

Ecología

Cambios ambientales en una laguna costera tropical: un enfoque de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$ en una especie residente

Environmental changes in a tropical coastal lagoon: a $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ approach in a resident species

José Armando Carrillo-Birkhahn ^a, Yassir Edén Torres-Rojas ^{a, *},
Sergio Aguñiga-García ^b y Alberto Sánchez-González ^b

^a Universidad Autónoma de Campeche, Instituto de Ecología, Pesquerías Oceanografía del Golfo de México, Av. Héroes de Nacozari Núm. 480, 24079 Campeche, Campeche, México

^b Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, Av. Instituto Politécnico Nacional s/n, 23096 La Paz, Baja California Sur, México

*Autor para correspondencia: yetorres@uacam.mx (Y.E. Torres-Rojas)

Recibido: 7 octubre 2021; aceptado: 15 agosto 2022

Resumen

Con la finalidad de estudiar las variaciones ambientales a nivel espacio-temporal en lagunas costeras tropicales y su impacto en fauna residente, se analizó la composición isotópica ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$) de 70 otolitos (1 por par) pertenecientes al pez *Bairdiella chrysoura*, considerada especie residente del Área de Protección de Flora y Fauna Laguna de Términos (APFFLT). Se realizaron muestreos mensuales (septiembre de 2016 a agosto de 2017) en 17 estaciones del APFFLT, donde se obtuvieron los ejemplares a los cuales se les analizó el otolito “sagitta” mediante “GasBench” acoplado a un espectrómetro de masas de razones isotópicas. Se encontraron diferencias significativas en $\delta^{18}\text{O}$ a nivel temporal, lo que sugiere que los otolitos responden a cambios ambientales, asociados a fluctuaciones de temperatura y salinidad relacionadas a la zona (bajo traslape entre temporadas en $\delta^{13}\text{C}$). Las ecuaciones de paleotemperatura mostraron un mejor ajuste con cambios de salinidad, lo que demuestra la influencia de la variable en lagunas costeras tropicales. En conclusión, el $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$ mostraron que *B. chrysoura* registra cambios ambientales que se presentan en el APFFLT; sin embargo, se recomienda desarrollar ecuaciones paleoclimáticas para lagunas costeras tropicales para proyectar escenarios climáticos regionales.

Palabras clave: Isótopos estables; Laguna de Términos; Bioindicadores; Peces; Cambio climático

Abstract

To study the environmental variations at the spatio-temporal level in tropical coastal lagoons and their impact on resident fauna, the isotopic composition ($\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$) of 70 otoliths (1 per pair) of the fish *Bairdiella chrysoura*

were analyzed. This fish species is considered as resident of the Laguna de Términos Flora and Fauna Protection Area (APFFLT). Monthly samplings were carried out (September 2016 to August 2017) at 17 APFFLT stations, where the specimens were obtained and the “*sagitta*” otolith was analyzed using GasBench coupled to an isotopic ratios mass spectrometer. Significant differences were found in $\delta^{18}\text{O}$ at the temporal level, suggesting that the otoliths respond to environmental changes, associated with fluctuations in temperature and salinity related with the zone (low overlap between seasons in $\delta^{13}\text{C}$). Paleo-temperature equations showed a better fit with salinity changes, demonstrating the influence of this variable in tropical coastal lagoons. In conclusion, the $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ showed that *B. chrysoura* registers environmental changes present in the APFFLT, however, it is suggested to develop paleo-climatic equations for tropical coastal lagoons to project regional climate scenarios.

Keywords: Stable isotopes; Términos Lagoon; Bioindicators; Fishes; Climate change

Introducción

Las lagunas costeras son cuerpos de agua que cubren aproximadamente 13% de línea de costa alrededor del mundo (Kjerfve, 1986, 1994), altamente productivas, dinámicas y con una importancia ecológica debido a los servicios ecosistémicos que brindan (Ramos-Miranda et al., 2006). En México, la laguna de Términos es considerada la laguna costera tropical más grande del país con una alta diversidad de flora y fauna por lo que ha sido catalogada como área de protección (Torres-Rojas et al., 2017). Sin embargo, estudios recientes registran en los últimos 30 años un decremento en su biodiversidad y abundancia (Dorantes-Hernández et al., 2020).

El decremento de biodiversidad en la laguna de Términos se ha asociado con cambios ambientales (Dorante-Hernández et al., 2020). Por ejemplo, Fichez et al. (2016) reportan un decremento significativo en la humedad de la laguna con el pasar de los años hasta el registro de sequías en 2016, asociado a impactos de los sistemas deltaicos (Atasta y Palizada), considerados como cruciales en la región (Villalobos-Zapata, 2015), los cuales han presentado impactos antrópicos (i.e, cambios de uso de suelo y contaminación urbana), así como por una alta actividad industrial y portuaria, lo que ha generado altas variaciones en temperatura y salinidad (Irola-Sansores et al., 2021; Santos-Santoyo et al., 2021).

Ante la presencia de cambios ambientales, existen bioindicadores como los peces, que pueden ser una gran herramienta que permita detectar y cuantificar alteraciones negativas o positivas en ecosistemas acuáticos. En el caso de los peces, los otolitos son utilizados como una estructura indicadora, ya que registran información acerca de la interacción organismo-ambiente (Volpedo y Vaz-dos-Santos, 2015). Estudios previos han demostrado que los otolitos son estructuras calcáreas, compuestas de carbonato de calcio en 96% y solo 3.1% de matriz orgánica, que durante su formación, el carbonato de calcio

es asimilado del ambiente a partir del proceso denominado biomineralización (Campana, 1999).

Debido a estas características, los otolitos han sido catalogados como estructuras metabólicamente inertes que están en equilibrio isotópico con las condiciones ambientales (Volpedo y Vaz-dos-Santos, 2015). Diferentes autores han reportado que el $\delta^{18}\text{O}$ depositado en los otolitos registra la señal isotópica del agua donde los organismos residen y presenta valores isotópicos enriquecidos a temperaturas bajas, mientras que en temperaturas cálidas refleja señales empobrecidas (Peterson y Fry, 1987; Trasviña-Carrillo et al., 2018). Kerr et al. (2007) reportaron que el $\delta^{13}\text{C}$ de los otolitos refleja los cambios de salinidad (93% - 100% de precisión) debido a que la mayor parte del carbono incorporado al otolito proviene del carbono inorgánico disuelto (65% a 80%), y en menor proporción, derivado de un origen metabólico (20% a 35%).

Un ejemplo de lo anterior es el estudio realizado por Romo-Curiel et al. (2016), quienes, a partir de isótopos, estimaron temperaturas retro calculadas durante la formación de anillos de crecimiento estacional de *Atractoscion nobilis* registrando que las temperaturas más altas coincidieron con la precipitación estival de aragonita y las temperaturas más bajas corresponden a los anillos de invierno; por tanto, los otolitos pueden ser usados para generar ecuaciones paleoclimáticas basadas en temperatura y salinidad, que ayudarían entender las condiciones en las que un organismos vive y se desarrolla (Rowell et al., 2008).

