



Universidad Veracruzana

Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias

Región Poza Rica-Tuxpan

Maestría en Manejo de Ecosistemas Marinos y Costeros

## **Detección acústica del cachalote *Physeter macrocephalus* y medición del ruido ambiental en el Golfo de México sur**

Tesis para obtener el grado de Maestra en  
Manejo de Ecosistemas Marinos y Costeros

**Presenta:**  
**Biól. Mar. Itzel Guadalupe Pérez Carballo**

Director:  
Dr. Arturo Serrano Solis  
Codirector:  
Dr. Joel Ortega Ortiz

Agosto de 2023

“Lis de Veracruz: Arte, Ciencia, Luz”



Universidad Veracruzana

Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias  
Región Poza Rica -Tuxpan

Maestría en Manejo de Ecosistemas Marinos y Costeros

*Detección acústica del cachalote *Physeter macrocephalus* y medición del ruido ambiental en el Golfo de México sur*

Tesis para obtener el grado de Maestra en  
Manejo de Ecosistemas Marinos y Costeros

Presenta:  
Itzel Guadalupe Pérez Carballo

Director:  
Dr. Arturo Serrano Solis

Codirector:  
Dr. Joel Gabriel Ortega Ortiz

Xalapa Veracruz a 20 de febrero de 2023.  
Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias.  
Región Poza- Rica-Tuxpan.

**Dr. Agustín de Jesús Basáñez Muñoz**  
Coordinador  
**Maestría en Manejo de Ecosistemas**  
**Marinos y Costeros**  
**Universidad Veracruzana**  
Presente

Por medio de la presente me dirijo a Ud. para dar conocimiento de que el presente proyecto titulado **“Detección acústica del cachalote *Physeter macrocephalus* y medición del ruido ambiental en el Golfo de México sur”** realizado por la C. Biol. Mar. Itzel Guadalupe Pérez Carballo, con matrícula S20000131, bajo la dirección del Dr. Arturo Serrano Solís y la codirección del Dr. Joel Gabriel Ortega Ortiz, ha sido aprobado y aceptado para poder llevar a cabo la solicitud de dictamen de liberación del documento.



Dr. Arturo Serrano Solis.



GOBIERNO DE  
MÉXICO



CONAHCYT  
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES  
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS



Chetumal 29 de enero de 2024

Maestría en Manejo de Ecosistemas Marinos y Costeros  
Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias  
Región Poza Rica-Tuxpan  
Universidad Veracruzana  
México

Ref: Carta de liberación de tesis de maestría

Certifico que leí y apruebo el informe final de tesis de maestría de la estudiante Itzel Guadalupe Pérez Carballo titulado: "DETECCIÓN ACÚSTICA DEL CACHALOTE *Physeter macrocephalus* Y MEDICIÓN DEL RUIDO AMBIENTAL EN EL GOLFO DE MEXICO SUR", para proceder con los trámites pertinentes que el posgrado requiera.

Atentamente,

Dra. Delma Nataly Castelblanco Martínez  
*Biología y Conservación de Mamíferos Acuáticos*  
Departamento de Sistemática y Ecología Acuática  
El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR), Unidad Chetumal  
Av. Centenario km 5.5. Col. Pacto Obrero Campesino  
C.P. 77014, Chetumal, Quintana Roo, MÉXICO

Unidad Chetumal. Av. Centenario km. 5.5, C. P. 77014, Chetumal, Quintana Roo  
Tel: 983 835 0440. [www.ecosur.mx](http://www.ecosur.mx)



A 23 de agosto de 2023, Tuxpan de Rdz. Cano, Veracruz

**A QUIEN CORRESPONDA**

**Maestría en Manejo de Ecosistemas Marinos y Costeros**

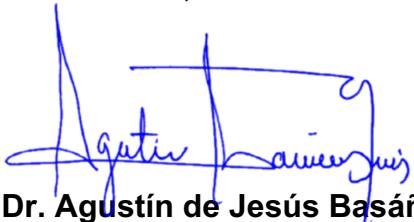
**Universidad Veracruzana**

**PRESENTE**

Certifico que leí y apruebo la tesis de maestría de la Biol. Mar. Itzel Guadalupe Pérez

Carballo titulado: **“Detección acústica del cachalote *Physeter macrocephalus* y medición del ruido ambiental en el golfo de México sur”**, para ser presentada en el examen de grado.

Atentamente,



**Dr. Agustín de Jesús Basáñez Muñoz**

**Docente de Tiempo Completo Titular C**

**Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias**

**Universidad Veracruzana**



Maestría en Manejo de Ecosistemas Marinos y Costeros  
Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias  
Región Poza Rica-Tuxpan  
Universidad Veracruzana  
México

Institut für Terrestrische und  
Aquatische Wildtierforschung – ITAW

Researcher:  
**Dr. Isabel Cristina Avila Jiménez,**  
PhD Biologist  
Werftstraße 6  
25761 Büsum, Germany

Tel. +49 511-856-81 77  
Isabel.Cristina.Avila.Jimenez@tiho-  
hannover.de

**Ref:** Informe final de tesis de maestría “DETECCIÓN ACÚSTICA DEL CACHALOTE *Physeter macrocephalus* Y MEDICIÓN DEL RUIDO AMBIENTAL EN EL GOLFO DE MEXICO SUR”.

Certifico que leí el informe final de la tesis de maestría titulada „DETECCIÓN ACÚSTICA DEL CACHALOTE *Physeter macrocephalus* Y MEDICIÓN DEL RUIDO AMBIENTAL EN EL GOLFO DE MEXICO SUR” de la estudiante Itzel Guadalupe Pérez Carballo. Felicito a la estudiante Pérez por su trabajo de maestría y su esfuerzo, pero considero que este documento debe ser mejorado y volverse a someter para mi aprobación. Anexo el informe con mis sugerencias y recomendaciones.

Cordialmente,

*Isabel Cristina Avila J.*  
Dr. Isabel Cristina Avila Jiménez

## **Dedicatoria**

Quiero dedicar este trabajo de grado a las personas más importantes en mi formación como persona y profesionista, Nona, Eder y Evaristo gracias por estar conmigo en todo momento y apoyarme sin dudarlo.

También quiero dedicarme esta tesis, por todo el esfuerzo y por no rendirme a pesar de tener muchas razones para hacerlo. Gracias Itzel por seguir adelante.

Esto es para ustedes.

## **Agradecimientos**

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACYT por brindarme la oportunidad de obtener la beca nacional de posgrado para maestría con número 1 082162, con la cual pude llegar a los objetivos marcados durante estos dos años de estudio profesionalizante. De igual manera, agradezco a la Universidad Veracruzana por ser mi alma mater y permitirme desarrollarme en la ciencia. Este trabajo de investigación no hubiera sido posible sin la intervención directa de la NOAA Fisheries, CIMAS, la University of Miami, Scripps Institution of Oceanography, University of California San Diego y el National Marine Fisheries Service (NMSF) entre otras instituciones involucradas en el proyecto de Gulf Listen Long-Term Investigations into Soundscapes, Trends, Ecosystems and Noise.

De manera personal quiero agradecer enormemente a mis directores de tesis los Doctores. Arturo Serrano Solis y Joel Ortega Ortiz, por brindarme la oportunidad de llevar a cabo esta investigación. Además, de darme la orientación y los conocimientos para poder seguir en este camino de la ciencia marina, los admiro mucho. También quiero agradecer a otros científicos increíbles que compartieron todo el conocimiento posible conmigo durante la pasantía y el trabajo de campo. Especialmente a la Doctora Kaitlin Frasier y Amanda Debich, quienes me capacitaron en Triton para comprender los conceptos básicos de la investigación acústica. También a la Doctora Melissa Soldevila que apoyó todo el proceso e hizo posible este proyecto, al Doctor John Hildelbrand por abrirme las puertas del SIO y brindarme la oportunidad de conocer diversos estudiantes de posgrado, como Natalie Posdaljian quien fue pieza clave en la comprensión del método, gracias Nat. Muchas gracias a mis amigos y colegas, Eva Hidalgo-Pla, Kieran, Vanessa, Bruce, John y Kristen y a Gaby Páez por todo el apoyo y motivación en este tiempo.

De igual manera quiero agradecer a mis maestros aquí en la UV, primordialmente al coordinador de la Maestría, el Dr. Agustín de Jesús Basáñez Muñoz, por la paciencia y el apoyo durante nuestro periodo como estudiantes de pandemia. A mi tutor el Dr. Eduardo Zarza Meza, a mi comité revisor, la Dra. Isabel Cristina Ávila Jiménez y la Dra. Delma Nataly Castelblanco Martínez, gracias por su apoyo y recomendaciones. Gracias a mi familia que me acompañaron en estos dos años de cambios y procesos, así como a mis amigos que me mantuvieron alegre ante las situaciones de estrés y ansiedad.

# Índice

<b>Dedicatoria</b> .....	i
<b>Agradecimientos</b> .....	ii
<b>Índice de figuras</b> .....	vi
<b>Índice de cuadros</b> .....	vii
<b>Resumen</b> .....	viii
<b>I. Introducción</b> .....	1
<b>II. Antecedentes</b> .....	5
2.1 Conceptos básicos de acústica y bioacústica de cetáceos .....	5
2.2 Monitoreo acústico pasivo (PAM) y el empleo de HARP .....	7
2.3 Estudios de Mamíferos Marinos en el Golfo de México .....	9
2.4 <i>Physeter macrocephalus</i> en el Golfo de México.....	12
2.5 El Estudio del Ruido Ambiental en el Golfo de México.....	16
<b>III. Objetivos</b> .....	18
3.1 Objetivo General .....	18
3.2 Objetivos particulares.....	18
<b>IV. Hipótesis</b> .....	18
<b>V. Área de Estudio</b> .....	19
5.1 Golfo de México .....	19
5.1.1 Golfo de México norte (GOMn).....	19
5.1.2 Golfo de México sur (GOMs) .....	20
5.2 Cordilleras Mexicanas .....	21
5.3 Escarpe de Campeche .....	21
<b>VI. Material y Métodos</b> .....	23
6.1 Recolección de datos.....	23
6.2 Detección de clics del cachalote.....	24

6.3 Análisis de sonidos.....	26
6.4 Análisis de las detecciones y estadístico.....	27
6.5 Ruido Ambiental .....	28
6. Detector de <i>airguns</i> .....	28
<b>VII. Resultados.....</b>	<b>29</b>
7.1 <i>Physeter macrocephalus</i> .....	29
7.1.1 Determinación del patrón diurno y ocurrencia acústica de cachalote en las Cordilleras Mexicanas .....	29
7.1.2 Estacionalidad en las Cordilleras Mexicanas .....	31
7.1.3 Ocurrencia acústica semanal y diaria en las Cordilleras Mexicanas .....	32
7.1.4 Determinación del patrón diurno y ocurrencia acústica de cachalote en el Escarpe de Campeche.....	34
7.1.5 Estacionalidad en el Escarpe de Campeche.....	36
7.1.6 Ocurrencia acústica semanal y diaria en el Escarpe de Campeche .....	37
7.1.7 Comparación de la actividad acústica entre las Cordilleras Mexicanas y el Escarpe de Campeche.....	38
7.2 Ruido Ambiental de baja frecuencia (10 Hz – 10 kHz).....	39
7.2.1 Ruido ambiental en las Cordilleras Mexicanas .....	39
7.2.2 Ruido Ambiental en el Escarpe de Campeche.....	41
7.3 Comparación entre sitios .....	43
<b>VIII. Discusión.....</b>	<b>45</b>
8.1 Determinación acústica y estacionalidad de cachalotes en las Cordilleras Mexicanas y el Escarpe de Campeche .....	45
8.2 Ruido ambiental de baja frecuencia en las Cordilleras Mexicanas y el Escarpe de Campeche y la ocurrencia reportada del cachalote .....	49
<b>IX. Conclusiones .....</b>	<b>53</b>

<b>9.1 la ocurrencia acústica de cachalotes en “las Cordilleras Mexicanas” y “el Escarpe de Campeche” dentro del GOMs .....</b>	<b>53</b>
<b>9.2 Identificar la estacionalidad en la ocurrencia acústica de cachalotes en el GOMs durante el periodo 2020-2021.....</b>	<b>53</b>
<b>9.3 Identificar las fuentes principales del ruido ambiental y medir las variaciones a escala temporal (diaria) del mismo en “las Cordilleras Mexicanas” y “el Escarpe de Campeche”. .....</b>	<b>53</b>
<b>9.4 Consideraciones y recomendaciones finales.....</b>	<b>54</b>
<b>X. Aplicación práctica.....</b>	<b>55</b>
<b>XI. Referencias .....</b>	<b>58</b>

## Índice de figuras

Figura 1. Mapa del área de estudio .....	23
Figura 2. Ventanas de trabajo de Triton.....	26
Figura 3. Interfaz de DetEdit. Patrón diurno en las Cordilleras Mexicanas.....	28
Figura 4. Patrón diurno de ocurrencia de clics cachalotes en las Cordilleras.....	31
Figura 5. Patrón diurno en las Cordilleras Mexicanas.....	32
Figura 6. Estacionalidad en la ocurrencia acústica de cachalotes las Cordilleras Mexicanas .....	33
Figura 7. Ocurrencia acústica semanal de cachalote en las Cordilleras Mexicanas.....	34
Figura 8. Ocurrencia acústica diaria de cachalote en las Cordilleras Mexicanas.....	34
Figura 9. Patrón diurno de ocurrencia acústica de cachalote en el Escarpe de Campeche...	36
Figura 10. Estacionalidad de la ocurrencia acústica de cachalote en el Escarpe de Campeche.....	37
Figura 11. Proporción de horas con presencia acústica de cachalote en el Escarpe de Campeche. ....	39
Figura 12. Proporción de horas por día con presencia acústica de cachalote en el Escarpe de Campeche.....	39
Figura 13. Comparación de la actividad acústica de los cachalotes en las Cordilleras Mexicanas y el Escarpe de Campeche .....	40
Figura 14. Detecciones de <i>airguns</i> por día en las Cordilleras Mexicanas .....	41
Figura 15. Amplitud de los <i>airguns</i> detectados en las Cordilleras Mexicanas .....	41
Figura 16. Ruido de baja frecuencia diario en las Cordilleras Mexicanas. ....	42
Figura 17. Detecciones de <i>airguns</i> por día en el Escarpe de Campeche.....	43
Figura 18. Ruido de baja frecuencia diario en el Escarpe de Campeche.....	43

## **Índice de cuadros**

Cuadro 1. Promedio de clics por estación.....	32
Cuadro 2. Actividad acústica promedio semanal.....	33
Cuadro 3. Promedio de clics por estación.....	37
Cuadro 4. Comparación entre sitios del GOMs .....	45
Cuadro 5. Comparación entre sitios del GOMs y GOMn .....	53

## Resumen

El Golfo de México se caracteriza por poseer una gran diversidad biológica y ecosistémica, dentro de esta se encuentra el *Physeter macrocephalus* o cachalote, que cumple con un importante rol en la red trófica y por esta razón su estudio es primordial para conocer el estado de salud del ecosistema. Los estudios acústicos de esta especie en la parte sur del Golfo son nulos. Además, otro aspecto poco explorado en esta zona es el paisaje sonoro, el cual es relevante estudiar, ya que ayuda a conocer las afectaciones que diversas fuentes de ruido ambiental pueden provocar en esta especie. Por lo que, el objetivo de esta investigación es analizar la ocurrencia acústica de los cachalotes y medir las variaciones del ruido ambiental de baja frecuencia (10 Hz – 10 kHz) en el Golfo de México sur (GOMs) a través del monitoreo acústico pasivo utilizando paquetes acústicos de alta frecuencia (HARPs). Se analizaron los datos acústicos recopilados de dos sitios: “Las Cordilleras Mexicanas y el Escarpe de Campeche” durante el periodo 2020-2021. Para ello se usaron diferentes detectores automáticos a través de MATLAB, con el motivo de identificar las señales acústicas del cachalote (“clics”) y el ruido ambiental. Al mismo tiempo, se realizaron análisis estadísticos para encontrar diferencias estacionales en la actividad acústica de los cachalotes dentro de estos dos sitios. Los resultados de estos estudios mostraron que las Cordilleras Mexicanas son la zona con mayor actividad acústica en comparación con el Escarpe de Campeche. No se observa ningún patrón estacional en ambos sitios, el análisis de varianzas entre las estaciones de cada sitio, para identificar estacionalidad en la actividad acústica de los cachalotes, demostró que en las Cordilleras Mexicanas el valor de  $p$  fue  $p = 0.495$ , mientras que para el Escarpe de Campeche fue de  $p = 0.219$ . Para ningún sitio se reportan diferencias significativas entre estaciones. En cuanto al ruido ambiental, se estudió la presencia de los *airguns*, dispositivos con los cuales se generan ondas de sonido para buscar hidrocarburos en los océanos, para ambas zonas los niveles de espectro van de los 100 a 110 dB re 1  $\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ . La información que aporta este trabajo permite sentar las bases para la investigación de factores que intervienen con la ocurrencia de los cachalotes y las posibles relaciones que el ruido tiene sobre ellos. Ya que, ambos sitios de estudio presentan actividad acústica todo el año de monitoreo, así como una marcada presencia de ruido de *airguns*.

