



FACULTAD DE CIENCIAS
EXACTAS Y NATURALES
Y AGRIMENSURA



Universidad Nacional del Nordeste

TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN

Licenciatura en Ciencias Biológicas

Técnicas de predicción de edad y crecimiento a partir de la morfometría y el peso del otolito de *Prochilodus lineatus* (Valenciennes 1837)

Autora: Kratochvil, Valeria Liset

Director: Dr. Sánchez, Sebastián (FCV-UNNE)

Codirectora: Dra. Silva, Natalia (FACENA-UNNE)

Lugar de trabajo: Instituto de Ictiología del Nordeste (FCV- UNNE)

Año 2023

INDICE

1	DENOMINACIÓN	3
2	RESUMEN	3
3	INTRODUCCIÓN	4
3.1	Origen, fundamentos de la investigación y antecedentes del tema	4
4	OBJETIVO GENERAL.....	5
4.1	Objetivos particulares.....	5
4.2	Hipótesis de trabajo.....	5
5	MATERIALES Y MÉTODOS	6
5.1	Clasificación y características de la especie en estudio.....	6
5.1.1	Clasificación taxonómica de la especie	6
5.1.2	Características de la especie en estudio	6
5.2	Sitios de muestreo.....	6
5.2.1	Descripción de los sitios de muestreo	7
5.3	Obtención de las muestras de peces.....	7
5.4	Biometría del otolito y determinación de edad	7
5.5	Análisis de datos	8
6	RESULTADOS.....	8
6.1	Morfología y morfometría de los otolitos	8
6.2	Otolitos como predictores de la edad de los peces.....	9
7	DISCUSIÓN	10
8	CONCLUSIONES.....	11
9	AGRADECIMIENTOS	12
10	BIBLIOGRAFÍA	13

1 DENOMINACIÓN

“Técnicas de predicción de edad y crecimiento a partir de la morfometría y el peso del otolito de *Prochilodus lineatus* (Valenciennes 1837).”

2 RESUMEN

El sábalo *Prochilodus lineatus* (Valenciennes 1837) es una importante especie comercial distribuida abundantemente en Sudamérica. Esta especie migra más de 1400 km para alimentarse y desovar entre los ríos Paraná y Uruguay, y el Estuario del Río de La Plata y es el principal recurso pesquero de la cuenca del Plata. En este trabajo se propusieron técnicas predictivas como alternativa para minimizar las dificultades a la hora de obtener la edad de los peces mediante el procesamiento de otolitos y lectura de los anillos de crecimiento. Se eligió esta especie para analizar si existe una relación positiva y significativa entre la morfometría y el peso del otolito *lapillus* con la edad y crecimiento del pez. Las muestras se obtuvieron en las campañas de pesca científica en el Alto Paraná, financiadas por el proyecto “Monitoreo y Evaluación de los recursos pesqueros aguas abajo de la presa”, convenio EBY-UNNE, Acta 30 2021-2022. Se capturaron, en total, 84 ejemplares de sábalo en muestreos mensuales realizados desde junio a octubre del año 2021 en dos puntos de muestreos de un sector del Alto Paraná, aguas abajo de la represa Yacyretá: Estación Ituzaingó (S 27° 35' O 56° 43') e Itá Ibaté (S 27° 25' O 57° 20'). Para las capturas de peces del canal principal se utilizó una batería de redes monofilamento (2,4 a 20 cm de abertura de malla entre nudo y nudo intercalado) colocadas en ciclos de 48 horas y las recorridas para la recolección de las capturas se realizaron en intervalos de 6 a 8 horas. Los peces recolectados en cada sitio y fecha de muestreo fueron clasificados por red de origen y se registraron, entre otras, las siguientes variables: peso total y longitud estándar. La biometría del total de los peces fue de 1,256 Kg en promedio y una media de 366 mm en longitud estándar. La mayoría de los peces capturados tenían 5 años de edad. Se encontró una correlación positiva entre la longitud y el peso del otolito *lapillus* ($r=0,76$), lo cual indicaría que el crecimiento en la longitud de los otolitos está directamente asociado con el aumento de su peso. Los análisis de regresión utilizando el largo y el peso de los otolitos como predictores de la longitud estándar y peso del pez indicaron que el largo del otolito tiene un mejor ajuste para predecir la longitud estándar y también el peso del pez, en comparación con el peso del otolito. Los análisis de regresión donde se consideraron el peso y la morfometría del otolito (largo, ancho y grosor) como predictores de la edad demostraron que el peso es mejor predictor de edad de los peces que las medidas morfométricas de los otolitos. Sin embargo, entre las medidas morfométricas analizadas se pudo observar que el grosor del otolito predice mejor la edad que el largo y el ancho. Con el objetivo de estimar los parámetros de crecimiento del sábalo, se aplicó el modelo de von Bertalanffy y se observó que para longitud estándar y peso no hubo diferencia entre edades, pero si se detectaron diferencias entre las edades más tempranas y las más viejas, debido a que el otolito se encuentra en constante crecimiento. Las técnicas predictivas de edad realizadas en este estudio no reemplazan a las técnicas tradicionales utilizadas para inferir edades debido a que no son tan precisas, todavía falta profundizar esta temática en futuros trabajos, pero son una buena alternativa para complementar y potenciar estudios donde sea necesario conocer la edad de los peces.

3 INTRODUCCIÓN

3.1 Origen, fundamentos de la investigación y antecedentes del tema

La interpretación de la edad y el crecimiento de estructuras rígidas se llama *oseocronometría* o *esclerocronología*. La esclerocronología es el estudio de las variaciones físicas y químicas en la formación de estructuras rígidas de organismos en el contexto de su formación (IFAS 2007). Aplicada a los peces, los otolitos, las escamas, las espinas, las vértebras y algunos huesos han sido las estructuras más ampliamente utilizadas, ya sea enteras, cortadas o parte de ellas (Meunier y Panfili 2002).

Históricamente, los otolitos se han utilizado principalmente para estudios de edad y crecimiento, con un enfoque en insumos para evaluaciones de poblaciones (Chris-Francis y Campana 2004) y para producir información básica sobre parámetros de crecimiento de poblaciones de peces. Sin embargo, debido a sus propiedades químicas y morfológicas, los otolitos se han utilizado más recientemente para separar poblaciones de la misma especie e incluso identificación de especies (Campana *et al.* 1999; Radhakrishnan *et al.* 2012; Škeljo y Ferri 2012). Las características taxonómicas de los otolitos se han explorado principalmente para el medio marino, y varias guías de especies describen en detalle su morfología (Tuset *et al.* 2008).

El estudio de los otolitos de peces aparece como una herramienta fundamental para conocer la historia de vida de las especies blanco de las pesquerías. La biometría de otolitos se usa para cuantificar la variabilidad y similitud de los mismos, y permite la descripción, estandarización e integración de datos morfológicos con otros de carácter fisiológico, molecular y ecológico. Este campo de la ciencia es muy utilizado en la determinación de la edad de peces teleósteos (Cardinale *et al.* 2004). Los primeros trabajos biométricos en otolitos se basaron en medidas lineales que se llevan a cabo sobre una proyección ortogonal del otolito sin tener en cuenta la curvatura, la cual puede ser muy pronunciada en algunos grupos de Teleósteos, y a partir de dicha proyección ortogonal se determinan los dos ejes mayores: la longitud máxima y ancho máximo perpendicular (Lombarte y Tuset 2015). En especies con otolitos muy gruesos, como los pertenecientes a las especies de corvinas (Sciaenidae) se suele medir adicionalmente el grosor o espesor máximo. También se ha descubierto el peso de los otolitos como una buena variable para determinar la edad (Cardinale *et al.* 2004).