La aplicación de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$ en otolitos de especies representativas en ecosistemas costeros, como las lagunas tropicales (en particular la laguna de Términos), permitiría explorar los cambios ambientales que se están registrando en años recientes, además de poder analizar cómo los organismos residentes están siendo impactados. Si bien la laguna de Términos cuenta con un programa de manejo para áreas naturales protegidas (Carabias-Lillo et al., 1997), para el estudio o caracterización de la salud del ecosistema,

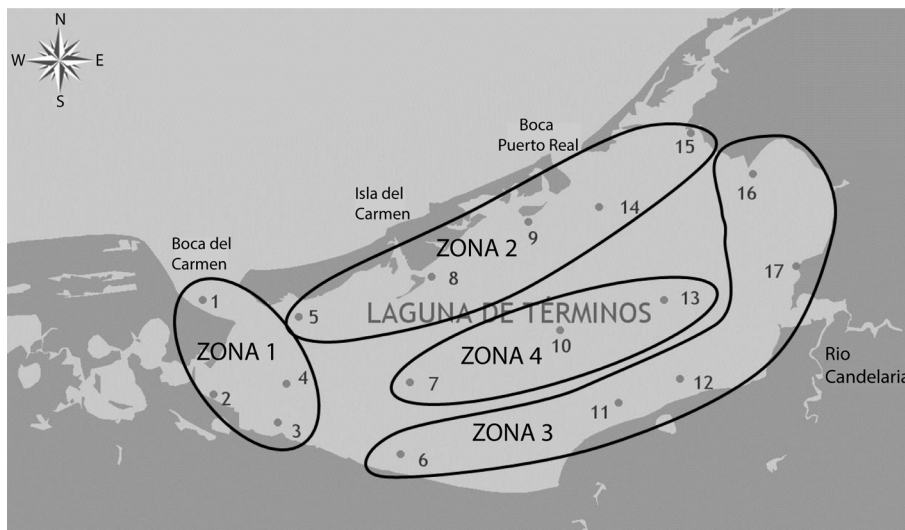


Figura 1. Mapa de los 17 sitios y 4 zonas de muestreo en la laguna de Términos, Campeche, México (Villeger, 2010).

que considera diversas variables como la temperatura, salinidad, pH y el oxígeno, éstos son registrados *in situ*, por lo que existe un vacío en cómo se puede estudiar la salud del ecosistema usando especies indicadoras residentes que reflejen los cambios ambientales.

Una especie indicadora potencial es el pez *Bairdiella chrysoura*, dado que es considerada como representativa, asociada con los sistemas deltaicos en la laguna de Términos durante la mayor parte de su ciclo de vida y ha sido reportada en la mayoría de las zonas (Chavance et al., 1984; Irola-Sansores et al., 2021; Ramos-Miranda et al., 2006). El presente estudio tiene como objetivo comparar la composición isotópica ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$) presente en otolitos de *B. chrysoura* a nivel espacio-temporal, con el fin de analizar (a partir de ecuaciones paleoclimáticas previamente desarrolladas) los cambios ambientales de la laguna de Términos durante el período 2016-2017, y los posibles escenarios de mitigación y adaptación que presentaría la fauna de seguir registrando cambios ambientales de mayor intensidad.

Materiales y métodos

El APFFLT se ubica en el sur del golfo de México, en la cual descargan 3 ríos (Palizada, Chumpán y Candelaria) con flujos variables a través del año y cuenta con 2 bocas que permiten una dinámica de agua marina y salobre (Ramos-Miranda et al., 2006). A nivel temporal, recibe la influencia de 3 temporadas climáticas: secas (febrero a mayo), lluvias (junio a septiembre) y nortes (octubre a enero). A nivel espacial, la laguna de Términos está

dividida en 4 zonas con 17 sitios de muestreo (fig. 1). La zona 1 incluye la boca del Carmen, Punta Zacatal, la boca del sistema Atasta y la boca Chica; en esta área, el agua marina proveniente de la boca del Carmen y el agua dulce de los sistemas deltaicos se mezclan. La zona 2 incluye la boca de Puerto Real, Punta Gorda y la mayoría de la costa de la isla del Carmen, en esta área la influencia del agua de mar prevalece. La zona 3 incluye las bocas de los ríos Palizada, Chumpán y Candelaria; el agua dulce tiene mayor influencia en esta área debido a los aportes de estos ríos. La zona 4 incluye la parte central de la laguna de Términos, por lo que actúa como una zona de mezcla entre el agua dulce y salada (Santos-Santoyo et al., 2021).

Se realizaron muestreos mensuales —septiembre de 2016 a agosto de 2017— a bordo de una embarcación (21 pies de eslora), y con la ayuda de un GPS, se localizó cada uno de los 17 sitios de muestreo establecidos por Ramos-Miranda et al. (2006). En cada sitio se registraron temperatura y salinidad del agua mediante una sonda multiparamétrica (YSI, Pro20), para posteriormente realizar la recolecta de los organismos de *B. chrysoura*, por arrastres con una red tipo camaronera, donde cada uno tuvo una duración de 12 min a una velocidad de 2.5 nudos. Después de cada arrastre, todos los organismos recolectados fueron etiquetados, almacenados y trasladados al laboratorio de Ecología Trófica, en el Instituto EPOMEX de la Universidad Autónoma de Campeche.

En laboratorio, *B. chrysoura* fue identificada (Carpenter, 2002), se registraron sus datos biométricos (longitud total “LT”, peso total “PT”) y se extrajo el par de

los otolitos “sagitta”. Posterior a la extracción y con el fin de eliminar los restos de tejido y sangre, los otolitos fueron limpiados en un baño ultrasónico digital (Branson 1800), en 3 ciclos de 10 min cada uno y fueron secados a 60 °C en un horno de convección natural (Thermo Scientific) por 12 h, para finalmente, ser pesados (g) y almacenados en viales Eppendorf.

Para el análisis isotópico, de los 242 pares de otolitos extraídos, se seleccionaron 70 otolitos pertenecientes a organismos con tallas mayores de 10 cm (organismos adultos residentes); a cada par de otolito se le extrajo una muestra de 200 a 300 µg de carbonatos usando un microtaladro de alta precisión (Merchantek Micromil) con una broca de 1 mm, perforando la parte más externa de cada uno, esta muestra se almacenó en viales Exentainer. Posteriormente, cada vial Exentainer fue purgado con gas helio para desplazar el gas atmosférico y se le agregó ácido fosfórico, el cual se dejó reaccionar con la muestra de otolito (carbonato de calcio) por 12 h a 72 °C liberando CO₂ en el proceso. Finalmente, los valores de δ¹⁸O y δ¹³C de las muestras carbonatadas de otolitos se cuantificaron utilizando un analizador GasBench de flujo continuo (Thermo Scientific) acoplado a un espectrómetro de masas de razones isotópicas (Thermo Scientific Delta V Plus) en el LESMA-CICIMAR-IPN, mediante un estándar NBS-19 (n = 4) y con una precisión analítica < 0.4‰.

Los valores obtenidos de δ¹⁸O y δ¹³C fueron calculados con la ecuación de Park y Epstein (1961):

$$\delta^{18}\text{O} \text{ o } \delta^{13}\text{C} = [(R \text{ muestra}/R \text{ estándar}) - 1] [(1000)]$$

$$R \text{ muestra} = {}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O} \text{ o } {}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}$$

$$R \text{ estándar} = {}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O} \text{ o } {}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}$$

Para demostrar que el valor de δ¹⁸O_A de los otolitos de *B. chrysoura* es independiente de la fisiología del organismo, de parámetros como la longitud total y el estado nutricional (peso total), se realizaron análisis de correlación (coeficiente de Pearson) entre los valores de δ¹⁸O_A y los valores de la longitud total (LT), el peso total (PT) y el peso del otolito (PO). Para evaluar la distribución espacial entre la zona de muestreo y la temporada climática, se determinó la amplitud y traslape del nicho isotópico (δ¹⁸O vs. δ¹³C) mediante el paquete SIBER (Stable Isotopic Bayesian Ellipses in R) del programa R (versión 4.0.2) propuesto por Jackson et al. (2011). Para corroborar la significancia del traslape de δ¹⁸O y δ¹³C, así como de los valores de temperatura y salinidad registradas *in situ*, las muestras fueron organizadas por sitio de muestreo y zonas (1, 2, 3, 4; fig. 1). Mientras que estacionalmente fueron organizadas por temporada climática: secas, lluvias

y nortes. En ambos casos (δ¹⁸O y valores registrados *in situ*), se les aplicó una prueba paramétrica (Anova 1 vía) para determinar si existían diferencias significativas a nivel espacio temporal.