Palabras clave: monitoreo acústico pasivo, cetáceos, HARP, *airguns*.

## I. Introducción

El Golfo de México GOM (como se abreviará de aquí en adelante) es una cuenca semicerrada en la que habitan alrededor de 15,400 especies marinas, de las cuales el 10 % son endémicas, de la misma manera se ha reportado la presencia de 21 especies de cetáceos. La ballena de Rice (*Balaenoptera ricei*) pertenece al Parvorden Mysticeti (ballenas barbadas), es la única especie residente del Golfo de México norte GOMn (como se abreviará de aquí en adelante) (Rosel *et al.*, 2021). Sin embargo, mediante censos visuales, se han reportado la presencia ocasional de seis especies de misticetos: *Balaenoptera musculus* (ballena azul); *Eubalaena glacialis* (ballena franca del norte); *B. physalus* (rorcual común); *B. borealis* (rorcual del norte), *B. acutorostrata* (ballena minke) y *Megaptera novaeangliae* (ballena jorobada) (Medrano-González., 2006; Martínez-Serrano *et al.*, 2011; Ramírez-León *et al.*, 2020; Vázquez -Castán *et al.*, 2009).

En el GOM también se han registrado 20 especies que pertenecen al parvorden Odontoceti (delfines dentados) entre los que se encuentran *Physeter macrocephalus* (cachalote); *Kogia breviceps* (cachalote pigmeo); *K. sima* (cachalote enano); *Orcinus orca* (orca); *Pseudorca crassidens* (orca falsa); *Feresa attenuata* (orca pigmea); *Tursiops truncatus* (delfín nariz de botella o tonina); *Delphinus delphis* (delfín común); *D. capensis* (delfín común de rostro largo); *Globicephala macrorhynchus* (calderón de aletas cortas); *Peponocephala electra* (calderón pigmeo); *Lagenodelphis hosei* (delfín de Fraser); *Grampus griseus* (delfín de Risso); *Stenella clymene* (delfín clymene); *Stenella coeruleoalba* (delfín listado); *Stenella frontalis* (delfín moteado del Atlántico); *Stenella attenuata* (delfín moteado pantropical) *Stenella longirostris* (delfín tornillo) y *Steno bredanensis* (delfín de dientes rugosos) (Frasier *et al.*, 2016; Heckel *et al.*, 2018; Marques *et al.*, 2009; Ortega-Ortiz *et al.*, 2004).

El GOM se divide en dos ecorregiones marinas reconocidas como Golfo de México norte: GOMn y Golfo de México sur: GOMs (como se abreviará de aquí en adelante). La primera incluye las zonas costeras de Alabama, Misisipi, Luisiana, Texas y el norte de Tamaulipas, esta ecorregión se extiende desde la bahía de Gullivan, Florida hasta el norte del Río Pánuco, Tamaulipas (Wilkinson *et al.*, 2009). La segunda ecorregión incluye las costas de Veracruz, Tabasco, Campeche y Yucatán, la zona profunda del talud en Florida y el abanico de Misisipi (Wilkinson *et al.*, 2009). El estudio de cetáceos dentro de estas

ecorregiones es vasto, pero ha estado orientado hacia especies de hábitos costeros en los que se han utilizado técnicas de monitoreo *in situ* como la foto-identificación, avistamientos visuales o el seguimiento satelital (Ramírez-León *et al.*, 2020).

Por otra parte, el número de investigaciones de cetáceos en el GOMn es mayor que los estudios actuales del GOMs. El Servicio Nacional de Pesquerías Marinas y el Servicio Estadounidense de Vida Salvaje y Peces publican cada año diversos reportes sobre el tamaño de las poblaciones de cetáceos para GOMn y el Atlántico Norte (Ramírez - León *et al.*, 2020; Würsig, 2017). Este hecho ha ayudado a generar información actualizada y ha sido motivo para el desarrollo de estrategias que ayuden a conocer más sobre los cetáceos que habitan esta ecorregión (Wilkinson *et al.*, 2009).

Para el GOMs se cuenta con varias publicaciones de cetáceos, pero gran parte de ellas se enfocan en especies de la familia Delphinidae y en los manatíes (*Trichechus manatus manatus*) (Becerril-Gómez, 2020; García-Vital *et al.*, 2015; Martínez-Serrano *et al.*, 2011; Ramírez-León *et al.*, 2020; Vázquez-Castán *et al.*, 2007; Vázquez-Castán *et al.*, 2009; Wilkinson *et al.*, 2009). Aunque el estudio de los mamíferos marinos en esta zona se remonta a 1952, solo se han registrado 3,941 individuos pertenecientes a 16 especies hasta el 2018, de los cuales 28 pertenecen al odontoceto más grande y común que circula dentro del GOM, es decir, el cachalote (*Physeter macrocephalus*) (Ramírez - León *et al.*, 2020). Esta especie es de hábitos profundos, la mayor parte del tiempo permanece a profundidades mayores a los 200 m principalmente por la búsqueda de alimento, lo que dificulta su registro en los censos visuales.

El cachalote, al ser un depredador, juega un papel importante en el estado de salud de los ecosistemas marinos, ya que mantiene el equilibrio de la cadena trófica, además de contribuir en el ciclo de nutrientes, sus excretas ayudan en la fijación del carbono, provocando la estimulación del crecimiento del fitoplancton al favorecer la productividad primaria (Pearson *et al.*, 2022). Los cachalotes se encuentran catalogados en peligro de extinción por la ESA (Endangered Species Act) de 1977 en las aguas del territorio de EUA (Read y Wade., 2000) y “Sujetas a Protección especial” por la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010 para la “Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-lista de especies en riesgo.” (D.O.F, 2010). En cuanto a su clasificación mundial,

la Lista Roja de la IUCN categoriza a los cachalotes como “vulnerables” (Taylor *et al.*, 2019). Por lo que, estudiarlos y protegerlos es necesario.

Es imprescindible resaltar que los ecosistemas marinos y costeros, así como la flora y fauna que habitan en ellos, se enfrentan a diversas amenazas, un ejemplo de esto es la explosión de la plataforma Deepwater Horizon Oil Spill DWH (como se abreviará de aquí en adelante), ocurrida en 2010, la cual desencadenó el derrame de petróleo del pozo Macondo dentro del GOMn con ubicación geográfica de 28°44'17"N 88°21'58" O. Este evento es considerado el desastre industrial más grave de los últimos años dentro del GOM, ya que se registró un total de 3,19 millones de barriles derramados (Würsing, 2017). Tras dicho suceso, diversas poblaciones de cetáceos se vieron expuestas a la inhalación, aspiración e ingestión de químicos derivados del petróleo, ocasionando daños en su salud (Takeshita *et al.*, 2017).

Existen otras amenazas relacionadas con la actividad industrial, como el incremento del tráfico de navíos y con ello el aumento de accidentes. En dichos accidentes, los cetáceos pueden sufrir desde pequeñas heridas, contusiones, hasta lesiones más graves, como la amputación de extremidades, que pueden llevarlos a la muerte (Ritter y Panigada, 2018). También es importante mencionar las amenazas generadas por actividades antrópicas tales como la sobre pesca, la caza y la contaminación (Farmer *et al.*, 2018; Sousa *et al.*, 2019). Asimismo, se han registrado cambios en la distribución geográfica, los movimientos migratorios, las etapas reproductivas y el comportamiento de las especies (Sousa *et al.*, 2019), lo anterior debido a la crisis por el calentamiento global (aumento de la temperatura superficial global) y el cambio climático (cambios en el estado del clima que persisten por más de 30 años) (IPCC, 2018). Estas situaciones han impulsado así la búsqueda de información actualizada, con el fin de generar estrategias para la conservación de estas especies (Torreblanca-Fernández, 2018).

Cabe resaltar que las investigaciones sobre la ecología de los cetáceos, realizadas en el GOM, son primordiales por ser la base para nuevos trabajos que pueden desarrollarse con monitoreo acústico pasivo (PAM por sus siglas en inglés). Si bien en el GOMs esta herramienta de monitoreo ha sido poco explorada, se ha comprobado que es eficiente para el estudio de los cetáceos (Zimmer, 2011). PAM es una de las metodologías de monitoreo que ofrece una amplia recopilación de información, con la premisa de generar bajo impacto de intervención antrópica. Existen diversos dispositivos con los que se puede aplicar PAM, por

ejemplo, los paquetes de grabación acústica de alta frecuencia (HARPs), son dispositivos de grabación capaces de recopilar los sonidos que existen en el fondo marino y son efectivos para conocer mejor el comportamiento, patrones de migración o distribución a diferentes escalas de tiempo de los cetáceos (Brownin *et al.*, 2017; Zimmer, 2011).

A partir del derrame de petróleo DWH en 2010, incrementó el interés científico en conocer la estructura poblacional de diversas especies marinas. A partir del DWH el empleo de PAM como herramienta principal, en conjunto con la caracterización del paisaje sonoro, ha permitido observar los cambios de distribución y abundancia dentro de las aguas del GOMn. Considerando las ventajas que PAM ofrece en este trabajo de grado se presenta por primera vez el uso de HARPs para describir la ocurrencia acústica del cachalote y medir el ruido ambiental en las Cordilleras Mexicanas y el Escarpe Campeche. Ambas regiones marinas pertenecen a la red de ubicaciones monitoreadas en el proyecto colaborativo *Gulf Listen Long-Term Investigations Into Soundscapes, Trends, Ecosystems and Noise* de la campaña de monitoreo de 2020 -2021.

Los dos sitios de estudio presentados en este trabajo son provincias geográficas dentro del GOMs, las descripciones existentes de estas áreas han sido resultado de exploraciones geológicas. Estas son consideradas zonas de extracción y exploración de petróleo y gas natural (Yarbuah *et al.*, 2018). Por lo que, el tráfico de embarcaciones y la actividad industrial que se desarrolla aquí, genera ruido que podría generar contaminación auditiva, perturbando estas áreas. En cuanto a las investigaciones de cetáceos en estas zonas, no hay reportes. Aún cuando se han estudiado especies costeras como *Tursiops truncatus*, *Stenella frontalis*, *Stenella attenuata* y otras pertenecientes a la familia Delphinidae, alrededor de las costas del GOMs, no hay reportes de investigaciones recientes en especies de hábitos oceánicos y con perfiles de buceo profundos y prolongados como es el caso de los Cachalotes (Ramírez-León, 2020). Considerando lo anterior, el objetivo de este estudio fue analizar la ocurrencia del *Physeter macrocephalus* y medir las variaciones del ruido ambiental de baja frecuencia (10 Hz – 10 kHz) en el Golfo de México sur.

## **II. Antecedentes**

### **2.1 Conceptos básicos de acústica y bioacústica de cetáceos**

La comunicación se define como el proceso en el que el emisor envía una señal y esta puede alterar el comportamiento de respuesta a dicha señal (Dudzinski y Gregg, 2018). Dentro del ambiente oceánico existen diversos tipos de comunicación, por ejemplo, la visual, la táctil y la química, las cuales se producen a través de diferentes procesos anatómicos y fisiológicos, (Dudzinski y Gregg, 2018), así también existe un tipo de comunicación que ocurre a través de cientos de kilómetros de distancia, esta se da principalmente mediante sonidos (Thomson y Richardson, 1995).

El término sonido se define como la propagación de cualquier tipo de perturbación mecánica en forma de ondas sonoras (Tejero-Caballo, 2020). El entorno marino es adecuado para la propagación del sonido, la velocidad de los sonidos en el agua marina es hasta cinco veces mayor que la velocidad a la que viajan en el aire. Es decir que la velocidad en el agua es de 1450 m/s y 1540 m/s, aunque esta depende directamente de factores físico-químicos como la salinidad, presión hidrostática y la temperatura (Dovgan, 2020). La dispersión de las ondas está estrechamente relacionada con la Segunda Ley de Newton “El cambio de movimiento es directamente proporcional a la fuerza motriz impresa y ocurre en línea recta, a lo largo de la cual la fuerza se imprime” por lo que existe transmisión de energía mas no de materia (Zimmer, 2011).

Las propiedades más importantes del sonido son la longitud de onda, la amplitud (A), el periodo y la frecuencia. La primera se refiere a la longitud de un ciclo completo de dicha onda, la amplitud está relacionada con la intensidad del sonido y mide la máxima desviación de la onda con respecto a la media sobre la presión del aire o agua. El periodo mide los segundos en que se completa un ciclo entero, un ciclo a su vez es el recorrido que hace el sonido en una onda. La amplitud sumada con la fase, indica el punto en el ciclo en el que se encuentra una onda, por otra parte, la frecuencia indica la cantidad de períodos completados por unidad de tiempo. La unidad de medida del sonido son los Hercios Hz o kilo- Hercios kHz (1 Hz es una oscilación o ciclo por segundo, 1 kHz es mil oscilaciones por segundo; 1 kHz=1000 Hz) (Jaramillo, 2007 y Tejero-Caballo, 2020).

Los cetáceos generan una gran variedad de sonidos, todos ellos con diferentes propósitos, de los cuales se describen: gemidos, gruñidos, chillidos, golpes, *gunshots*, crujidos, zumbidos, clics, pulsos, llamadas bajas y altas, trinquetes, trompetazos, series de pulsos, etc. (Zimmer, 2011). Estos sonidos son esenciales para la comunicación, entre miembros de la misma especie o entre diferentes especies, para avisar sobre la presencia de peligros, la existencia de comida o para dar a conocer su posición, identidad y estado reproductivo (Thomson y Richardson, 1995).

En los miembros del parvorden Mysticeti los sonidos son generados por el sistema respiratorio superior e inferior, la laringe, y una estructura en forma de “U” denominada “*U-fold*”. Se ha observado que esta estructura (*U-fold*) se encuentra bordeando la entrada del saco laríngeo y puede funcionar como una caja de resonancia para el sonido (Frankel, 2018 y Rama-Torres, 2020). Los Mysticetos generan emisiones acústicas de baja frecuencia e infrasónicas (menos de 20 Hz) así mismo poseen la capacidad de escuchar sonidos dentro del mismo rango (Park *et al.*, 2017). Se ha descrito que los sonidos de los misticetos ayudan a sincronizar sus respuestas biológicas y de comportamiento (Dudzinski y Gregg, 2018).