Los otolitos de los peces teleósteos son complejos cuerpos policristalinos compuestos principalmente por carbonato de calcio precipitado en forma de aragonito y pequeñas cantidades de otros minerales inmersos dentro de una matriz orgánica (Campana 1999) y están alojados en el aparato vestibular. El aparato vestibular es un órgano de equilibrio y está suspendido en la cápsula ótica y contiene los canales semicirculares y tres ampollas denominadas sáculo, lagena y utrículo. Dentro de cada ampolla se encuentra un otolito *sagitta*, *asteriscus* y *lapillus*, respectivamente. Los tres pares de otolitos están relacionados con funciones de equilibrio y audición (Popper y Fay 1993). Estas estructuras poseen una morfología específica para cada especie (Tombari *et al.* 2000; Volpedo y Echeverría 2000; Tuset *et al.* 2008) y son conservativas ya que el material que los compone no se reabsorbe ni altera (Casselmann 1987). Sin embargo, el uso de caracteres anatómicos no matemáticos, no solo requieren de un alto grado de experiencia por parte del científico, si no que presentan un alto nivel de ambigüedad. Para evitar la subjetividad de los caracteres anatómicos, se empezaron a identificar especies cercanas a partir de medidas biométricas de otolitos en los 1980 (Bori 1986).

En los peces dulceacuícolas, especialmente en los descendientes del linaje Ostariophysi, el otolito *sagitta* es reducido y no se usa para estudios de edad y crecimiento, mientras que los pares de otolitos *asteriscus* y *lapillus* están más desarrollados y tienen características distintivas para cada especie (Lombarte y Tuset 2015). En este sentido, la caracterización morfológica del otolito puede ser crítica en estudios de redes tróficas, ayudando en la identificación de presas a través de los otolitos encontrados en el contenido del estómago, y permitiendo la reconstrucción de composiciones faunísticas pasadas (Reichenbacher *et al.* 2007).

El principal método para realizar inferencias de edad a través de otolito es mediante la lectura de los anillos de crecimiento que se producen periódicamente. Esto se puede hacer de varias formas, por ejemplo, cortando el otolito en diferentes planos o realizando lecturas en todo el otolito (Secor *et al.* 1991). Este método implica definir lo que es un anillo de crecimiento. Varios autores conceptualizan de forma diferente lo que es un anillo de crecimiento y, por esta razón, es esencial esclarecer en cada estudio lo que se considera como anillo. El anillo representa el ciclo que se está evaluando. Comúnmente se considera el conjunto de una zona opaca y otra translúcida, como un anillo (Morales-Nin 1992). Sin embargo, las estimaciones de edad suelen ser difíciles de obtener utilizando estas estructuras, debido al alto costo del equipo y las habilidades necesarias para procesar el otolito y realizar lecturas precisas y exactas (Ilkyaz *et al.* 2011).

Una alternativa para minimizar estas dificultades es obtener la edad utilizando únicamente la morfometría y el peso del otolito, de modo que no sea necesario procesarlo. Para obtener la edad de manera confiable, debe existir una fuerte correlación entre el crecimiento de los peces y el crecimiento del otolito y, además, un conjunto de otolitos de peces debe ser procesados para conteos anulares (Santana *et al.* 2018). Los otolitos, a diferencia de otros huesos, solo tienen procesos de acumulación; esto tiende a resultar en una relación positiva entre el crecimiento del otolito y el crecimiento de los peces (Battaglia *et al.* 2010; Humston *et al.* 2015). Por lo tanto, los modelos predictivos que utilizan el peso o cualquier otra medida del otolito podrían proporcionar métodos más baratos para estimar la edad, ya que no requieren habilidades de lectura especializadas ni un procesamiento costoso del otolito (Chris-Francis *et al.* 2005).

La cuenca del Río Paraná cuenta con 600 especies de peces aproximadamente. Muchas de estas especies son migradoras de largas distancias y son la base de las pesquerías regionales que caracterizan a la Cuenca del Plata (Bonetto *et al.* 1981). Entre los principales recursos pesqueros de la cuenca del Paraná se encuentra el sábalo, *Prochilodus lineatus* (Valenciennes 1836), cuyos volúmenes de captura superaron las 36.000 tn año⁻¹ solo en la porción media del Paraná (Sverlij *et al.* 1993; MINAGRO 2016). Se trata de una importante especie comercial distribuida abundantemente en Sudamérica, pertenece a la familia Prochilodontidae, la cual se caracteriza principalmente por su comportamiento migratorio (Agostinho *et al.* 2000). A pesar de la relevancia pesquera de esta especie, muchos aspectos ecológicos no se comprenden completamente debido al comportamiento migratorio activo y la influencia de factores ambientales.

Una forma de proporcionar soluciones para resolver estos problemas es comprender mejor los aspectos de la población de esta especie para generar información precisa y confiable, y fomentar evaluaciones más complejas de las poblaciones de peces. Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue estimar la relación entre las variables biométricas longitud y peso del otolito y luego relacionar esas medidas con la talla corporal de *Prochilodus lineatus*. Se eligió para trabajar el otolito *lapillus* debido a que es de mayor tamaño y facilidad de extracción en especies pertenecientes al orden Characiformes (Volpedo y Fuchs 2010; Carvalho *et al.* 2015; Sánchez y Martínez 2017).

El tema propuesto para este TFG se desarrolló en el marco del proyecto “Monitoreo y Evaluación de los recursos pesqueros aguas abajo de la presa”, convenio EBY-UNNE, Acta 30 2021-2022, el cual provee el financiamiento para las campañas de pesca experimental en el Alto Paraná.

4 OBJETIVO GENERAL

- Estimar la relación entre variables biométricas del otolito *lapillus* con la edad y crecimiento de *Prochilodus lineatus*.

4.1 Objetivos particulares

- Analizar la relación entre longitud y peso del otolito *lapillus* de *Prochilodus lineatus*.
- Estimar la relación de la morfometría del otolito *lapillus* con la talla de sábalo.
- Analizar la relación entre longitud y peso del otolito con el número de anillos del otolito *lapillus* como posible estimador de la edad y crecimiento en sábalo.

4.2 Hipótesis de trabajo

H1: Existe una correlación positiva, alta y estadísticamente significativa entre la longitud y el peso del otolito *lapillus* de *Prochilodus lineatus*.

H2: Existe una correlación positiva, alta y estadísticamente significativa entre la longitud y el peso del otolito *lapillus* y la talla del pez que puede usarse como estimador de la edad.

H3: Existe una correlación positiva, alta y estadísticamente significativa entre la longitud y el peso del otolito *lapillus* y la edad del pez.