Una vez determinada las condiciones *in situ*, se calculó la composición isotópica del oxígeno en la aragonita en equilibrio con el agua de mar, usando la ecuación propuesta por Bemis et al. (2000).

$$T = C1 - C2 * (\delta^{18}\text{O}_A - \delta^{18}\text{O}_W)$$

donde T = temperatura estimada de mar expresada en °C, C = son las constantes de calcificación en foraminíferos de acuerdo con la temperatura y salinidad, C1 = 14.9 y C2 = 4.8, δ¹⁸O_A = valor isotópico del aragonito (otolito), δ¹⁸O_W = valor isotópico del agua de mar.

El valor del δ¹⁸O_w fue calculado usando la ecuación propuesta por Surge et al. (2005) para regiones tropicales:

$$\delta^{18}\text{O}_w = C1 * (S) - C2$$

donde, δ¹⁸O_w = al valor isotópico del agua de mar, S = el valor de la salinidad del agua de mar, C1 = 0.13 y C2 = -2.7.

Resultados

La talla promedio de los 70 organismos de *B. chrysoura* seleccionados fue de 13.62 ± 1.78 cm (DE). Se detectaron diferencias significativas entre las tallas a nivel espacial ($p < 0.05$), encontrando tallas promedio máximas en la zona 2 (12.55 ± 3.31 cm) y mínimas en la zona 4 (10.13 ± 3.39 cm). No se encontraron correlaciones significativas entre los valores de δ¹⁸O del otolito y el peso total (PT) del organismo ($p = 0.70$), así como con el peso total del otolito ($p = 0.07$). Se encontró una correlación entre los valores de δ¹⁸O y la longitud total del organismo ($p = 0.02$), pero con un bajo coeficiente de determinación (fig. 2).

De acuerdo con SIBER, el traslape isotópico de *B. chrysoura* a nivel temporal fue medio (0.53), donde organismos de la temporada de secas mostraron una elipse con área menor (1.45); en contraste, organismos de la temporada de lluvias mostraron una elipse con área más grande (1.87) (tabla 1; fig. 3a). A nivel espacial el traslape isotópico de *B. chrysoura* entre las zonas se encuentra en un nivel bajo (0.30); en los organismos en la zona 3 se observó la elipse con el área más grande (2.90). Por otro lado, los organismos en la zona 4 mostraron el área de elipse más pequeña (0.94) (tabla 2, fig. 3b). No se encontraron diferencias significativas a nivel espacial ($p = 0.20$), pero sí a nivel temporal ($p < 0.05$) donde la temporada seca y de lluvias mostraron valores más enriquecidos en el isótopo pesado que la temporada de

nortes ($-1.04 \pm 0.42\text{‰}$, $-1.01 \pm 0.46\text{‰}$, y $-1.39 \pm 0.53\text{‰}$, respectivamente; tabla 3).

A nivel temporal, se encontraron diferencias significativas en salinidad ($p < 0.05$), el valor promedio más alto fue durante la temporada de secas (31.71 ± 5.22 UPS), la temporada de lluvias mostró un valor promedio de 30.44 ± 1.48 UPS, y el valor promedio mínimo fue observado en la temporada de nortes (21.54 ± 8.03 UPS). La temperatura mostró diferencia significativa ($p < 0.05$) con un promedio máximo durante temporada de lluvias ($30.44 \pm 7.45^\circ\text{C}$), la temporada de secas presentó una temperatura promedio de $28.57 \pm 0.48^\circ\text{C}$, y la temporada de nortes reportó la temperatura promedio mínima ($26.89 \pm 7.02^\circ\text{C}$) (fig. 4).

A nivel espacial (fig. 5), los valores de temperatura no mostraron diferencias significativas ($p = 0.98$), con valores promedio similares ($28.69 \pm 4.03^\circ\text{C}$), pero con una tendencia en decremento en la temperatura de la zona 1 a la zona 4. Para la salinidad se presentaron diferencias significativas ($p < 0.05$), donde la zona 3 reportó el promedio mínimo de salinidad (24.69 ± 7.45 UPS), en la zona 1 y la zona 4 se observó un comportamiento similar en los promedios de salinidad (27.96 y 27.99 UPS, respectivamente), mientras que el promedio de salinidad más alto fue en la zona 2 (32.29 ± 6.07 UPS). La temperatura estimada por zonas mostró diferencias con respecto a la temperatura *in situ* (fig. 6a). Sin embargo, tanto en condiciones *in situ* como a partir de las ecuaciones paleoclimáticas, se observó menor temperatura en la zona 3 y en la zona 4, comparadas con las zonas 1 y 2.

A nivel temporal, la temperatura estimada siempre fue menor que la observada *in situ*, excepto para los meses de 2017 (fig. 6b). Se observa que la tendencia de las mediciones *in situ*, al igual que las estimadas por las ecuaciones para el periodo de septiembre a diciembre de 2016, es, en ambos casos, de disminución de las temperaturas. Sin embargo,

Tabla 1

Área de la elipse y traslape del nicho isotópico (SIBER), correspondiente a la categoría de temporada climática en función de los valores de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{18}\text{O}$ obtenido de los otolitos de *Bairdiella chrysoura*.

Categoría	Área de la elipse	Área corregida	Traslape
1 – Secas	4.50	1.45	0.53
2 – Lluvias	7.47	1.87	
3 – Nortes	4.14	1.61	

Tabla 2

Área de la elipse y el traslape del nicho isotópico (SIBER), correspondiente a la categoría de zona de muestreo en función de los valores de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{18}\text{O}$ obtenidos de los otolitos de *Bairdiella chrysoura*.

Zona	Área de la elipse	Área corregida	Traslape
1	4.82	1.99	0.30
2	3.07	1.20	
3	9.52	2.90	
4	2.76	0.94	

la magnitud en los cambios de temperatura estimada fue mayor al observado *in situ* para el periodo de diciembre a marzo. De marzo a agosto, la medición *in situ* es inversa a la estimada. Sin embargo, se pudo observar tanto en escala espacial como temporal, que la temperatura estimada con ecuaciones paleoclimáticas mostró un comportamiento similar a la salinidad registrada *in situ*, lo que sugiere que esta variable tiene un importante efecto en la variabilidad observada en el $\delta^{18}\text{O}$ de los otolitos de *B. chrysoura*.

Tabla 3

Datos isotópicos ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$) obtenidos en lo otolitos de *Bairdiella chrysoura* organizados por zona de muestreo (Villegér, 2010) y temporada climática en la laguna de Términos, Campeche, México, del 2016 al 2017. DE = Desviación estándar; N = número de otolitos analizados.

