



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES IZTACALA

**Descripción morfológica de músculos extraoculares,
encéfalo y nervios craneales del tiburón martillo *Sphyrna
lewini* (E. Griffith & C.H. Smith, 1834)**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
B I Ó L O G A**

PRESENTA:

Alvarez Trejo Yaah-Mell

Directora de Tesis:

Dra. Mónica González Isáis.

Los Reyes, Iztacala, Tlalnepantla, Estado de México. 2024.





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas

Tesis Digitales

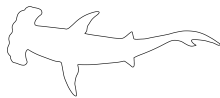
Restricciones de uso

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.

Agradezco principalmente a mi mamá y mi papá por su apoyo total e inquebrantable a mí y mi educación académica durante toda mi vida. A mi hermano por toda la motivación y ayuda.

Mi completo agradecimiento a mi tutora, la Dra. Mónica González Isáis por aceptarme en el laboratorio de Morfología, por compartir su conocimiento y guiarme durante todo este proyecto.

También agradezco grandemente a mis sinodales, la Mtra. Nayeli Zaldivar, el Dr. Hector Marcos Montes Domínguez, Dra. Bertha Segura Alegría y la Biól. Karina Solis Juárez por sus valiosas observaciones y comentarios.

Asimismo, a las demás integrantes del laboratorio por el apoyo en campo para la recolección del material utilizado, especialmente al Dr. Héctor por realizar las salidas a campo, compartir su conocimiento y permitirme trabajar con organismos de su colección. Agradezco también y particularmente a la Mtra. Naye por resolver cada duda.

Un profundo agradecimiento a los pescadores de Isla Aguada, Campeche y Boca del Cielo, Chiapas, de quienes aprendí conocimiento invaluable sobre el mar y por su apoyo en la obtención del material para este trabajo.

A cada profesora y profesor que me inspiró un interés por la biología, gracias.

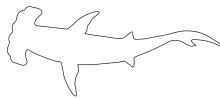
A todas las amigas que me ayudaron y acompañaron durante este proceso.

Y finalmente, mi más grande agradecimiento y respeto a cada tiburón que fue estudiado en este trabajo, sin los cuales el conocimiento obtenido no existiría.



Índice.

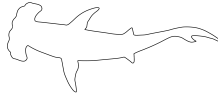
Resumen.....	3
Summary.....	4
Introducción.....	5
Clasificación.....	5
Descripción.....	6
Anatomía del cerebro.....	9
Músculos extraoculares.....	10
Antecedentes.....	11
Justificación.....	17
Objetivos.....	17
General.....	17
Particulares.....	17
Materiales y métodos.....	18
Trabajo de campo.....	18
Trabajo de laboratorio.....	18
Resultados.....	20
Morfología del encéfalo.....	20
Nervios craneales.....	30
Músculos extraoculares.....	35
Discusión.....	39
Morfología del encéfalo.....	39
Nervios craneales.....	47
Músculos extraoculares.....	48
Conclusión.....	49
Recomendaciones.....	50
Referencias bibliográficas.....	50



Resumen.

Sphyrna lewini, comúnmente llamado tiburón martillo o cornuda prieta, es una especie de condictio perteneciente al orden de los carcharhiniformes el cual habita en las aguas tropicales pelágico-costeras de todo el mundo. El presente trabajo tuvo por objetivo describir la morfología del encéfalo y nervios, además de una breve descripción morfológica de los músculos extraoculares. Se trabajó con 11 organismos de diferentes tallas recolectados en las costas del Golfo de México (Campeche) y del Océano Pacífico (Chiapas), los cuales fueron disectados, ilustrados y fotografiados para su estudio. Se encontró que la morfología del cerebro de *S. lewini* es similar a la descrita para galeomorfos, posee un telencéfalo y cerebelo hipertrofiados, este último presenta el mayor nivel de foliación en la escala visual. Además, tiene un mesencéfalo de un tamaño relativamente reducido. La proporción del tamaño que ocupan las áreas cerebrales es similar a lo descrito para otras especies de tiburón martillo (*S. mokarran* y *S. zygaena*). El origen, la trayectoria e inervación de los nervios II, III, IV y VI corresponden a las reportadas previamente en elasmobranquios. Los músculos extraoculares en *S. lewini* son consistentes respecto a otros tiburones en el número de músculos (2 oblicuos y 4 rectos), sin embargo, su distribución asemeja más a la descrita para myliobatidae debido a la forma aplanada dorsoventralmente y alargada lateralmente de su cabeza.

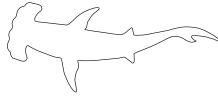
Palabras clave: *Sphyrna lewini*, sistema nervioso central, nervios craneales, músculos extraoculares, elasmobranquios, encéfalo.



Summary.

Sphyrna lewini, commonly known as scalloped shark, is a chondrichthyan part of the order of carcharhiniiformes, it can be found in pelagic and coastal areas around the world. The purpose of this study was to describe the morphology of the encephalon and cranial nerves, as well as a brief morphological description of the extrinsic ocular muscles. There were collected eleven organisms of diverse sizes in the coasts of the Gulf of Mexico (Campeche) and the Pacific Ocean (Chiapas), they were dissected, examined, illustrated and photographed in order to be studied. It was found that the morphology of the brain is similar to the one described for galeomorph sharks, *S. lewini* has hypertrophied telencephalon and cerebellum, the last one presents the highest level of foliation in the visual scale (6). Besides, it possesses a relatively reduced mesencephalon. The relative size of the cerebral regions is similar to that of *S. mokarran* and *S. zygaena*. The origin, trajectory and innervation of the cranial nerves (II, III, IV and VI) were similar to the previously reported in other elasmobranchs. The extraocular muscles are consistent with those of other species of sharks in the number of muscles (2 oblique and 4 rectus), however the muscles's distribution is more similar to the described for myliobatoidei, since this sharks possesses a flattened and laterally extended head.

Key words: *Sphyrna lewini*, central nervous system, cranial nerves, extraocular muscles, elasmobranch, encephalon.



Introducción.

La clase de los condricios se caracteriza porque todos los organismos vivientes actuales presentan un endoesqueleto con calcificación prismática, un esqueleto dermal que consiste de dentículos, también conocidos como escamas placoideas, cráneo sin suturas, reemplazo serial de dientes, ceratotriquia, es decir, radios de aletas suaves y sin segmentar, no presentan vejiga natatoria ni pulmones, los machos presentan un par órganos copuladores cilíndricos, llamados mixopterigios, utilizados para la fertilización interna (Nelson, *et al.*, 2016).

Existen dos subclases dentro del grupo de los peces cartilaginosos: Holocephalii, la cual incluye a las quimeras, y Elasmobranchii, la cual se divide en Batomorphii (rayas) y Selachii (tiburones) (Nelson, *et al.*, 2016).

Los tiburones (Selachii) se caracterizan por un cuerpo generalmente cilíndrico o levemente deprimido dorsoventralmente, las hendiduras branquiales siempre se encuentran en posición lateral, a diferencia de los batoideos, cuando los espiráculos están presentes siempre se sitúan dorsalmente o en la superficie dorso-lateral de la cabeza. Presentan aleta caudal y cola altamente desarrolladas en todas las especies, que sirven para impulsar su nado por medio de ondulaciones laterales. Pueden presentar 5, 6 o 7 aberturas branquiales dependiendo de la familia (Compagno, *et al.*, 1995).

Clasificación

Reino: Animalia.

Filo: Chordata.

Clase: Chondrichthyes.



Subclase: Elasmobranchii.

Orden: Carcharhiniformes.

Familia: Sphyrnidae.

Género: *Sphyrna*.

Especie: *S. lewini* (E. Griffith & C. H.

Smith, 1834). (Miller *et al.*, 2013).

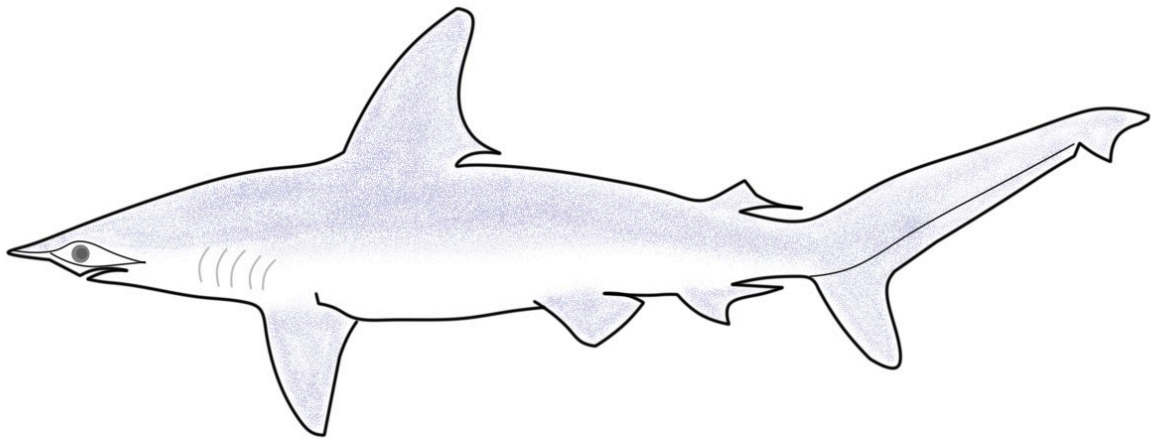
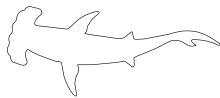


Figura 1. Vista lateral de *Sphyrna lewini* (Modificado de Compagno *et al.*, 1995).

Descripción.

Sphyrna lewini, comúnmente llamado tiburón martillo o cornuda prieta, se caracteriza por la forma aplanada dorsoventralmente y extendida lateralmente de su cabeza, única de la familia Sphyrnidae, se distingue de otras especies de tiburón martillo porque el borde posterior de su cabeza crea un arco bien definido, la parte posterior de su cabeza se hunde en la parte media, y además presenta una escotadura muy marcada frente a ambos orificios nasales, surcos prenariales bien desarrollados, dientes triangulares con borde liso o finamente aserrado y boca redondeada (Fig. 2).



Además, presenta aletas pectorales anchas pero cortas, una primera aleta dorsal alta falciforme y una segunda mucho más pequeña con extremo posterior separada del cuerpo que se alarga hasta el inicio de la aleta caudal, aletas pélvicas con el borde posterior prácticamente recto. En la parte dorsal presenta un tono gris o marrón, mientras que la región ventral es blanca, a excepción de las puntas de las aletas pectorales que son negras (Fig. 1). Los adultos llegan a medir hasta 430 cm de longitud (Compagno *et al.*, 1995).

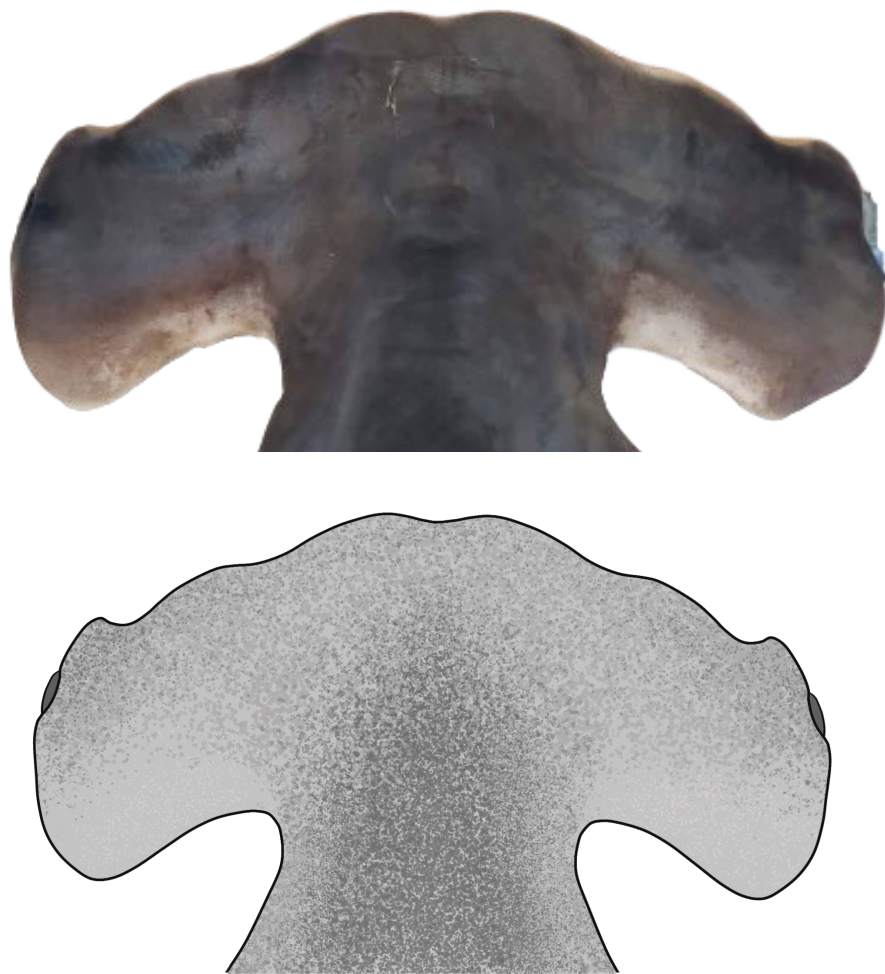
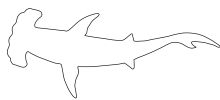
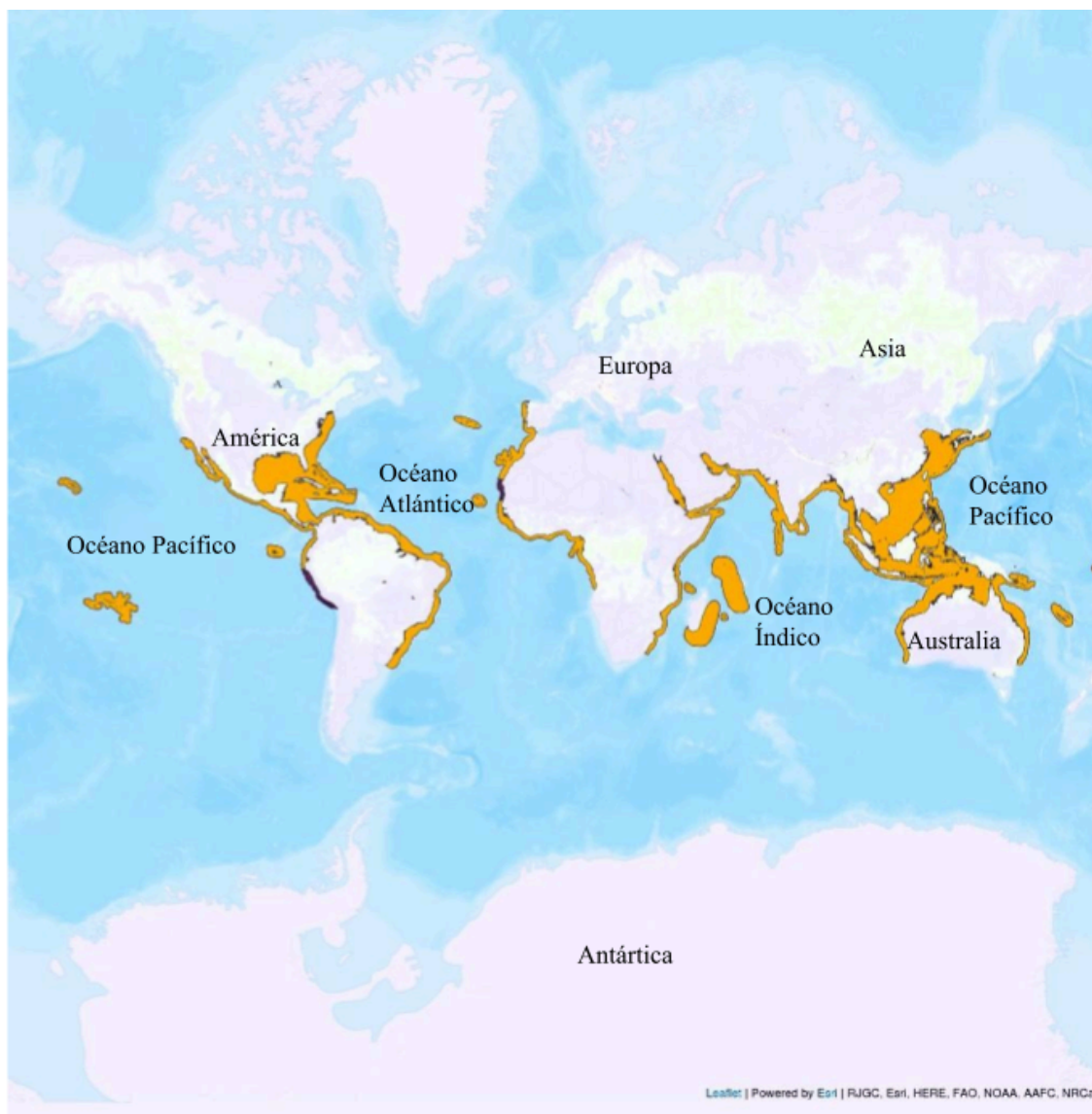


Figura 2. Cabeza de *Sphyrna lewini*. Vista dorsal.