5 MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 Clasificación y características de la especie en estudio

5.1.1 Clasificación taxonómica de la especie

Reino: Animalia
 Filo: Chordata
 Subfilo: Vertebrata
 Superclase: Gnathostomata
 Clase: Actinopterygii
 Subclase: Neopterygii
 Infraclase: Teleostei
 Superorden: Ostariophysii
 Orden: Characiformes
 Familia: Prochilodontidae
 Género: Prochilodus
 Especie: *Prochilodus lineatus* (Valenciennes, 1836)
 Nombre vulgar: sábalo



5.1.2 Características de la especie en estudio

Los ríos de la cuenca del Plata, como todos los grandes ríos de América del Sur, presentan una gran diversidad de peces, siendo *Prochilodus lineatus* la especie con mayor biomasa en toda la Cuenca (Agostinho *et al.* 2004, Espinach *et al.* 2007, Suzuki *et al.* 2009, Sánchez *et al.* 2011). El sábalo se encuentra ampliamente distribuido a través de la cuenca del Río de La Plata en Bolivia, Brasil, Paraguay, Uruguay y Argentina. También, se encuentra en el sistema endorreico de la cuenca del río Salí y la laguna Mar Chiquita en la provincia de Córdoba de la Argentina (Baigún *et al.* 2019). Hacia el sur, se extiende hasta la boca del Río de La Plata y el río Salado (Sverlij *et al.* 1993, Castro y Vari 2004). Es una especie sin dimorfismo sexual (Sverlij *et al.* 1993), con una edad de primera maduración antes de los dos años de vida (Simões 2010). La abundancia de la especie, podría deberse a su hábito alimentario detritívoro y su exitosa estrategia reproductiva, estrechamente adaptada al régimen natural de pulsos de inundación del sistema (Sverlij *et al.* 1993, Agostinho *et al.* 1993a, Fuentes 1998, Espinach Ros *et al.* 2007, Lozano *et al.* 2019). Su ciclo de vida de tipo periódico, maximiza el éxito reproductivo en situaciones de fluctuaciones ambientales cíclicas en gran escala y magnitud variable, como los ciclos de inundación y estiaje en el Paraná (Winemiller 1992, 2005). Se la considera migradora de larga distancia (Agostinho *et al.* 2003, Agostinho *et al.* 2004). Hay estudios sobre las migraciones de esta especie en los tramos Superior, Alto y Medio del río Paraná (Godoy 1975, Bonetto *et al.* 1981) que cobran relevancia al explicar la coexistencia de las migraciones, ascendentes de larga distancia hacia áreas de reproducción, llamadas migraciones reproductivas y las descendentes, hacia áreas de alimentación en donde los peces encuentran alimentos y mejores condiciones ambientales para el crecimiento conocidas como migraciones tróficas (Godoy 1975, Bonetto *et al.* 1981). Las migraciones reproductivas se dan en primavera/verano, ocurriendo el desove a medida que ocurre el incremento del nivel hidrométrico (Stassen *et al.* 2010). Los huevos pelágicos son arrastrados por la corriente aguas abajo, y luego de casi 12-18 hs las larvas eclosionan e ingresan al valle de inundación gracias a la conectividad producto de aguas altas, donde consiguen alimento y refugio (Sverlij *et al.* 1993, Agostinho *et al.* 1993a, Fuentes 1998).

5.2 Sitios de muestreo

El área de trabajo comprendió un sector del Alto Río Paraná, aguas debajo de la represa Yacyretá. Este incluye los siguientes sitios de muestreo (Fig.1):

- Estación Ituzaingó (1 km): S 27° 35' O 56° 43'
- Estación Itá Ibaté (90 km): S 27° 25' O 57° 20'

5.2.1 Descripción de los sitios de muestreo

La estación Ituzaingó corresponde a un tramo del río caracterizado por poseer un cauce ramificado, con numerosas islas, afloramientos de roca basáltica, escasa profundidad y fuerte corriente. La vegetación natural del área corresponde a la selva marginal o ribereña (Carnevali 1994), con parches remanentes de dicha formación vegetal en cercanías del área de muestreo. Sobre los lados del terraplén se ha ido desarrollando una vegetación arbórea espaciada que coloniza las áreas libres de roca basáltica. Las zonas más bajas están colonizadas por sarandí, yuquerí, carrizales en manchones aislados y otras gramíneas acuáticas. Las áreas rocosas pueden estar cubiertas por Podostemonáceas, plantas sumergidas que habitan zonas de corriente rápida (Barrios 2021).

La estación en Itá Ibaté es un tramo simple del río, destacándose algunas barras de cauce y zonas de rápidos con fondos rocosos de arenisca y conglomerado pertenecientes a la formación Ituzaingó. La vegetación acuática está dominada por carrizales y cortaderas, la selva de ribera se extiende en una banda de aproximadamente 200-300 m (Carnevali 1994), la cual queda cubierta por agua en periodos de aguas altas.

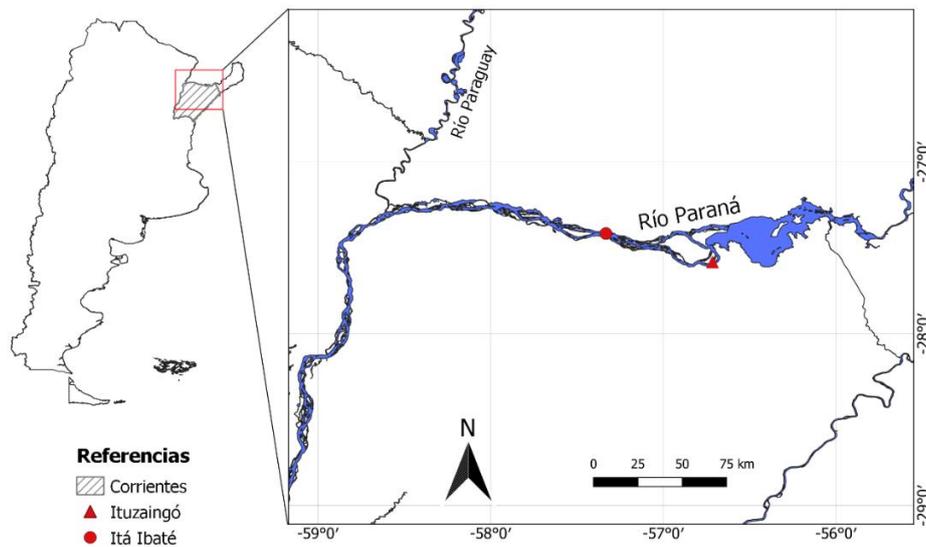


Fig. 1: Mapa de los sitios de muestreo

5.3 Obtención de las muestras de peces

Los muestreos en el canal principal del río se realizaron con frecuencia mensual. Para las capturas de peces del canal principal se utilizó una batería de redes monofilamento (2,4 a 20 cm de abertura de malla entre nudo y nudo intercalado) colocadas en ciclos de 48 horas y las recorridas para la recolección de las capturas se realizaron a intervalos de 6 a 8 horas. Los peces recolectados en cada sitio y fecha de muestreo fueron clasificados por red de origen y se registraron, entre otras, las siguientes variables: peso total y longitud estándar.

5.4 Biometría del otolito y determinación de edad

Para extraer los otolitos se realizó una disección del hueso craneal del pez. De esta forma se accedió a las cámaras óticas a través de la bóveda de cavidad bucal o mediante un corte en la parte posterior del cráneo. Los otolitos izquierdo y derecho fueron removidos con unas pinzas finas para evitar su destrucción y fueron preservados en seco en sobres de papel.

El otolito derecho de cada pez fue medido con calibre digital obteniéndose la longitud, el ancho y el grosor. El peso se obtuvo con el otolito completamente limpio y seco mediante una balanza analítica, con una precisión de microgramos.