Temporada	Nortes				Lluvias				Secas				Anual			
	Zona	N	$\delta^{18}\text{O}$	DE	$\delta^{13}\text{C}$	DE	$\delta^{18}\text{O}$	DE	$\delta^{13}\text{C}$	DE	$\delta^{18}\text{O}$	DE	$\delta^{13}\text{C}$	DE	Prom. $\delta^{18}\text{O}$	Prom. $\delta^{13}\text{C}$
1		16	-1.63	0.35	-6.44	0.62	-1.03	0.79	-6.42	1.03	-1.22	0.17	-7.64	0.34	-1.29	-6.80
2		19	-1.09	0.12	-4.92	0.96	-1.11	0.36	-4.70	1.11	-0.77	0.12	-5.44	0.61	-1.03	-4.91
3		18	-1.83	0.66	-5.62	-5.04	-0.99	0.30	-6.13	0.95	-1.15	0.74	-7.06	1.89	-1.27	-6.25
4		17	-1.11	0.40	0.74	0.45	-0.90	0.37	-5.20	0.63	-0.98	0.37	-6.21	0.52	-0.99	-5.45
Total		70	-1.42	0.53	-6.65	1.33	-1.02	0.47	-5.57	1.20	-1.04	0.43	-5.4	0.88	-1.15	-5.82

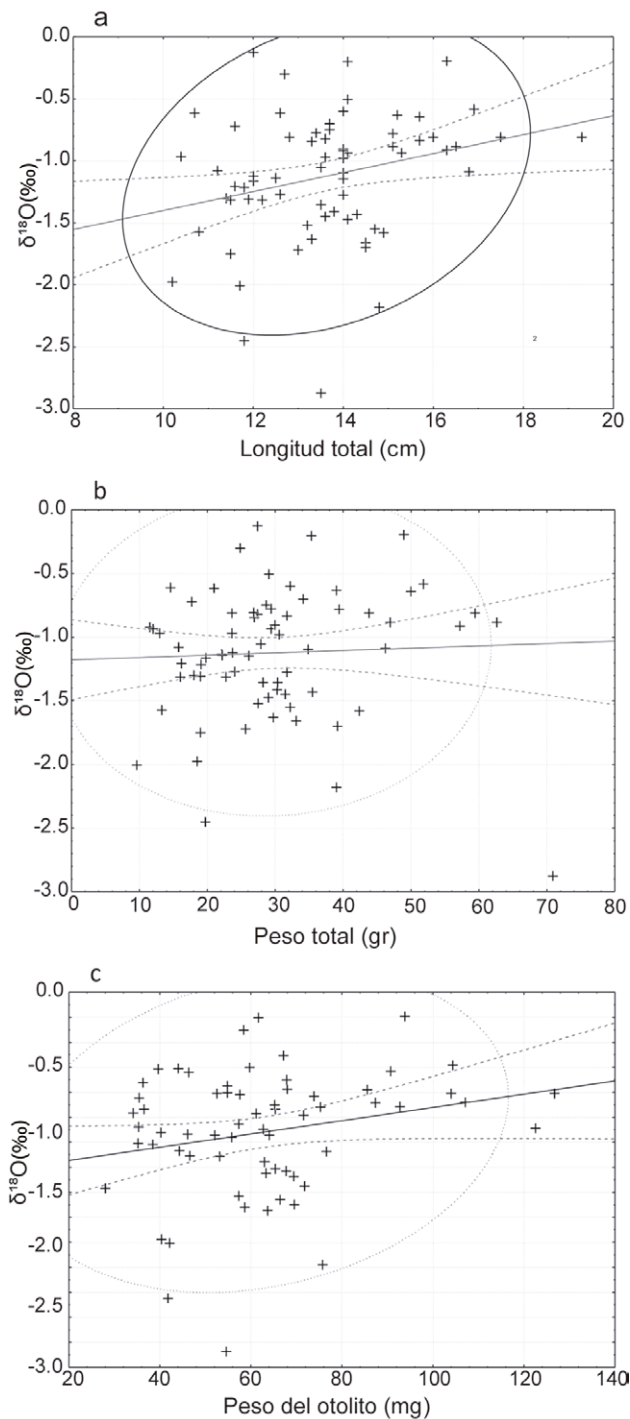


Figura 2. Correlaciones entre los valores de $\delta^{18}\text{O}$ de los otolitos vs. la longitud total (a), el peso total (b) y el peso del otolito (c).

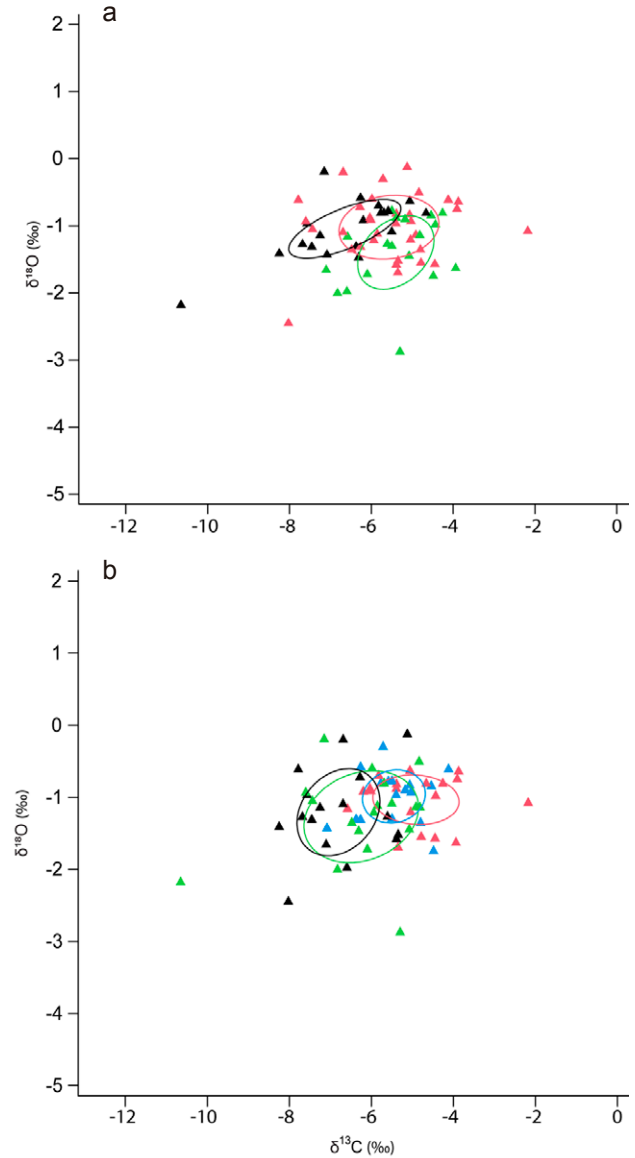


Figura 3. Preferencias temporales (a): nortes = elipse roja, secas = elipse verde lluvias = elipse negra, y espaciales (b): zona 1 = elipse negra, zona 2 = elipse azul, zona 3 = elipse verde, zona 4 = elipse roja, calculadas por datos isotópicos de otolitos de *B. chrysoura* en la laguna de Términos

Discusión

La especie *B. chrysoura* es de gran importancia para la laguna de Términos debido a su amplia distribución espacial y temporal en este ecosistema (Chavance et al., 1984; Ramos-Miranda et al., 2006). Esta especie fue encontrada en el presente trabajo en 16 de 17 estaciones y tuvo presencia en las 4 zonas de la laguna. También se