En cuanto a su hábitat, esta especie habita las aguas tropicales pelágico-costeras, se puede encontrar desde 0 a 275 metros de profundidad (Ebert & Fowler, 2021). Es una especie muy

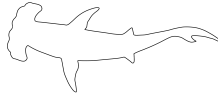


móvil, se distribuye en aguas templadas de todo el mundo, (Fig. 3) cuenta con registros en el océano Atlántico, incluyendo el Golfo de México y el Caribe, el Mediterráneo, en el Pacífico, incluyendo el Golfo de Persia, y el océano Índico (Carpenter *et al.*, 1997).



- Existente (residente).
- Probablemente existente (residente).

Figura 3. Mapa de distribución de *Sphyrna lewini*. (Rigby *et al.*, 2019)



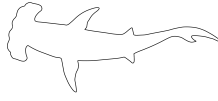
Anatomía del cerebro.

Los cerebros de Selachii exhiben un amplio rango de variación, tanto en tamaño como en el desarrollo relativo de las regiones cerebrales, las estructuras donde se encuentra más variación del tamaño es en el telencéfalo y cerebelo, así como en el nivel de foliación de esta última. (Northcutt, 1977)

La diferencia de la morfología cerebral está ligada a la posición filogenética de una especie e impactada por su ecología (comportamiento, migración, hábitos alimenticios y reproductivos) derivando en variaciones en el tamaño del cerebro y de sus regiones principales (Yopak *et al.*, 2019). Por esto se considera que la talla del cerebro y su morfología proveen información sobre el comportamiento de los tiburones, lo que es particularmente útil en especies donde existe gran dificultad de estudiar su comportamiento en su hábitat natural.

Entre los tiburones, los galeomorfos (heterodontiformes, orectolobiformes, carcharhiniformes) tienden a poseer cerebros con caracteres considerados más derivados, como cerebelo foliado y telencéfalo hipertrofiado, mientras que escualomorfos y escuatinomorfos suelen poseer cerebros considerados basales, es decir, cuerpos cerebelares lisos y telencéfalos reducidos (Yopak *et al.*, 2007). Sin embargo, debido a que existe gran cantidad de variación interespecífica, es necesario continuar realizando estudios morfológicos del encéfalo de diversos elasmobranquios.

El cerebro de tiburones es complejo y actualmente se desconoce información de muchos aspectos de su diversidad y evolución, contrario al grupo de peces teleósteos que ha sido mayormente estudiado (Guzzo, 2019).



Para el estudio morfológico del encéfalo, se suelen considerar 5 regiones sensoriales principales: Telencéfalo, cerebelo, diencéfalo, mesencéfalo y médula oblongada.

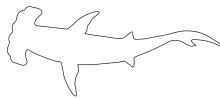
En cuanto a los nervios craneales, estos son mayormente consistentes entre los distintos grupos de vertebrados incluyendo a los condrictios, presentan pocas variaciones en su organización y tamaño (New, 2001).

Músculos extraoculares.

La visión de los elasmobranquios ocupa un papel importante, especialmente en especies activas, pelágicas y bentopelágicas que son predadores superiores, por esto tienen características visuales avanzadas (Lisney & Collin, 2007) incluyendo el movimiento de los globos oculares proporcionado por sus músculos extraoculares.

Los músculos extraoculares son constantes en número, acomodación e inervación en la mayoría de los vertebrados (Goodrich, 1986), sin embargo, pueden presentar variaciones específicas dependiendo de la especie, sobre todo en grupos con alta diversidad morfológica como son los tiburones (Cunha *et al.*, 2016).

Típicamente existen seis músculos extraoculares en los tiburones, al igual que en todos los peces gnathostomados, recto superior, recto inferior, recto lateral y recto medio, además los músculos superior oblicuo e inferior oblicuo. Todos son inervados por el tercer par craneal, a excepción del recto lateral y el superior oblicuo los cuales son inervados por los nervios VI y IV, respectivamente (Smith, 2005).



El movimiento del globo ocular en el eje horizontal se da por los músculos recto superior e inferior, mientras que en el eje vertical se da por los músculos recto anterior y posterior. Por otro lado, los músculos oblicuos se encargan de la rotación del globo (Land, 2015).

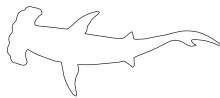
Antecedentes.

Northcutt realizó un estudio en 1977 sobre la organización del sistema nervioso central de los elasmobranquios y su significado evolutivo, se evaluó el desarrollo relativo del telencéfalo y cerebelo en diversas especies, incluyendo *Sphyrna lewini*, *S. tiburo* y *S. zygaena*. Se concluyó que el corpus cerebellum de los tiburones Galeomorfos presentan una hipertrofia que origina una asimetría, un tectum óptico cubierto por el cerebelo y un telencéfalo con hipertrofia.

Northcutt en 1989 estudió la variación cerebral y las tendencias filogenéticas en elasmobranquios, se realizó un análisis cladístico utilizando a un grupo externo como criterio para establecer la filogenia de las características neuronales de los condriactios actuales. Se observaron los cerebros de 19 especies de condriactios, entre los que se incluye a *Sphyrna tiburo* y otros elasmobranquios. Se concluyó que el tamaño relativo del cerebro de los Galeomorfos es mayor que en Squaliformes y Squatiniformes.

Bodznick en 1991, estudió las áreas multimodales sensoriales en el cerebro de elasmobranquios, particularmente las relacionadas a la visión, para esto se observó el cerebro de *Leucoraja erinaceus*, *Ginglymostoma cirratum* y *Squalus acanthias*. Se concluyó que áreas del telencéfalo y del tectum óptico son encargadas de integrar la información y que se encuentran particularmente hipertrofiadas en batoideos derivados y en tiburones galeomorfos.

En 1999 Ito y colaboradores realizaron un estudio morfológico de la forma externa del cerebro y de los nervios craneales de un tiburón boquiancho, *Megachasma pelagios*, donde se describió el

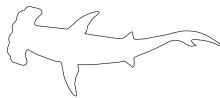


desarrollo de los bulbos olfatorios, las aurículas, el mesencéfalo y el cerebelo. Se observó que *M. pelagios* presenta un cerebelo pequeño, mientras que las aurículas presentaron mayor desarrollo; además se realizó la alometría del tamaño del cerebro y fue comparada a la de otras especies de peces cartilagosos, finalmente se concluyó que presenta un cerebro pequeño respecto a su talla. New en 2001, realizó un estudio comparativo del conocimiento de la neurobiología del cerebelo de distintos elasmobranquios con el propósito de comprender e hipotetizar sobre la función del cerebelo en el comportamiento de condriktios, se comparó la anatomía cerebelar y comportamiento de diferentes batoideos y tiburones incluyendo a *S. tiburo*.

Lisney y Collin en 2006, realizaron un estudio comparativo de la morfología del cerebro en peces pelágicos de gran tamaño, tanto condriktios como teleósteos fueron examinados, evaluaron la encefalización y el desarrollo relativo de cinco áreas del cerebro (telencéfalo, cerebelo, bulbos olfatorios, tectum óptico y el área octavo lateral). Realizaron un análisis alométrico en cuatro especies de tiburones pelágicos (*Pseudocarcharias kamoharai*, *Carcharhinus longimanus*, *C. falciformis* y *Alopias superciliosus*), el cual demostró que los tiburones pelágicos poseen un cerebro de mayor tamaño al de los teleósteos pelágicos, así como bulbos olfatorios y área octavolateral más desarrollados.

Yopak y colaboradores en 2007, estudiaron la organización cerebral y foliación cerebelar en tiburones y holocéfalos, se evaluó la variación en el tamaño del cerebro, en la morfología en relación con la filogenia y ecología de cada especie. Además, se propuso un índice de foliación cerebelar para cuantificar la foliación del 1 al 5 de acuerdo a la cantidad de pliegues en la superficie del cerebro y su profundidad y la simetría de este.

En 2007, Lisney y colaboradores realizaron un análisis volumétrico de las áreas sensoriales del cerebro (tectum óptico, bulbos olfatorios lóbulos anteriores de la línea lateral y lóbulo posterior



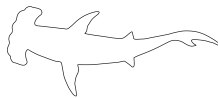
de la línea lateral) de elasmobranquios; se concluyó que el tamaño relativo de cada área refleja la importancia relativa de sus respectivas modalidades sensoriales, se encontró cambios ontogenéticos en la importancia relativa de los sistemas sensoriales.

Puzdrowski y Gruber en 2009 estudiaron las características morfológicas del cerebelo de la raya atlántica (*Hypanus sabinus*) y su posible importancia evolutiva. Se revisaron las conexiones neuronales de los lóbulos del cerebelo, y se reportó que la compleja hipertrofia del cuerpo cerebelar en rayas puede ser el resultado de la especialización en los lóbulos y la adquisición de nuevas señalizaciones neuronales.

En 2009 Yopak y Frank realizaron un estudio sobre la organización cerebral y el tamaño del cerebro en el tiburón ballena, *Rhincodon typus*, utilizando imagen de resonancia magnética, fue analizado en relación a la filogenia y ecología de la especie y fue comparado con más de 60 especies de tiburones. Demostraron que tiene un cerebro de tamaño pequeño en relación a su tamaño corporal, con un diencefalo de gran tamaño y un mesencéfalo relativamente reducido.

Ari en 2011, estudió la encefalización y la organización de Myliobatiformes con una perspectiva ecológica, se analizó la relación de masa cerebral respecto a masa corporal y la morfología externa del cerebro de tres especies de batoideos (*Mobula mobular*, *Mobula thurstoni* y *Mobula birostris*). A partir del cociente de encefalización se concluyó que el tamaño del cerebro es mayor al esperado para los organismos de ese tamaño, además se encontró que la morfología del cerebelo y el telencéfalo es similar a la morfología de *Sphyrna mokarran*.

Yopak y Lisney en 2012, realizaron un estudio alométrico del tectum óptico en peces cartilaginosos, se comparó el tamaño del mesencéfalo en 75 especies, por medio de dos técnicas morfométricas. El mesencéfalo de mayor tamaño se encontró en especies pelágicas costeras/oceánicas, en tiburones oceánicos, y tiburones arrecifales bentopelágicos, mientras que



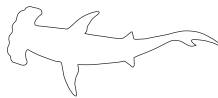
el tectum de menor tamaño se encontró en especies de tiburones bentónicas, batoideos y en la mayoría de especies batiales.

Montgomery y colaboradores en 2012, realizaron un estudio del cerebelo y estructuras similares que se encuentran en la pared dorsolateral del rombencéfalo en los peces cartilaginosos, establecieron que estas estructuras similares al cerebelo comparten un programa de desarrollo genético similar, además se propuso que estas mismas estructuras son el antecedente evolutivo de lo que es actualmente el cerebelo.

Hofmann y Northcutt en 2012, estudiaron la organización, funciones y conexiones del telencéfalo en *Squalus acanthias* y en *Platyrrhinoidis triseriata*, para esto fueron inyectados marcadores en varias partes del prosencéfalo. Descubrieron vías olfativas extensivas en el palio lateral, lo que indica que existen centros olfativos importantes en el telencéfalo, principalmente el palio dorsal.

Montes-Domínguez y colaboradores en 2014 realizaron un estudio morfológico de la musculatura craneal y cerebro de *Diplobatis ommata*, donde se observaron y describieron las estructuras cerebrales y las trayectorias de los nervios craneales. Se concluyó que el encéfalo de *D. ommata* presenta una anatomía similar a la de los batoideos basales, y que tiene bulbos olfatorios de gran tamaño en comparación a otros batoideos, sin embargo, el telencéfalo es reducido respecto a su tamaño corporal, lo que indica hábitos poco complejos; además se describieron modificaciones importantes en la trayectoria de los pares craneales VII, IX Y X para inervar los órganos eléctricos.

Yopak y colaboradores realizaron en 2015 un estudio en las tallas de los bulbos olfatorios en distintos condriactios con el fin de obtener más información sobre la variación interespecífica de la capacidad olfatoria. Se compararon medidas de 58 especies, incluyendo *S. lewini*, *S. mokarran*



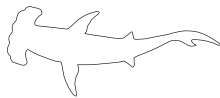
y *S. zygaena*, se concluyó que la variación considerable en tamaño y forma se correlaciona con el hábitat de estas especies.

En 2016 Yopak y colaboradores estudiaron el grado de foliación cerebelar en diversos condriktios con el propósito de establecer una clasificación cuantitativa, para esto se realizó un análisis tridimensional en *Beringraja binoculara*, *S. acanthias*, *M. californica* y *Sphyrna tiburo*. Se establecieron 5 niveles de foliación desde poca o inexistente (*B. binoculara*) hasta foliación extrema y asimetría del cerebelo (*S. tiburo*).

Cunha y colaboradores realizaron en 2016 un estudio comparativo de la anatomía de los músculos extraoculares de Myliobatoideos; se caracterizaron los cuatro músculos rectos y dos oblicuos de especies de rayas con diferente hábitat y comportamiento, además realizaron un análisis de componentes principales para evaluar la relación del largo de los músculos en cada especie y otras diferencias anatómicas de importancia. Describieron un músculo extra para *Mobula thurstoni*.

En 2017 Muriana y colaboradores realizaron un estudio morfológico del bulbo ocular de *Sphyrna lewini*, se observaron dos grupos de músculos extrínsecos: oblicuos (dorsal y ventral) y rectos (lateral, medial, dorsal y ventral) los cuales son evidentes por observación directa; describieron los puntos de origen y de inserción de los músculos, observaron cortes del bulbo ocular y sus anexos utilizando microscopía electrónica de barrido y describieron la córnea, las fibras cristalinas y el cartílago óptico. Concluyeron que las variaciones presentadas en esta especie se deben al hábitat en que se desarrollan.

Yopak y colaboradores en 2019, realizaron un estudio comparativo de la morfología del cerebro de *Somniosus microcephalus* y *S. pacificus*, utilizaron Imagen de Resonancia Magnética para determinar la encefalización y el desarrollo relativo de áreas importantes del cerebro y

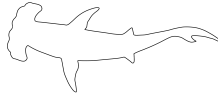


compararlos con otras 100 especies de tiburones de diversos hábitats; descubrieron que estas especies presentan un telencéfalo y cerebelo relativamente reducidos en comparación con otros tiburones, sin embargo el desarrollo relativo de su tectum óptico y bulbos olfatorios coinciden con otras especies de tiburones de aguas profundas de la misma familia.