Luego, el otolito izquierdo de cada pez fue lijado en sección transversal a través del núcleo usando un minitorno con un disco abrasivo marca Shofu. La superficie pulida fue quemada en una llama de alcohol para producir patrones de bandas diferentes. El quemado parcial permitió distinguir con claridad un patrón temporal que alterna bandas traslúcidas (crecimiento de invierno de marzo a agosto) y bandas opacas (septiembre a febrero) (Fig.2b). El otolito fue montado en plastilina y leído utilizando un microscopio estereoscópico (40X) siguiendo el procedimiento de Espinach Ros *et al.* (2008).

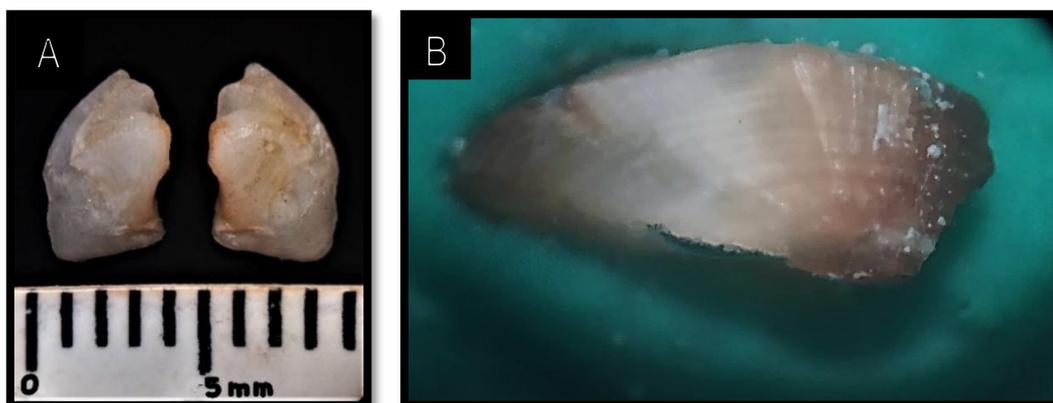


Fig. 2: A-Otolitos izquierdo y derecho de *Prochilodus lineatus*. B-Otolito izquierdo cortado, lijado y quemado visto en microscopio estereoscópico (40X) donde se pueden ver las bandas concéntricas claras y oscuras.

5.5 Análisis de datos

Se realizaron correlaciones de Pearson para comprobar el grado de asociación entre la longitud del otolito con el peso del otolito.

Las relaciones entre las mediciones de otolitos y, por tanto, la longitud como el peso de los peces se verificaron mediante regresiones lineales. En todos los análisis, las mediciones de otolitos se consideraron predictores de la longitud o el peso de los peces.

El modelo más ampliamente utilizado para asociar la longitud del cuerpo con la edad es el de von Bertalanffy (von Bertalanffy 1938). Este modelo es un caso especial de curva exponencial y considera la edad como la variable independiente (x) y la longitud del cuerpo en una edad como la variable dependiente (y). Con el objetivo de estimar los parámetros de crecimiento, se aplicó esta función utilizando las dataciones de edad y las longitudes estándares de cada ejemplar que presentó líneas de crecimiento reales en los otolitos.

Finalmente, se hizo un análisis de Kruskal-Wallis para verificar si las medidas obtenidas a través de los otolitos pueden ser utilizadas para distinguir la edad de los peces, pero no fue considerado en el estudio ya que, para varias de las edades evaluadas el tamaño de la muestra fue muy pequeño, lo que podría distorsionar los resultados finales.

Se utilizó el software estadístico Infostat (Di Rienzo *et al.* 2020) para todos los análisis estadísticos.

Los datos empleados para realizar el trabajo fueron los obtenidos a partir de los muestreos mensuales realizados por el INICNE, así como resultados obtenidos para ejemplares de sábalo en estudios previos realizados por el INICNE en los ríos Paraná y Uruguay. Adicionalmente, se realizó una exhaustiva búsqueda bibliográfica actualizada en la Biblioteca Electrónica de Ciencia y Tecnología del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva.

6 RESULTADOS

Se capturaron en total 84 ejemplares de sábalo en muestreos mensuales realizados desde junio a octubre del año 2021 en dos puntos de muestreos de un sector del Alto Río Paraná, aguas debajo de la represa Yacyretá. La biometría del total de los peces fue de 1,256 Kg en promedio y una media de 366 mm en longitud estándar. La mayoría de los peces capturados tienen 5 años de edad.

6.1 Morfología y morfometría de los otolitos

El otolito *lapillus* es un otolito pequeño (Fig. 2a). Su longitud varió de 3,7 a 7,1 mm (media = 5,05), el ancho de 2,4 a 4,9 mm (media = 3,3), el grosor de 1 a 1,9 mm (media=1,3) y el peso de 14,9 a 66,1 mg (media = 33,7). Se encontró una correlación positiva entre la longitud y el peso del otolito ($r = 0,76$), lo que indica que el crecimiento en la longitud de los otolitos está directamente asociado con el aumento de su peso. La falta de correlación indicaría que el otolito crece en una dimensión, pero no en la otra.

6.2 Otolitos como predictores de la edad de los peces

El análisis de regresión utilizando las medidas de largo y peso de los otolitos como predictores de la longitud estándar del pez indicó que existe una relación positiva entre el largo y el peso del otolito y la longitud estándar del pez. Se observó que el largo del otolito tiene un mejor ajuste para predecir la longitud del pez ($R^2 = 0,69$) que el peso del otolito ($R^2 = 0,61$) (Gráfico 1).

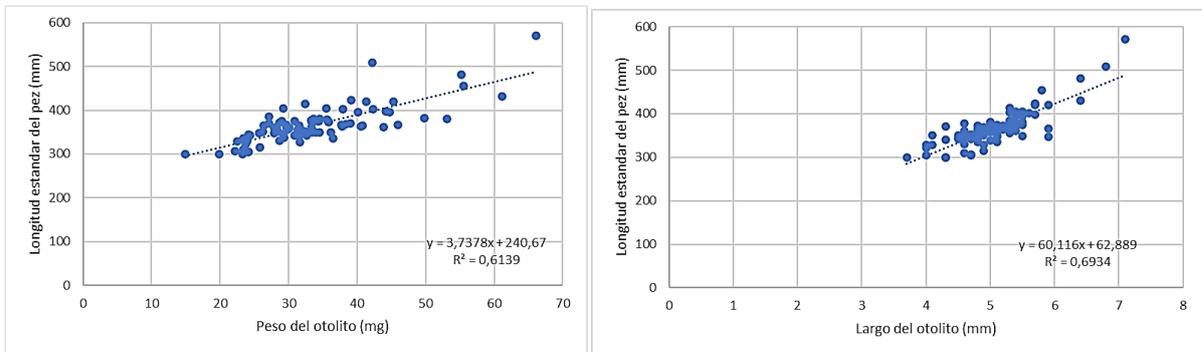


Gráfico 1: Relación entre el peso y el largo de los otolitos con la longitud estándar del pez.

También se analizó el largo y el peso del otolito como predictores del peso total de los peces y se observó que el largo del otolito ($R^2=0,61$) predice mejor el peso del pez que el peso del otolito ($R^2=0,41$) (Gráfico 2).