En contraste, los Odontocetos poseen la capacidad de generar y escuchar sonidos de altas frecuencias (más de 20 000 Hz). Algunos sonidos que emiten estos mamíferos marinos se realizan mediante ecolocalización, proceso que hace uso de los ecos que emite el animal con el objetivo de estimar la ubicación, el alcance, el ángulo y la dirección de algún objeto (Whitlow, 2018; Zimmer, 2011). Los sonidos de ecolocalización se distinguen por alcanzar tanto bajas como altas frecuencias de hasta 150 kHz y se denominan “clics”. Otros sonidos son los silbidos, cuyas frecuencias varían de entre 2-15 kHz y se ha sugerido que son las principales señales de comunicación entre odontocetos, además de otras emisiones de pulsos explosivos denominados “ladridos, graznidos, chirridos, zumbidos y gemidos” que poseen funciones sociales (Dovgan, 2020; Dudzinski y Gregg, 2018; Zimmer, 2011).

La ecolocalización en los odontocetos ocurre a nivel del sistema respiratorio, en el cual se encuentran los pasajes nasales superiores que a su vez contienen a los labios fónicos (Rama-Torres, 2020). Estos labios en conjunto con la bursa dorsal conforman el complejo MLDB (recibe ese acrónimo por los nombres en inglés de estas estructuras “*monkey lips*” y “*dorsal bursae*”). La bursa dorsal está asociada con el melón, órgano de contenido graso cuya principal función es ser una lente acústica, ya que enfoca y acopla los sonidos que emiten los odontocetos dirigiéndolos hacia el agua (Frankel, 2018 y Rama-Torres, 2020). El

órgano homólogo al melón en los *Physeter macrocephalus*, recibe el nombre de órgano espermaceti, cumpliendo la misma función del melón (Fernández-Casado, 2000). En el apartado 2.4 se retoman las características acústicas de los cachalotes y su presencia en el GOM.

## 2.2 Monitoreo acústico pasivo (PAM) y el empleo de HARP

El Monitoreo Acústico Pasivo o PAM es una herramienta útil para conocer las señales acústicas de diversas especies. Actualmente, es una de las metodologías más empleadas para el estudio de mamíferos marinos, ya que el análisis de la acústica es una de las herramientas más viables para estudiar especies de hábitos profundos, como es el caso del odontoceto *Physeter macrocephalus* (Browning *et al.*, 2017; Wiggins y Hildebrand; 2007). En los últimos años el empleo gradual de técnicas de monitoreo acústico pasivo PAM, tanto a largo como a corto plazo, ha ayudado a conocer y entender las dinámicas de población, las comunidades, la diversidad, las tendencias estacionales y las tendencias de migración, así como la abundancia relativa y la estimación del tamaño de la población de los mamíferos marinos. PAM también permite comprender los comportamientos de alimentación, comunicación y apareamiento, así como obtener información sobre especies crípticas o de las que no se tienen suficientes datos. Además de ayudar a generar planes de mitigación, para reducir los efectos negativos de las actividades humanas como el tráfico de barcos, sonares militares y la exploración marina (Ackleh *et al.*, 2012; Brownin *et al.*, 2017; Merkens *et al.*, 2018; Soldevilla *et al.*, 2019; Ward *et al.*, 2012; Zimmer, 2011).

Un ejemplo del empleo de PAM es el monitoreo del impacto de eventos antrópicos sobre los ecosistemas marinos. Se hicieron estudios comparando la densidad de cachalotes antes (julio 6-14, 2007) y después (septiembre-octubre 2010) del derrame de petróleo DWH en el GOMn. Estos demuestran que la detección promedio de clics por día de *P. macrocephalus*, en los sitios cercanos al derrame de petróleo (en la zona norte, a 14.48 km del derrame), disminuyó un 52.7 % y en los sitios alejados (hacia el sur a 40.23 km de distancia) aumentó un 39.4 % (Ackleh *et al.*, 2012). Esta disminución y aumento de actividad acústica se ve reflejada en la estimación de la densidad de los cachalotes, pues en los sitios alejados al derrame (los sitios más sureños) incrementó de 1.5 individuos /1000 km<sup>2</sup> en 2007 hasta 3 individuos /1000 km<sup>2</sup> en 2010. La reubicación de esta población fue, posiblemente,

a causa de la contaminación generada por el derrame y al incremento en el tráfico de buques de limpieza e investigación debido al incidente (Ackleh *et al.*, 2012).

Otro ejemplo utilizando PAM es la investigación enfocada en encontrar la estructura social de los cachalotes basándose en las vocalizaciones. Existen series de clics que se repiten varias veces (series de 3 a 20 clics que duran de 0.2 – 2 s), a estas series se les denomina cudas. Se ha reportado que la función de las cudas es establecer comunicación entre miembros de una unidad social o clanes (Antunes *et al.*, 2011; Watkins y Schevill, 1977). El estudio del comportamiento social de los cachalotes se ha llevado a cabo analizando la composición de las cudas y los intervalos entre clics de diferentes grupos de cachalotes en la zona norte del Océano Atlántico sur, esto ha permitido la clasificación de dos clanes: el clan norte con cudas representadas por 5 clics separados y el clan sur dominado por cudas de 10-13 clics, demostrando que cada clan tiene su propia identidad, esta investigación abre paso a un mejor entendimiento en el comportamiento social de los cachalotes (Amorim *et al.*, 2020; Whitehead, 2018). El éxito en la implementación del PAM depende mucho de la aplicación o las circunstancias y de las capacidades del instrumento que se esté utilizando para aislar las señales acústicas emitidas por el objeto de estudio del resto de los sonidos existentes (André *et al.*, 2011).

Existen diferentes modelos y tipos de grabadores acústicos remotos aptos para el medio acuático. Uno de los dispositivos que ha sido desarrollado con el objetivo de emplear PAM es el HARP (High-Frequency Acoustic Recording Package) o paquetes de grabación acústica de altas frecuencias. Los HARPs poseen la capacidad de detectar sonidos de hasta 200 kHz, es decir, que su rango de detección incluye vocalizaciones tanto de misticetos como de odontocetos. Estos equipos se componen de registradores acústicos, calibrados y equipados con un hidrófono, registrador de datos (caja de presión con ocho discos duros de 1 TB), baterías, lastre, sistema de liberación acústica y sistema de flotación (Wiggins y Hildebrand, 2007). Los HARPs pueden ser colocados en zonas remotas y operar durante meses o años, ya que estos equipos se programan en intervalos específicos en los que es posible conservar la batería y la capacidad de almacenaje (Au y Lammers, 2016).

La PAM que utiliza dispositivos HARP no solo permite estudiar la acústica de los cetáceos, sino encontrar la presencia de coros de peces, sonidos de origen antrópico como ruido generado por los barcos comerciales, pesqueros y de turismo, también detecta el ruido de origen natural (tormentas, huracanes, vientos, movimientos tectónicos, etc.) así como,

aquellos que generan exploraciones marinas para la búsqueda de hidrocarburos (mejor conocidos como *airguns*) y el dragado (Wiggins y Hildebrand, 2007). Los *airguns* o pistolas de aire generan sonidos sísmicos con el propósito de analizar las características geológicas del lecho marino, el aire comprimido que liberan se propaga creando una burbuja oscilante que actúa como un sonido impulsivo, generalmente de baja frecuencia, puede llegar a empalmarse con los sonidos emitidos por diversos misticetos y es capaz de causar daños en estos animales (Stone y Tasker, 2006).

### **2.3 Estudios de Mamíferos Marinos en el Golfo de México**

La mastozoología marina en el GOM surge a partir de 1950, con investigaciones por parte de Berdegué (1956), Lluch-Belda (1969) y Villa-Ramírez (Ríos-Muñoz *et al.*, 2014). En 1979 se fundó la primera sociedad mexicana dedicada al estudio de los mamíferos marinos, la Sociedad Mexicana de Mamíferos Marinos SOMMEMA (Medrano-González y Urban-Ramírez, 2019). Los primeros trabajos, como el de Manzanilla-Naim (1998), mencionan aspectos que afectan la conservación de diversas especies de mamíferos marinos en el Golfo de México y el Caribe, entre ellas algunas de las especies de rorcuales: *Balaenoptera musculus*, *Eubalena glacialis*, *Eschrichtius robustus* y *Megaptera novaeangliae* (Manzanilla-Naim, 1998).

Otro ejemplo de la importancia del estudio de los mamíferos marinos es la diversidad, distribución y abundancia relativa estacional (lluvias, secas y frentes fríos) de cetáceos en la costa norte del estado de Veracruz (Tamiahua y Tuxpan) entre 2005-2006. En esta investigación se observaron individuos de: *Tursiops truncatus*, *Stenella attenuata*, *Stenella longirostris*, *Steno breadenensis*, *Globicephala macrorhynchus* y *Megaptera novaegliae* (Galindo *et al.*, 2009). Por otro lado, entre febrero y abril de 2008 se estudió la diversidad, distribución y abundancia de los cetáceos desde el GOMn hasta las costas de Alvarado, Veracruz, dentro del GOMs. Este estudio se realizó mediante transectos lineales y sistemáticos para lograr observar ejemplares de *Tursiops truncatus*, *Pseudorca crassidens*, *Steno breadenensis*, *Stenella frontalis* y *Stenella clymene* (Vázquez-Castán *et al.*, 2009).

Se ha demostrado que el estudio de los cetáceos en el GOM se centra en investigaciones de *Tursiops truncatus* (Ramírez-León *et al.*, 2020). Aun cuando se tienen estimaciones de abundancia de diferentes especies de cetáceos, las técnicas de monitoreo como los censos visuales, foto-identificación, obtención de biopsias hipodérmicas, muestras

de heces, entre otras, implican la presencia de los investigadores en el área de estudio, así como un significativo esfuerzo de muestreo (Ramírez-León *et al.*, 2020). El caso contrario ocurre con el monitoreo PAM que permite reducir las interacciones antrópicas al estudiar indirectamente el área de estudio. Con la obtención de los datos acústicos, estas estimaciones también son posibles incluso a largo plazo.

Durante el periodo de 1983 - 2017 se registraron 28 artículos sobre cetáceos, publicados por instituciones mexicanas, en el GOMs de los cuales los reportes de variamientos y estudios ecológicos de las poblaciones fueron los más frecuentes, representando un 26 % de la producción total en este periodo de revisión bibliográfica en el GOM (281 artículos científicos). En cuanto a los artículos del GOM se tiene registro de un total del 248 dentro del mismo periodo. Otros tópicos recurrentes en estas investigaciones fueron: salud animal, manejo y conservación y comportamiento de los cetáceos, siendo *Tursiops truncatus* la especie más estudiada, en comparación con otras especies reportadas en el GOM (Ramírez-León *et al.*, 2020). Cabe resaltar que las aguas mexicanas del GOM son poco estudiadas y dirigir la atención en las diferentes especies de cetáceos que habitan esta cuenca oceánica es imprescindible.

Como se ha mencionado antes, en este trabajo se analizaron datos de dos sitios dentro del GOMs; las Cordilleras Mexicanas y el Escarpe de Campeche. Las Cordilleras están al noroeste del GOMs, tienen una profundidad que va desde los 400 m hasta los casi 3500 m, con una temperatura superficial media de 26° C; esta provincia geológica se encuentra a 172 km de la costa y presenta alto tráfico de embarcaciones debido a la cercanía del puerto comercial de la ciudad de Tampico, Tamaulipas y de Tuxpan, Veracruz (CNH, 2019). El Escarpe de Campeche, al sureste del GOMs, tiene una profundidad media de 200 m y máxima de 2800 m, con una temperatura superficial media de 26° C; se encuentra a 230 km de la costa y presenta alto tráfico de embarcaciones (Arredondo-Godínez, 2016).

En el GOMs se distinguen las siguientes estaciones: invierno, primavera, verano y otoño, la variabilidad en la temperatura superficial de agua (SST) entre invierno y verano puede llegar a ser hasta de 12 °C (Zavala-Hidalgo *et al.*, 2001). También se estima que los flujos de calor contenido incrementan entre primavera y verano (Zavala-Hidalgo *et al.*, 2014). De igual manera, los patrones en la circulación de las corrientes oceánicas en esta ecorregión presentan cambios estacionales. Las corrientes se dirigen al sur en otoño e invierno (septiembre-marzo), durante primavera y verano (mayo-agosto) y se dirigen al norte,

alcanzando una velocidad media de 0,70 ms-1 (Zavala-Hidalgo *et al.*, 2003). Los cambios que se observan en la circulación y los patrones del viento son capaces de modificar la ocurrencia de las surgencias y los hundimientos, estos fenómenos son movimientos verticales de las masas de agua de las profundidades hacia la superficie en el caso de las surgencias, como de aguas superficiales al fondo (hundimientos) y sus funciones son determinantes para la productividad primaria (Shah *et al.*, 2019; Zavala-Hidalgo *et al.*, 2014).

Estudios sobre la estacionalidad de los cetáceos reportados para el GOM demuestran que estos se mantienen diversos y abundantes a lo largo del año (Maze-Foley y Mullin., 2006). Durante 1992 hasta 1994 se reporta la presencia de al menos 10 especies de cetáceos en otoño y 15 especies para invierno, incluyendo al cachalote en la lista de las ocho especies que fueron observadas en las cuatro estaciones (Mullin *et al.*, 2004). Se ha observado que en el GOMn las especies pertenecientes a la familia Physeteridae presentan mayor densidad durante primavera y verano al norte del GOMn, mientras que en otoño e invierno existe un declive. Por otro lado, en las zonas hacia el sur del GOMn la densidad de estos cetáceos fue alta durante otoño e invierno (Hildebrand *et al.*, 2019).

Mucho de lo que se conoce sobre los mamíferos marinos que habitan el Golfo de México proviene de estudios realizados por diversas instituciones extranjeras como la *National Oceanic and Atmospheric Administration - Marine Fisheries Service NOAA-NMFS department*, el *Scripps Institution of Oceanography* de la Universidad de San Diego, la Universidad de Miami, entre otras. Existen otros proyectos que se han interesado por las aguas mexicanas del GOM, tal es el caso del proyecto de CiGoM (*The Gulf of Mexico Research Consortium*) el cual se centra en investigar los impactos que genera el petróleo y gas que se extrae del GOM sobre la flora y fauna del mismo. Otro proyecto que está en desarrollo y que incluye la investigación de cetáceos tanto en el GOMn y GOMs es *Gulf Listen Long-Term Investigations Into Soundscapes, Trends, Ecosystems and Noise*, que tiene como objetivo monitorear la vida marina mediante PAM y los efectos que el sonido antropogénico genera en diversas especies, siendo los cetáceos un punto clave de investigación, especialmente en las zonas del GOMs de las cuales no se tiene suficiente información.

## 2.4 *Physeter macrocephalus* en el Golfo de México

Los odontocetos son el grupo con mayor riqueza en el GOM, el cachalote (*P. macrocephalus*, Linnaeus, 1758) es el más grande y común en esta zona, con una de las distribuciones más amplias, desde el Ecuador hasta los polos, normalmente habitando aguas oceánicas, alcanzando hasta más de 1200 m de profundidad. Esta especie presenta dimorfismo sexual, los individuos femeninos llegan a medir 11 m y pesar 15 t, los machos hasta 16 m y 45 t. Poseen un cuerpo lateralmente comprimido y una cabeza grande que equivale, aproximadamente, a un cuarto o un tercio del total de la longitud del cuerpo. Su esperanza de vida es de 60 años (Jefferson *et al.*, 2015; Weller *et al.*, 2000).