En 2019 Guzzo realizó un estudio comparativo de la anatomía del cerebro en el orden Lamniformes, y sus implicaciones en el comportamiento y evolución, para comprender cómo es que la ecología y la filogenia ha influenciado las variaciones en el cerebro de los lamniformes. Describió la gran correlación positiva que existe entre el tamaño del cerebro y la talla del organismo, además planteó que, en tiburones con un mayor cerebro, el cerebelo tiende a presentar mayor nivel de foliación, también demostró que el estilo de vida de un organismo se ve reflejado en el tamaño de las áreas cerebrales encargadas de los sentidos.

Montes-Domínguez estudió en 2020 describió las variaciones morfológicas del cerebro en varias especies de la superfamilia Dasyatidae (Chondrichthyes: Myliobatidae) y sus implicaciones filogenéticas. Describió el nivel de foliación del cerebelo, longitud de tractos olfatorios y tamaño cerebral; reportó las diferencias más importantes que existen tanto intraespecíficamente e interespecíficamente, en el telencéfalo y el cerebelo, incluyendo las aurículas; agrupó a las especies estudiadas en tres morfotipos con base en la morfología externa del encéfalo. Además propuso una escala visual para determinar el grado de foliación del cerebelo que va desde organismos sin foliación (1) a extremadamente foliados (6).

Rodríguez-Marcelino en 2023 realizó una descripción morfológica del sistema nervioso de un tiburón pelágico: *A. pelagicus*, se estudió la forma y tamaño de las principales áreas del cerebro (telencéfalo, cerebelo, mesencéfalo, encéfalo y médula oblonga), además se detalló la posición



de los 10 pares craneales y de los músculos extraoculares que incluye el origen e inserción y la trayectoria de las fibras musculares.

Justificación.

Dentro del grupo de los condictios existe una gran variación en la morfología externa del cerebro, debido a la gran diversidad en estilos de vida que pueden presentarse, de ahí la importancia de realizar estudios en diferentes especies que amplíen el conocimiento disponible sobre la organización cerebral y áreas sensoriales de los peces cartilaginosos. En el caso de *Sphyrna lewini* no existe un trabajo que abarque la descripción de los músculos oculares, morfología externa del cerebro y nervios craneales, un conocimiento necesario para tener una mayor comprensión de las relaciones ecológicas y filogenéticas de los tiburones.

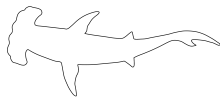
Objetivos.

General.

Describir la morfología del encéfalo y nervios craneales de *Sphyrna lewini*.

Particulares.

- Describir la morfología del cerebro de *Sphyrna lewini*.
- Describir el origen de los nervios craneales de *S. lewini*.
- Describir los músculos extraoculares de *S. lewini*.



Materiales y métodos.

Trabajo de campo.

Se recolectaron 11 organismos de *Sphyrna lewini*, 5 en el Pacífico en la localidad de Boca del Cielo, Chiapas y 6 en el Golfo de México, en la localidad de Isla Aguada, Campeche, como parte de la pesca artesanal que se lleva a cabo en esas comunidades, por medio de palangre en embarcaciones menores.

La determinación taxonómica se realizó con las claves de Compagno, *et al.*, (1995).

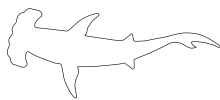
Para la fijación de los organismos se cortó la región cefálica y se abrió la fontanela para dejar expuesto el encéfalo (en organismos juveniles con cavidad craneal de menor tamaño se utilizó bisturí, mientras que en organismos maduros y de piel más gruesa se utilizaron tijeras y cuchillos), éste fue cubierto de formaldehído al 4%, aunado a esto se inyectaron los músculos de la región cefálica con formaldehído al 4%, posteriormente se almacenó en bolsas de plástico con formol al 4% para garantizar que el material fuera fijado. El material se transportó al laboratorio de Morfología de la Facultad de Estudios Superiores Iztacala para su estudio.

Trabajo de laboratorio.

Los 11 ejemplares de distintas tallas de *Sphyrna lewini* fueron lavados con agua corriente para retirar el exceso de formol.

Se disectó el cráneo de cada organismo utilizando bisturí y pinzas de disección, de forma que quedara descubierto el encéfalo, nervios craneales y los músculos oculares en la región dorsal.

Se tomaron las medidas de las estructuras cerebrales con un vernier digital (mm), incluyendo longitud patrón, ancho y largo del telencéfalo, cerebelo, diencefalo, mesencefalo y médula



oblonga, y otras estructuras sensoriales, como los globos oculares y bulbos olfatorios, para determinar el tamaño relativo (Fig. 4). Se realizó un registro fotográfico y descripciones detalladas además de ilustraciones en vista dorsal y ventral para garantizar una descripción más detallada y completa del encéfalo. Para poder observar algunas estructuras como la médula oblongada, aurículas y diencefalo se retiró el cerebelo utilizando espátula y bisturí. La terminología utilizada para describir las estructuras cerebrales es la de New (2001) y Yopak *et al.*, (2007), para el grado de foliación del cerebelo se consideró la escala visual de Yopak (2016) modificada por Montes-Domínguez (2020). La longitud patrón se consideró desde el extremo anterior del telencéfalo hasta el extremo posterior de la médula oblongada (Fig. 4).

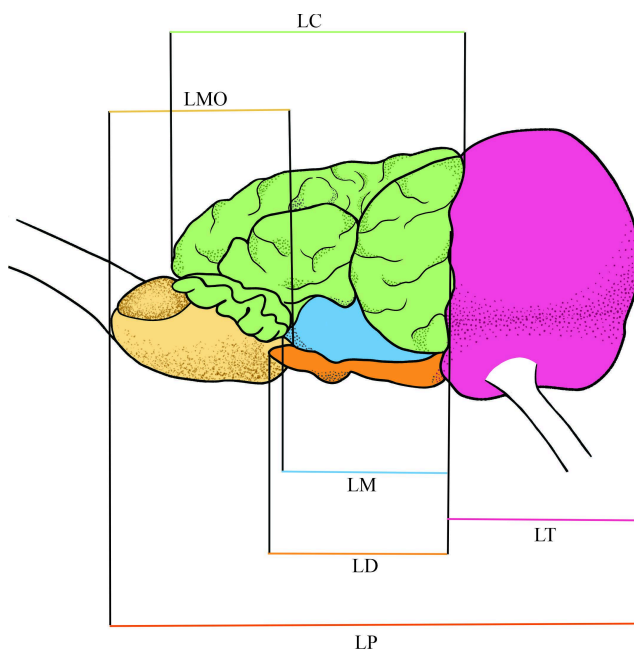


Figura 4. Estructuras cerebrales a medir. LC: longitud del cerebelo, LD: longitud del diencefalo, LM: longitud del mesencefalo, LM.O: longitud de médula oblongada, LP: longitud patrón, LT: longitud del telencéfalo.



Posteriormente se observó el origen, inserción y dirección de las fibras musculares de los músculos oculares, posteriormente se realizó lo mismo en la región ventral para generar una descripción detallada e ilustraciones de la musculatura. La terminología utilizada fue la de Cunha *et al.*, (2016).

Resultados.

Morfología del encéfalo.

Los valores promedio y la desviación estándar de las estructuras del encéfalo se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Media y desviación estándar de las medidas de las áreas principales del cerebro. Las medidas son expresadas en porcentaje de la longitud promedio.

Estructura.	n = 11
Longitud telencéfalo	43.51 ± 5.61
Ancho telencéfalo	84.36 ± 12.72
Longitud cerebelo	48.14 ± 4.70
Ancho cerebelo	61.26 ± 12.50
Longitud mesencéfalo	21.52 ± 5.54
Ancho mesencéfalo	45.36 ± 6.62
Longitud diencéfalo	31.16 ± 8.76
Ancho diencéfalo	34.67 ± 6.81
Ancho médula oblongada	39.77 ± 3.96
Longitud médula oblongada	35.68 ± 9.54



La estructura de mayor longitud es el cerebelo, ocupa 49% del total del encéfalo de *S. lewini*, seguido del telencéfalo con 43% y la médula oblongada en tercer lugar, con 36.76% en promedio, el diencefalo y mesencéfalo son las estructuras con menor longitud, 31.66 y 21.34% respectivamente (Fig. 5).

La estructura más ancha es el telencéfalo con un promedio de 85.44%, seguido por el cerebelo con 63.39%, el mesencéfalo 46.03% y la médula 39%, el que tiene menor ancho es el diencefalo con 36.48% (Fig. 6).

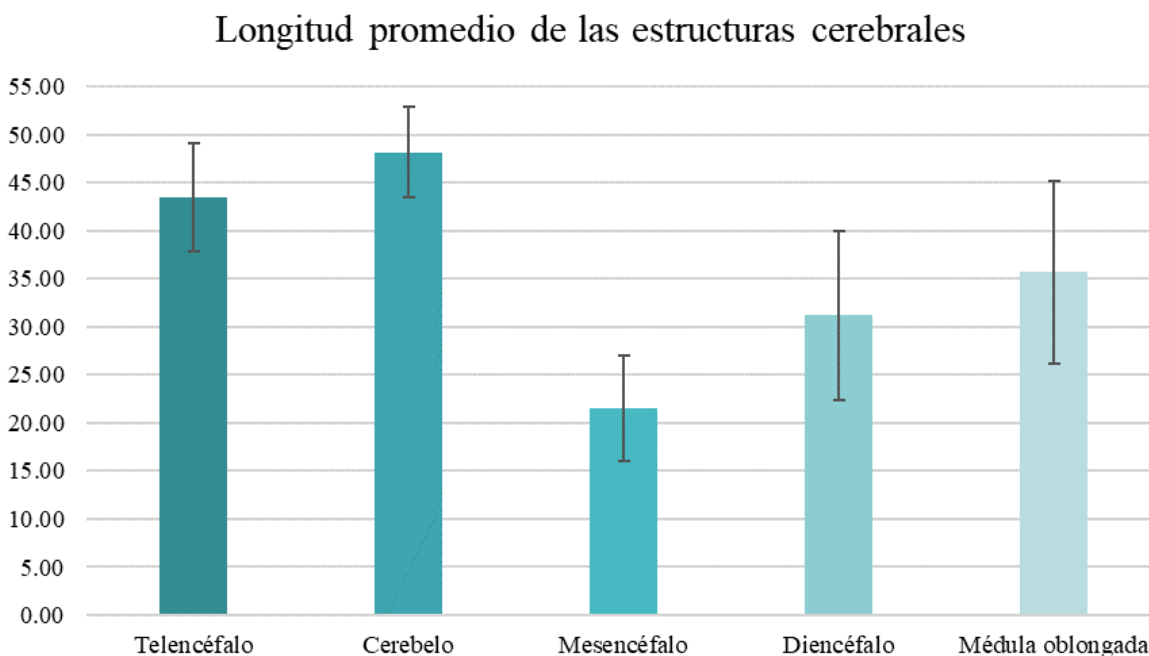


Figura 5. Longitud promedio de las áreas sensoriales principales en el cerebro (n = 11).

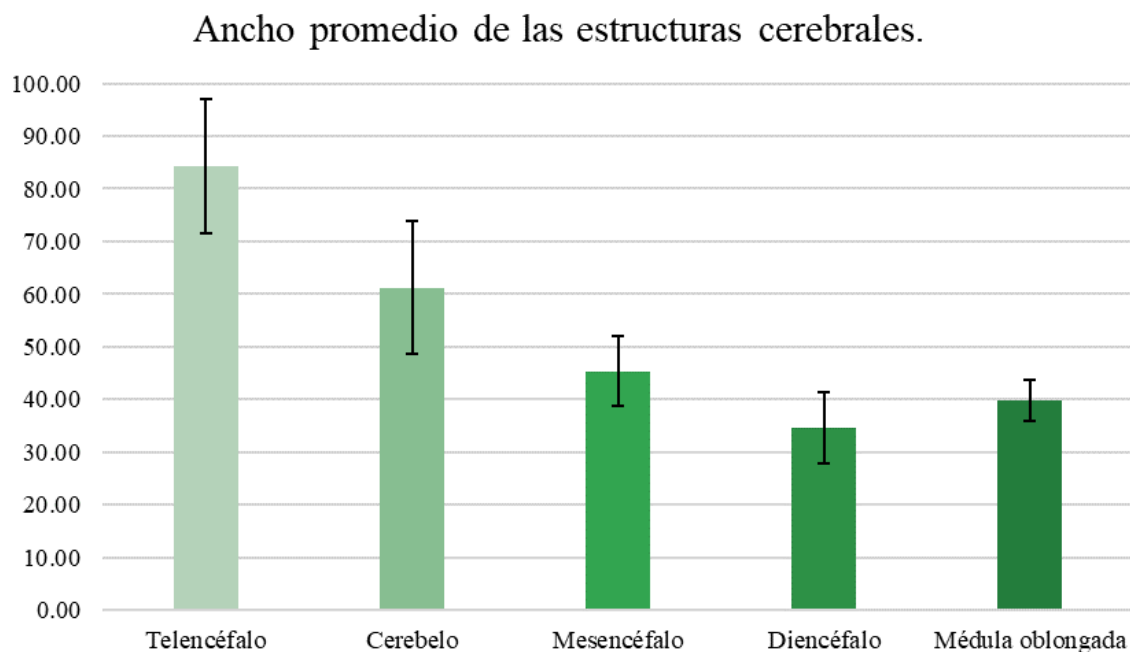


Figura 6. Ancho promedio de las áreas principales del cerebro (n=11).

El cerebro de *Sphyrna lewini* se encuentra en la parte media del cráneo, a pesar de ser poco alargado ocupa gran parte de la cavidad del cráneo por su gran volumen.

El telencéfalo se localiza anteriormente respecto al cerebelo, presenta una forma ovalada, su núcleo central presenta dos lóbulos divididos por un surco poco profundo. El lóbulo posterior del telencéfalo se ubica debajo del lóbulo posterior, y es de mayor tamaño que éste. El palio lateral se encuentra a cada lado del núcleo central anterior, del palio surgen los pedúnculos olfatorios, se extienden lateralmente con una ligera inclinación antero-ventralmente, son tan anchos como el nervio óptico (Fig. 7). Los bulbos olfatorios son más anchos que los pedúnculos olfatorios, se extienden en todo el borde posterior del epitelio olfatorio y se estrechan en el extremo distal.

