J., F. García, V. Cota, J. Chollet, And J. Vergara. 2011. Length–Weight Relations Of Selected Species Of The Family Gerreidae (Actinopterygii: Perciformes) From The Mexican Coast. Acta ichthyologica et piscatorial 41 (1): 67-69.

Klingenberg C.P. y Ekau W. 1996. A combined morphometric and phylogenetic analysis of an ecomorphological trend: pelagization in Antarctic fishes (Perciformes: Nototheniidae) 59: 143–177.

Lagler, K.F. 1984. Ictiología. AGT Editor, México.

Longenecker K. 2008 Relationships between Otolith Size and Body Size for Hawaiian Reef Fishes 4: 533–539.

Lombarte A., Palmer M., Matallanas J., Gómez-Zurita J., Morales-Nin B., 2010 Ecomorphological trends and phylogenetic inertia of otolith sagittae in Nototheniidae 89:607–618.

Mascareñas I., Arburto O., Balart E., 2003, Otolitos de peces de arrecife del Golfo de California, Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, México B.C.S., 120 p.

Nelson, J.S., E.J. Crossman, H. Espinosa-Pérez, L.T. Findley, C.R. Gilbert, R.N. Lea i J.D. Williams, 2004. Common and scientific names of fishes from the United States, Canada, and Mexico. American Fisheries Society, Special Publication 29.

Nelson J. S. 2006 Fishes of the world, 4ta edición, John Wiley and Son, Inc.; Alberta Canada. UICN 2008, 502p.

Paxton, J.R.; 2000. Fish otoliths: do sizes correlate with taxonomic group, habitat and/or luminescence? Phil. Trans R. Soc. Lond. B 355, 1299-1303.



Parmentier E., Chardon M., Vandewalle P. 2002 Preliminary study on the ecomorphological signification of the sound-producing complex in Carapidae 139-151.

Platt, C., Popper, A.N., 1981. Fine structure and function of the ear. In: Tavolga, W.N., Popper, A.N., Fay, R.R. (Eds.), *Hearing and Sound Communication in Fishes*. Springer-Verlag, New York, pp. 2-37.

Popper, A. N., 1976, Ultrastructure of the auditory regions in the inner ear of the lake whitefish. *Science* 192: 1020- 1023 pp.

Rholf, F. J. 2008 tpsDig 2, Versión 2.12 Department of Ecology and Evolution, State Univ. of New York at Stony Brook, Stony Brook.

Smith-Vaniz, W. F. 1984. Carangidae: relationships. En: Moser, H.G., W.J. Richards, D.M. Cohen, M. P. Fahay, A. W. Kendall Jr., S. L. Richardson (Eds.), *Ontogeny and Systematics of Fishes*. Am. Soc. Ichthyol. Herpetol. Spec. Publ. 1, 522–530.

Sokal R.R y F.J Rholf. 1995 *The principles and practice of statistics in biological research*. W.H. Freeman and company 3° Ed. Pp. 887.

Tuset V.M., Lombarte A. and Assis C. 2008 Otolith atlas for the western Mediterranean, north and central eastern Atlantic; *Scientia Marina* 72S1; 7-198.

Verigina, I.A. 1991. Basic adaptation of the digestive system in bony fishes as a function of diet. 31: 8-20.

Volpedo, A.V., Echeverria, D.D., 1997, *Morfología de la Sagittae de lenguados del Mar Argentino (Bothidae, Paralichthyidae y Achiropsettidae)*., *Thalassas* 13: 113-126 pp.

Volpedo V. A. Echeverría D. D. 2000. *Catálogo y claves de otolitos para la identificación de peces del mar argentino*. Editorial Dunken. Buenos Aires, Argentina; pp 90.



Volpedo A. V., Echeverría D.D. 2002 Ecomorphological patterns of the sagitta in fish on the continental shelf off Argentine. Fisheries Reserch. 60 (2003) 551-560.

Volpedo A. y Echeverria D. D. 2003 Ecomorphological patterns of the sagitta in fish on the continental shelf off Argentine Fisheries Reserch 60: 551–560.

Volpedo A. V., Tombari A.D. & Echeverría D.D. (2008) Eco-morfological patterns of the sagitta of Antarctic fish. Polar Biol. 31 (5): 635-640.

VOLPEDO, A. V. y D. V. FUCHS. 2010. Eco-morphological patterns of the *lapillus* of Paranoplatenses Siluriforms (South America). Fisheries Research 102:160-165.

Wright, P.J. (Eds.), Manuel de sclerochronologie des poissons. formation by starmaker in otolith biomineralization. Science 302, 282–Coedition Ifremer – IRD, pp. 31–88.