El cachalote se alimenta a grandes profundidades, alcanzando hasta los 3,200 m en inmersiones de 30-40 min. Su principal sustento son calamares de tamaños medianos - grandes, peces, tiburones y mantarrayas. Los cachalotes tienden a viajar en grupos, la composición de estos varía dependiendo los integrantes, si viajan hembras, crías o machos. El número de integrantes de cada grupo está relacionado con la zona geográfica en la que se ubican y también con la etapa reproductiva en la que se encuentran, ya que los machos al llegar a la madurez abandonan las manadas moviéndose a aguas más frías en latitudes altas, por lo que es más común encontrar solo hembras en algunos grupos (Avila *et al.*, 2022; Jefferson *et al.*, 2015; Muto *et al.*, 2019; Whitehead, 2018).

En el GOM la presencia de esta especie es común, los reportes de avistamientos han sido cercanos a la plataforma continental. Se han registrado cerca de 23 varamientos y numerosos avistamientos, lo que hace pensar que existen poblaciones residentes que están aisladas de las poblaciones continentales (Heckel *et al.*, 2018; Niño-Torres *et al.*, 2011). La abundancia de los cachalotes es mayor en áreas de alta productividad primaria, llamadas “grounds” que generalmente son zonas de surgencias (Whitehead, 2018). Un estudio de 2009 reporta la presencia de 763 individuos de cachalote en el GOMn (Hayes *et al.*, 2017). Mientras que en 2020 se estimó que la abundancia del cachalote, en el GOMn, era de 1180 ejemplares (Hayes *et al.*, 2022).

Además, en las aguas Estadounidenses del Golfo se ha reportado una población de cachalotes hembra que habita zonas cercanas al talud de la plataforma continental, este “stock” se encuentra protegido por el US Marine Mammal Protection Act y está catalogado como “stock estratégico” (Farmer *et al.*, 2018). En comparación, la estimación para la región oceánica del GOMs en 2002 es de 411 individuos (Ortega-Ortiz *et al.*, 2004). No se cuenta

con estudios actualizados, por lo que no se conocen las cifras de abundancia ni densidad para esta ecorregión.

Esta especie es la única que tiene un solo espiráculo y la mandíbula inferior mucho más estrecha que la mandíbula superior. Además, una de sus características distintivas es el complejo nasal masivo que contiene el órgano espermaceti, el cual está repleto de aceite de espermaceti y difiere en su composición química del aceite de los melones de otros odontocetos (Whitehead, 2018). El sistema respiratorio de los cachalotes, al igual que a otros cetáceos, les permite generar vocalizaciones. Estos cetáceos utilizan la ecolocalización para localizar alimento en las profundidades de los océanos. Estos sonidos son denominados clics, algunos tipos de clics los utilizan para comunicarse y otros para ecolocalizar (Stanistreet *et al.*, 2018; Whitehead, 2018; Zimmer, 2011).

Las vocalizaciones del cachalote se encuentran en un rango de alta frecuencia (100 Hz a 70 kHz) y duraciones promedio de 2 -24 ms. Los cachalotes emiten diferentes tipos de clics cuando se encuentran buceando, los clics más comunes de ecolocalización poseen niveles de presión de 245 dBpp re 1  $\mu$ Pa y pueden ser detectados a distancias de 10 a 20 km. Otra característica de estos sonidos es la energía que contienen, debido a que esta varía entre la banda de frecuencia de 1-15 kHz con duraciones de 0.5-2 s, esto tan solo como parte del ciclo de forrajeo (Solsona- Berga, 2019). Los otros tipos de clics son denominados clics (regulares y usuales), crujidos, clics lentos y cudas, los cuales pueden tener variaciones entre los 5 Hz -25 kHz (Morrissey *et al.*, 2006).

Se ha sugerido que tanto los clics usuales, que se caracterizan por bandas de frecuencias de 500 Hz – 24 kHz, y los crujidos se usan para la ecolocalización. Además, se ha reportado que los crujidos posiblemente se emitan al intentar capturar una presa. Los clics lentos se repiten cada 6 – 8 s, son emitidos únicamente por los machos y tienden a ser más intensos que los clics regulares (Burnham, 2017; Debich *et al.*, 2015; Morrissey *et al.*, 2006). Se habla de cudas cuando hay series de 3 a 20 clics que duran 0.2 – 2, las cudas son menos intensas y con menor frecuencia que los clics usuales, generalmente cada agrupación de cachalotes hembra tiene sus cudas distintivas (Stanistreet *et al.*, 2018; Whitehead, 2018).

El estudio del cachalote en el GOM comenzó mediante censos visuales, incluso algunos de ellos realizados a bordo de cruceros que realizaron estudios enfocados en estudiar las circulaciones de mesoescala o exploraciones sísmicas para la búsqueda de hidrocarburos

combinadas con técnicas de grabación acústica. Se reportan al menos 41 individuos avistados y 10 registros acústicos en el GOMn durante los veranos de 1996 y 1997 (Biggs *et al.*, 2000). El 90 % de ellos fueron localizados en un área de giros ciclónicos a 100 km al sur del Río Misisipi en 1996, mientras que en 1997 se registraron 23 avistamientos y 9 registros acústicos, de los cuales el 80 % también se encontraron en la zona con presencia de giros, esta investigación demuestra la ocurrencia del cachalote y las asociaciones que tienen cuando eventos a mesos escala suceden en el GOM (Biggs *et al.*, 2000).

Los avances en el conocimiento acústico han demostrado que con la aplicación de un software útil para el uso de matrices de grabación acústica es posible localizar, de manera tridimensional, las posiciones geográficas de los cachalotes (Morrissey *et al.*, 2006). Esta especie es acústicamente activa, durante una sola inmersión, un solo individuo puede generar miles de clics (Thode *et al.*, 2015). Gracias a los esfuerzos realizados en pasadas campañas de monitoreo, se conocen mejor las dinámicas de las poblaciones y la distribución del cachalote, al menos dentro del GOM, la distribución está estrechamente relacionada con la presencia de giros de mesos escala. Además, existe mayor esfuerzo en utilizar técnicas de PAM para el estudio de la especie (Jochens *et al.*, 2008; Thode *et al.*, 2004).

El cachalote presenta dos perfiles de buceo: 1) el buceo profundo que se lleva a cabo entre los 200 m hasta 700 m de profundidad -debido a la profundidad del área de estudio -, en él los cachalotes generan intervalos cortos de inter-clics y crujidos durante la alimentación y 2) en el buceo somero los cachalotes son acústicamente más activos, pero no realizan actividades de forrajeo. Este perfil de buceo se registra de los 10 m a los 200 m (Mathias *et al.* 2012). Por otra parte, se aplicaron etiquetas de seguimiento satelital a 51 cachalotes en el GOMn durante los veranos del 2002 al 2005, con el objetivo de encontrar alguna relación entre su distribución y la presencia de exploraciones marinas activas, es decir, *airguns*. La ocurrencia de los individuos etiquetados no demostró un patrón que indique que la presencia de *airguns* influye o causa cambios en la distribución o movimientos de los cachalotes, pero se observa una variación en el comportamiento de forrajeo, pues durante el tiempo de monitoreo se registró mayor actividad en la superficie, que se extendía hasta por 4 h en las cuales los individuos etiquetados solo se sumergían cuando el sonido del *airguns* paraba (Winsor *et al.*, 2017).

Por otro lado, el aumento en el estudio de patrones estacionales y de comportamiento basado en bioacústica ha incrementado, prueba de esto es la descripción de la ocurrencia

estacional del cachalote dentro del GOMn durante 2010 – 2012, como parte del monitoreo enfocado a los cetáceos que habitan la zona post-derrame de petróleo DWH (Deep Water Horizon Oil Spill), con ayuda de Unidades de Grabación Acústica Autónoma (MARUs). e reporta que la especie es de tendencia cíclica, o sea, están presentes en un ciclo de 6-11 meses, al menos en los sitios de estudio, pero recalcan que podría variar si se toma en cuenta un monitoreo a largo plazo (Morano *et al.*, 2020).

Se han incrementado los esfuerzos por conocer los daños causados por la contaminación y las estrategias de adaptación que la fauna marina experimentó tras el derrame de petróleo de DWH en 2010. Se reporta la ocurrencia, estacionalidad y diferenciación de sexos de *P. macrocephalus* en tres sitios de GOMn: Mississippi Canyon (MC) el cual es el sitio donde se suscitó el derrame, Green Canyon (GC) y Dry Tortugas (DT). Los resultados de esta investigación provienen de HARPs con datos del periodo 2010 a 2017. Se describe que existe mayor ocurrencia de cachalotes en el Cañón de Misisipi y Green Canyon en comparación con Dry Tortugas, a pesar de que este último sitio es el más alejado de la zona en la que ocurrió el derrame de petróleo DWH (Solsona-Berga, 2019).

Con PAM se ha logrado demostrar que, en el GOMn, en específico en el Valle y Cañón de Misisipi, la presencia de cachalotes en 2010 presentó una disminución en la densidad poblacional. En 2007 se registró una densidad de 0.599/ 1000 km<sup>2</sup> pero esta disminuyó a 0.128/1000 km<sup>2</sup> en 2010, posteriormente, entre 2010-2015 se reportó un aumento en la densidad de la población de esta misma zona de un 136 %, es decir, de 0.120/1000 km<sup>2</sup> a 0.302/1000 km<sup>2</sup> esto indica que la recuperación del sitio después del DWH ha permitido a los grupos de cachalotes habitar de nuevo estas zonas afectadas (Li *et al.*, 2021).

Por otro lado, se ha demostrado que entre las perturbaciones a las que se ve expuesta esta especie, además de la contaminación generada por el derrame de petróleo DWH, se encuentra el ruido generado por las exploraciones marinas (*airguns*) y el ruido proveniente del tráfico de barcos, los cuales forman parte del paisaje sonoro y ocasionan cambios en los comportamientos de muchas especies marinas. (DeRuiter *et al.*, 2006 y Farmer *et al.*, 2018). Las exploraciones geológicas marinas, que tienen como objetivo encontrar depósitos de petróleo, utilizan fuentes de sonido de alta energía que generan ondas sísmicas. Uno de los dispositivos más utilizados son los *airguns*. Estos instrumentos liberan pulsos de aire de alta

presión hacia el agua, esta acción crea una cavidad que se expande, se contrae y re-expande, es decir que el sonido creado por un *airgun* llega al suelo marino y este regresa a la fuente de la cual fue emitido, este proceso es repetido después de varios segundos. (Richardson *et al.*, 1995).

## 2.5 El Estudio del Ruido Ambiental en el Golfo de México

El concepto de ruido se define como un sonido indeseable que puede tener diversas fuentes de origen (Jaramillo, 2007). También se ha descrito como la variación aleatoria de la amplitud y frecuencia (Zimmer, 2011). Cuando se habla de ruido ambiental se hace referencia al ruido de fondo que enmascara otros sonidos de interés, en el océano este tipo de ruido proviene de fuentes naturales (tormentas, sismos o lluvias) o de actividades antrópicas como el tráfico de barcos, de exploración y búsqueda de hidrocarburos para el dragado, con pistolas de aire (*airguns*) y sonares militares, barcos dedicados a la pesca comercial, así como el sonido generado por la construcción, los rompehielos y la navegación recreativa (Hildebrand, 2009; Richardson *et al.*, 1995). El estudio del ruido ambiental en el mar ha proporcionado un mejor entendimiento de cómo se constituye el paisaje sonoro en las áreas marinas.

Los paisajes sonoros son ambientes sonoros que pueden ser naturales, antrópicos o composiciones abstractas, su importancia radica en que permiten comprender mejor los efectos negativos que los sonidos producidos por actividades humanas tienen sobre la vida marina (Hernández-Landeros, 2021), pues se ha demostrado que la alta intensidad en este tipo de sonidos, específicamente los generados por sonares y *airguns*, han ocasionado varamientos de zifios, ya que estos sonidos pueden interferir en la capacidad de detectar las llamadas de su propia especie, los ecos de las presas o su sentido de navegación (Hildebrand, 2005).

El estudio del paisaje sonoro del GOM está tomando importancia y muchos de los registros se han limitado a la EEZ de EUA dentro del GOMn, el Golfo de México es una cuenca concurrida y las actividades comerciales son la principal causa de ruido antropogénico presente (Barkaszi *et al.*, 2012; HDR, 2022; Wiggins *et al.*, 2016). Esta última se lleva a cabo mediante campañas de exploración sísmica utilizando *airguns*. En ejemplares que estaban en la superficie etiquetados con Dtags, dispositivos capaces de grabar registros acústicos y rangos de profundidad, se ha detectado que los pulsos de *airguns* son de alrededor de 500 Hz, lo cual afecta directamente a pequeños odontocetos (DeRuiter *et al.*, 2006).

El ruido emitido por un solo *airgun* puede cubrir un área de 300,000 km<sup>2</sup>, causando una elevación en los niveles del ruido de fondo hasta 100 veces más grande que la capacidad del mismo. Hasta el momento no se ha reportado que la población de cachalotes en el GOM se vea afectada de manera grave por el ruido proveniente de los *airguns*, de acuerdo al análisis de datos sobre su comportamiento antes y después de la exposición a estos equipos, se demostró que los cachalotes no suelen evitar estos sonidos cuando se encuentran en movimiento, pero sí se ha observado un cambio en los tiempos que pasan forrajeando, lo cual a largo plazo tendrá efectos negativos para la población (Kavanagh *et al.*, 2019; Miller *et al.*, 2009; Weilgart, 2013). Por lo que, es importante monitorear los efectos que pueden causar en la población de cachalotes del GOM.

Gracias a los análisis del paisaje sonoro realizados, con HARPS, en cinco sitios de monitoreo del GOMn - Green Canyon, Mississippi Canyon, DeSoto Canyon, Main Pass y Dry Tortugas - (Wiggins *et al.*, 2016) fue posible reportar que en todos los sitios la principal fuente de ruido proviene de *airguns*. Además, se identificó la presencia del ruido generado por el Huracán Isaac del 2012. Algunos de estos sitios presentaron mayor presión en niveles de ruido que otros, de manera general Dry Tortugas presenta gran presión durante los primeros años de monitoreo (2010-2012) pero esta se ve reducida a partir del 2013, la metodología utilizada en esta investigación dio pauta al desarrollo del código de detección de ruido de baja frecuencia con soporte de interfaz en MATLAB, el cual se utiliza para estudiar el ruido ambiental y el cual también se emplea en este trabajo de grado.

Es importante mencionar que aquí se emplea un enfoque en el ruido ambiental de baja frecuencia porque dentro de este tipo de ruido se encuentran la mayoría de las fuentes provenientes de actividades antropogénicas y aunque los cachalotes no vocalizan a baja frecuencia, se ha observado que son capaces de detectar estos sonidos (DeRuiter *et al.*, 2006; Estabrook *et al.*, 2016).

### **III. Objetivos**

#### **3.1 Objetivo General**

Analizar la ocurrencia de *Physeter macrocephalus* y medir las variaciones del ruido ambiental de baja frecuencia (10 Hz – 10 kHz) en el Golfo de México sur.

#### **3.2 Objetivos particulares**

1. Determinar la ocurrencia acústica del cachalote en “las Cordilleras Mexicanas” y “el Escarpe de Campeche” dentro del GOMs.
2. Identificar la estacionalidad en la ocurrencia acústica de cachalotes en el GOMs durante el periodo 2020-2021.
3. Identificar las fuentes principales del ruido ambiental y medir las variaciones a escala temporal (diaria) del mismo en “las Cordilleras Mexicanas” y “el Escarpe de Campeche”.