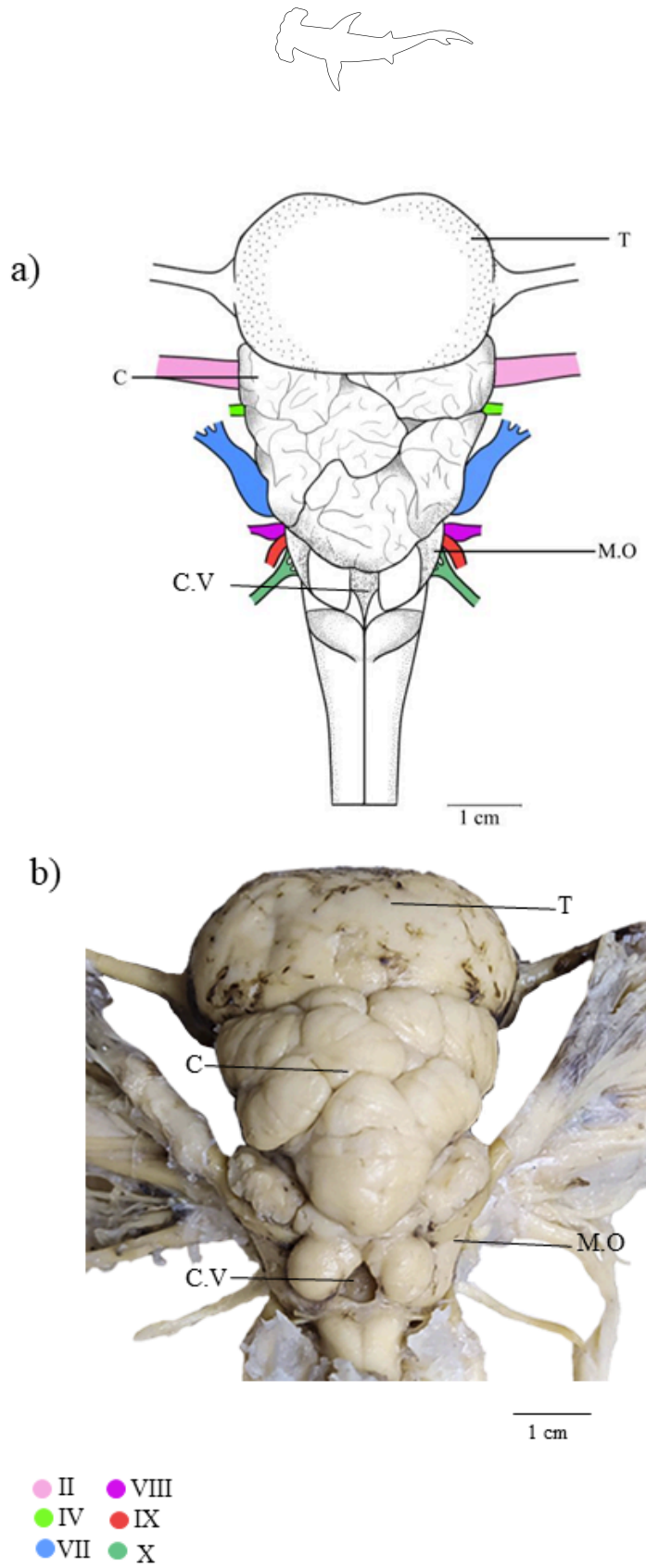
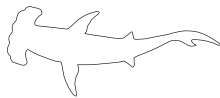


Figura 7. Encéfalo. Vista dorsal. a) Ilustración b) Fotografía.
 C. cerebelo; C.V: Cuarto ventrículo; M.O: Médula oblongada; T: Telencéfalo.



El cerebelo es una estructura grande, más alargada que el telencéfalo, del cual se encuentra inmediatamente posterior, no existe espacio entre ambas estructuras (Fig. 7). Presenta una forma similar a un triángulo equilátero invertido; con un alto nivel de foliación; presenta surcos más profundos que dividen el cerebelo en lóbulos (10-13), y surcos menos profundos pero bien definidos que a su vez dividen los lóbulos en numerosas vesículas de menor tamaño (Fig. 11). Al remover el cerebelo se puede observar el cuarto ventrículo relativamente pequeño. En la superficie ventral del cerebelo, en la parte media se encuentran los pedúnculos cerebrales laterales a cada lado del tallo cerebral, el cual se encuentra justo en el centro (Fig. 12).

Las aurículas se encuentran en posición posterior ventral al cerebelo, por lo que se pueden observar mejor al retirarlo, presentan una gran cantidad de pliegues y se conforman por dos hojas a cada lado: anterior y posterior (Fig. 8).

El mesencéfalo se observa al retirar el cerebelo, en vista dorsal. Los dos lóbulos ópticos son esféricos y bien definidos, no se encuentran completamente separados. Se encuentra dorsalmente respecto al diencefalo (Fig. 8).

El diencefalo es observable en vista ventral, está en posición posterior respecto al telencéfalo y ventral a los bulbos ópticos. Es una estructura simétrica que presenta dos lóbulos inferiores del infundíbulo redondos a cada lado de la hipófisis, la cual se alarga anterocaudalmente, con la parte anterior más estrecha que la posterior (Fig. 9).

La médula oblongada de *S. lewini* se localiza posterior al diencefalo y en la región ventral del cerebelo, es una estructura alargada más ancha de la región anterior.

En la superficie dorsal presenta un surco ancho que se extiende longitudinalmente, y a cada lado de este presenta un par de núcleos esféricos, llamados núcleos dorsales octavolateralis (Fig. 10).

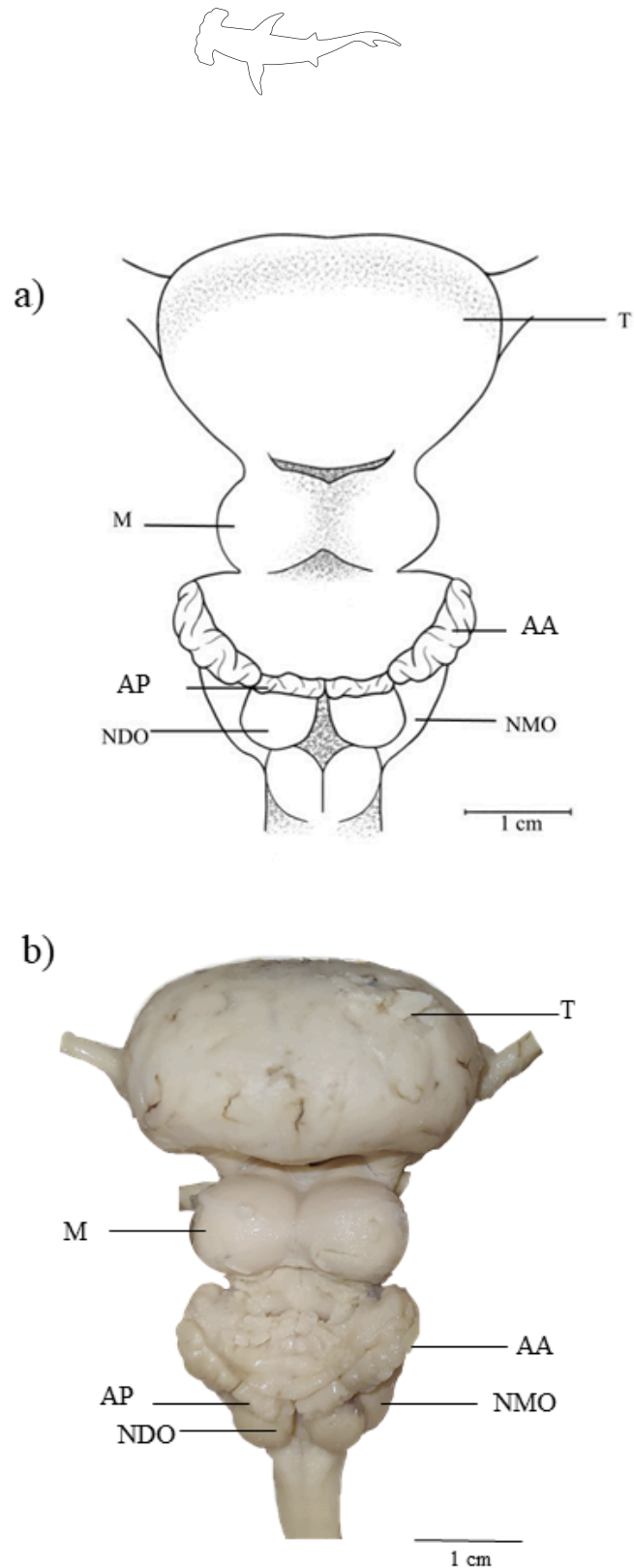


Figura 8. Encéfalo sin cerebelo. Vista dorsal. a) Ilustración b) Fotografía. AA: Aurícula anterior; AP: Aurícula posterior; M: Mesencéfalo; NDO: Núcleo dorsal octavolateralis; NMO: Núcleo medial octavolateralis; T: Telencéfalo.

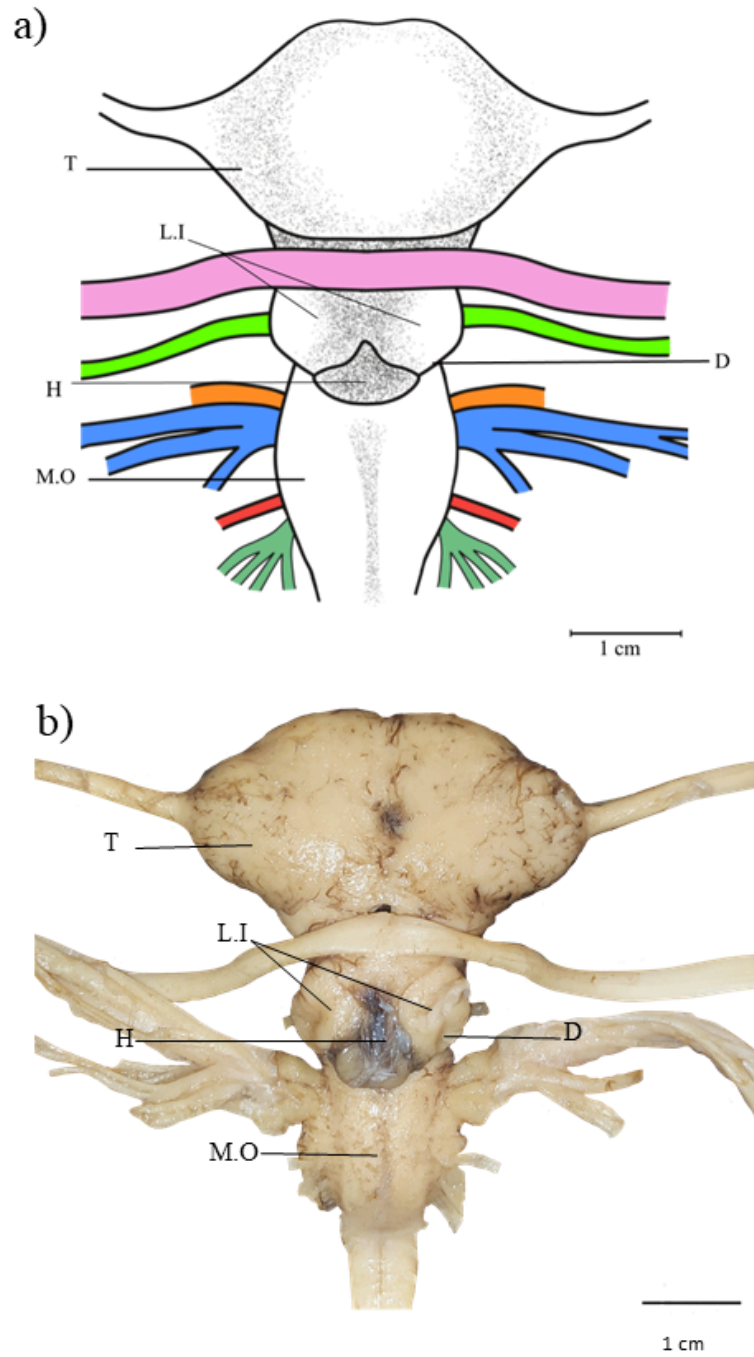
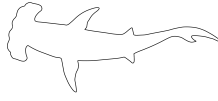


Figura 9. Encéfalo. Vista ventral. a) Ilustración b) Fotografía. D: Diencefalo; H: Hipófisis; L.I: Lóbulos del infundíbulo; M.O: Médula oblongada; T: Telencefalo.

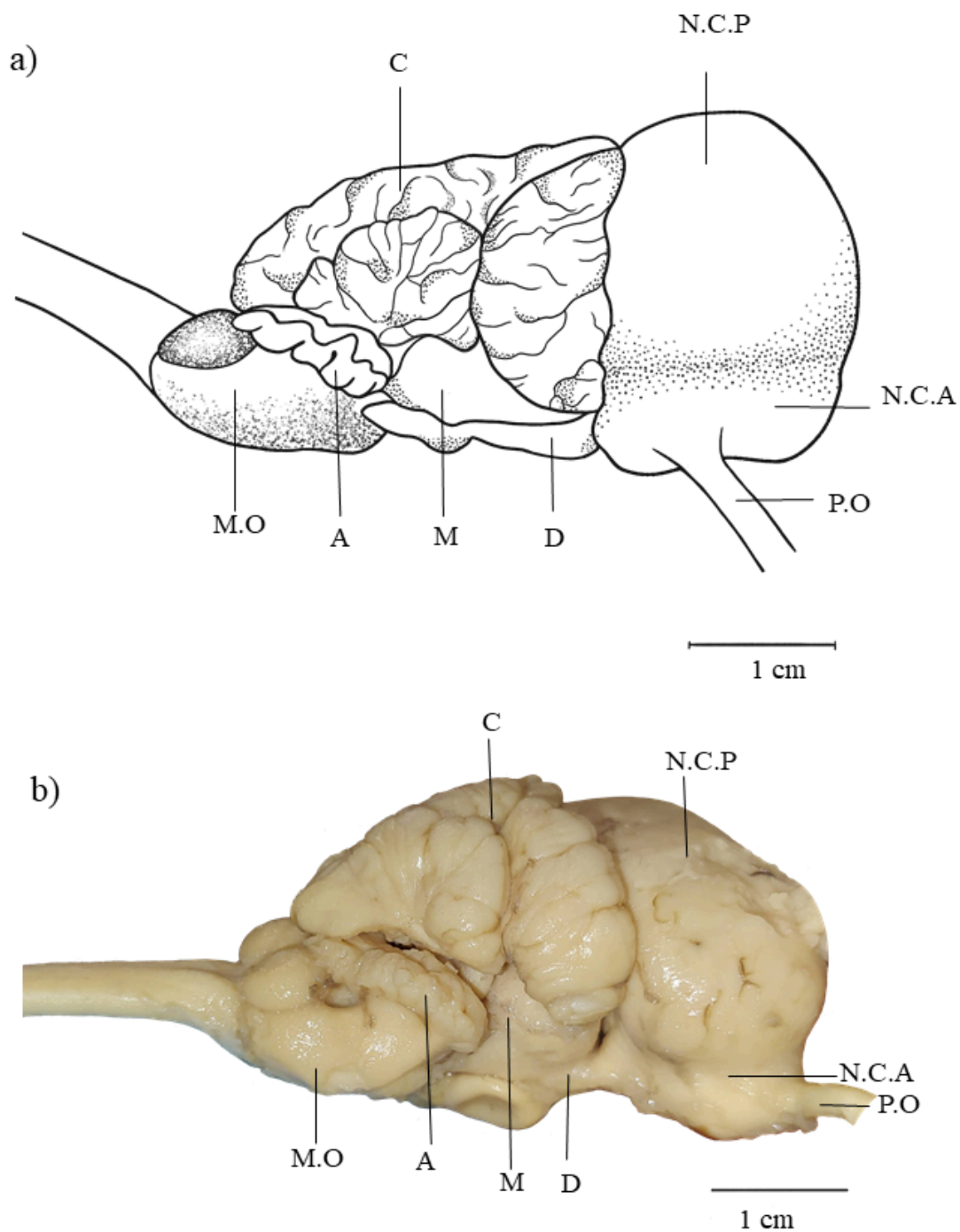
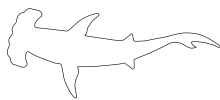


Figura 10. Encéfalo. Vista lateral sin nervios. a) Ilustración b) Fotografía. A: aurículas; C: Cerebelo; D: Diencéfalo; M: Mesencéfalo; M.O: Médula oblongada; N.C.A: Núcleo central anterior; N.C.P: Núcleo central posterior; P.O: Pedúnculo olfatorio.