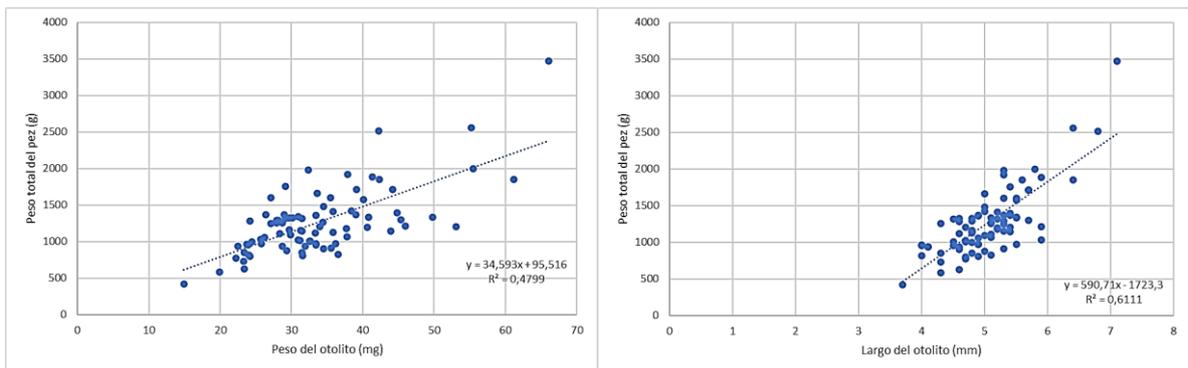
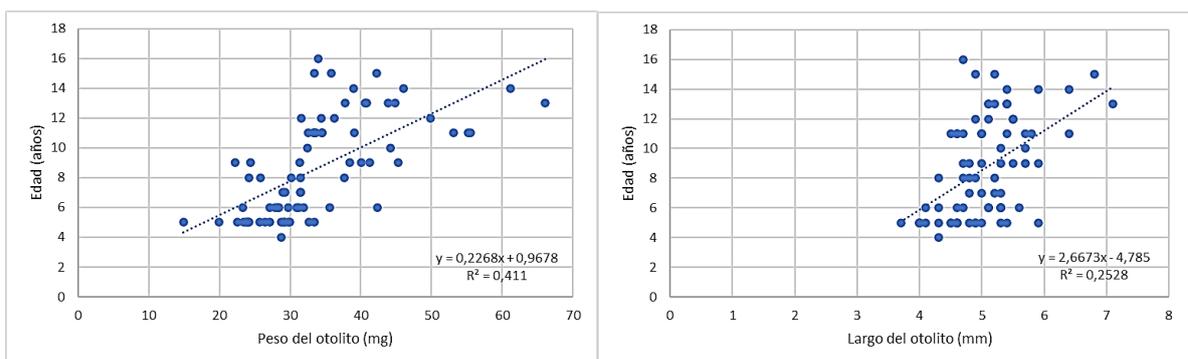


Gráfico 2: Relación entre el peso y el largo de los otolitos con el peso total del pez.

Los análisis de regresión donde se consideraron el peso y la morfometría del otolito (largo, ancho y grosor) como predictores de la edad obtenida a partir del conteo de anillos de los otolitos procesados con la metodología de Espinach Ros *et al.* (2008), demostraron que el peso ($R^2=0,41$) es mejor predictor de edad de los peces que las medidas morfométricas de los otolitos. Sin embargo, entre las medidas morfométricas se pudo observar que el grosor del otolito ($R^2=0,35$) predice mejor la edad que el largo ($R^2=0,25$) y el ancho ($R^2=0,27$) (Gráfico 3).



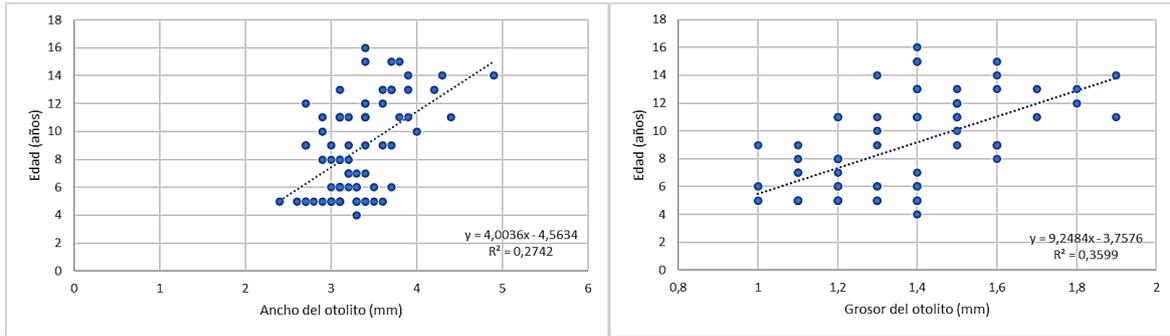


Gráfico 3: Relación entre el peso y medidas morfométricas del otolito con la edad del pez.

Con el objetivo de estimar los parámetros de crecimiento del sábalo, se aplicó el modelo de von Bertalanffy utilizando las dataciones de edad estimadas mediante las líneas de crecimiento, así como las estimaciones de edad realizadas a partir del peso, longitud y grosor de los otolitos y también, utilizando las dataciones de edad y las longitudes estándares de cada ejemplar.

Se observó que para longitud estándar y peso no hubo diferencia entre edades, esto se explica porque se trabajó con peces de edades grandes, que ya se encuentran próximos a alcanzar su peso máximo (Gráfico 4). Sin embargo, se manifiestan diferencias entre las edades más tempranas y las más viejas, debido a que el otolito se encuentra en constante crecimiento.

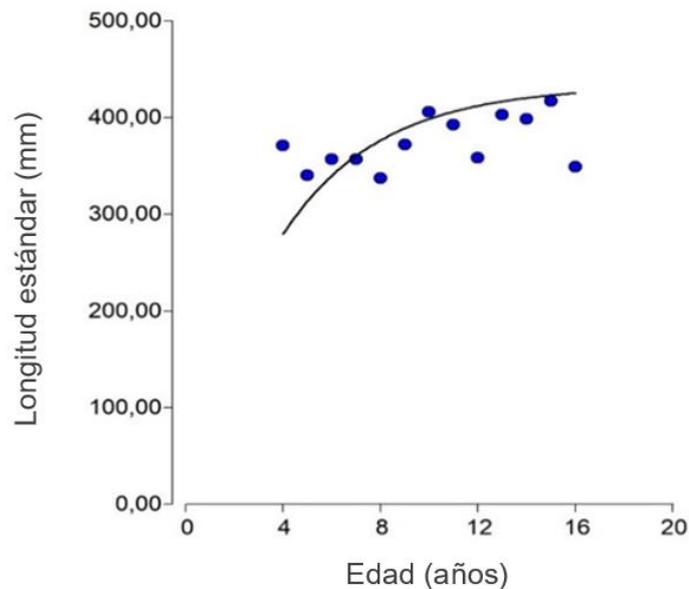


Gráfico 4: Curva de crecimiento del modelo de von Bertalanffy para *Prochilodus lineatus*, estimada con la longitud estándar (mm) y la edad (años).