### **IV. Hipótesis**

Si los niveles de ruido ambiental de baja frecuencia son similares en las Cordilleras Mexicanas y el Escarpe de Campeche, entonces la actividad acústica de *Physeter macrocephalus* será similar en ambos sitios.

## V. Área de Estudio

El área de estudio en este trabajo de investigación está sujeta al proyecto de “*Gulf Listen Long Term Investigations into soundsacapes, trends, ecosystems and noise*”. Para este trabajo de tesis se decidió analizar los datos acústicos de dos de los nuevos sitios de monitoreo a largo plazo en el GOMs. Dichos sitios son denominados; “Cordilleras Mexicanas” y “Escarpe de Campeche”, ambos fueron implementados en la campaña de monitoreo en 2020 del proyecto antes mencionado y forman parte de la red de sitios del GOM que han sido monitoreados anualmente, dicho monitoreo inició en el 2020 teniendo fecha de término en 2025. Cabe destacar que en este trabajo se analizaron los primeros datos obtenidos de ambos sitios, es decir, del periodo 2020-2021 (Figura 1).

### 5.1 Golfo de México

El GOM es una cuenca semicerrada compleja y dinámica, su formación comenzó durante el Terciario por la sedimentación clástica gracias a grandes masas de sales. La circulación de las masas de agua en el GOM ocurre en dos capas, la primera capa que alcanza los 1000 m se ve influenciada por “La Corriente de Lazo”, en la cual las masas de agua ingresan desde el Mar Caribe por el Canal de Yucatán para salir en dirección hacia el Atlántico a través del Canal de Florida (Amon *et al.*, 2023). La segunda capa es la profunda, a más de 1200 m de profundidad, en la que existen patrones de circulación ciclónica en forma de un giro ciclónico central profundo que proviene de aguas profundas del Atlántico Norte (Amon *et al.*, 2023).

La zona central y Oeste del GOM presenta giros mesoescala, ciclónicos y anticiclónicos. El viento y las corrientes de la plataforma continental del GOM mantienen el flujo de las deposiciones de agua dulce y los nutrientes provenientes de los Ríos Misisipi-Atchafalaya en el GOMn y Grijalva-Usumacinta en el GOMs (Davis *et al.*, 2000; Hernández-Mendoza, 2004; Uribe-Martínez *et al.*, 2019). A lo largo de este trabajo se han tomado en cuenta las ecorregiones del GOM propuestas por Wilkinson *et al* (2009), el Golfo de México norte y el Golfo de México sur. La regionalización del GOM surge de la necesidad de generar un marco consensual en América del Norte para las iniciativas y planes de conservación en estas regiones, a continuación, se detalla cada una de ellas (Wilkinson *et al.*, 2009).

#### 5.1.1 Golfo de México norte (GOMn)

Esta ecorregión posee el 60 % de las marismas intermareales de EUA, así como los aportes de agua dulce procedentes de ríos mayores, los numerosos hábitats de crianza para peces, los

bancos de “Flower Garden” y la zona muerta del GOM (recibe este nombre debido al contenido orgánico derivado de las descargas del Río Misisipi). Además, cuenta con una superficie de 578,294 km<sup>2</sup> e incluye las costas de Alabama, Misisipi, Luisiana, Texas, la Bahía de Gullivan en la zona costera de Florida y la zona norte del estado de Tamaulipas. Su clima es semitropical y tropical con un marcado régimen de temperaturas estacionales, diferentes a las de GOMs de hasta 7° C, las temperaturas durante el invierno van desde 14 - 24° C mientras que en verano de 28 – 30 °C (Wilkinson *et al.*, 2009).

La plataforma continental tiene una extensión de hasta 250 km justo al frente de la costa de Florida, que va estrechándose hasta la salida del Río Misisipi, y posteriormente ensanchándose de nuevo, especialmente frente a las costas de Texas y Luisiana. El GOMn recibe una gran deposición de agua dulce y nutrientes producidos por el sistema, formando en conjunto con el Río Misisipi y el Río Atchafalaya, representando así el 70 % de las descargas que, al entrar en contacto con La Corriente de Lazo, son redirigidas a la zona centro de esta ecorregión (Wilkinson *et al.*, 2009).

### **5.1.2 Golfo de México sur (GOMs)**

El GOMs incluye lagunas costeras, sistemas dunares, manglares, lechos de pastos marinos y diversos sistemas arrecifales, estos últimos principalmente localizados cerca de las ciudades de Tuxpan y Veracruz, así como otros arrecifes extendidos en la parte este de la plataforma de Yucatán. Esta ecorregión comprende las aguas de los estados de Veracruz, Tabasco, Campeche y Yucatán y parte del talud frente a Florida y el abanico del Misisipi, posee una superficie de 883, 568 km<sup>2</sup>, con temperaturas promedio que rondan entre los 24- 25° C en invierno y 28- 28.5 ° C durante el verano, su profundidad promedio es de 1,900 m y el sustrato es de tipo mixto, arcilloso y limoso (Wikilson *et al.*, 2009).

La costa sur del Golfo tiene una plataforma ancha que alcanza una amplitud de hasta 170 km frente a Campeche y hasta 200 km en la costa norte de Yucatán. Las surgencias están presentes en la zona oeste del GOMs, cerca de Campeche, estas resultan en aportes verticales de nutrientes que a su vez incrementan la producción primaria. La influencia del sistema de Ríos Grijalva-Usumacinta influye en la escasa existencia de formaciones coralinas para algunas zonas costeras del GOMs (Wikilson *et al.*, 2009).

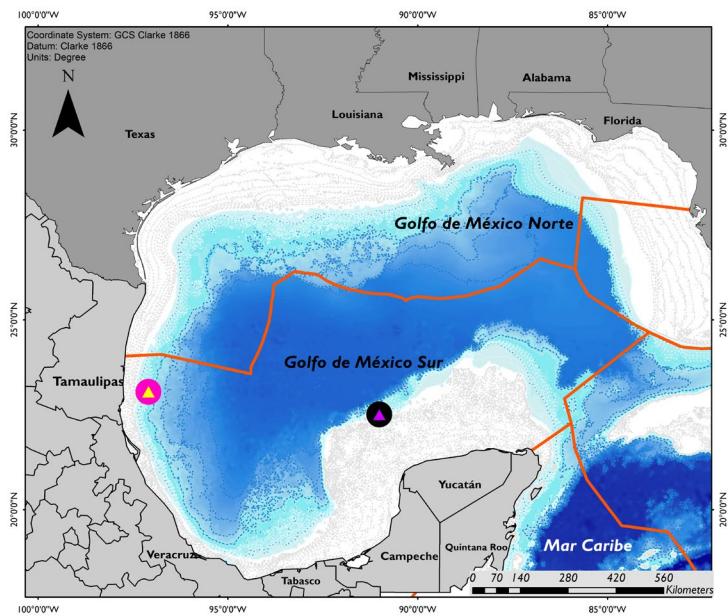
## 5.2 Cordilleras Mexicanas

Este sitio es un sistema pasivo de deformación de aguas profundas ubicado al Oeste del GOM, con una extensión de 600 km y 120-200 km de ancho y una profundidad que va de 400 m hasta casi 3500 m. Es una provincia geográfica formada de pendientes transicionales y llanuras abisales de varios kilómetros de espesor a lo largo de la plataforma continental de la costa del norte del Estado de Veracruz, México. Las dimensiones de estos pliegues varían entre los 30 y 120 km de longitud y 8 km de ancho. Campañas de exploración sísmica con *airguns* han demostrado que las cordilleras son un sitio rico en acumulación de hidrocarburos (Kenning y Mann., 2020; Yarbuah *et al.*, 2018; Yarbuah y Contreras., 2017).

Las cordilleras mexicanas podrían tener alta influencia de tráfico de barcos debido a que es un sitio localizado en punto medio entre el Puerto Comercial API Tampico, Tamaulipas, uno de los más importantes del GOMs y que registra un alto tráfico de barcos teniendo 15 líneas navieras principales y 5 rutas de navegación. Además, de la presencia de otro puerto comercial en la ciudad de Tuxpan, Veracruz, que también recibe barcos comerciales, aunque en menor cantidad en comparación con el puerto de Tampico (Kenning y Mann., 2020; Yarbuah *et al.*, 2018; Yarbuah y Contreras., 2017).

## 5.3 Escarpe de Campeche

Esta provincia geográfica del GOMs representa uno de los acantilados marinos más grandes del mundo, con un desnivel de 2000 m de profundidad y un rango de profundidad de 200-2800m, forma parte del borde del margen norte y este de la Plataforma de Yucatán. Esta zona se encuentra entre los Montículos de Campeche y la Plataforma de Yucatán. En cuanto a la estructura del Escarpe de Campeche, está conformada por crestas provenientes de los movimientos de los sedimentos. El origen de esta provincia se debe al crecimiento de arrecifes y bancos carbonatados del Cretácico Temprano, así como de diversos procesos erosivos (INAPESCA, 2018). Las exploraciones sísmicas han ayudado a describir la morfología de esta zona, demostrando que posee una importante contribución de sedimento carbonatado proveniente de la plataforma (Núñez- Useche y Barragán., 2013). En el estado de Campeche se ubican cuatro puertos en los que se realizan actividades pesqueras, industriales y petroleras; el Puerto de Ciudad del Carmen, Cayo Arcas, Puerto de Champotón y Puerto Lerma. Por lo que el tráfico de embarcaciones es similar a lo que se observa en las Cordilleras Mexicanas (INAPESCA, 2018).



Autor: Bio. Mar. Itzel G. Pérez-Carballo

**Figura 1. Mapa del área de estudio.** Tanto en el territorio estadounidense como en el territorio mexicano se puede apreciar la línea naranja que marca la división de las ecorregiones marinas del GOM, los HARP utilizados para este trabajo de investigación se encuentran representados con el triángulo amarillo (Cordilleras Mexicanas) y el triángulo morado (Escarpe de Campeche). En este mapa también se incluyen las áreas de detección de los HARPs ( $10 \text{ km}^2$ ).

## VI. Material y Métodos

### 6.1 Recolección de datos

Los datos acústicos se extrajeron de las grabaciones captadas por los HARPs de ambos sitios. El HARP de las Cordilleras Mexicanas se ubicó a una latitud 23-06.4563 N, longitud 97-05.2341 O a 1245 m de profundidad, las grabaciones dieron inicio el 07 de septiembre de 2020 y finalizaron el 04 de septiembre de 2021. El HARP dispuesto sobre el Escarpe de Campeche se localizó a una latitud 22-51.78042 N y longitud 91-01.48440 O a una profundidad de 2125 m. Las grabaciones dieron inicio el 05 de septiembre de 2020 y finalizaron el 01 de septiembre de 2021. Ya que estos equipos se mantienen anclados al fondo y cuentan con un sistema de flotación se mantuvieron suspendidos en la columna de agua de manera vertical. Debido a la posición del instrumento, se estima que poseen un alcance en la detección del ruido de hasta 10 km. Sin embargo, esta estimación es relativa a las condiciones ambientales, la distancia a la que se encuentra la fuente del ruido y la fuerza en la que el sonido haya sido emitido.

La recuperación de los HARPs se hizo a bordo del Crucero de investigación R/V *Pelican*, el equipo de trabajo estuvo compuesto por miembros del laboratorio *Marine Bioacoustics Research Collaborative* y la Universidad Veracruzana. Se zarpó desde Cocodrie, Luisiana el 19 de agosto 2021, Se recorrió el GOM pasando por las 19 localidades de monitoreo planteadas como parte del proyecto *Gulf Listen*, entre estos sitios se encontraron “las Cordilleras Mexicanas” y “el Escarpe de Campeche” hasta culminar el viaje de nuevo en Cocodrie, Luisiana en septiembre 8 de 2021.

Las actividades de recuperación y despliegue de los HARPs se llevaron a cabo con la grúa del barco y la intervención manual del personal científico para evitar daños al equipo. Cada HARP se inspeccionó a detalle: primero se revisó el hardware, es decir, el estado físico de los cables, hidrófono, flotadores, cadenas, las cajas de presión y el sistema de liberación. Posteriormente, se realizaron las pruebas de cubierta que consisten en conectar el HARP a diferentes cables que permiten evaluar la calidad de los datos obtenidos.

Al terminar estas pruebas, se desensambló cada una de las secciones de los HARPs para hacer la inspección interna. Este procedimiento permitió evaluar las condiciones de cada parte del instrumento, así como la recolección de los discos duros en los que se almacenaron

los datos. Por último, se le brindó mantenimiento a cada una de las partes desmontadas para volver a programar los HARPs y así colocarlos de nuevo en el agua.

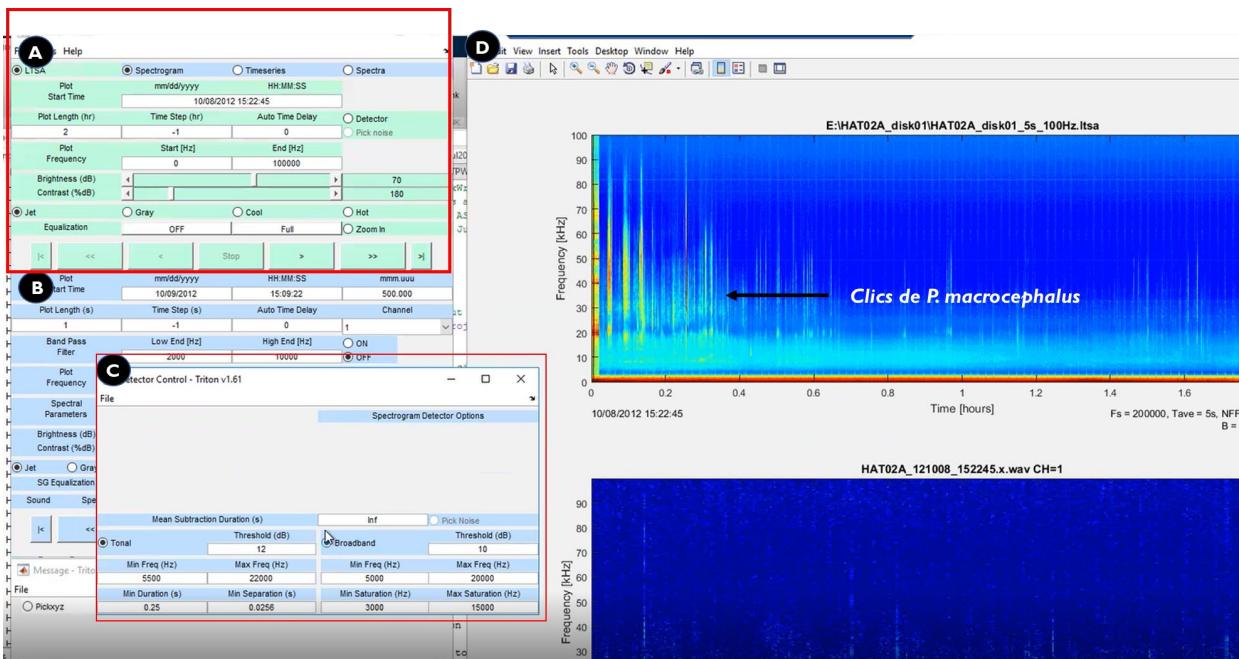
## 6.2 Detección de clics del cachalote

Los discos duros recolectados en cada uno de los sitios de monitoreo fueron enviados a las instalaciones del *Scripps Institution of Oceanography*, UC San Diego, donde se analizó una vez más la calidad de los datos. Los datos de las Cordilleras Mexicanas y el Escarpe de Campeche fueron previamente comprimidos y divididos en secciones para facilitar el análisis. Estas secciones reciben el nombre de “*Long -Term Spectral Average*” (LTSA como se abreviarán de aquí en adelante) cuya función es generar gráficos en los que se pueden apreciar conjuntos de datos de diversa temporalidad, incluida la búsqueda, anotación y evaluación de eventos acústicamente significativos, como es el caso de vocalizaciones emitidas por delfines y ballenas o de fuentes antrópicas. De manera general, los LTSA son espectrogramas (gráficos tridimensionales de tiempo-energía y frecuencia).