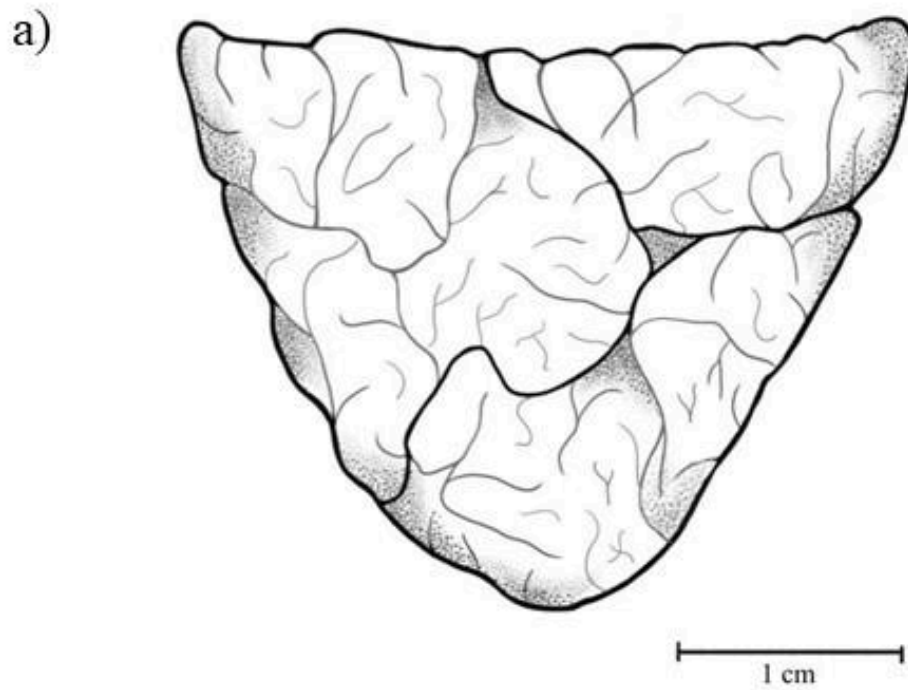
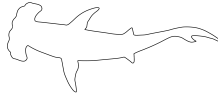


Figura 11. Cerebelo. Vista dorsal. a) Ilustración b) Fotografía

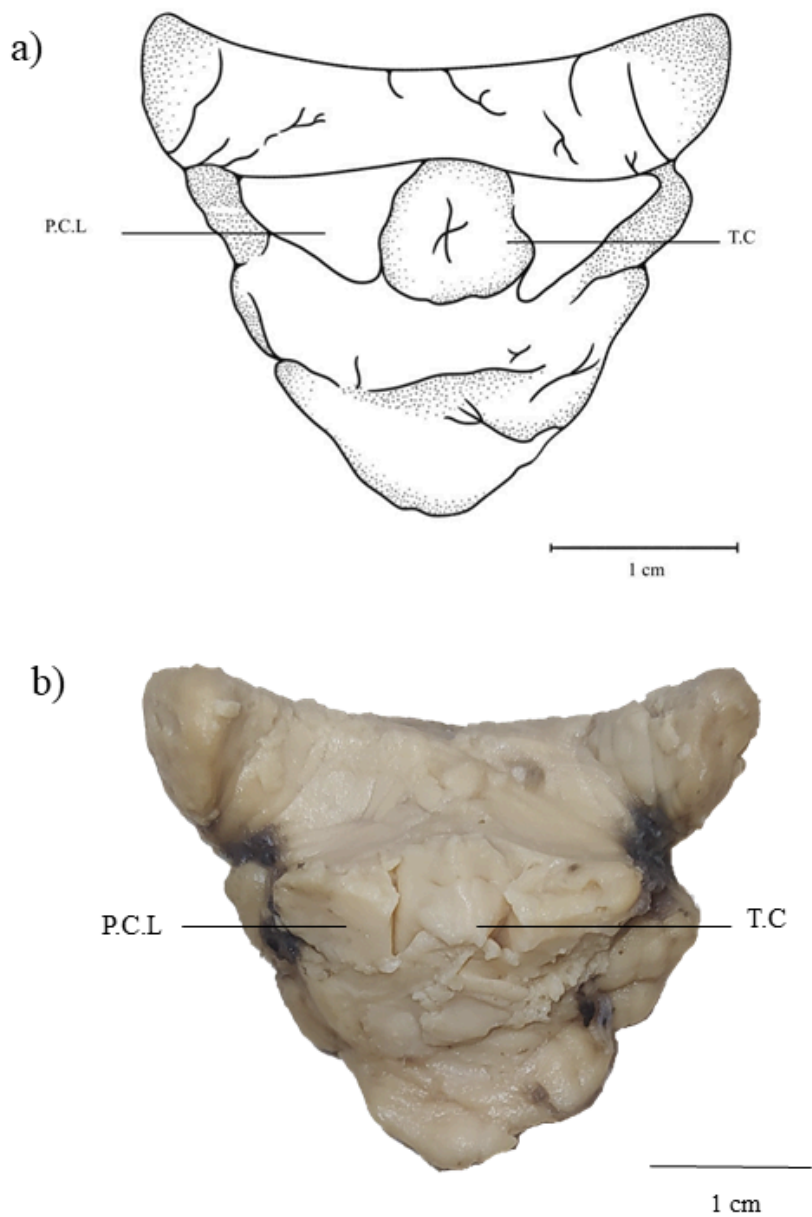
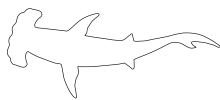
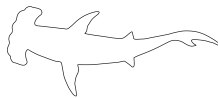


Figura 12. Cerebelo. Vista ventral. a) Ilustración b) Fotografía. T.C: Tronco cerebelar; P.C.L: Pedúnculo cerebelar lateral.



Nervios craneales.

Se observaron 9 nervios craneales en *Sphyrna lewini*, el nervio craneal I (olfatorio) se excluye de las descripciones debido a que por su posición dentro de los bulbos olfatorios (Montes-Domínguez, 2020), no formó parte de la observación macroscópica realizada.

Nervio II: Óptico.

El quiasma óptico de *S. lewini* se encuentra en la región ventral del diencefalo, es el nervio craneal más grueso (hasta 4.4 mm), tanto el ancho como largo aumenta conforme aumenta la talla del organismo, se extiende lateralmente, presenta una ligera curvatura en la parte media, hasta llegar al centro de la región posterior del globo ocular (Fig. 13-15).

Nervio III: Oculomotor.

Tiene su origen en el mesencéfalo, en la región lateral de los bulbos ópticos, se divide en dos ramas muy cerca del origen, ambas se alargan anterolateralmente, una rama inerva el músculo medio superior y recto superior en la región más proximal, la otra se divide y se dirige ventralmente hasta inervar el músculo oblicuo inferior en la región media y al músculo recto inferior en la región proximal (Fig. 15,16).

Nervio IV: Troclear.

Se origina de la región dorsal anterior del mesencéfalo en la superficie dorsal, este nervio delgado corre lateralmente hasta inervar el músculo oblicuo superior en la región media posterior (Fig. 15,16).

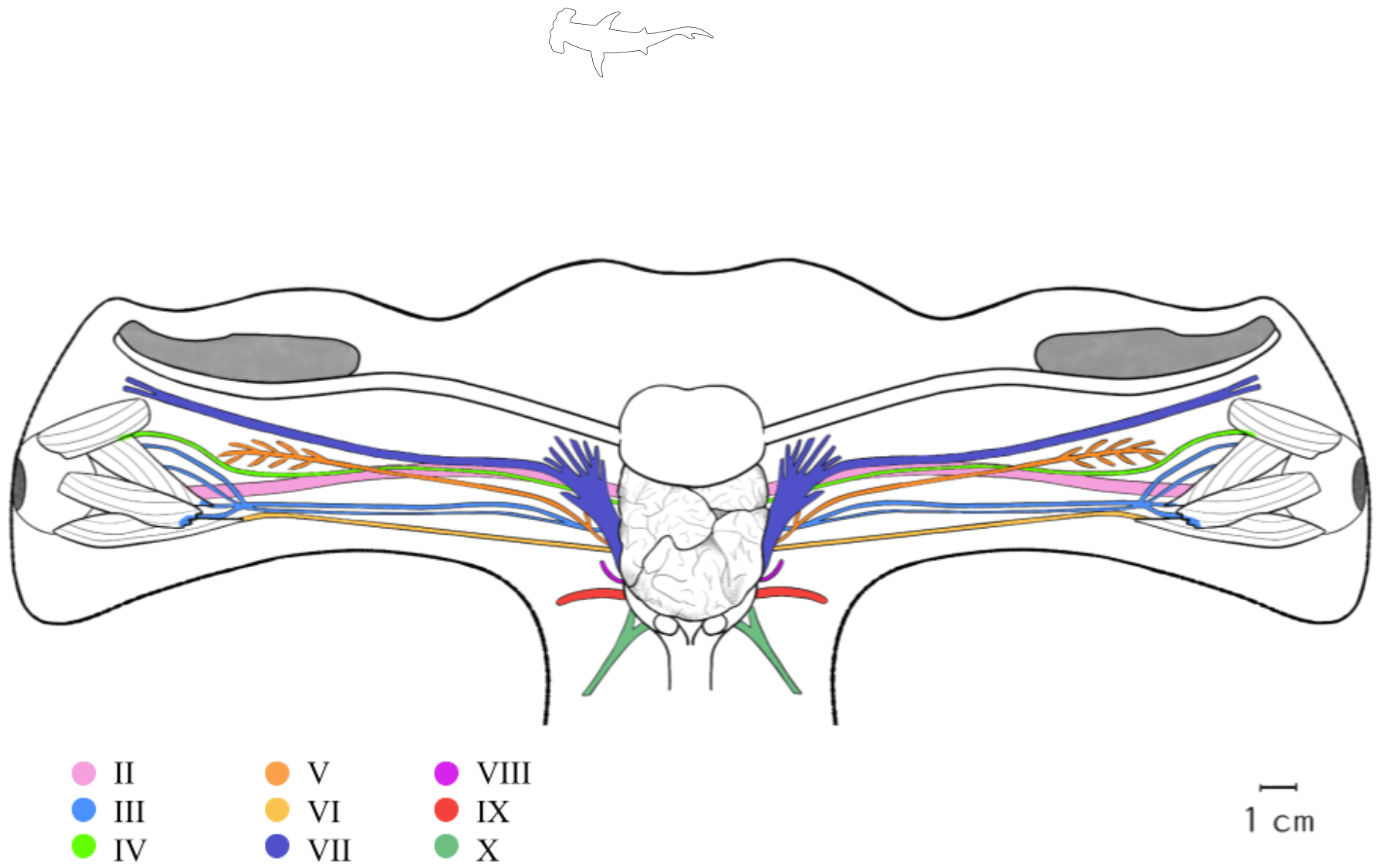


Figura 13. Ilustración de nervios craneales. Vista dorsal.



Nervio V. Trigémino.

Surge de la región dorsal de la médula oblongada justo debajo de las aurículas, es un nervio ancho, al avanzar se divide en tres principales ramificaciones más delgadas. La primera rama se extiende anteriormente hacia la parte dorsal del cráneo y se subdivide en diversas ramificaciones más delgadas, la segunda ramificación también se subdivide y corre anterolateralmente hacia la región ventral, innervando la musculatura mandibular, la tercera ramificación es más ancha y corre anterolateralmente hasta innervar la parte anterior de la cápsula nasal (Fig 13-15).

Nervio VI: Abducens o motor ocular externo.

Se origina en la región lateral de la médula oblongada, debajo del tercer nervio craneal, es uno de los nervios más delgados, se extiende lateralmente hasta llegar al músculo recto lateral, el cual innerva en su región más proximal (Fig. 15,16).

Nervio VII: Facial.

Tiene su origen en la región lateral anterior de la médula oblongada, el nervio corre anterolateralmente, y se divide en 2 ramificaciones más delgadas que se dirigen hacia la región ventral del cráneo (Fig 13-15).

Nervio VIII: Acústico.

Se origina en la médula oblongada, en la región lateral media, es un nervio delgado que se extiende hacia las cápsulas óticas (Fig. 15).

Nervio IX: Glossofaríngeo

Se origina de la región ventral posterior de la médula oblongada, posterior al nervio VIII, comparte origen parcialmente con el nervio vago, del cual se distingue por ser ligeramente más delgado, se extiende lateralmente con una inclinación hacia la región posterior del cráneo (Fig. 15).

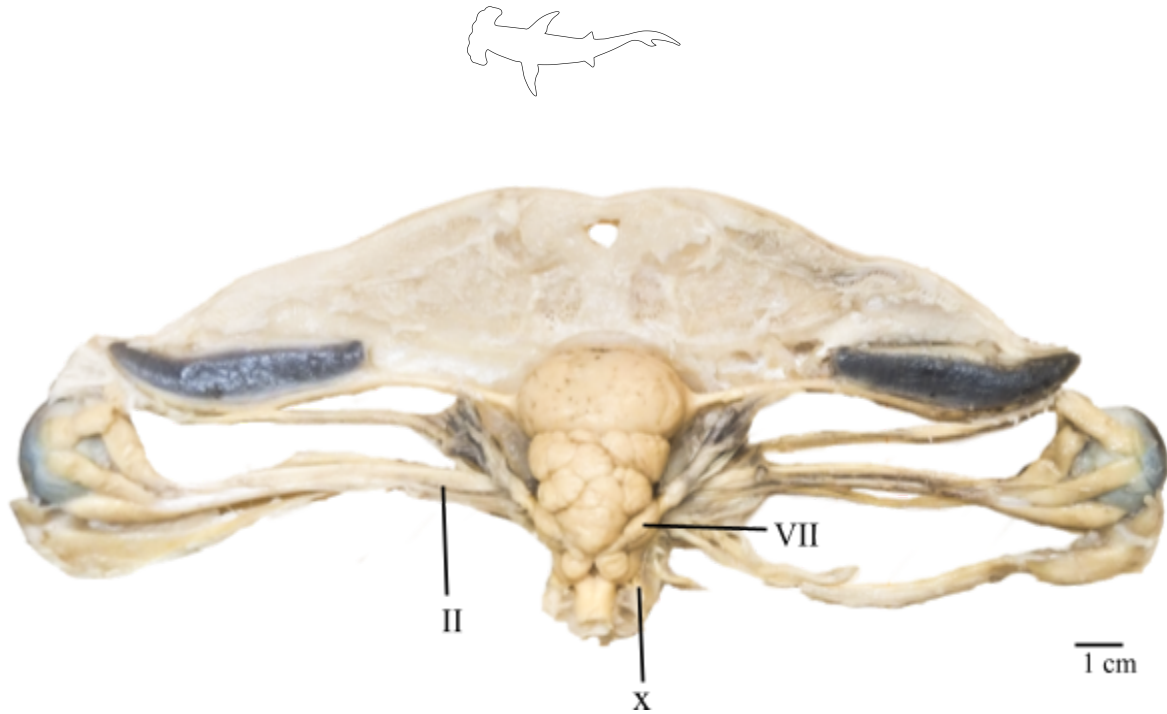


Figura 14. Fotografía de nervios craneales. Vista dorsal

Nervio X: Vago.

Se origina en la región posterior de la médula oblongada, está formado por dos ramas, la primera se origina de la región ventral y la segunda de la región lateral de la misma médula, ambas se unen inmediatamente y se extienden caudalmente hacia la región ventral (Fig. 15).