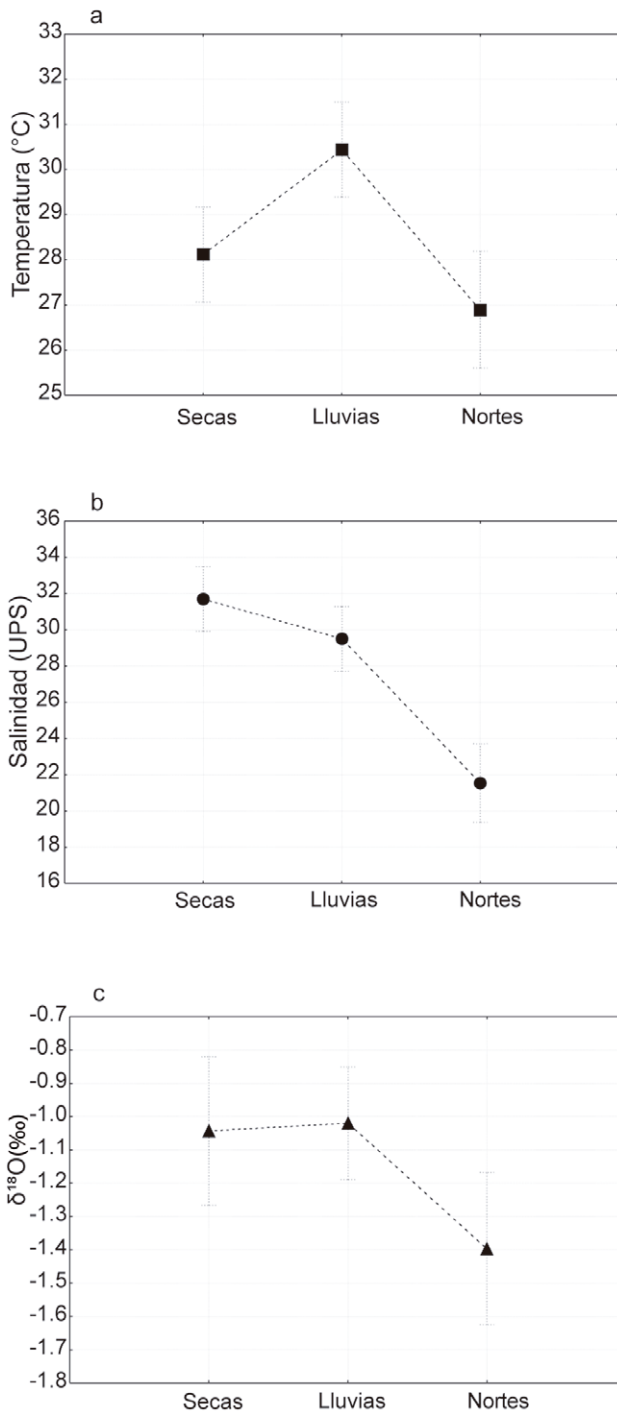


Figura 4. Comportamiento *in situ* de la temperatura (a) y salinidad (b), así como del $\delta^{18}\text{O}$ de los otolitos (c) de *B. chrysoura* por temporada climática en la laguna de Términos.

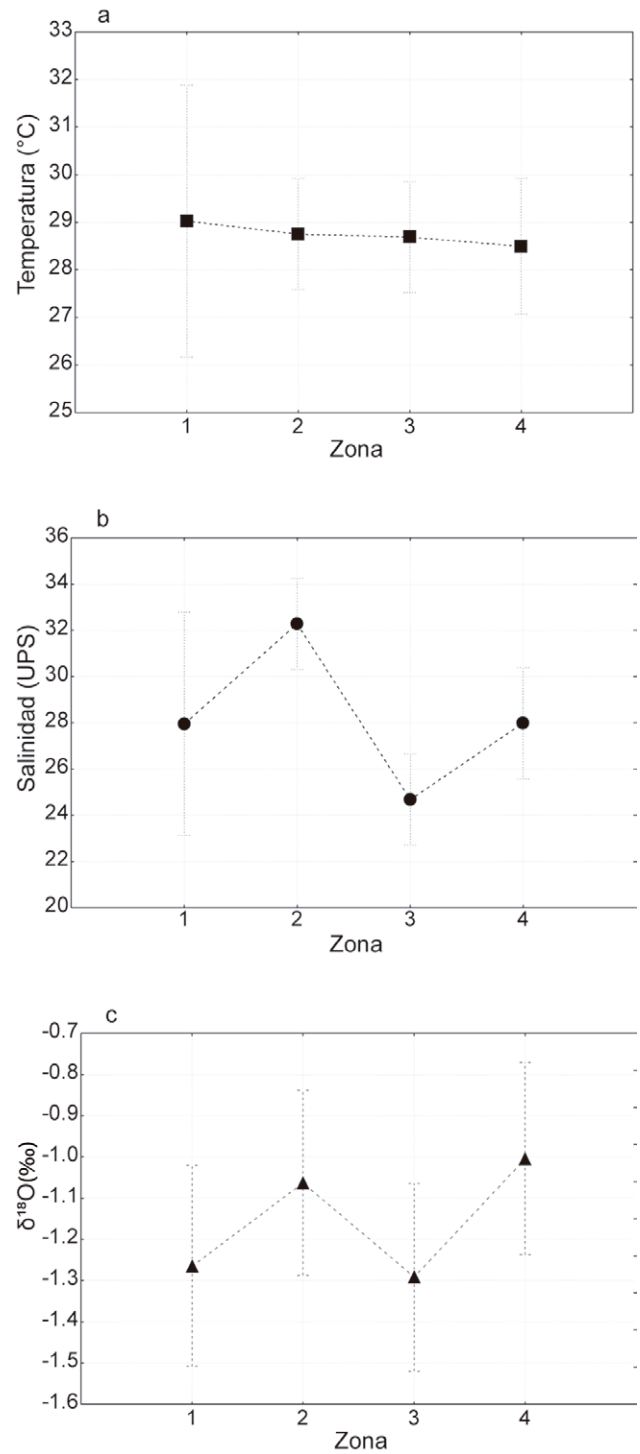


Figura 5. Comportamiento a nivel espacial *in situ* de la temperatura (a), salinidad (b) y los valores de $\delta^{18}\text{O}$ de los otolitos (c) de *B. chrysoura* en la laguna de Términos.

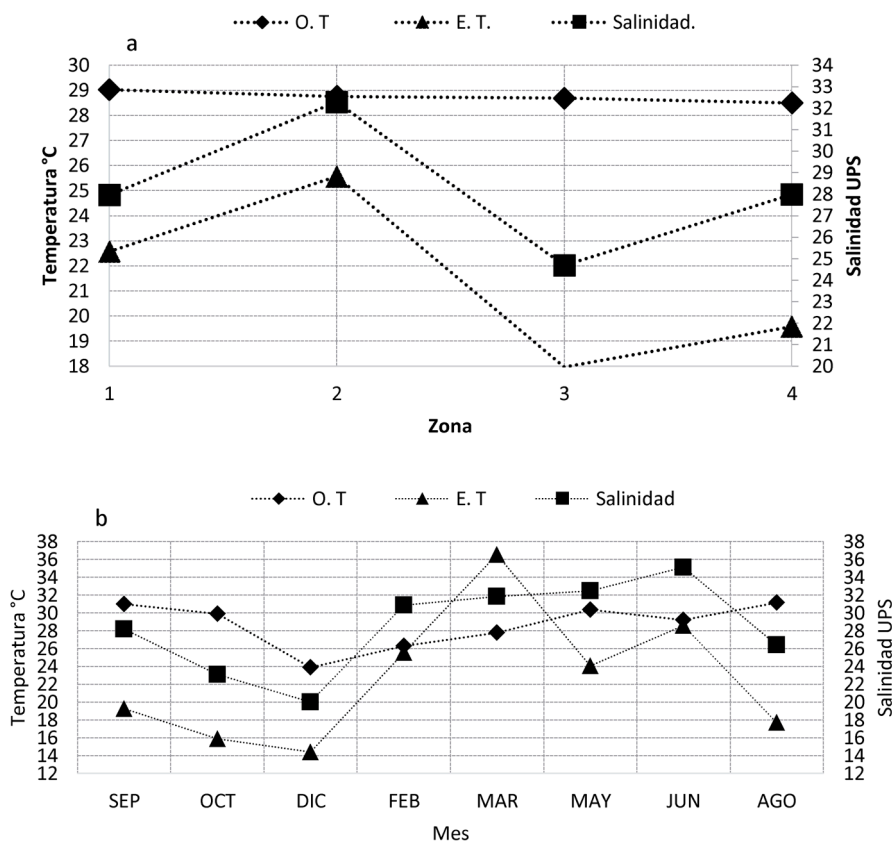


Figura 6. Comparación entre los valores promedio de la temperatura observada (T.O), temperatura estimada (T.E) y la salinidad en la laguna de Términos entre septiembre de 2016 y agosto 2017 a niveles espacial (a) y temporal (b).