Las grabaciones fueron obtenidas durante un año completo, y aproximadamente las 24 horas del día hubo registros de ruido. La extracción y diferenciación de los clics de cachalotes de todos los ruidos existentes en las grabaciones se llevó a cabo en el Software Triton 2000-2006, versión 1.63 20070212 desarrollado por Wiggins y Hildebrand (2000). Este software funciona a través de Matlab versión 2016b, el cual es una herramienta de programación y cálculo numérico que funge como un lector de datos acústicos.

Tanto los datos de las Cordilleras Mexicanas como los del Escarpe de Campeche fueron divididos en siete sub-discos, es decir, en siete LTSA, cada uno de los cuales fue revisado manualmente. Con el fin de identificar algún error en los datos, la ventana de control de Triton se configuró para mostrar el espectrograma cada 2 h de grabación. Dentro de Triton existen diversas herramientas que permiten extraer las vocalizaciones de diferentes especies basándose en las frecuencias en las que estas vocalizan. Una de estas herramientas es el detector de “*Sperm Whales*” (Figura 2), el cual extrae de manera automatizada los clics mediante un código construido en Matlab. La primera etapa consistió en la detección de sonidos de ancho de banda o pulsos considerados como clics de cachalote. Cada LTSA pasó por esta primera detección, una vez finalizada la primera detección se agregó un segundo análisis que revisó la detección correcta de cada clic en los datos extraídos, este proceso también se llevó a cabo en Triton.

Una vez concluido el proceso de detección en Triton, en la consola de Matlab y con códigos de programación específicos para la detección cachalotes, construidos por Solsona-Berga y Posdaljian (2016), se continuó con el análisis de los datos. Cada dispositivo HARP posee un ciclo de grabación, este ciclo puede variar entre los 45-70 segundos. Este proceso genera un sonido capaz de obstruir el análisis o la detección detallada de los clics, por lo que se eliminó este ciclo con un código matemático “*Eliminate-Disk-Write-Noise*”. Posteriormente, se detectó la presencia de ruido de barcos con el objetivo de separarlos de los clics y con ello conseguir datos más limpios para el siguiente análisis, el cual incluye revisiones manuales a través de DetEdit.



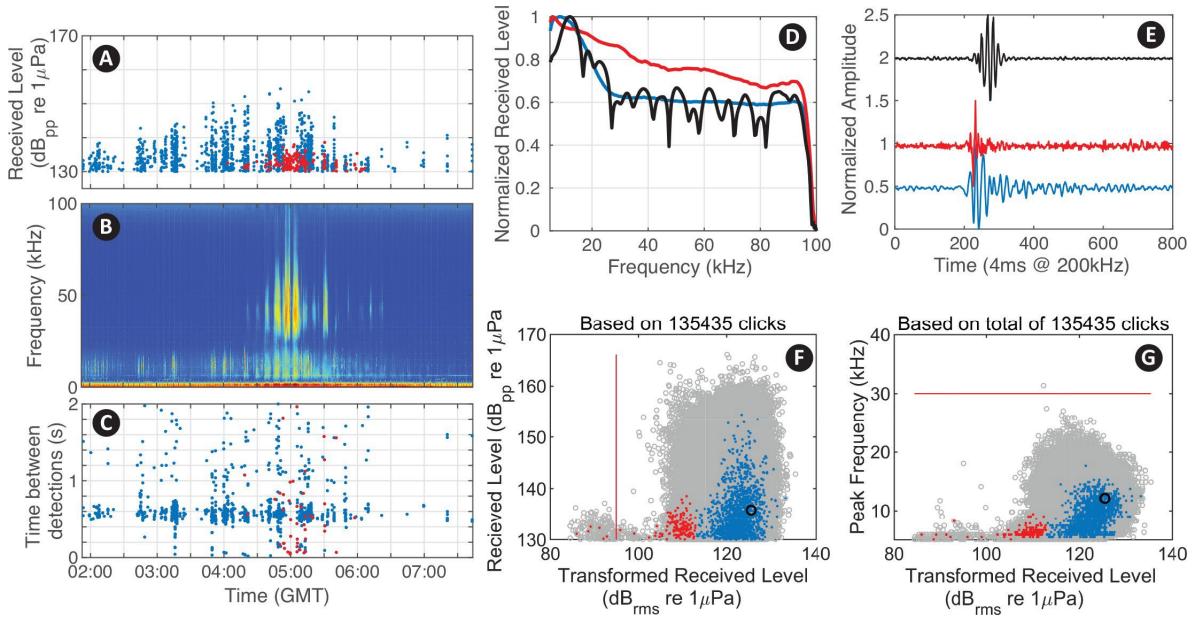
**Figura 2. Ventanas de trabajo de Triton.** A) Ventana de control del LTSA. B) Ventana de control de cada fecha específica, ambas ventanas pueden configurarse para observar mejor el espectrograma. C) Ventana de control del detector de Clics. D) Visor del espectrograma del LTSA en el que se pueden observar clics de cachalote.

### 6.3 Análisis de sonidos

Para identificar de manera manual los clics de cachalote se utilizó DetEdit, el cual es un paquete de códigos que provee un grupo de herramientas para analizar, manipular y visualizar detecciones acústicas usando una interfaz desarrollada en Matlab (Solsona-Berga *et al.*, 2020). El proceso consistió de tres pasos, en los cuales se generaron nuevos LTSA que condensaron los clics de cachalote detectados en Triton. Debido a que, en los LTSA originales, se eliminaron los ruidos emitidos por barcos, así como el ruido del ciclo de grabación. De esta manera, el análisis manual fue más rápido y específico.

Cada subdisco pasó por este proceso y posteriormente estos nuevos LTSA fueron transformados en archivos TPWS (por sus siglas en inglés). Es decir, en archivos de Tiempo, Niveles de recepción de pico a pico, Forma de la onda y Parámetros espectrales. Estos TPWS contienen matrices con los parámetros de detección acústica que son primarias para visualizar los datos. El proceso dentro de DetEdit se llevó a cabo en tres rondas de observación y exclusión de detecciones que no cumplieron con las características de los clics (el intervalo entre clics, la frecuencia, el pico de frecuencia, los niveles de decibeles recibidos, y la amplitud del sonido característico de los cachalotes).

Tomando en cuenta que pueden existir fallas en los detectores; el ruido de barcos o clics de otras especies son capaces de filtrarse y parecer clics de cachalotes. Dentro de DetEdit se observaron mediante gráficos los clics detectados. (tanto en el LTSA como en los gráficos de niveles de decibeles recibidos, el intervalo de tiempo entre detecciones, la amplitud de las detecciones y la frecuencia pico 10-12 kHz). Cabe destacar que, dentro de esta interfaz se puede elegir clic por clic, permitiendo observar todas estas características que ayudan a descartar el origen de la detección (Figura 3). Los datos que se obtuvieron de estas tres rondas de limpieza fueron los últimos pasos para continuar con el análisis.



**Figura 3. Interfaz de DetEdit.** A) ventana de niveles recibidos en dB re 1  $\mu$ Pa. Cada punto azul representa un clic detectado B) LTSA nos ayuda a distinguir si los clics que se detectaron pertenecen a la especie de interés o si se trata de otra fuente de sonido. C) Intervalo del tiempo en el que se observan las detecciones. D) se observa la densidad normalizada del espectro en frecuencias. E) Ondas de sonido normalizadas. F) Niveles recibidos vs niveles recibidos transformados y por último G) Frecuencias pico y niveles recibidos transformados. Todas estas ventanas proveen la información necesaria para descartar posibles falsos positivos, por lo que es un paso crucial en la detección de los clics de cachalotes. Tomada de Solsona-Berga et al. (2019).

#### 6.4 Análisis de las detecciones y estadístico

Con la base de datos obtenida de las detecciones, se realizaron los análisis de ocurrencia del patrón diurno en la actividad acústica de los cachalotes, así como de la detección diaria y semanal de los clics, esto se logró al utilizar códigos matemáticos que extraen los clics y el tiempo en el que fueron detectados. En el caso del patrón diurno de la ocurrencia en la actividad acústica, se tomaron en cuenta las horas oscuras y horas de luz, se realizaron pruebas no paramétricas de comparación de medias Mann-Whitney U-Test (Wilcoxon Rank sum test) en las Cordilleras Mexicanas y el Escarpe de campeche, también se analizaron las medias de ambas áreas de estudio, para comparar la ocurrencia de la actividad acústica. Por último, se aplicó un análisis de varianza ANOVA y pruebas de Levene entre ambas áreas de estudio, para observar si se presentó un patrón estacional en la ocurrencia de la actividad acústica. Estos análisis se llevaron a cabo con el Software estadístico R. versión 2022.02.3.

## 6.5 Ruido Ambiental

El análisis del ruido ambiental de baja frecuencia de las Cordilleras Mexicanas y el Escarpe de Campeche se llevó a cabo a partir de datos acústicos decimados por valor de 100 (df100). Esto quiere decir que las grabaciones obtenidas de ambos sitios se sometieron a un proceso de extracción de frecuencias en las que solo se pueden analizar aquellas que son de baja frecuencia, en este caso se habla de ruido ambiental de baja frecuencia porque los rangos son desde 10 Hz – 10 kHz en este espectro es posible detectar la presencia de *airguns*, ruido de barcos, tormentas y vocalizaciones de diversas especies marinas.

El proceso del análisis se llevó a cabo en tres pasos, utilizando como herramienta principal el código de extracción de datos temporales de ruido ambiental, desarrollado por el MBARC- Kieran Lenssen (2021) Llamado Temporal Spectra 211110, cuya interfaz funciona mediante Matlab versión 2019b. La primera fase de este código se usó para extraer los promedios del ruido ambiental, por hora, día y mes. Posteriormente, se realizó la visualización de los promedios mediante gráficos, en los cuales se observaron la frecuencia y el nivel de los decibeles recibidos tanto de los promedios por día y hora como los promedios mensuales. El último paso consistió en generar gráficos que condensaron los datos, llamados LGS Long -Term-Spectrogram en los que se pudo observar el ruido ambiental e identificar la fuente principal de los mismos. Una vez obtenidos estos gráficos se procedió a hacer la comparativa entre los sitios tomando como referencia los resultados provenientes del Detector de *airguns*.

## 6. Detector de *airguns*

El detector de *airguns* fue desarrollado por el equipo del MBARC y la interfaz funciona exclusivamente en MATLAB. Es una herramienta que permite detectar *airguns* en datos decimados, en el caso de los datos que se usaron para analizar el ruido ambiental se utilizaron datos decimados por 100 (df100).

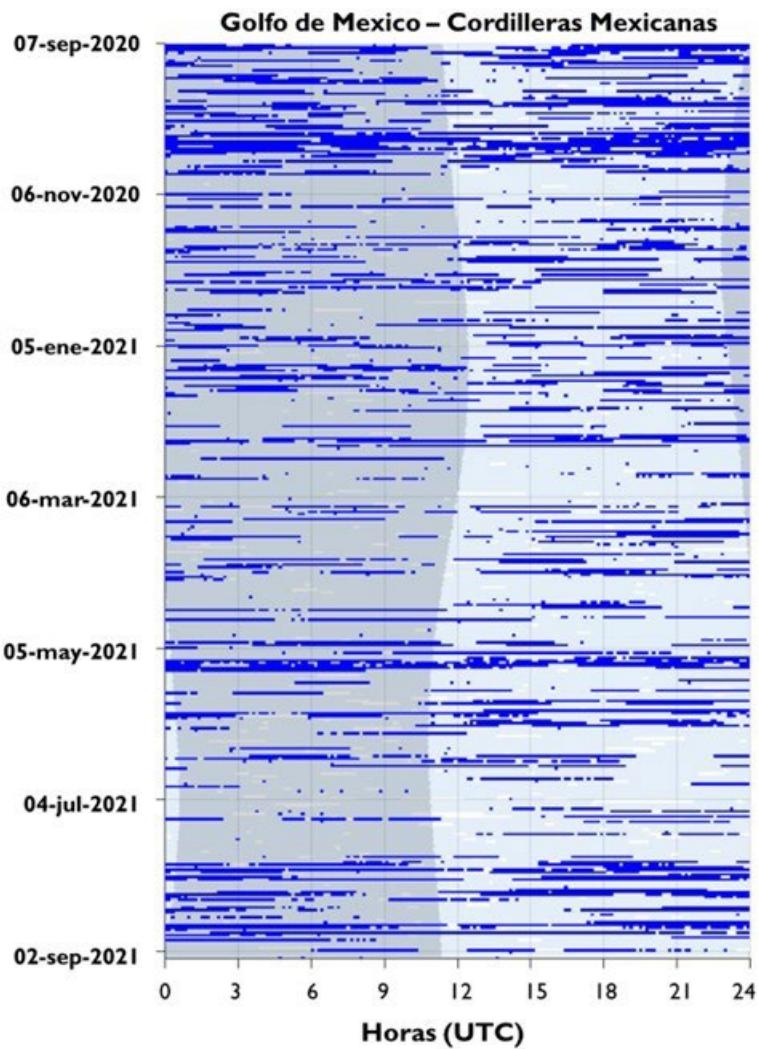
## **VII. Resultados**

### **7.1 *Physeter macrocephalus***

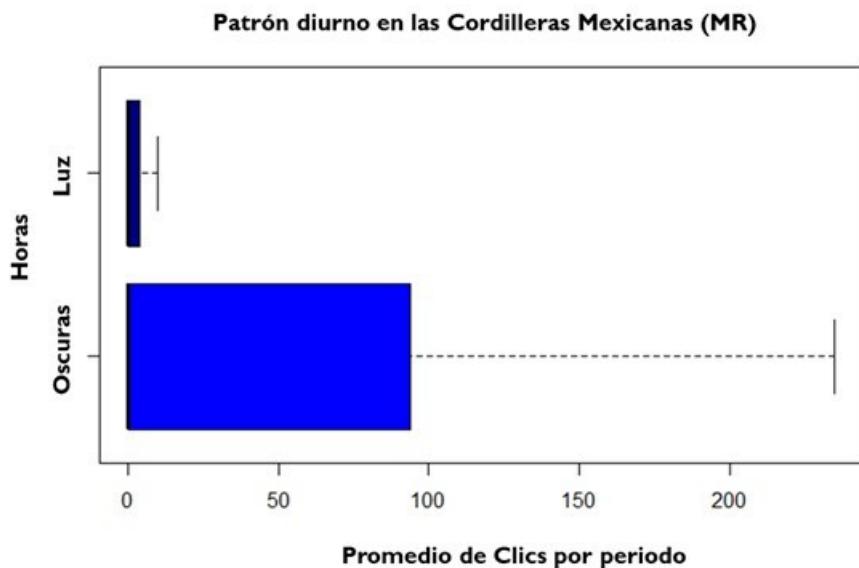
#### **7.1.1 Determinación del patrón diurno y ocurrencia acústica de cachalote en las Cordilleras Mexicanas**

Se analizaron 363 días de grabación desde el 07 de septiembre de 2020 hasta 04 de septiembre de 2021, representando un total de 8,517.83 horas de grabación provenientes de las Cordilleras Mexicanas. Los metadatos obtenidos de este HARP son los primeros en observarse de esta zona en el GOMs. Se detectaron más de 4 millones de clics. Con una media de clics diarios de  $\bar{x} = 12,020$  y el promedio de amplitud Pico-Pico por el tiempo de grabación fue de  $\bar{x} = 125.22$ .