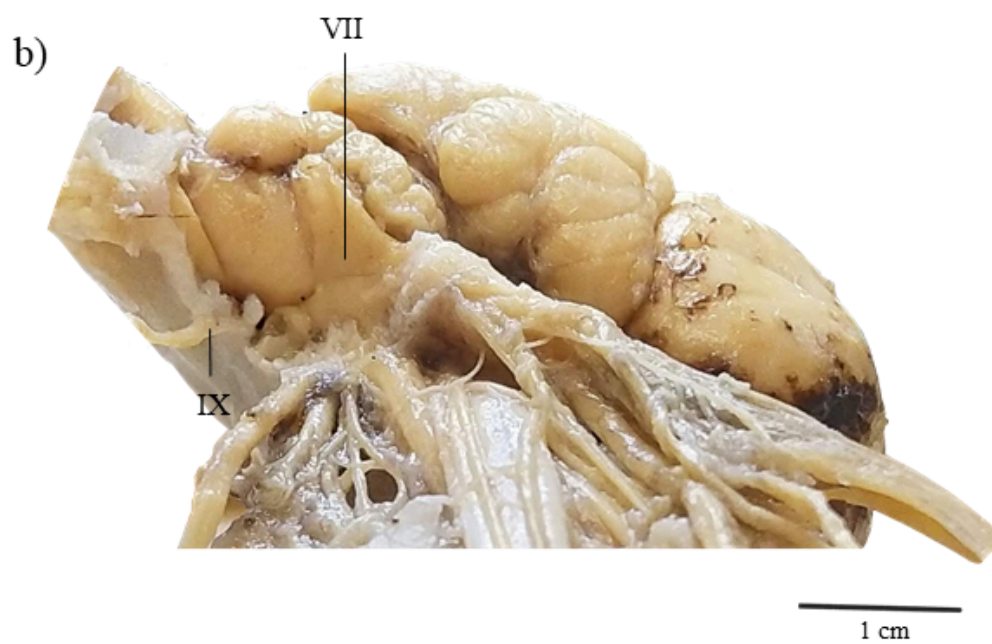
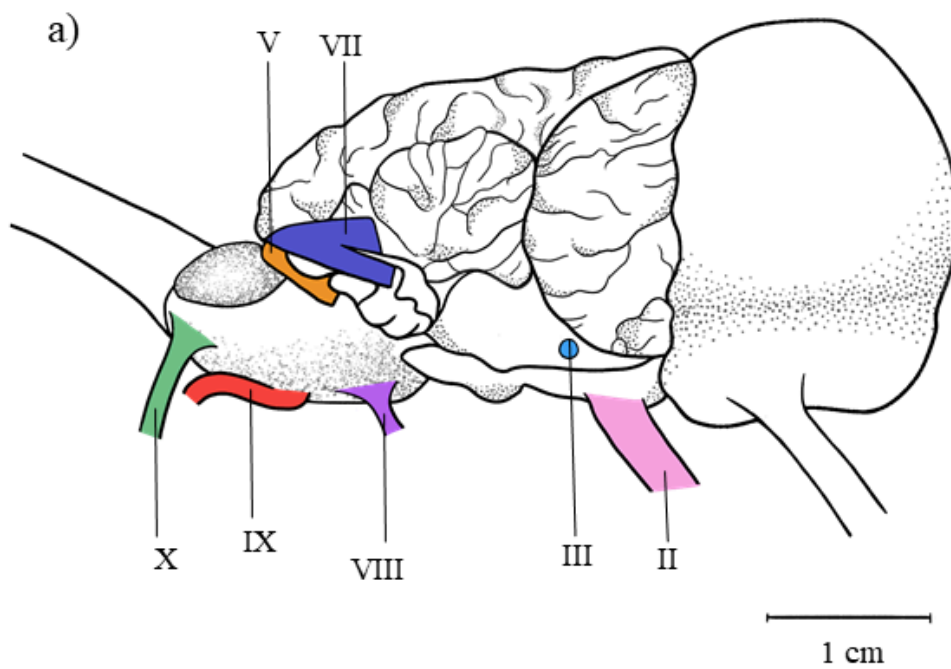
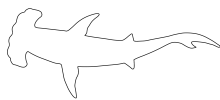
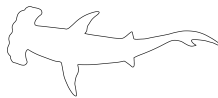


Figura 15. Nervios craneales. Vista lateral. a) Ilustración b) Fotografía.



Músculos extraoculares.

En *S. lewini* los ojos se encuentran lateralmente en la parte distal del cráneo debido a la forma aplanada dorsoventralmente y extendida lateralmente de su cabeza, por esto los músculos extraoculares también presentan una organización ligeramente diferente a las otras familias de Selachii. Se describieron seis músculos extraoculares divididos en dos grupos: rectos y oblicuos.

Músculo recto medio.

El músculo medio se origina a partir de un tendón en el cartílago del proceso postorbital, las fibras se extienden anterolateralmente, éste músculo presenta una forma cuasi-rectangular, con el origen más estrecho que el resto del músculo, se inserta en la región dorsal media del globo ocular.

Músculo recto superior

El músculo recto superior se origina del proceso postorbital, tiene una figura alargada, las fibras musculares corren anterolateralmente por debajo del músculo superior oblicuo y sobre el músculo inferior oblicuo hasta insertarse en la región anterior del globo ocular (Fig. 16)

Músculo recto inferior.

Este músculo se observa en vista ventral, comparte origen con los otros músculos rectos, es estrecho en su origen y de forma alargada, las fibras corren lateralmente y se ensanchan al insertarse en la parte media del globo ocular en la región ventral (Fig. 16).

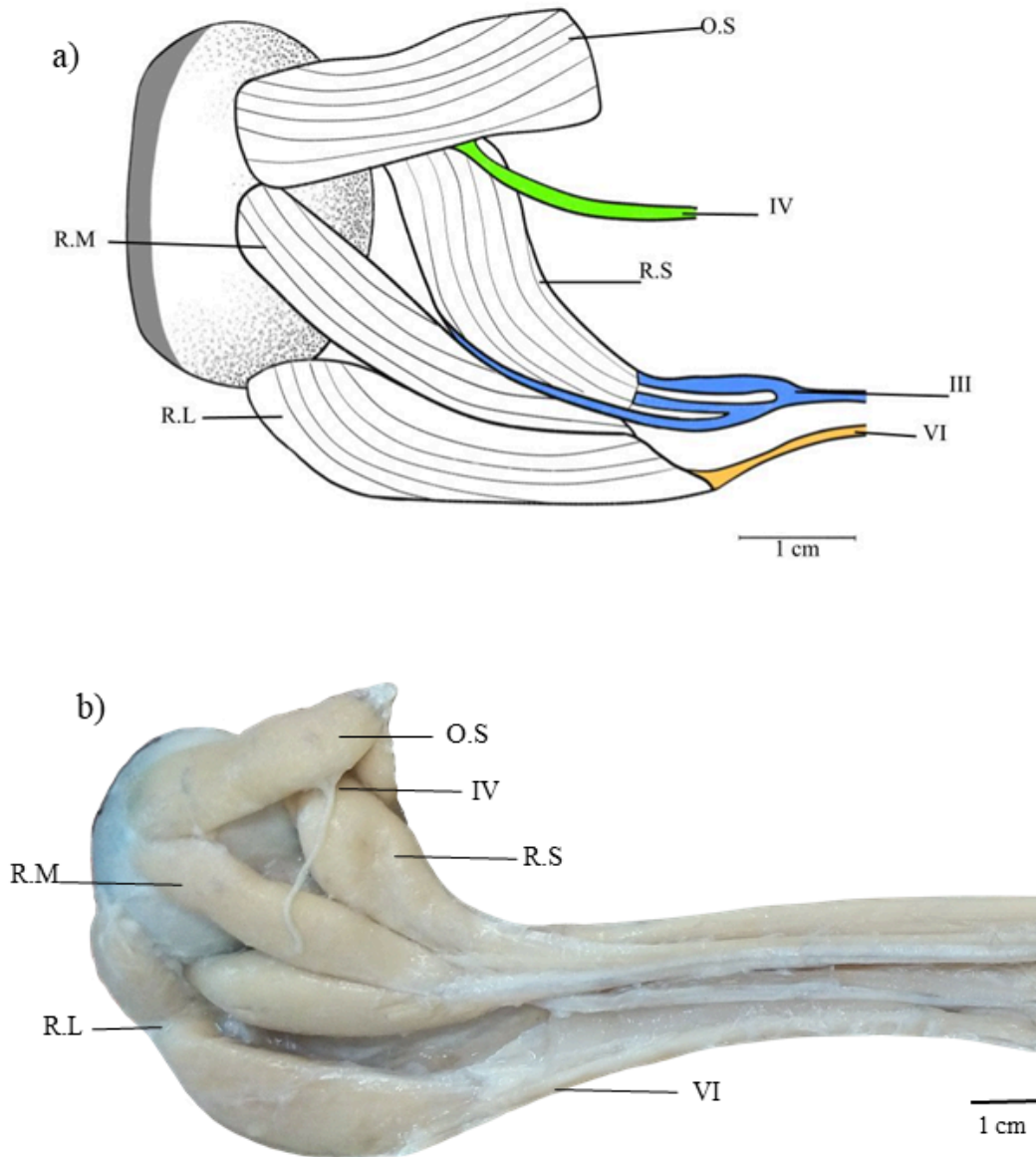
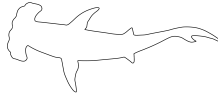


Figura 16. Músculos extraoculares. Vista dorsal. a) Ilustración b) Fotografía. O.S: Oblicuo superior; R.L: Recto lateral; R.M: Recto medio; R.S: Recto superior.



Músculo recto lateral.

El músculo recto lateral se origina de la región más posterior del proceso postorbital y presenta una forma fusiforme, sus fibras musculares se extienden lateralmente y se inclinan en dirección cefálica al insertarse a la región posterior del globo ocular.

Oblicuo superior.

El músculo superior oblicuo presenta una forma rectangular, se origina en la parte distal posterior del cartílago de la cápsula nasal, las fibras musculares corren posterolateralmente hasta insertarse en la región media dorsal del globo ocular anterior al músculo recto medio (Fig. 16).

Oblicuo inferior.

El músculo oblicuo inferior comparte origen con el oblicuo superior en el cartílago de la cápsula nasal y corre posterolateralmente debajo del mismo, sin embargo, sus fibras musculares se dirigen ventralmente hasta insertarse en la región ventral media del globo ocular (Fig. 17).

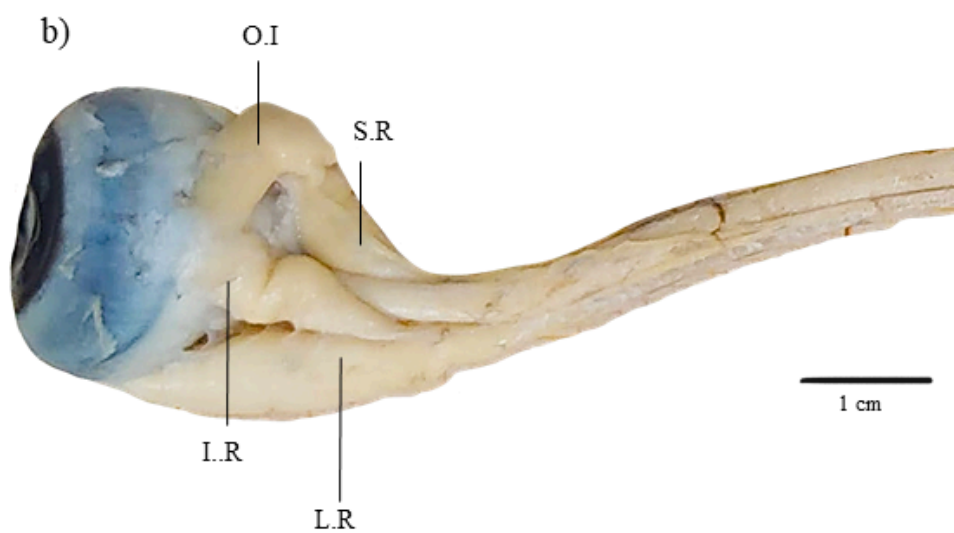
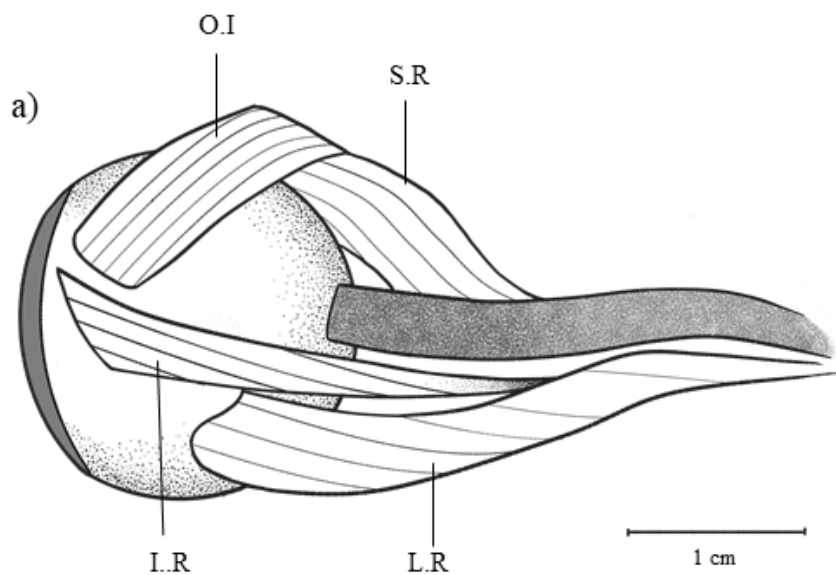
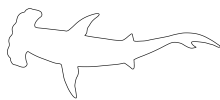
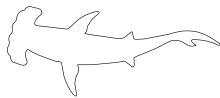


Figura 17. Músculos extraoculares. Vista ventral. a) Ilustración b) Fotografía. OI: Oblicuo inferior; RI: Recto inferior; R.L: Recto lateral; R.S: Recto superior.



Discusión.

Morfología del encéfalo.

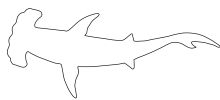
La morfología externa del telencéfalo de *S. lewini* fue constante en todos los organismos revisados en este estudio: un núcleo central ovalado con dos lóbulos diferenciados por un surco, siendo el lóbulo anterior de mayor tamaño que el posterior.

La notable hipertrofia del telencéfalo vista en *S. lewini* (Longitud: 43.51% Ancho: 84.36%) en este estudio corresponde con el estudio realizado por Yopak *et al.*, (2007), en el cual se señaló un gran desarrollo telencefálico en *S. lewini*, con un peso promedio de 53.75%.

En comparación con otras especies, el telencéfalo de *Sphyrna lewini* tiene una morfología similar a la descrita para *S. mokarran* (66.52) y *S. zygaena* (58.10%) pues igualmente presentan una hipertrofia de esta estructura (Yopak *et al.*, 2007), además, el telencéfalo de *S. tiburo* ha sido descrito como una estructura agrandada, presenta un núcleo central anterior notablemente mayor al posterior (Hoffmann & Northcutt, 2012), estas descripciones reflejan la cercanía filogenética entre estas especies pertenecientes a la familia Sphyrnidae. También podrían reflejar la similitud de hábitats, ya que son especies de aguas costero-pelágicas y costeras (respectivamente), con comportamientos sociales complejos.

En el caso de otras especies de Carcharhiniformes que comparten estilo de vida como *Carcharhinus falciformes* y *C. brachyurus*, también coinciden con *S. lewini* al presentar un telencéfalo extremadamente hipertrofiado (Yopak *et al.*, 2007).

En cuanto a especies más distantes filogenéticamente, pero que se asemejan a *S. lewini* por su gran tamaño, hábitat pelágico y al ser considerada una especie social, como es el caso de *Mobula sp.*, presenta un telencéfalo relativamente grande (61%) (Ari, 2011), esto podría atribuirse a la



similitud de hábitat y estilo de vida. Sin embargo, no todas las especies pelágicas han reportado grandes telencefálicos, *Alopias superciliosus* es una especie pelágica al igual que *S. lewini*, pero contrario a este presenta un telencéfalo relativamente reducido para su talla corporal (28.72%), lo que podría relacionarse a la diferencia en sus estilos de vida puesto que *A. superciliosus* es considerada una especie solitaria (Rodríguez-Marcelino, 2023) o a una característica filogenética.