7 DISCUSIÓN

En este trabajo se corroboró que el largo y el peso del otolito son buenos indicadores para predecir la longitud estándar y el peso del pez, hecho que fue demostrado por Megalofonou (2006), siendo el largo del otolito mejor predictor de la longitud estándar del pez que el peso del otolito y contradiciendo a lo reportado por Santana *et al.* (2018), donde los autores afirman que el peso del otolito es mejor para predecir la longitud del pez. Este resultado es relevante para estudios de redes tróficas, ya que la resistencia del aragonito de los otolitos a la degradación permite que se conserven muy bien en el contenido estomacal y a partir de esta información sabemos que es posible predecir el tamaño de la presa que fue devorada por el depredador con un grado de confiabilidad aceptable; y en estudios

paleontológicos, ya que, el tamaño de los otolitos proporciona evidencia de la diversidad y la talla de los peces extintos (Reichenbacher *et al.* 2007).

Actualmente, en Argentina se han incrementado los trabajos utilizando morfometría y microquímica de otolitos en estudios de peces de agua dulce (Avigliano *et al.* 2017, 2018, 2020). Se publicó un atlas de otolitos de peces de Argentina y un libro sobre métodos de estudio con otolitos con información relevante sobre esta temática (Volpedo *et al.* 2017; Volpedo y Vaz-dos-santos 2015). Sin embargo, los estudios de edad y crecimiento de peces de agua dulce utilizando otolitos aún están en proceso de consolidación y lejos de la etapa de estudios similares para especies marinas.

Los estudios morfométricos de otolitos se han utilizado a menudo para hacer predicciones sobre la longitud, la edad y el peso de los peces (Chris-Francis y Campana 2004; Ilkyaz *et al.* 2011; Santana *et al.* 2018). Este campo de la ciencia puede proporcionar mucha información, especialmente sobre stock pesqueros y la ecología de *Prochilodus lineatus*, especie considerada como un importante recurso pesquero en la cuenca del Río Paraná.

Assis (2005), en su debate sobre la morfología del otolito *lapillus*, señala que hay dos tipos principales de otolitos: los de peces clupeiformes y los de peces no clupeiformes. El otolito de *lapillus* de *P. lineatus* pertenece al segundo grupo. Este otolito tiene una forma regular y generalmente muy similar a los otolitos *lapillus* de otras especies (Volpedo *et al.* 2017), lo que complica su uso en estudios taxonómicos. Es un otolito muy resistente, de fácil manipulación y extracción.

Los estudios de edad y crecimiento con otolitos son la aplicación más tradicional de estas estructuras y esto se debe a que presentan una deposición periódica de carbonato de calcio lo que forma anillos cuantificables y como a su vez, estos están asociados a la talla del pez, se puede determinar la edad (La Mesa *et al.* 2010). Las estimaciones de edad son fundamentales para los estudios de dinámicas de población y crecimiento (Campana y Thorrold 2001). Se comprobó en este estudio que el peso de los otolitos es mejor predictor de la edad de los peces que las medidas morfométricas (largo, ancho y grosor) de los otolitos analizados. Sin embargo, el uso de la morfometría de otolitos para hacer predicciones de edad debe investigarse más en profundidad, ya que el descubrimiento de nuevas técnicas predictivas puede reducir altamente los costos y el tiempo necesarios para producir buena información en los trabajos donde sea necesario conocer las edades reales de los individuos. Por ejemplo, las evaluaciones de stock podrían utilizar esta información para mejorar su eficacia.

8 CONCLUSIONES

El uso de la morfometría y el peso del otolito como predictores de edad se puede considerar como una alternativa a las técnicas tradicionales que involucran el procesamiento de otolitos con el procedimiento de Espinach Ros *et al.* (2008). Las técnicas predictivas de edad realizadas en este estudio no reemplazan a las técnicas tradicionales bien estudiadas debido a que no son tan precisas. Sin embargo, resulta relevante profundizar en esta temática en futuros trabajos, ya que podrían convertirse en una buena alternativa para complementar y potenciar otros estudios donde sea necesario conocer la edad de los peces.

Como propuesta para trabajos futuros, los estudios deberían enfocarse en continuar analizando las relaciones entre las variables obtenidas a partir de los otolitos con las correspondientes a los peces, generando bases de datos de información morfológica, morfométrica y microquímica, ya que estas estructuras constituyen una herramienta fundamental para trabajos de edad y crecimiento, identificación de especies, aspectos ecológicos y biológicos, ecología trófica de ictiófagos, paleontológicos, zoogeográficos y arqueológicas. Se deberían replicar trabajos hechos con especies marinas con el objetivo de proporcionar más información sobre las especies de agua dulce.

Los resultados presentados en este trabajo son fundamentales como aporte a los estudios de edad y crecimiento de *Prochilodus lineatus* en Argentina, principalmente porque es una especie con gran interés comercial en el país.

9 AGRADECIMIENTOS

A mis padres, Amelia y Eduardo, ya que son el motor que me impulsa a perseguir mis metas. Quiero dedicarles este trabajo, ya que siempre han estado a mi lado, creyendo en mí y brindándome su apoyo incondicional. También un agradecimiento especial a mis hermanas, Karen y Andrea, y a mi hermano, Fabricio.

A mis amigos de la facultad, mi "team", porque el camino no fue fácil, pero tenerlos ahí lo hizo mucho más llevadero. Hoy cierro un capítulo de mi vida, pero me los llevo a cada uno, con muchos recuerdos y risas, en mi corazón.

A mi director, el Dr. Sebastián Sánchez, por la paciencia infinita y el acompañamiento durante todo el transcurso de la tesina aportando importantes sugerencias, comentarios y sacándome de todas mis dudas, mejorando así mi formación académica y personal.

A mi co-directora, la Dra. Natalia Silva y compañeros del Instituto de Ictiología que fueron parte de la recolección de muestras utilizadas en este trabajo y me brindaron su ayuda en todo momento cuando lo necesité.