observó durante las 3 estaciones climáticas. Su distribución en la laguna de Términos refuerza lo reportado por diversos autores (Irola-Sansores et al., 2021; Ramos-Miranda et al., 2006), quienes ubican a *B. chrysoira* como una especie representativa de la laguna, haciendo que su uso como especie indicadora sea viable, dado que cumple con los criterios establecidos por la literatura, como son la cohesión del grupo y una representatividad espacial y temporal del ecosistema (González-Coto, 2014).

En la laguna de Términos, *B. chrysoira* mantiene preferencia por las áreas cerca de las bocas de los ríos Palizada, Chumpán y Candelaria, donde se ha observado con mayor frecuencia y representatividad a nivel temporal y espacial, lo que coincide con lo reportado por Chavance et al. (1984) y Ramos-Miranda et al. (2006); además, este comportamiento también es mencionado por otros autores en ecosistemas estuarinos en el golfo de México, donde reportan que tienen una preferencia por zonas ricas en pastos marinos (Sobocinski y Latour, 2015). Contrario a esto, la zona 2 mostró la menor cantidad de organismos,

lo que coincide con otros autores (Ramos-Miranda et al., 2006). La gran presencia de organismos en la temporada de lluvias observada en el presente trabajo contrasta con lo mencionado por otros autores (Chavance et al., 1984; Ramos-Miranda et al., 2006).

El rango de longitud total de los organismos del presente estudio es similar a la documentada en otros trabajos que han estudiado a *B. chrysoira* en ecosistemas estuarinos (Grammer et al., 2009). Al respecto, se reporta que los procesos fisiológicos pueden tener influencia en los otolitos, durante su formación (Volpedo y Vaz-dos-Santos, 2015); sin embargo, estudios con otolitos, donde se analiza la relación entre la edad y las bandas de crecimiento de estas estructuras —producto de los cambios ambientales a los que se ve sometido el organismo (Grammer et al., 2009), indican que al incorporar los valores de $\delta^{18}\text{O}$ en los otolitos, sí reflejan una gran influencia de las variaciones en las condiciones ambientales, pero no mostraron una relación directa con los procesos fisiológicos (Rowell et al., 2008). La baja correlación de los valores de $\delta^{18}\text{O}$

de los otolitos vs. el peso y la talla, así como el peso del otolito, sugiere que los factores fisiológicos no afectan de forma significativa en la señal isotópica. La relación positiva y significativa, pero con bajo coeficiente de determinación, puede reflejar hábitos migratorios del organismo, así como el desplazamiento de adultos a áreas menos salobres, probablemente, para su época de reproducción, así como la migración de juveniles a zonas más salobres por los procesos de reclutamiento (Chavance et al., 1984; Grammer et al., 2009; Sobocinski y Latour, 2015).

En el análisis del traslape se observa uno bajo entre los organismos de diferentes zonas, lo que sugiere que los organismos están registrando la señal isotópica de la zona específica donde habitan a través de la deposición de $\delta^{18}\text{O}$ en el otolito. La elipse más grande corresponde a la zona 3, y esto puede deberse a la fuerte influencia de los ríos que descargan sus aguas en esta área dependiendo de la temporada (Cerón-Gómez, 2010; Ramos-Miranda et al., 2006). La zona 1 muestra una tendencia similar a la zona 3, lo que puede deberse a que ambas tienen influencia de agua dulce, en este caso del sistema Atasta, pero también a que es una zona con gran influencia de agua marina proveniente de la boca del Carmen. Adicionalmente, la zona 1 y 3 son regiones reportadas como migratorias de *B. chrysourea*, desde la laguna hasta las zonas de estuarios, en las bocas de los ríos durante los meses de reclutamiento y reproducción (Chavance et al., 1984). La elipse más pequeña se presenta en la zona 4, lo que sugiere que los organismos reflejan menos variaciones ambientales, debido a la poca influencia que tienen los sistemas deltaicos.

Los valores de $\delta^{18}\text{O}$ de la calcita o aragonita que son precipitados por los organismos de ambientes marinos o costeros reflejan la temperatura de donde estos organismos vivieron, así como, la influencia en los cambios de salinidad que tienen lugar en las zonas debido a la descarga de los ríos, en algunos casos este efecto es más importante que la temperatura (Dorantes-Hernández et al., 2020; Kerr et al., 2007; Rowell et al., 2008). Lo anterior contrasta con lo reportado en otros trabajos, en donde la temperatura es el factor clave en el comportamiento del $\delta^{18}\text{O}$, prevaleciendo sobre todo en ambientes marinos, donde las salinidades son constantes (Høie et al., 2004; Kalish, 1991).

Las fluctuaciones espaciales de los valores $\delta^{18}\text{O}$ en la zona 1 y la zona 3 mostraron un empobrecimiento en ^{18}O de -1.29‰ y -1.27‰ , respectivamente. Esto pudo deberse a las contribuciones de agua dulce (empobrecida en ^{18}O), provenientes de los ríos Palizada y Atasta (en la zona 1) y de los ríos Candelaria y Chumpán (en la zona 3), esta influencia se puede corroborar por los bajos valores de salinidad promedios obtenidos *in situ* (24.69 y 27.96 UPS, respectivamente). Los valores de $\delta^{18}\text{O}$ en

la zona 3 están más empobrecidos en el isótopo pesado que las áreas con poca influencia de aguas continentales y predominancia de agua marina, como las zonas 2 y 4 (más salobres y enriquecidas en el isótopo) (Høie et al., 2004). Específicamente la zona 1, se mostró como una zona de mezcla, porque pese a tener la influencia de los sistemas Palizada y Atasta, también recibe grandes aportes de agua marina proveniente de la boca del Carmen, lo que se refleja en sus valores de salinidad (27.96 UPS); sin embargo, la influencia del agua dulce puede observarse en los valores empobrecidos en $\delta^{18}\text{O}$, similares a los de la zona 3.