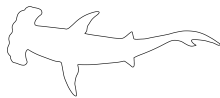
En lo relativo a especies lejanas tanto filogenéticamente como ecológicamente respecto a *S. lewini* como *Orectolobus ornatus* y *Cephaloscyllium isabella*, especies demersales y bentónicas, se han reportado telencéfalos mucho menos desarrollados (>50%) (Yopak *et al.*, 2007).

El telencéfalo de condricios es un centro multimodal donde se integra información recibida de distintos sistemas sensoriales (olfativo, visual, auditivo, electro-receptivo y mecano receptivo), su gran tamaño es uno de los indicadores de lo derivado del cerebro de tiburones (Ari, 2011).

Especies que suelen cazar en aguas con poca visibilidad dependen de la integración de señales electro-receptivos y olfativos (Bodznick, 1990), en el caso de *S. lewini*, que suele realizar migraciones verticales hasta 450 m de profundidad para alimentarse de presas mesopelagicas (Klimley *et al.*, 1993) un telencéfalo bien desarrollado parece reflejar su comportamiento.

En particular, un telencéfalo hipertrofiado se considera una característica avanzada asociada con comportamientos complejos e inteligencia social (Ari, 2011), *S. lewini* forma cardúmenes altamente complejos, organizados de acuerdo a la madurez de los organismos, por lo que se consideran animales sociales (Klimley, 1985).

El telencéfalo suele ser considerado como el centro olfativo del cerebro, si bien es cierto que la mayoría de fibras olfativas se dirigen hacia el palio lateral, se ha sugerido que no es el único sentido que lo domina, otras áreas del telencéfalo podrían recibir información visual desde el



mesencéfalo (Hofmann & Northcutt, 2012). Por lo que su tamaño se considera un indicador de la capacidad olfativa de una especie, además de la capacidad de integración de información.

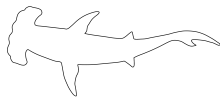
Se observó que el cerebelo es la estructura de mayor tamaño relativo en el encéfalo de *S. lewini*, su longitud ocupa el 49.28% de la longitud patrón.

Si bien, un cerebelo de gran tamaño no necesariamente es indicador de un alto nivel de foliación, *S. lewini* presenta el nivel más alto de foliación (6) de acuerdo a la escala visual de Montes-Domínguez (2020), con pliegues cerebelares profundos y bien definidos, además de una asimetría evidente, los surcos profundos que forman lóbulos bien definidos son una característica propia de myliobatiformes y galeomorfos derivados (Puzdrowski & Gruber, 2009).

Sphyrnidae es uno de los taxones con mayor desarrollo neural entre los condriictios, aunado a esto, el tamaño relativo del cerebelo de *S. lewini*, es de los más grandes (48.14% largo), similar a lo descrito previamente para *S. zygaena* (área: 22.25%) y *S. mokarran* (área:18.41%) (Yopak *et al* 2007). Se ha señalado que el cerebelo de *S. tiburo* es extremadamente foliado (Yopak *et al.*, 2016); sin embargo, no presenta un grado de hipertrofia tan alto como *S. lewini*.

Un cerebelo con gran desarrollo (nivel alto de foliación e hipertrofiado) puede encontrarse en tiburones galeomorfos y batoideos independientemente de su talla (Northcutt, 1977), es decir, no es una característica que se correlaciona directamente con especies de gran tamaño, esto es congruente para *S. lewini* puesto que los organismos adultos se encuentran en tallas de hasta 430 cm (Hazin, 2001).

Un cerebelo altamente foliado permite un aumento en la superficie cerebral, lo que a su vez reduce la longitud para las conexiones neuronales, proporcionando un medio energéticamente eficiente para coordinar tamaños corporales grandes o para la agilidad motora del nivel central



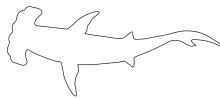
(Yopak *et al.*, 2019), por esto es que se considera un indicador de la agilidad motora de los condriictios.

La variación en la complejidad y morfología de un cerebelo se correlaciona con su filogenia y ecología, particularmente con la alimentación pues se refleja en la coordinación durante la localización de presas y el análisis de consecuencias de sus propios movimientos (Yopak *et al.*, 2007).

En el caso de una especie pelágica, *Alopias superciliosus*, del orden Lamniformes, presenta un cerebelo altamente foliado y de gran tamaño, lo que se le ha atribuido a su condición de especie migratoria, de nado activo y a su técnica de depredación que requiere gran coordinación motora (Rodríguez-Marcelino, 2023). Igualmente, *Sphyrna lewini* presenta un nado activo y movimientos motores complejos, además de realizar migraciones horizontales y verticales entre distintos hábitats (Coiraton *et al.*, 2020; Hoyos-Padilla *et al.*, 2014).

Se ha señalado que ciertas especies, tal como *Megachasma pelagios* (tiburón de boca ancha) a pesar de tener un telencéfalo bien desarrollado, presenta un cuerpo cerebelar pequeño y levemente foliado, lo que se atribuye con su alimentación por filtración, pues es un tipo de alimentación inactivo (Ito *et al.*, 1999). Contraria a un tipo de alimentación activa que requiere de gran agilidad motora como el de *S. lewini*, que se alimenta de diferentes presas, incluyendo especies ágiles pertenecientes a la familia Scombridae y Serranidae (Hinojosa-Alvarez, 2007). Además, se relaciona con la posición filogenética que cada especie ocupa (Orden Lamniformes y Carcharhiniformes respectivamente).

La morfología externa del cerebelo de *S. lewini* indica una mayor complejidad que un cuerpo cerebelar completamente liso y simétrico. Las condiciones bióticas y abióticas se asocian con



adaptaciones anatómicas y fisiológicas para el aumento de la eficiencia de un organismo (Lisney *et al.*, 2007).

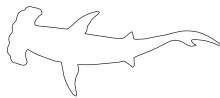
El mesencéfalo de *S. lewini* es la estructura de menor longitud presente en el cerebro de *S. lewini* (21.36%), se conforma por un tectum óptico con lóbulos ópticos bien definidos con una forma esférica casi perfecta y por el tegmento mesencefálico ubicado ventralmente. El tamaño promedio de esta estructura coincide con lo descrito para *S. lewini* por Yopak & Lisney (2012): únicamente 6.53% del peso total del encéfalo corresponde a esta estructura.

El tamaño de esta estructura en *S. lewini* se considera menor al promedio respecto a otros condriictios, al igual que en otras especies del mismo género como *S. zygaena* y *S. mokarran* en las cuales el mesencéfalo ocupa únicamente 6.08% y 3.75% del volumen total, respectivamente (Yopak *et al.*, 2007).

En especies de Carcharhiniformes, las cuales son cercanas filogenéticamente a Sphyrnidae, se puede encontrar una tendencia a presentar un mesencéfalo igualmente menor al promedio, tal es el caso de *Carcharhinus brachyurus* (Yopak *et al.*, 2007).

Mientras que especies de las que *S. lewini* es filogenéticamente más distante presentan mesencéfalos más desarrollados, como el tiburón mako *Isurus oxyrinchus* (Yopak & Lisney, 2012). Igualmente se ha reportado que *A. superciliosus*, una especie perteneciente al orden Lamniformes y pelágicas, presenta ojos y tectum óptico de gran tamaño (Rodríguez-Marcelino, 2023) a pesar de compartir hábitat.

El mesencéfalo es un centro multimodal, es decir, múltiples estímulos provenientes de diferentes órganos convergen en él, sin embargo, se ha comprobado que existe una fuerte relación entre su tamaño y el número de axones en el nervio óptico, por lo que su tamaño es considerado un indicador de las capacidades visuales de los elasmobranquios (Lisney *et al.*, 2007). Por



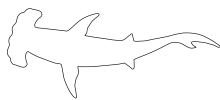
consiguiente, un mesencéfalo menor promedio como el de *S. lewini* podría indicar una relevancia media del sentido de la vista para este, especialmente al ser la estructura con menor tamaño en el encéfalo.

El tamaño del mesencéfalo en *S. lewini* podría indicar su estilo de vida pelágica costero/oceánica, con un comportamiento caracterizado por nadar entre aguas con menor visibilidad de la costa, donde no puede depender primariamente de la vista, y aguas con mayor visibilidad en la zona pelágica. Además, para alimentarse realiza migraciones verticales diarias de hasta 450 m de profundidad a la zona mesopelágica (Klimley *et al.*, 1993) donde la visibilidad es extremadamente reducida debido a la escasa penetración de luz solar, es claro que la vista no es un sentido del que depende primordialmente para la depredación, evitar predadores o relacionarse con su entorno.

El mesencéfalo de *S. lewini* es considerablemente mayor que el que poseen especies de condriictios abisales como *Hydrolagus colliei*, una especie abisal de Chimaeridae, que presenta un mesencéfalo bien definido, pero de tamaño menor al promedio con longitud del 13.8% del total, lo que se piensa que se debe a su estilo de vida bentopelágico y hábitat de aguas más profundas (García-Sánchez., 2022).

También es mayor que el mesencéfalo de especies de Batoidea como *Gymnura lessae* (1.50%) y *G. marmorata* (1.35%) (Montes-Domínguez, *et al.*, 2020).

Además de relacionarse con el sentido de la vista, el tamaño del mesencéfalo también podría indicar la capacidad del procesamiento sensorial en los peces cartilaginosos, al ser un centro multimodal donde convergen señales provenientes del sistema octavo lateralis, cerebelo y médula espinal (Yopak & Lisney, 2012).



El diencéfalo de *S. lewini* es la cuarta región con mayor longitud en el encéfalo (31.16%), los lóbulos del infundíbulo se encuentran semi redondeados y presenta una hipófisis delgada y alargada, esto coincide con lo mencionado por Yopak *et al.*, (2007) donde se menciona que el diencéfalo de *S. lewini* es la estructura que menos peso añade al encéfalo (4.44%) ya que presenta un tamaño relativo reducido.

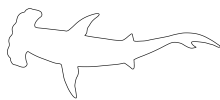
Esta estructura conecta por fibras con el telencéfalo, cerebelo y tectum óptico, proyectando y recibiendo señales multisensoriales (Northcutt, 1989), además se ha reportado que responde estímulos de la línea lateral (Bleckman *et al.*, 1987), indicando que es un área con gran importancia multisensorial, sin embargo, las implicaciones exactas en el comportamiento que tiene el tamaño del diencéfalo en elasmobranquios se mantiene incierta.

Al igual que en otras especies del mismo género: *S. zygaena* (3.93 %), *S. mokarran* (3.39%) (Yopak *et al.*, 2007) *S. lewini* presenta un diencéfalo menor al promedio, por lo que un diencéfalo reducido podría ser una tendencia filogenética en este grupo.

Similarmente, *Carcharhinus brachyurus*, especie cercana a *S. lewini*, con hábitos y estilos de vida similares (costero-pelágicos), presenta un diencéfalo reducido (Yopak *et al.*, 2007). A diferencia de especies de lamniformes como *Alopias superciliosus* y *Pseudocarcharias* sp. que presentan un diencéfalo hipertrofiado (Rodríguez-Marcelino, 2023; Yopak *et al.*, 2007).

S. lewini presenta un diencéfalo relativamente mayor que especies basales como batoideos de hábitats bentónicos, tal como *G. lessae* y *G. marmorata*, que presentan una longitud de diencéfalo de 1.65% y 1.59%, respectivamente (Montes-Domínguez *et al.*, 2020).

Si bien, no existen suficientes estudios que expliquen la correlación entre el tamaño del diencéfalo con el estilo de vida, se ha observado que especies que son depredadores veloces como *A. pelagicus* y *A. vulpinus* presentan diencéfalos hipertrofiados y un comportamiento



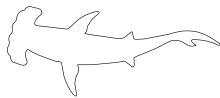
caracterizado de movimientos rápidos y altamente coordinados, mientras que especies de movimientos lentos poseen los diencéfalos de menor tamaño registrados, como *Mitsukurina owstoni*, *Carcharias taurus* y *Megachasma pelagios* (Guzzo, 2019), en el caso de *S. lewini*, con un diencéfalo menor al promedio pero bien definido, se podría correlacionar con su estatus de cazador activo, pero principalmente con su posición filogenética como un taxón más derivado en términos evolutivos.

La longitud de la médula oblongada de *S. lewini* ocupa en promedio 35.65% de la longitud patrón, siendo la tercera estructura con mayor tamaño en el encéfalo, similarmente Yopak *et al.*, (2007) señala que el peso de la médula oblongada de *S. lewini* es relativamente reducido, incluso inferior al promedio de los condriictios conocidos (11.57%).

La médula de tamaño relativo reducido coincide con datos de estudios previos en donde se ha reportado que el grupo sphyrnidae suelen ser especies que presentan una médula oblongada de tamaño inferior al promedio, tal es el caso de *S. zygaena* (9.63%) y *S. mokarran* (1.93%) (Yopak *et al.*, 2007).

Igualmente, otra especie pelágica, *Alopias superciliosus*, reporta una médula oblongada reducida, de apenas el 23.31% de la longitud patrón (Rodríguez-Marcelino, 2023) siendo incluso menor que la reportada en este estudio para *S. lewini*. De igual manera, otras especies pelágicas como *C. caliciforme* y *C. brachyurus* presentan una médula menor al promedio (Yopak *et al.*, 2007), esto podría indicar posible correlación con el estilo de vida pelágico, contrario a batoideos y tiburones bentónicos, los cuales presentan una gran médula oblongada (Yopak, 2012).

Además, una médula oblongada reducida parece ser tendencia filogenética en Galeomorphii, mientras que tiburones más basales (escualomorfos y escuatimorfos) poseen medulas oblongas bien desarrolladas (Northcutt, 1989).



La morfología externa de las áreas cerebrales puede indicar en algunos casos información sobre importancia de los sentidos que corresponden con esa estructura, una médula oblongada bien desarrollada se suele relacionar con especialización sensorial no visual (Yopak & Montgomery, 2008), por recibir proyecciones del octavo lateral.

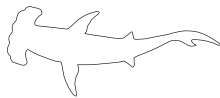
Se ha observado que estructuras que contienen neuronas motoras y sensoriales primarias, tal como la médula oblongada, tienden a aumentar poco su tamaño al aumentar el tamaño general del cerebro (Yopak *et al.*, 2010), así, aunque *S. lewini* presenta un cerebro relativamente grande, no es de sorprender que la médula oblongada no presente una hipertrofia.

El tamaño de los núcleos octavo-lateral medial y dorsal varían considerablemente entre especies, en el caso de *S. lewini* son prominentes, similar a otros galeomorfos (Northcutt, 1989), el lateral recibe señales de los nervios anteriores de la línea lateral, mientras que el dorsal recibe de todos los nervios de la línea lateral (Corwin, 1989), si bien se ha especulado mucho respecto a las posibles implicaciones del cambio en el tamaño en relación a su ecología, no se sabe con seguridad la correlación.

El cerebro presenta diferencias con lo que ha sido reportado para otros tiburones pelágicos tales como *A. superciliosus* o especies del mismo género como el tiburón pala, *S. tiburo*.

Nervios craneales.

La organización de los nervios craneales descrita para *S. lewini* es similar en número, origen y ordenación a la descrita previamente para otros condriictios como *M. thurstoni*, *D. hypostigma* (Cunha *et al.*, 2016); *Gymnura lessae*, *Gymnura marmorata* (Montes-Domínguez *et al.*, 2020); *Megachasma pelagios* (Ito *et al.*, 1999) y *Alopias superciliosus* (Rodríguez-Marcelino, 2023).