10 BIBLIOGRAFÍA

- Agostinho, A.A., L.C. Gomes, H. Suzuki y H. Júlio (2003). Migratory fish from the upper Paraná River basin, Brazil. In: Carolsfeld J, Harvey B, Ross C, Baer A, Ross C (eds.) Migratory Fishes of South America: Biology, Social Importance and Conservation Status. World Fisheries Trust, the World Bank and the International Development Research Centre, Victoria, pp. 19-99.
- Agostinho, A.A., L.C. Gomes, S. Veríssimo y E.K. Okada (2004). Flood regime, dam regulation and fish in the Upper Paraná River: effects on assemblage attributes, reproduction and recruitment. *Rev Fish Biol Fisher* 14: 11–19.
- Agostinho, A.A., S.M. Thomaz, C.V. Minte-Vera y K.O. Winemiller (2000) Biodiversity in the high Paraná River floodplain. In: Gopal B, Junk WJ, Davis JA, editors. Biodiversity in wetlands: assessment, function and conservation. Leiden, Backhuys Publishers; p.89-118.
- Agostinho, A.A., A.E. Vazzoler, L. Gomes y E. Okada (1993). Estratificación espacial y comportamiento de *Prochilodus scrofa* em distintas fases del ciclo de vida, en la planicie de inundación del alto río Paraná y embalse de Itaipu, Paraná, Brasil. *Rev Hydrobiol Trop*. 26 (1) 79–90.
- Almirón, A., M. Azpelicueta, J. Casciotta y A. López Cazorla. (1997). Ichthyogeographic boundary between the Brazilian and Austral subregions in South America, Argentina. *Biogeographica*, 73: 23-30.
- Arratia, G. (1997). Brazilian and Austral freshwater fish fauna of South America. A contrast. Tropical biodiversity and systematic. Proceedings of the international Symposium on Biodiversity and Systematics in Tropical Ecosystems: 179-187.
- Assis, C.A. (2005) The utricular otoliths, lapilli, of teleosts: their morphology and relevance for species identification and systematics studies. *Sci Mar*. 2005; 69(2):259-73.
- Avigliano, E., A. Domanico, S. Sánchez y A. Volpedo (2017). Oolith elemental fingerprint and scale and otolith morphometry in *Prochilodus lineatus* provide identification of natal nurseries. *Fisheries Research*, 186, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2016.07.026>
- Avigliano, E., M. Pouilly, J. Bouchez, A. Domanico, S. Sánchez, S. Llamazares Vegh, C. Clavijo, P. Scarabotti, J. Facetti, J. Caffetti, F. Rosso, C. Pecheyran, S. Bérail y A. Volpedo (2020). Strontium isotopes ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) reveal the life history of freshwater migratory fishes in the La Plata Basin. *River Research and Applications*, 36(10), 1985–2000. <https://doi.org/10.1002/rra.3727>
- Avigliano, E., M.E. Rolón, J.J. Rosso, E. Mabrugaña y A. Volpedo (2018). Using otolith morphometry for the identification of three sympatric and morphologically similar species of *Astyanax* from the Atlantic Rain Forest (Argentina). *Environmental Biology of Fishes*, 101(9), 1319–1328. <https://doi.org/10.1007/s10641-018-0779-2>
- Baigún, C.R.M., J. Sarmiento y S. Barrera (2019). Distribución y aspectos biológicos del sábalo (*Prochilodus lineatus*) en la cuenca del río Pilcomayo. In *Peces y pesquerías en las cuencas Pilcomayo y Bermejo*. Van Damme P.A., Baigún C.R.M., Sarmiento J., Carvajal-Vallejos F.M. Edit. INIA, Cochabamba, Bolivia. 516 pp.
- Barrios, C.E. (2021). Biomonitorio del impacto del represamiento del río Paraná sobre las poblaciones de sábalo (*Prochilodus lineatus*).
- Battaglia, P., D. Malara, T. Romeo y F. Andaloro (2010) Relationships between otolith size and fish size in some mesopelagic and bathypelagic species from the Mediterranean Sea (Strait of Messina, Italy). *Sci Mar*. 74(2):605-12.
- Bonetto, A. A., M. Canon Veron y D. Roldán. (1981). Nuevos aportes al conocimiento de las migraciones de peces en el río Paraná. *Ecosur*, 8(16), 29-40.
- Bori, C., (1986). Análisis morfométrico comparado del otolito (*sagitta*) de *Solea vulgaris* y *S. senegalensis* del Delta del Ebro. *Investigación Pesquera*, 50: 247-264.
- Campana, S.E. (1999). Chemistry and composition of fish otoliths: Pathways, mechanisms and applications. In *Marine Ecology Progress Series* (Vol. 188, pp. 263–297). Inter-Research. <https://doi.org/10.3354/meps188263>
- Campana, S.E. y S.R. Thorrold (2001) Otoliths, increments, and elements: keys to a comprehensive understanding of fish populations? *Can J Fish Aquat Sci*; 58(1):30-38. Chris-Francis.

- Cardinale, M., P. Doering-Arjes, M. Kastowsky y H. Mosegaard (2004). Effects of sex, stock, and environment on the shape of known-age Atlantic cod (*Gadus morhua*) otoliths. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 61: 158-167.
- Carnevali, R. (1994). Fitogeografía de la provincia de Corrientes: cartas, escalas 1: 500.000 y 1: 1.000. 000. Gobierno de la Provincia de Corrientes.
- Carvalho, B.M., A. M. Vaz-dos-Santos, H. L. Spach y A. V. Volpedo (2015). Ontogenetic development of the sagitta otolith of the anchovy, *Anchoa tricolor* (Spix and Agassiz, 1829), in a subtropical estuary. *Scientia Marina*, 79(4): 409-418.
- Casselman, J. M (1987). Growth and relative size of calcified structures of fish. *Transactions of the American Fisheries Society*, 119: 673-688.
- Castro, R.M.C. y R.P. Vari (2004). Detritivores of the South American Fish Family Prochilodontidae (Teleostei: Ostariophysi: Characiformes): A Phylogenetic and Revisionary Study. *Smithsonian contributions to zoology*. 622.189p.
- Chris-Francis, R.I.C. y S.E. Campana (2004). Inferring age from otolith measurements: a review and a new approach. *Can J Fish Aquat Sci*. 61(7):1269-84.
- Chris-Francis, R.I.C., S.J. Harley, S.E. Campana y P. Doering-Arjes (2005). Use of otolith weight in length-mediated estimation of proportions at age. *Mar Freshwater Res*. 56(5):735-43.
- Di Rienzo, J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M., Robledo C.W. InfoStat versión (2020). Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- Espinach Ros, A., y R. P. Sánchez (2007). Proyecto de evaluación del recurso sábalo en el Paraná. Informe de los resultados de la primera etapa (2005– 2006) y medidas de manejo recomendadas Secretaría de Agricultura Ganadería, Pesca y Alimentación, Serie Pesca y Acuicultura: Estudios e Investigaciones Aplicadas Nro. 1, Buenos Aires.
- Fitch, J.E. y R.L. Brownell Jr (1968). Fish otoliths in cetacean stomachs and their importance in interpreting feeding habits. *J Fish Res Board Can*. 25(12):2561-74.
- Fuentes, F. y A. Espinach Ros (1998). Distribucion espacial y temporal del ichthyoplcton en un punto del bajo delta del rio Parana. *Rev Mus Arg Cienc Nat Bernardino Rivadavia*. 8: 51-61.
- Godoy, M.P. (1975). Peixes do Brasil, Subordem Characoidei. Bacia do Río Mogí Guassu. Vol. I, II, III, IV: 847. Editora Franciscana.
- Humston, R, M. Moore, C. Wass, D. Dennis y S. Doss (2015). Correlations bet ween body length and otolith size in smallmouth bass *Microp terus dolomieu Lacépède, 1802* with implications for retrospective growth analyses. *J Appl Ichthyol*. 31(5):883-87.
- IFAS (2007). 1st International Sclerochronology Conference, 2007. Disponible en: <https://conference.ifas.ufl.edu/sclerochronology/#/index> .Acesso: Agosto 2015.
- Ilkyaz, A.T, G. Metin y H.T. Kinacıgil (2011). The use of otolith length and weight measurements in age estimations of three Gobiidae species (*Deltentosteus quadrimaculatus*, *Gobius niger*, and *Lesueurigobius friesii*). *Turk J Zool*. 35(6):819-27.
- La Mesa, M., G. Scarcella, F. Grati y G. Fabi (2010). Age and growth of the black scorpionfish, *Scorpaena porcus* (Pisces: Scorpaenidae) from artificial structures and natural reefs in the Adriatic Sea. *Sci. Mar*. 74, 677-685.
- Lombarte, A., & Tuset, V. (2015). Morfometria de otólitos. Métodos de estudo com otólitos: princípios e aplicações. Buenos Aires: CAFP-BA-PIESCI, 269-302.
- Lozano, I.E., S. Llamazares Vegh, M.I. Gómez, Y.G. Piazza, J.L. Salva y C.M. Fuentes (2019). Episodic recruitment of young *Prochilodus lineatus* (Valenciennes, 1836) (Characiformes: Prochilodontidae) during high discharge in a floodplain lake of the River Paraná, Argentina. *Fish Manage Ecol*. 26:260–268.
- Megalofonou, P. (2006) Comparison of otolith growth and morphology with somatic growth and age in young-of-the-year bluefin tuna. *J Fish Biol*. 68(6):1867-78.
- Meunier, F.J. y J. Panfili (2002). Historical. pp. 23-30. In: Panfili, J., Pontual, H., Troadec, H., Wright, P.J., Manual of fish sclerochronology. IFREMER, Brest.