A nivel temporal, los valores de $\delta^{18}\text{O}$ obtenidos en otolitos indicaron diferencias significativas entre las 3 zonas climáticas (secas, lluvias y nortes), éstas coinciden con las diferencias encontradas tanto en temperatura como salinidad a partir de los datos *in situ*, lo que refuerza la posibilidad de usar los otolitos como proxies de los cambios ambientales en ecosistemas lagunares. También se puede inferir que los cambios ambientales a nivel temporal son más pronunciados que los cambios a nivel espacial, lo que coincide con lo mencionado por Surge y Walker (2005). En el caso de la temporada de secas y lluvias, los valores promedio fueron similares (-1.04‰ y -1.02‰ , respectivamente), contrastando con la temporada de nortes con el valor promedio de $\delta^{18}\text{O}$ más empobrecido (-1.39‰). Lo anterior sugiere que las contribuciones de agua dulce en la laguna llegan a su máximo durante esta temporada, lo cual se hace evidente al notar que durante esta temporada, también se alcanzan los valores promedio de salinidad más bajos (21.54 UPS). Similar a los valores de $\delta^{18}\text{O}$, ambas temporadas también mostraron valores de salinidad y temperatura promedios similares, lo que sugiere que durante estas 2 temporadas los aportes de agua dulce son menores en la laguna. En general, la señal isotópica de los otolitos refleja las diferencias entre los organismos que viven en áreas con influencia predominantemente marina y los que habitan en zonas con influencia mayormente estuarina en la laguna de Términos.

El rango observado en los valores de $\delta^{18}\text{O}$ va de -1.5‰ a -0.8‰ en la laguna de Términos, presentan una similitud con los reportados en trabajos realizados para la parte norte del golfo de México, donde se estudió el $\delta^{18}\text{O}$ a partir de conchas de foraminíferos en los núcleos sedimentarios y donde el rango obtenido fue desde -1.86‰ hasta -1.13‰ (Emiliani et al., 1975); sin embargo, el comportamiento de los valores de $\delta^{18}\text{O}$ observados durante el presente trabajo mostró mayor influencia a escala temporal, comparado con las observaciones de otros trabajos realizados en el norte del golfo de México (Emiliani et al., 1975), esta mayor variabilidad en los registros isotópicos de los otolitos puede explicarse por el

dinamismo de la laguna producto de los aportes de aguas territoriales a través de las bocas de la laguna y el tipo de estructura estudiada.

La estimación de la temperatura del mar, a partir de $\delta^{18}\text{O}$ obtenido de organismos marinos en sus estructuras metabólicamente inertes, ha sido uno de los principales desafíos, debido a la dependencia del $\delta^{18}\text{O}$ del agua de mar, a cambios en la temperatura y salinidad del mar (Bemis et al., 2000; Cerón-Gómez, 2010; Dorantes-Hernández et al., 2020; Rowell et al., 2008; Surge y Walker, 2005; Trasviña-Carrillo et al., 2018). La estimación de la temperatura marina es más compleja en ambientes de transición entre lo marino y estuarino, donde las contribuciones de agua dulce continentales son significativas (Dorantes-Hernández et al., 2020; Kerr et al., 2007). Esta complejidad puede ser observada cuando las temperaturas de la laguna tomadas *in situ* son comparadas con las temperaturas estimadas. En la zona 2, la temperatura estimada es de 25.57 °C y tiene la menor diferencia (3.18 °C), con respecto a la temperatura *in situ* 28.75 °C. El resto de las zonas (1, 3 y 4) tienen una temperatura estimada con un rango de diferencia de 7 a 11 °C con respecto a la temperatura *in situ*.

A escala temporal, al igual que a nivel espacial, la temperatura estimada es inferior a la temperatura *in situ*. En la época de secas, la diferencia entre la temperatura observada y la estimada fue de aproximadamente 3 °C; por el contrario, para las temporadas de norte y lluvias, las ecuaciones resultaron en valores más alejados de la temperatura observada para ambas zonas; sin embargo, el comportamiento de la temperatura estimada en las 3 estaciones climáticas fue el esperado, dado que tanto la observada como la estimada siguieron la misma tendencia, y que la temperatura más baja de las 3 estaciones se reporta en la estación nortes. Por lo que, algo que se debe considerar al estimar la temperatura, es la influencia de la salinidad. A diferencia de otros estudios donde la temperatura estimada de los organismos fue muy similar a la medida *in situ*, cuando las condiciones fueron marinas y con variaciones de salinidad mínimas (Bemis et al., 2000; Grossman y Ku, 1986; Rowell et al., 2008; Surge y Walker, 2005; Trasviña-Carrillo et al., 2018).

A partir del presente estudio, se puede señalar que no existe una influencia significativa de factores fisiológicos en los valores de $\delta^{18}\text{O}$ de los otolitos. Aunque los valores de $\delta^{18}\text{O}$ muestran que los isótopos de oxígeno responden a cambios ambientales, particularmente variaciones de temperatura y salinidad, se observó que no existen diferencias significativas entre las 4 zonas de la laguna de Términos. En cambio, se encontraron diferencias significativas a nivel temporal. Además de esto, SIBER mostró que los otolitos reflejan la señal isotópica de cada

área y estación. Finalmente, la respuesta de la ecuación de paleo temperatura a los cambios ambientales, dadas las condiciones ambientales dinámicas de la laguna de Términos, mostró que los valores estimados de temperatura son imprecisos y, principalmente, están asociados a la respuesta de $\delta^{18}\text{O}$ a los cambios de salinidad, y no tanto a los cambios de temperatura, por lo que es necesario desarrollar nuevas ecuaciones adaptadas a ecosistema tropicales costeros e incluir el análisis isotópico en los programas de manejo de áreas naturales protegidas para mejorar el proceso de gestión costero.

Agradecimientos

JACB agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) y al Programa de Becas para Estudios de Posgrado, por la beca otorgada con DNI 1002645 y YETR agradece al Proyecto Semarnat-Conacyt 263401 “Análisis de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{18}\text{O}$ en otolitos de peces marinos presentes en el Área de Protección de Flora y Fauna Laguna de Términos, Campeche: indicadores del cambio climático”.

Referencias

- Bemis, B. E., Spero, H. J., Lea, D. W. y Bijma, J. (2000). Temperature influence on the carbon isotopic composition of *Globigerina bulloides* and *Orbulina universa* (planktonic foraminifera). *Marine Micropaleontology*, 38, 213–228. [https://doi.org/10.1016/S0377-8398\(00\)00006-2](https://doi.org/10.1016/S0377-8398(00)00006-2)
- Campana, S. E. (1999). Chemistry and composition of fish otoliths: pathways, mechanism and application. *Marine Ecology Progress Series*, 188, 263–297. <https://doi.org/10.3354/meps188263>
- Carabias-Lillo, J., Quadri-de la Torre, G. y De la Maza-Elvira, J. (1997). Programa de manejo del Área de Protección de Flora y Fauna “Laguna de Términos”. México D.F.: Instituto Nacional de Ecología.
- Carpenter, K. (2002). Bony fishes, Part 2 (Opisthognathidae to Molidae), sea turtles and marine mammals. En K. Carpenter (Ed.), *The living marine resources of the Western Central Atlantic* (pp. 1375–2127). Rome: FAO.
- Cerón-Gómez, J. A. (2010). *Discriminación de subpoblaciones de la sardina del Pacífico (Sardinops sagax) con base en la temperatura de crianza estimada a partir de valores de $\delta^{18}\text{O}$ de los núcleos de otolitos (Tesis de maestría)*. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. Baja California, México.
- Chavance, P., Flores-Hernández, D., Yáñez-Arancibia, A. y Amezcua-Linares, F. (1984). Ecología, biología y dinámica de las poblaciones de *Bairdiella chrysoura* en la laguna de Términos, sur del golfo de México. (Pisces: Sciaenidae). *Anales del Instituto de Ciencias Del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México*, 11, 126–161.