El análisis de ocurrencia diurna de cachalote basado en la detección de clics demuestra que a lo largo del año la detección de clics fue constante. En la Figura 4 se puede observar que tanto en las horas de oscuridad (0-11:59 UTC) como en las horas de luz (12-23:59 UTC) hay presencia acústica de cachalote, cada línea azul representa una detección. Para verificar si existen diferencias en el patrón diurno de la ocurrencia, se realizó una prueba de comparación de medias no paramétrica Mann-Whitney U-test, debido a que el conjunto de datos analizados no presentó una distribución normal. Se observó un valor de  $p = 0.0003665 < \alpha = 0.05$  por lo que se rechazó la hipótesis de que las horas luz tienen igualdad de ocurrencia que las horas de oscuridad. Se demuestra diferencias significativas en las medias de ambos periodos, ya que para las horas de oscuridad la media de clics es de  $\bar{x} = 574.5$  mientras que para las horas de luz la media es de clics  $\bar{x} = 437.0$  demostrando que la actividad acústica fue recurrente en las horas oscuras (Figura 5).



**Figura 4. Patrón diurno de ocurrencia de clics cachalotes en las Cordilleras Mexicanas.** Se observa la ocurrencia de clics durante las horas oscuras (0-11:59 UTC) franja gris y horas de luz (12-23:59) franja blanca [UTC: Tiempo Universal Coordinado], los clics se representan con las líneas azules en el periodo de monitoreo (eje Y) es decir de septiembre 2020-2021.



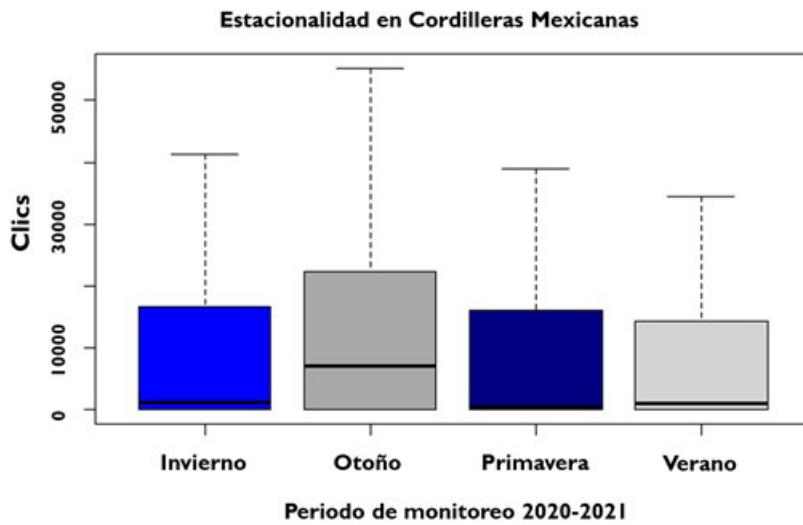
**Figura 5. Patrón diurno en las Cordilleras Mexicanas.** Grafica de cajas de la prueba Mann-Whitney U-test. Se observa el promedio de clics por periodo de horas oscuras (0-11:59 UTC) y horas luz (12-23:59).

### 7.1.2 Estacionalidad en las Cordilleras Mexicanas

La actividad acústica registrada fue notablemente mayor durante verano (21 de junio – 21 de septiembre) y otoño (22 septiembre -20 diciembre). Con una media de ocurrencia en la temporada de verano de  $\bar{x} = 12,020.3$  clics y en otoño de  $\bar{x} = 14,167$ . En comparación con invierno (21 de diciembre – 20 de marzo) en el que se registró un promedio de  $\bar{x} = 11,573.4$  clics y en primavera (21 marzo – 20 junio) con un promedio de ocurrencia de  $\bar{x} = 9,698.7$  clics (Cuadro 1). Los resultados del análisis de varianza ANOVA muestran que no hay diferencias significativas entre las varianzas entre verano, otoño, invierno y primavera. Donde el valor de  $F = 0.799$  mientras que, el valor de  $p = 0.495$  siendo  $> \alpha = 0.05$ , Estos resultados se corroboraron con una prueba de Leven con valor de  $p = 0.668$  siendo  $> \alpha = 0.05$  (Figura 6).

**Cuadro 1. Promedio de clics por estación**

Estación	Verano	Invierno	Otoño	Primavera
$\bar{x}$ clics	$\bar{x} = 12,020.3$	$\bar{x} = 11,573.4$	$\bar{x} = 14,167$	$\bar{x} = 9,698.7$



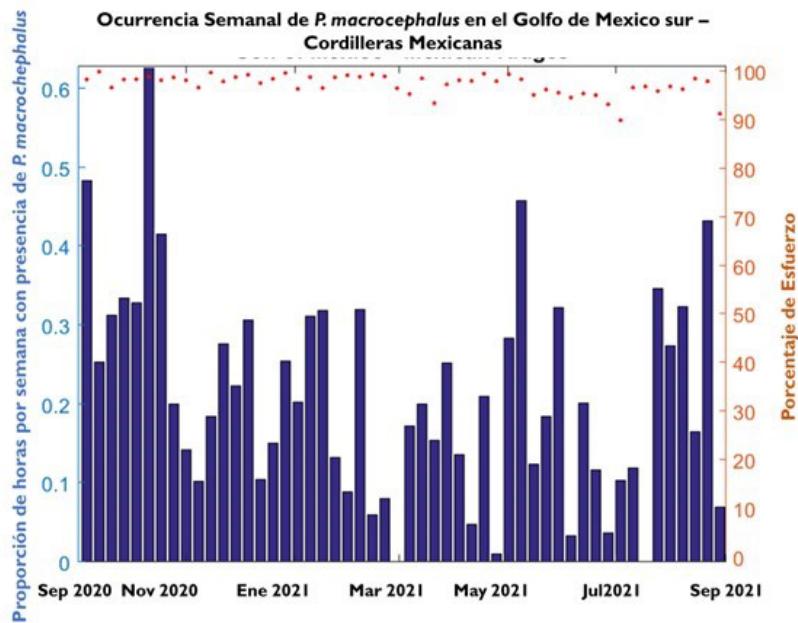
**Figura 6. Estacionalidad en la ocurrencia acústica de cachalotes las Cordilleras Mexicanas.** Aunque otoño y verano presentaron mayor número de clics no represento una diferencia significativa en las medias de las cuatro estaciones.

### 7.1.3 Ocurrencia acústica semanal y diaria en las Cordilleras Mexicanas

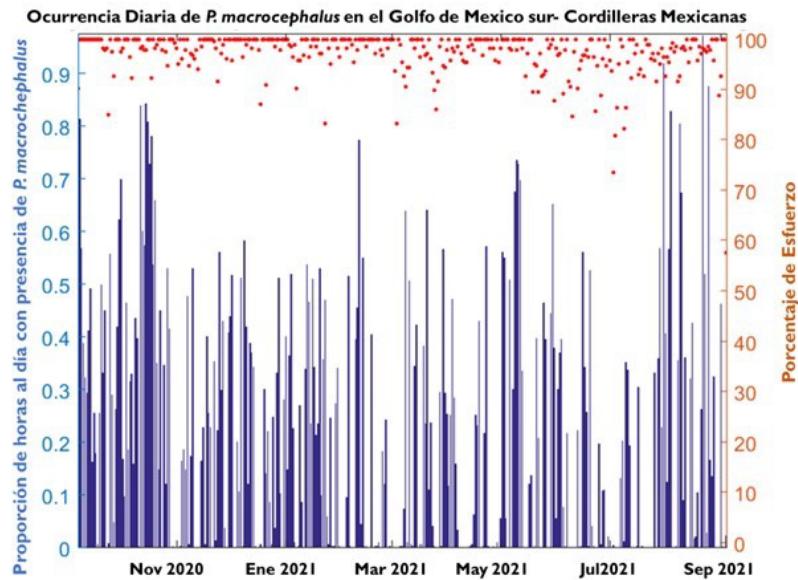
En el análisis más detallado de la ocurrencia semanal durante el año de monitoreo muestra la proporción de horas por semana con presencia de cachalote, así como el porcentaje de esfuerzo que fueron detectadas para las Cordilleras Mexicanas (Figura 7). Durante verano y otoño 2020 la actividad acústica registrada representa un  $\bar{x} = 0.26$  h de la misma manera la ocurrencia disminuye entre invierno  $\bar{x} = 0.18$  h, primavera  $\bar{x} = 0.17$  h (Cuadro 2). En cuanto a la proporción de horas con actividad acústica diaria, muestra una proporción de 0.4-0.8 h durante verano – otoño 2020. Como se ha observado anteriormente, la proporción de horas diarias (Figura 8) es similar a las horas por semana. Hay días y semanas entre invierno y primavera con ocurrencia posterior a las 0.5 h. Aunque el tiempo de monitoreo no nos permite observar un claro patrón estacional en la ocurrencia si se observa que durante finales de verano y otoño 2020 la presencia de cachalote fue notoriamente mayor que en parte del año 2021.

**Cuadro 2. Actividad acústica promedio semanal**

Estación	Verano	Invierno	Otoño	Primavera
$\bar{x}$ horas	$\bar{x} = 0.26$ h	$\bar{x} = 0.18$ h	$\bar{x} = 0.26$ h	$\bar{x} = 0.17$ h



**Figura 7. Ocurrencia acústica semanal de cachalote en las Cordilleras Mexicanas.** Se observa la escala temporal por semanas de cada mes en las que se detectaron clics de cachalote se observa la proporción en horas, así como el porcentaje de esfuerzo este porcentaje se representa con los puntos rojos que indican que las detecciones fueron revisadas a detalle entre un 90 -100 %.

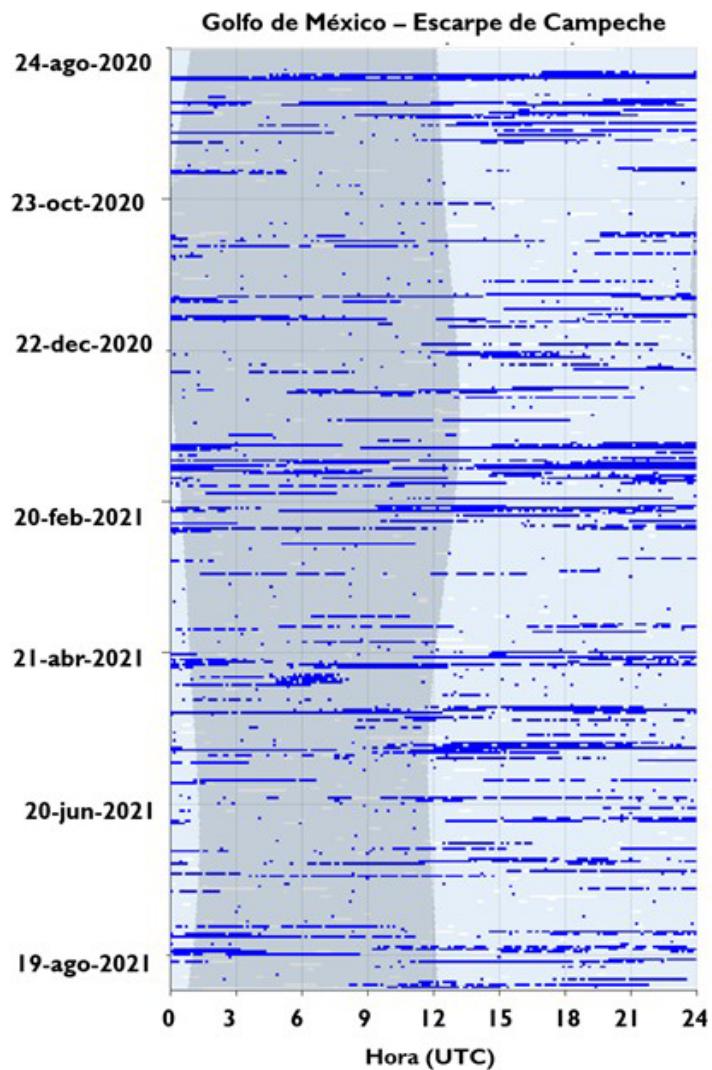


**Figura 8. Ocurrencia acústica diaria de cachalote en las Cordilleras Mexicanas.** Este grafico igual que el anterior se observan las detecciones diarias de clics, así como la proporción de horas y el porcentaje de esfuerzo representado con los puntos rojos con un esfuerzo de 85-100%.

#### **7.1.4 Determinación del patrón diurno y ocurrencia acústica de cachalote en el Escarpe de Campeche**

Se analizaron 365.6 días, abarcando desde el 01 de septiembre de 2020 hasta 01 de septiembre de 2021 y se registraron un total de 8,772 h de grabación provenientes del Escarpe de Campeche. Se obtuvo un total de 861,428 clics de cachalote tras el análisis de detección. Con un promedio de clics diarios de  $\bar{x} = 2,360.1$ . Mientras que, el análisis de ocurrencia diurna de cachalote basado en la detección de clics demostró que durante el año la detección de clics fue constante, pero en la Figura 9 se puede observar que tanto en las horas de oscuridad (0-11:59 UTC) como en las horas de luz (12-23:59 UTC) hay menor presencia acústica de cachalote que en comparación con las Cordilleras Mexicanas.

Con el fin de comprobar que ambos períodos (horas de luz y de oscuridad) presentan la misma ocurrencia acústica, se realizó una prueba no paramétrica de Wilcoxon donde el valor de  $p < 0.05$ , indicando que se encontraron diferencias en las medias de los períodos analizados, ya que para las horas de oscuridad la media de clics  $\bar{x} = 91.31$ , mientras que para las horas de luz la media es de clics  $\bar{x} = 101.96$  en la (Figura 9) incluso se puede observar que entre diciembre y abril hay más registros durante las horas de luz y esto también puede observarse en el análisis de estacionalidad.

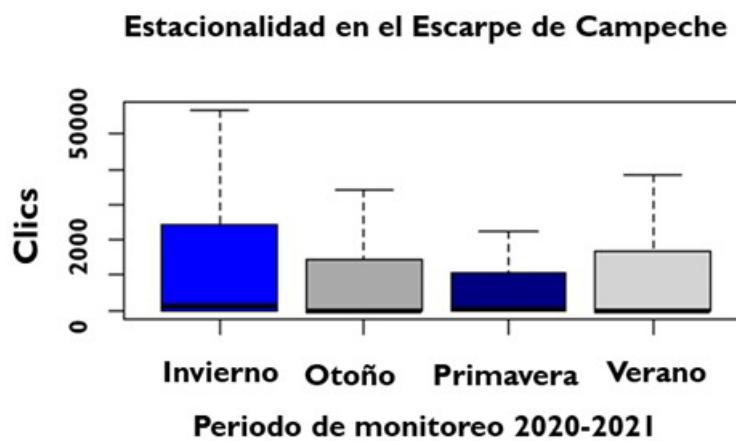


**Figura 9. Patrón diurno de ocurrencia acústica de cachalote en el Escarpe de Campeche.** Se observa la ocurrencia de clics durante las horas oscuras (0-11:59 UTC) franja sombreada gris y horas de luz (12-23:59) franja no sombreada o blanca [UTC: Tiempo Universal Coordinado], los clics se representan con las líneas azules en el periodo de monitoreo (eje Y) es decir de septiembre 2020-2021.