- MINAGRO (2016). Subsecretaría de Pesca y Acuicultura, Argentina. Ministerio de Agroindustria. Disponible de: <http://www.minagri.gob.ar/site/pesca/index.php>.
- Morales-Nin, B. (1992). Determination of growth in bony fish from otolith microstructure. *FAO Fisheries technical Paper*, 322:1-51.
- Popper, A. N. y R.R. Fay (1993). Sound detection and processing by fish: critical review and major research questions (Part 1 of 2). *Brain, behavior and evolution*, 41(1): 14-25.
- Radhakrishnan, K.V., L. Yuxuan, K.V. Jayalakshmy, L. Ming, B.R. Murphy y X. Songguang (2012). Application of otolith shape analysis in identifying different ecotypes of *Coilia ectenes* in the Yangtze Basin, China. *Fish Res.* 125-126:156-60.
- Reichenbacher, B., U. Sienknecht, H., Küchenhoff y N. Fenske (2007) Combined otolith morphology and morphometry for assessing taxonomy and diversity in fossil and extant killifish (*Aphanius*, *Prolebias*). *J Morphol.* 2007; 268(10):898-915.
- Reis, R.E., S.O. Kullander y C. J. Ferraris, Jr. (2003). Check list of the freshwaters fishes of South and Central America. Porto Alegre: EDIPUCRS, 1-673.
- Sánchez, S., A. O. González, J.P. Roux, F.J. Ruiz Díaz, J. Santinón, C. Flores Quintana, D. R. Hernández, P. Soneira y H. Arbués M, Domitrovic (2011). Evaluación de los Recursos Pesqueros Aguas Abajo de la Represa de Yacyretá. Período agosto 2010-Julio 2011. Informe final presentado por el Instituto de Ictiología del Nordeste de la Fac, de Ciencias Veterinarias de la UNNE a la Entidad Binacional Yacyretá, Convenio EBY-UNNE, Acta Complementaria N° 21. Corrientes, Argentina.
- Sánchez, R.O. y V. H. Martínez (2017). Morphological variations of the three otoliths of some species of the family Loricariidae (Ostariophysi: Siluriformes). *Neotrop. ichthyol.* 15., <http://dx.doi.org/10.1590/1982-0224-20160058>.
- Santana, H. S., A.C Rodrigues y C.V Mente-Vera (2018). Otolith morphometry provides length and weight predictions and insights about capture sites of *Prochilodus lineatus* (Characiformes: Prochilodontidae). *Neotropical Ichthyology*, 16(4), 1–9. <https://doi.org/10.1590/1982-0224-20180094>
- Secor, D.H., J.M. Dean y E.H. Laban (1991). Manual for otolith removal and preparation for microstructural examination. Columbia: Baruch Institute Technical Report.
- Simões, M.A. (2010). Determinação da estrutura etária e idade de primeira maturação em populações de *Prochilodus lineatus* (Valenciennes, 1837) no rio mogi-guaçu, cachoeira de emas, Pirassununga, sp. Ministério do meio ambiente instituto chico mendes de conservação da biodiversidade centro nacional de pesquisa e conservação de peixes continentais – CEPTA.
- Škeljo, F. y J. Ferri, (2012). The use of otolith shape and morphometry for identification and size-estimation of five wrasse species in predator-prey studies. *J Appl Ichthyol.* 28(4):524-30.
- Stassen, M.J.M, M.W. Van de Ven, T. Van der Heide, M.A. Hiza, G. Van der Velde y A.J.P. Smolders (2010). Population dynamics of the migratory fish *Prochilodus lineatus* in a neotropical river: The relationships with river discharge, flood pulse, El Niño and fluvial megafan behaviour. *Neotrop Ichthyol.* 8:113–122.
- Suzuki, H. I., A. A. Agostinho, D. Bailly, M.F. Gimenes, H.F. Júlio-Junior y L.C. Gomes (2009). Inter-annual variations in the abundance of young-of-the-year of migratory fishes in the Upper Paraná River floodplain: Relations with hydrographic attributes. *Braz J Biol.* 69:649–660.
- Sverlij, S.B., A. Espinach Ros y G. Ortí (1993). Synopsis De Los Datos Biológicos Del Sábalo *Prochilodus Lineatus* (Valenciennes, 1847), Food and Agriculture Organization of the United Nations – FAO Fisheries Synopsis. FAO, sinopsis sobre la pesca 154, Roma.
- Tombari, A., A.V. Volpedo y D.D. Echeverría (2000). Patrones morfológicos en la sagitta de peces (Atherinidae: Odontesthes) de Argentina. *Revista de Ciencias del Mar THALASSAS*, 16: 11-19.
- Tuset V.M., A. Lombarte y A.C. Assis (2008). Otolith atlas for the Western Mediterranean, North and central eastern Atlantic. *Scientia Marina*, 72 (1): 7-198.
- Van Neer W., A. Ervynck, L.J. Bolle, R.S. Millner y A.D. Rijnsdorp (2002). Fish otoliths and their relevance to archaeology: an analysis of Medieval, Post-Medieval, and Recent Material of Plaice, Cod and Haddock from the North Sea. *Environ Archaeol.* 2002; 7(1):61-76.

Volpedo, A.V. y D.D. Echeverría (1997). Morfología de las *sagittae* de lenguados del Mar Argentino (Bothidae, Paralichthyidae y Achirosettidae). *Thalassas*, 13: 113 -126.

Volpedo, A.V. y D.D. Echeverría (2000). Catálogo y claves de otolitos para la identificación de peces del mar argentino. Editorial Dunken, Buenos Aires.

Volpedo, A.V. y D.V. Fuchs, (2010). Ecomorphological patterns of the lapillus of Paranoplatenses Siluriforms (South America). *Fisheries Research* 102:160-165.

Volpedo, A.V., G. Thompson y E. Avigliano (2017). Atlas de Otolitos de Peces de Argentina (E. Avigliano, A. Volpedo, y G. Thompson (eds.)).

Volpedo, A. y A.M Vaz-dos-santos (2015). MÉTODOS DE ESTUDIOS CON OTOLITOS: PRINCIPIOS Y APLICACIONES. <https://doi.org/10.1088/1751-8113/44/8/085201>

von Bertalanffy, L. (1938). A quantitative theory of organic growth. *Human Biology*, 10: 181-von Holst, E., 1950. Die Arbeitsweise des stato-lithen-apparates bei fischen. *Z. Vergleich. Physiol.* 32:60-120.

Winemiller, K.O. (1992). Life-history strategies and the effectiveness of sexual selection. *Oikos*. 62: 318-327.

Winemiller, K.O. (2005). Life history strategies, population regulation, and implications for fisheries management. *Can J Fish Aquat Sci.* 62: 872-885.