- Dorantes-Hernández, J. M., Torres-Rojas, Y. E., Aguiñiga-García, S., Ramos-Miranda, J., Trasviña-Carrillo, L. D., Flores-Hernández, D. et al. (2020). Variation of $\delta^{18}\text{O}$ in otoliths of *Stellifer lanceolatus* and *Eucinostomus gula* environmental change indicator in Terminos Lagoon, Mexico. *Marine Environmental Research*, 161, 105135. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2020.105135>
- Emiliani, C., Gartner, S., Lidz, B., Eldridge, K., Elvey, D. K., Huang, T. C. et al. (1975). Paleoclimatological analysis of Late Quaternary cores from the Northeastern Gulf of Mexico. *Science*, 189, 1083–1088. <https://doi.org/10.1126/science.189.4208.1083>
- Fichez, R., Archundia, D., Grenz, C., Douillet, P., Gutiérrez, F., Origel, M. et al. (2016). Global climate change and local watershed management as potential drivers of salinity variation in a tropical coastal lagoon (Laguna de Terminos, Mexico). *Aquatic Sciences*, 79, 219–230. <https://doi.org/10.1007/s00027-016-0492-1>
- González-Coto, J. D. (2014). Bioindicadores como aliados en el monitoreo de condiciones ambientales. *Éxito Empresarial*, 252, 1–4.
- Grammer, G. L., Brown-Peterson, N. J., Peterson, M. S. y Comyns, B. H. (2009). Life history of silver perch *Bairdiella chrysoura* (Lacepède, 1803) in North-Central Gulf of Mexico Estuaries. *Gulf of Mexico Science*, 27, 62–73. <https://doi.org/10.18785/goms.2701.07>
- Grossman, E. L. y Ku, T. L. (1986). Oxygen and carbon isotope fractionation in biogenic aragonite: temperature effects. *Chemical Geology: Isotope Geoscience Section*, 59, 59–74. [https://doi.org/10.1016/0168-9622\(86\)90057-6](https://doi.org/10.1016/0168-9622(86)90057-6)
- Høie, H., Otterlei, E. y Folkvord, A. (2004). Temperature-dependent fractionation of stable oxygen isotopes in otoliths of juvenile cod (*Gadus morhua* L.). *ICES Journal of Marine Science*, 61, 243–251. <https://doi.org/10.1016/j.icesjms.2003.11.006>
- Irola-Sansores, B. N., Torres-Rojas, Y. E. y Cuevas-Jiménez, A. (2021). Spatial temporal behavior of benthic communities in the Terminos Lagoon, Mexico: possible areas of protection and conservation. *JAINA Costas y Mares ante el Cambio Climático*, 3, 55–76. doi 10.26359/52462.0421
- Jackson, A. L., Parnell, A. C., Inger, R. y Bearhop, S. (2011). Comparing isotopic niche widths among and within communities: SIBER - stable isotope Bayesian ellipses in R. *Journal of Animal Ecology*, 80, 595–602.
- Kalish, J. M. (1991). ^{13}C and ^{18}O isotopic disequilibria in fish otoliths: metabolic and kinetic effects. *Marine Ecology Progress Series*, 75, 191–203. <https://doi.org/10.3354/meps075191>
- Kerr, L., Secor, D. y Kraus, R. (2007). Stable isotope ($\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$) and Sr/Ca composition of otoliths as proxies for environmental salinity experienced by an estuarine fish. *Marine Ecology Progress Series*, 349, 245–253. <https://doi.org/10.3354/meps07064>
- Kjerfve, B. (1986). Comparative oceanography of coastal lagoons. En D. A. Wolfe (Ed.) *Estuarine variability* (pp. 63–81). Rockville, Maryland: Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-761890-6.50009-5>
- Kjerfve, B. (1994). Coastal lagoons. En B. Kjerfve (Ed.), *Elsevier oceanography series* (pp. 1–8). College Station, TX: Elsevier Science Publishers.
- Park, R. y Epstein, S. (1961). Metabolic fractionation of ^{13}C and ^{12}C in plants. *Plant Physiology*, 36, 133–138. <https://doi.org/10.1104/pp.36.2.133>
- Peterson, B. J. y Fry, B. (1987). Stable isotopes in ecosystem studies. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 18, 293–320. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.18.110187.001453>
- Ramos-Miranda, J., Flores-Hernández, D., Ayala-Pérez, L. A., Rendón-von Osten, J., Villalobos-Zapata, G. y Sosa-López, A. (2006). *Atlas hidrológico e ictiológico de la Laguna de Términos*. Campeche, Mexico: Universidad Autónoma de Campeche.
- Romo-Curiel, A. E., Herzka, S. H., Sepulveda, C. A., Pérez-Brunius, P., y Aalbers, S. A. (2016). Rearing conditions and habitat use of white seabass (*Atractoscion nobilis*) in the northeastern Pacific based on otolith isotopic composition. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 170, 134–144. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2016.01.016>
- Rowell, K., True, C., Flessa, K. W. y Dettman, D. L. (2008). Peces sin agua: validación y aplicación de $\delta^{18}\text{O}$ en los otolitos de *Totoaba macdonaldi*. *Ciencias Marinas*, 34, 55–68. <https://doi.org/10.7773/cm.v34i1.1256>
- Santos-Santoyo, J. E., Torres-Rojas, Y. E. y Cuevas-Jiménez, A. (2021). Record of changes in the regionalization of Terminos Lagoon, Campeche. *JAINA Costas y Mares ante el Cambio Climático*, 3, 23–40. <https://doi.org/10.26359/52462.0221>
- Sobocinski, K. y Latour, R. (2015). Trophic transfer in seagrass systems: estimating seasonal production of an abundant seagrass fish, *Bairdiella chrysoura*, in lower Chesapeake Bay. *Marine Ecology Progress Series*, 523, 157–174. <https://doi.org/10.3354/meps11163>
- Surge, D. y Walker, K. J. (2005). Oxygen isotope composition of modern and archaeological otoliths from the estuarine hardhead catfish (*Ariopsis felis*) and their potential to record low-latitude climate change. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 228, 179–191. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2005.03.051>
- Torres-Rojas, Y. E., Flores-Hernández, D., Gómez-Críollo, F., Aguiñiga-García, S., Sánchez-González, A., Concepción-Pérez, C. et al. (2017). Isótopos estables y diversidad de peces en Laguna de Términos: indicadores del cambio climático. En Semarnat-Conacyt (Eds.), *Primer Encuentro Científico y Técnico. Fondo Sectorial para la Investigación Ambiental* (pp. 151–158). México D.F.: Semarnat/ Conacyt.
- Trasviña-Carrillo, L. D., Hernández-Herrera, A., Torres-Rojas, Y. E., Galván-Magaña, F., Sánchez-González, A. y Aguiñiga-García, S. (2018). Spatial and trophic preferences of jumbo squid *Dosidicus gigas* (D'Orbigny, 1835) in the central Gulf of California: ecological inferences using stable isotopes. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 32, 1225–1236. <https://doi.org/10.1002/rcm.8147>
- Villalobos-Zapata, G. J. (2015). Conservación y manejo del Área de Protección de Flora y Fauna: (1994–2015). En J. Ramos y G. J. Villalobos (Eds.), *Aspectos socioambientales de la*

- región de la laguna de Términos, Campeche* (pp. 1–20). Campeche: Universidad Autónoma de Campeche.
- Villegier, S., Ramos, J., Flores, D. y Mouillot, D. (2010). Contrasted changes in taxonomic versus functional diversity of tropical fish communities after habitat degradation. *Ecological Applications*, 20, 1512–1522. <https://doi.org/10.1890/09-1310.1>
- Volpedo, A. V. y Vaz-dos-Santos, A. M. (2015). *Métodos de estudios con otolitos: principios y aplicaciones*. Buenos Aires: Programa de Internacionalización de la Educación Superior y Cooperación Internacional (PIESCI).