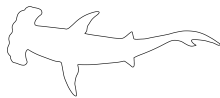
A diferencia de otros vertebrados, en elasmobranquios el término quiasma no hace referencia a la región en que se cruzan las fibras ópticas de ambos ojos, si no que se refiere al origen del nervio óptico (Montes-Domínguez *et al.*, 2020), por esto en *S. lewini* el quiasma óptico está en la región ventral del diencéfalo, Los nervios se extienden en la cavidad craneal, debido a la forma aplanada dorsoventralmente y extendida de la cabeza de *S. lewini*, propia de Sphyrnidae, los nervios craneales II, III, IV y VI se extienden horizontalmente para inervar la retina y músculos extraoculares, ubicados lateralmente en cada extremo de la cabeza, en vez de extenderse anteriormente como en la mayoría de especies de Selachii; en esto se asemejan más a Batoidea.

Músculos extraoculares.

El sentido de la vista es de gran importancia para muchas especies, la capacidad de movimiento del globo ocular puede significar una visión superior o inferior, y está dada por los músculos extraoculares (Cunha, *et al.*, 2016).

Estos músculos tienden a ser constantes en número en los condriactos, *S. lewini* presenta 4 músculos rectos (recto, lateral, superior e inferior) y 2 músculos oblicuos (superior e inferior), si bien estudios descriptivos sobre los músculos extraoculares de *S. lewini* son escasos, Muriana *et al.*, (2017) describe similarmente a los 6 músculos extraoculares como bien desarrollados. A diferencia de ciertas especies de tiburones bentónicos (*Chiloscyllium punctatum*, *Hemiscyllium ocellatum*, *Orectolobus maculatus*) que presentan dos músculos extraoculares adicionales conocidos como músculos pediculares (Seamone *et al.*, 2015)

Los músculos oblicuos comparten origen en el cartílago de la cápsula nasal, sin embargo no se encuentran fusionados, a diferencia de *M. thurstoni* que los presenta fusionados en origen e



inserción; además el músculo recto superior en esta especie es alargado, difiriendo de lo descrito para *D. hypostigma*, cuyo músculo recto superior es triangular (Cunha *et al.*, 2016).

Otras diferencias en los músculos de *S. lewini* son respecto a *A. superciliosus*, especie que presenta músculos extraoculares evidentemente hipertrofiados, al igual que globos oculares de gran tamaño, en contraste con los músculos extraoculares de menor tamaño de *S. lewini*, los músculos de tamaño reducido pueden indicar un uso reducido del movimiento particular (Cunha *et al.*, 2016), sin embargo, estudios morfométricos serían necesarios para determinar si es ese el caso para esta especie.

Conclusión.

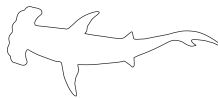
En general la morfología del encéfalo de *Sphyrna lewini* es la propia de los galeomorfos. Su telencéfalo es hipertrofiado con el núcleo central posterior de mayor tamaño que el núcleo central anterior.

Su cerebelo es hipertrofiado y presenta un desarrollo mayor que el descrito para otras especies, tiene el nivel máximo de foliación (6), debido a los numerosos lóbulos que se forman por los surcos profundos. Estas características son distintivas en especies sociales, capaces de navegar en hábitats complejos.

El mesencéfalo y diencéfalo son las estructuras de menor tamaño relativo.

La proporción del tamaño que ocupan las áreas cerebrales es similar a lo descrito para otras especies de tiburón martillo (*S. mokarran* y *S. zygaena*).

Para comprender mejor las implicaciones ecológicas y filogenéticas de lo aquí descrito es necesario continuar con análisis evolutivos y neuroecológicos de *S. lewini*.



En el presente trabajo estudio se observó el origen de 9 nervios craneales (II-X) y la inserción de los pares II, III, IV y VI, la cual se encontró similar a la descrita para la mayoría de tiburones galeomorfos.

Si bien los músculos oculares de *S. lewini* no presentan una alteración en número y posición, son de tamaño reducido a comparación de especies que dependen primariamente de la visión, tales como *A. superciliosus*.

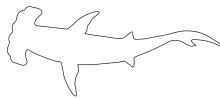
Recomendaciones.

Para tener más información sobre las diferencias que existen entre especies es necesario realizar estudios más allá de la morfología externa.

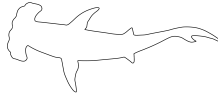
Los estudios de la morfología de músculos extraoculares son escasos, se requiere mayor información que permita comparar especies y así comprender mejor la visión de estos organismos.

Referencias bibliográficas.

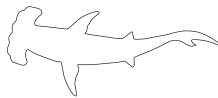
- Ari, C. (2011). Encephalization and brain organization of mobulid rays (Myliobatiformes, Elasmobranchii) with ecological perspectives. *The Open Anatomy Journal*, 3(1), 1-13.
- Bleckmann, H., Bullock, T. H., & Jørgensen, J. M. (1987). The lateral line mechanoreceptive mesencephalic, diencephalic, and telencephalic regions in the thornback ray, *Platyrhinoidis triseriata* (Elasmobranchii). *Journal of Comparative Physiology*. 161, 67-84.
- Bodznick, D. (1990). Elasmobranch vision: multimodal integration in the brain. *Journal of Experimental Zoology*, 256(S5), 108-116



- Carpenter, K.E., F. Krupp, D.A. Jones & U. Zajonz. (1997) *Living marine resources of Kuwait, eastern Saudi Arabia, Bahrain, Qatar, and the United Arab Emirates*. Roma: FAO.
- Coiraton, C., Amezcua, F., & Ketchum, J. T. (2020). New insights into the migration patterns of the scalloped hammerhead shark *Sphyrna lewini* based on vertebral microchemistry. *Marine biology*, 167(5), 58.
- Compagno, L.J.V., Krupp, F & Schneider, (1995) Tiburones. En: *Guía FAO para la Identificación de Especies para los Fines de la Pesca-Pacífico Centro-Oriental Volumen II. Vertebrados. Parte1*. Ed. por W. K Fischer, W., Krupp, F., Schneider, W., Sommer, C., & KE Carpenter and Niem, V. H. Roma. FAO.
- Corwin, J. T. (1989). Functional anatomy of the auditory system in sharks and rays. *Journal of Experimental Zoology*, 252(S2), 62-74.
- Cunha, C. M., Oliveira, L. E., & Kfoury Jr, J. R. (2016). Comparative anatomy of the extraocular muscles in four Myliobatidae rays (Batoidea, Myliobatiformes). *Journal of anatomy*, 228(5), 877-886.
- Ebert, D. A., & Fowler, S. (2021). *Sharks of the world: a complete guide*. 1st ed. New Jersey. Princeton University Press.
- García Sánchez, A. J. (2023) *Descripción anatómica de la región cefálica de *Hydrolagus coliei*: encéfalo, cráneo, músculo (Chondrichthyes: Holocephalii: Chimaeridae)*. Tesis de Licenciatura. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Goodrich S.E. (1986) *Studies on the Structure and Development of Vertebrates*. Chicago: University of Chicago Press.



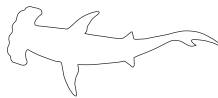
- Guzzo, F. (2019). *Comparative brain anatomy of lamniform sharks (Elasmobranchii: Lamniformes) and its implications to function, behavioral ecology, and evolution*. Tesis. Chicago: College of Science and Health.
- Hofmann, M. H., & Northcutt, R. G. (2012). Forebrain organization in elasmobranchs. *Brain Behavior and Evolution*, 80(2), 142-151.
- Hazin, F., Fischer, A., & Broadhurst, M. (2001). Aspects of reproductive biology of the scalloped hammerhead shark, *Sphyrna lewini*, off northeastern Brazil. *Environmental Biology of Fishes*, 61, 151-159.
- Hinojosa-Alvarez, S. A. (2007) *Áreas de crianza de tiburones en el área de Salina Cruz, Oaxaca*. Tesis de licenciatura. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Hoyos-Padilla, E. M., Ketchum, J. T., Klimley, A. P., & Galván-Magaña, F. (2014). Ontogenetic migration of a female scalloped hammerhead shark *Sphyrna lewini* in the Gulf of California. *Animal Biotelemetry*, 2, 1-9.
- Ito, H., Yoshimoto, M., & Somiya, H. (1999). External Brain Form and Cranial Nerves of the Megamouth Shark, *Megachasma pelagios*. *Copeia*, 1999(1), 210–213.
- Klimley, A. P. (1985). Schooling in *Sphyrna lewini*, a species with low risk of predation: a non-egalitarian state. *Zeitschrift für Tierpsychologie*, 70(4), 297-319.
- Klimley, A. P., Mancilla, I. C., & Geniz, J. L. C. (1993). Descripción de los movimientos horizontales y verticales del tiburón martillo *Sphyrna lewini*, del sur del golfo de California, México. *Ciencias marinas*, 19(1), 95-115.
- Land, M. F. (2015). Eye movements of vertebrates and their relation to eye form and function. *Journal of Comparative Physiology A*, 201(2), 195-214.



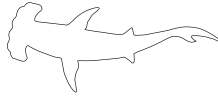
- Lisney, T. J. & Collin, S. P. (2006). Brain morphology in large pelagic fishes: a comparison between sharks and teleosts. *Journal of Fish Biology*, 68(2), 532-554.
- Lisney T.J. & Collin SP (2007) Relative eye size in elasmobranchs. *Brain Behav Evol*, 69, 266–279.
- Lisney, T. J., Bennett, M. B., & Collin, S. P. (2007). Volumetric analysis of sensory brain areas indicates ontogenetic shifts in the relative importance of sensory systems in elasmobranchs. *Raffles Bulletin of Zoology*, 55(14), 7-15.
- Miller, M.H., Carlson, J., Cooper, P., Kobayashi, D., Nammack, M. & Wilson, J. (2013). *Status Review Report: Scalloped Hammerhead Shark (Sphyrna lewini)*. National Marine Fisheries Service, Office of Protected Resources.
- Montes-Domínguez, H. M., López-Bárceñas, R., & González-Isáis, M. (2014). Estudio Morfológico del Cerebro y Pares Craneales de *Diplobatis ommata* (Elasmobranchii: Narcinidae). *International Journal of Morphology*, 32(4), 1152-1155.
- Montes-Domínguez, H. M., Ayala-Pérez, L. A., Castillo-Rivera, M. A., González-Isáis, M., & Reynoso, V. H. (2020). Neuroanatomía de Dos Especies del Género *Myliobatis* (Chondrichthyes: Myliobatoidea). *International Journal of Morphology*, 38(2), 499-504.
- Montes-Domínguez H., (2020). *Variaciones morfológicas del cerebro de la superfamilia Dasyatoidea (Chondrichthyes: Myliobatidae) y sus implicaciones filogenéticas*. Tesis doctoral. México: Universidad Autónoma Metropolitana.
- Montgomery, J. C., Bodznick, D., & Yopak, K. E. (2012). The cerebellum and cerebellum-like structures of cartilaginous fishes. *Brain Behavior and Evolution*, 80(2), 152-165.



- Muriana, C. B., Amorim, A. F., Vasconcelos, B. V., Leandro, R. M., Malavasi, C. E., Rici, R. E. G., Miglino, M. A., Ferreira, A. O. & Maria, D. A. (2017). Morphological study of the eye bulb of the hammerhead shark, *sphyrna lewini* (Elasmobranch: Carcharhinidae). *International Journal of Morphology*, 35(1), 287-292–292.
- Nelson, J. S., Grande, T. C., & Wilson, M. V. (2016). *Fishes of the World*. 5th ed. New Jersey: John Wiley & Sons.
- New, J. G. (2001). Comparative neurobiology of the elasmobranch cerebellum: theme and variations on a sensorimotor interface. En: *The behavior and sensory biology of elasmobranch fishes: an anthology in memory of Donald Richard Nelson*. Tricas, T.C., Gruber, S.H. (eds), Dordrecht: Springer, 93-108.
- Northcutt, R. G. (1977). Elasmobranch central nervous system organization and its possible evolutionary significance. *American Zoologist*, 17(2), 411-429.
- Northcutt, R. G. (1989). Brain variation and phylogenetic trends in elasmobranch fishes. *Journal of Experimental Zoology*, 252(S2), 83-100.
- Northcutt, R. G. (1977). Elasmobranch central nervous system organization and its possible evolutionary significance. *American Zoologist*, 17(2), 411-429.
- Puzdrowski, R. L., & Gruber, S. (2009). Morphologic features of the cerebellum of the Atlantic stingray, and their possible evolutionary significance. *Integrative Zoology*, 4(1), 110-122.
- Rigby, C.L., Dulvy, N.K., Barreto, R., Carlson, J., Fernando, D., Fordham, S., Francis, M.P., Herman, K., Jabado, R.W., Liu, K.M., Marshall, A., Pacoureau, N., Romanov, E., Sherley, R.B. & Winker, H. (2019) *Sphyrna lewini*. The IUCN Red List of Threatened Species 2019 (mapa). IUCN.



- Rodríguez-Marcelino, M.R. (2023) *Descripción morfológica del sistema nervioso de *Alopias superciliosus* (Lowe,1841) (Chondrichthyes)*. Tesis de Licenciatura. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Seamone, S. G., & Syme, D. A. (2015). Elasmobranch muscle structure and mechanical properties. En: *Fish physiology*. Shadwick R.E., Farrel A.P. & Brauner C.J (Eds) London:Academic Press. (189-218).
- Shaun P. C. (2018) Scene through the eyes of an apex predator: a comparative analysis of the shark visual system. *Clinical and Experimental Optometry*, (101) 5, 624-640.
- Smith, K. (2005). *Eye Movements and the Visual Field in Elasmobranchs*. Tesis BSc (Hons). Queensland: The University of Queensland.
- Yopak, K. E., Lisney, T. J., Collin, S. P., & Montgomery, J. C. (2007). Variation in brain organization and cerebellar foliation in chondrichthyans: sharks and holocephalans. *Brain, behavior and evolution*, 69 (4), 280-300.
- Yopak, K. E., & Montgomery, J. C. (2008). Brain organization and specialization in deep-sea chondrichthyans. *Brain Behavior and Evolution*, 71(4), 287-304.
- Yopak, K. E., & Frank, L. R. (2009). Brain size and brain organization of the whale shark, *Rhincodon typus*, using magnetic resonance imaging. *Brain, Behavior and Evolution*, 74 (2), 121-142.
- Yopak, K. E., Lisney, T. J., Darlington, R. B., Collin, S. P., Montgomery, J. C., & Finlay, B. L. (2010). A conserved pattern of brain scaling from sharks to primates. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107 (29), 12946-12951.
- Yopak, K. E. (2012). Neuroecology of cartilaginous fishes: the functional implications of brain scaling. *Journal of Fish Biology*, 80 (5), 1968-2023.



- Yopak, K. E., & Lisney, T. J. (2012). Allometric scaling of the optic tectum in cartilaginous fishes. *Brain, behavior and evolution*, 80 (2), 108-126.
- Yopak, K. E., Lisney, T. J., & Collin, S. P. (2015). Not all sharks are “swimming noses”: variation in olfactory bulb size in cartilaginous fishes. *Brain Structure and Function*, 220, 1127-1143.
- Yopak, K. E., Galinsky, V. L., Berquist, R. M., & Frank, L. R. (2016). Quantitative classification of cerebellar foliation in cartilaginous fishes (Class: Chondrichthyes) using three-dimensional shape analysis and its implications for evolutionary biology. *Brain, behavior and evolution*, 87(4), 252-264.
- Yopak, K. E., McMeans, B. C., Mull, C. G., Feindel, K. W., Kovacs, K. M., Lydersen, C. & Collin, S. P. (2019). Comparative brain morphology of the Greenland and Pacific sleeper sharks and its functional implications. *Scientific Reports*, 9(1), 10022.