### 7.1.5 Estacionalidad en el Escarpe de Campeche

Se registra un promedio de clics para verano de  $\bar{x} = 2,360.1$ , para otoño de  $\bar{x} = 1,403.4$ . Mientras que, para invierno  $\bar{x} = 2,231$  y para la estación de primavera se observa un promedio de clics de  $\bar{x} = 2,117$  (Cuadro 3) como se menciona anteriormente, en los meses que corresponden a invierno y verano se registró mayor ocurrencia acústica. Para probar si estas dos estaciones son acústicamente más activas se llevó a cabo un análisis de varianzas ANOVA se observó un valor de  $F = 1.483$  y  $p = 0.219$ , se observa que no existen diferencias significativas entre las varianzas de las cuatro estaciones monitoreadas. Se reforzaron estos resultados con una prueba de Levene la cual confirmó que no existen diferencias, incluso cuando se pensaba que invierno y verano serían los meses con mayor ocurrencia de cachalote (Figura 10).

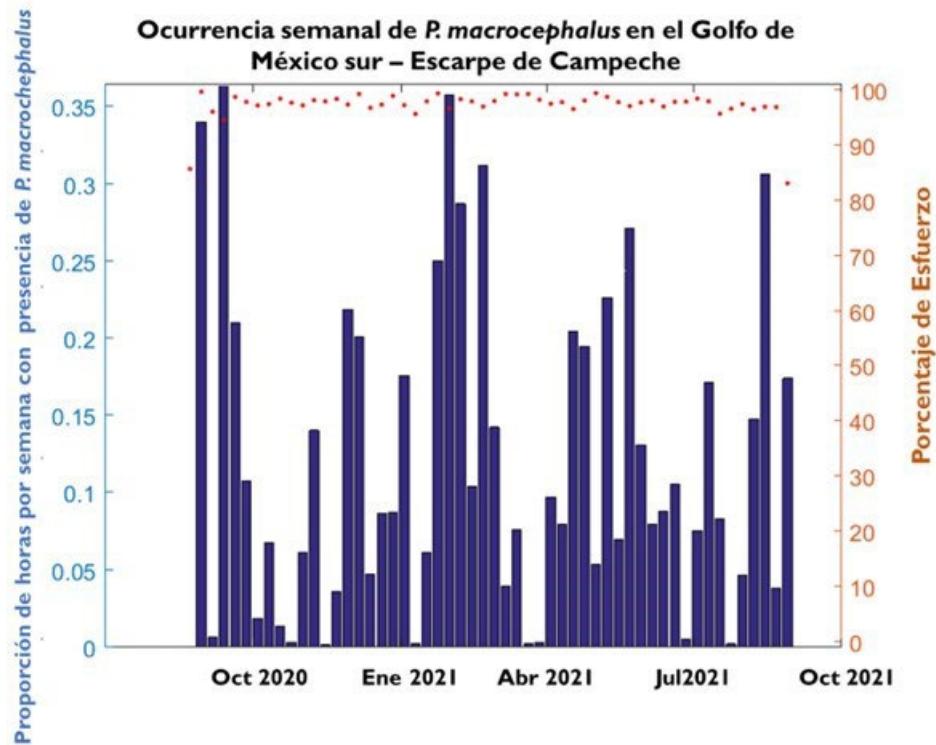
<b>Cuadro 3. Promedio de clics por estación</b>				
Estación	Verano	Invierno	Otoño	Primavera
$\bar{x}$ clics	$\bar{x} = 2,360.1$	$\bar{x} = 2,231$	$\bar{x} = 1,403.4$	$\bar{x} = 2,117$



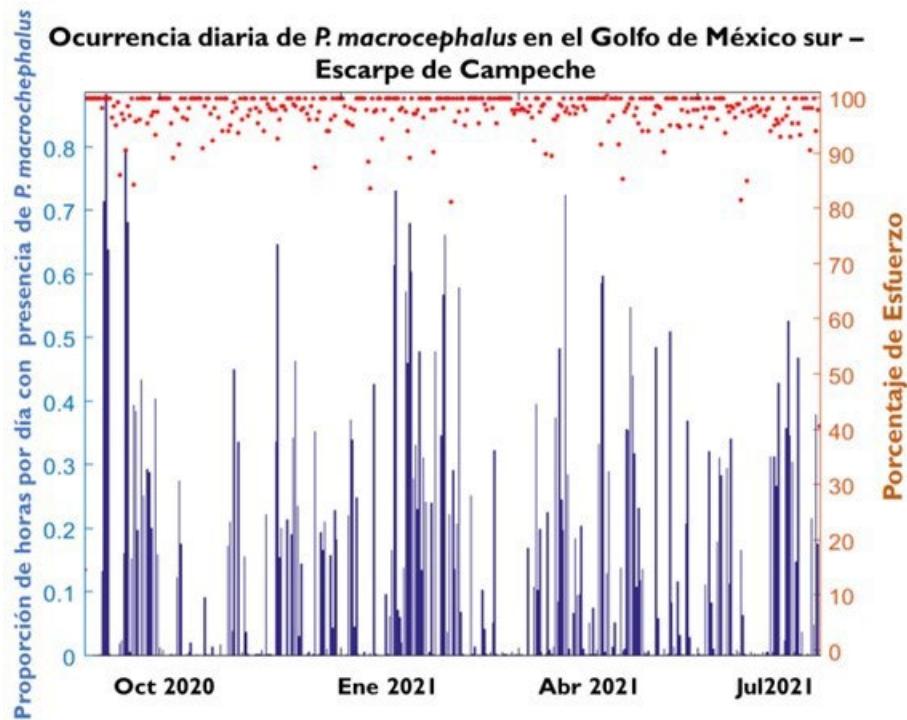
**Figura 10. Estacionalidad de la ocurrencia acústica de cachalote en el Escarpe de Campeche.**  
De nuevo logramos observar mayor número de clics durante invierno y verano, pero, no existen diferencias significativas para que exista un patrón marcado.

### 7.1.6 Ocurrencia acústica semanal y diaria en el Escarpe de Campeche

En el análisis de la ocurrencia semanal durante el año de monitoreo muestra la proporción de horas por semana con presencia de cachalote, así como el porcentaje de esfuerzo que fueron detectadas para el escarpe de Campeche (Figura 11). En la ocurrencia semanal se puede observar que durante las 52 semanas de monitoreo la mayor proporción de horas registradas fue de 0.3 – 0.35 h en semanas de verano e invierno, mientras que en semanas de otoño y primavera la proporción de horas fue de entre 0.05 -0.15 h para otoño y en primavera de 0.05 – 0.2 h. En cuanto a la proporción de horas registradas diariamente (Figura 12) los días de invierno y verano concuerdan con lo observado anteriormente, donde la proporción diaria es de 0.1 – 0.4 h con algunos días que alcanzan la proporción de 0.8 h existen días en los que la proporción registrada es menor a 0.1 h con estas observaciones se puede confirmar que si bien no existe un patrón estacional basado en la actividad acústica si existen días en los que hubo menor y mayor número de horas de registros.



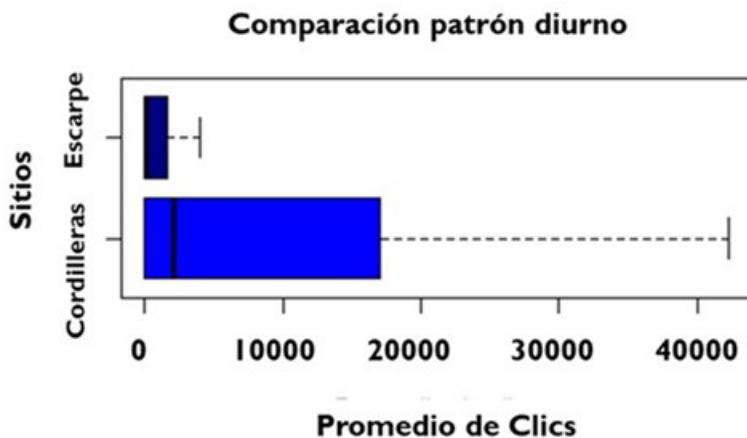
**Figura 11. Proporción de horas con presencia acústica de cachalote en el Escarpe de Campeche.** Cada barra azul representa una semana monitoreada. Mientras que, el porcentaje de esfuerzo se ve reflejado con los puntos rojos para casi todas las semanas el porcentaje fue de 100%.



**Figura 12. Proporción de horas por día con presencia acústica de cachalote en el Escarpe de Campeche.** Cada línea azul representa un día dentro de los meses de monitoreo, al igual que en el análisis de proporción semanal se observa el porcentaje de esfuerzo.

#### 7.1.7 Comparación de la actividad acústica entre las Cordilleras Mexicanas y el Escarpe de Campeche

Debido a que el conjunto de datos de ambos sitios no presentó una distribución normal, se aplicó una prueba no paramétrica para observar las diferencias entre las medias. La prueba de Mann Whitney U test mostró un valor de  $p= 0.0000000002744$ , siendo  $< \alpha = 0.05$ , por lo que, se rechaza la hipótesis de que la actividad acústica es igual en ambas áreas, siendo las Cordilleras mexicanas que presentan mayor número de registros, presentando una media de  $\bar{x} = 11,954.41$  clics. En contraste, el Escarpe de Campeche presentó una media de  $\bar{x} = 2,360.077$  (Figura 13).



**Figura 13. Comparación de la actividad acústica de los cachalotes en las Cordilleras Mexicanas y el Escarpe de Campeche.** El resultado del análisis de comparación de medias, muestra que las cordilleras presentaron mayor número registros acústicos de *P. macrocephalus*.

## 7.2 Ruido Ambiental de baja frecuencia (10 Hz – 10 kHz)

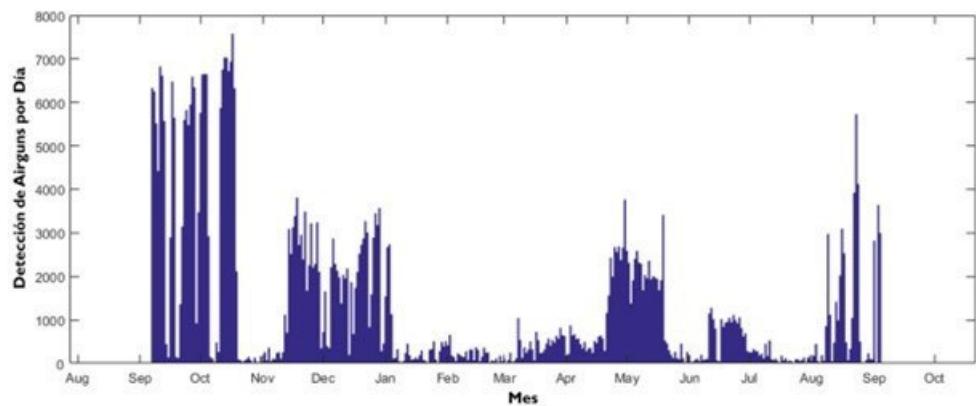
### 7.2.1 Ruido ambiental en las Cordilleras Mexicanas

Durante el análisis de ruido se logra observar la presencia constante de *airguns* provenientes de exploraciones sísmicas para la búsqueda de hidrocarburos durante el periodo de monitoreo. Esto nos muestra que en el paisaje sonoro para la zona de las Cordilleras Mexicanas no solo hay evidencia de ruido natural, como es el caso de la actividad acústica de los cachalotes, sino que también existe una gran influencia de ruido de origen antrópico. En la Figura 14 se observan las detecciones diarias de *airguns*, los días más concurridos por este sonido fueron de los meses de septiembre a finales de octubre, algunos días de octubre 2020 se llegaron a detectar hasta 7,500 pulsos de *airguns*. Durante noviembre, las detecciones bajaron a menos de 1,000 pulsos diarios, pero estos no cesaron. Entre diciembre de 2020 y enero de 2021 el número de detecciones volvió a incrementar, para posteriormente observarse una notoria reducción en los siguientes tres meses. En mayo de 2020 el número de detecciones alcanzó los 3,000 pulsos diarios, para el resto del periodo las detecciones bajaron hasta volver a detectarse entre 4,000-5,000 pulsos diarios entre agosto- septiembre de 2021.

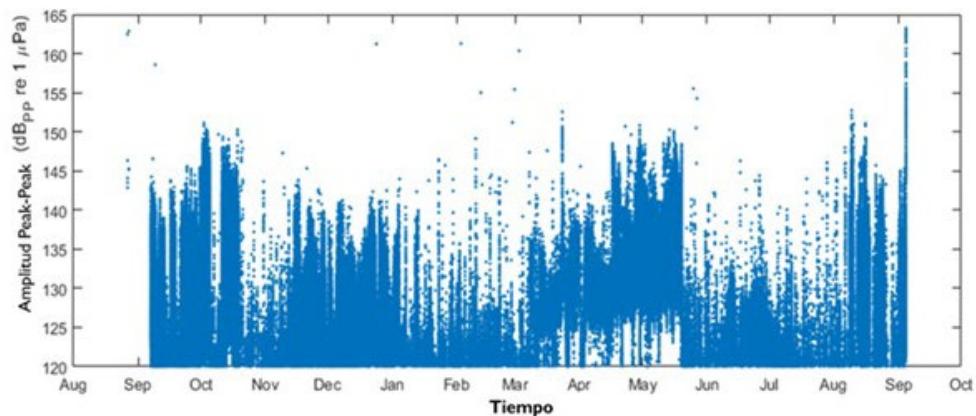
La intensidad de este sonido muestra una amplitud en niveles recibidos del sonido en amplitud pico-pico desde septiembre 2020 a septiembre 2021, cuya amplitud promedio fue de  $\bar{x} = 129.5$  dB re 1  $\mu$ Pa (Figura 15). Lo anterior corresponde a las características acústicas de este tipo de sonido, cada punto azul representa una detección de ruido. Durante todo el

tiempo de monitoreo están presentes, entre abril y mayo la intensidad del sonido de los *airguns* incrementó en comparación con los otros meses.

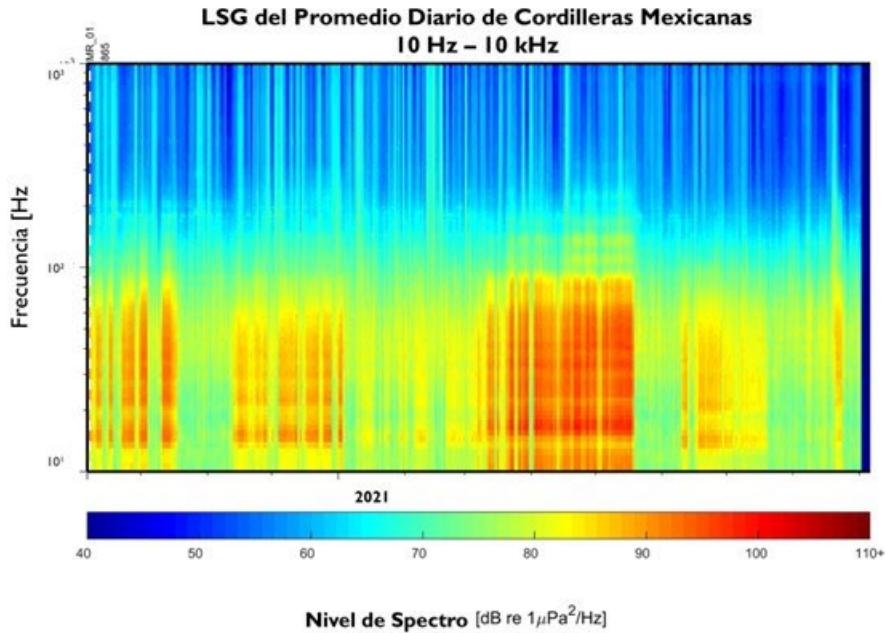
Las fuentes del ruido ambiental se observan en el espectrograma a largo plazo o LSG (por sus siglas en inglés) (Figura 16). Se visualiza el nivel de espectro del sonido de baja frecuencia y las detecciones de *airguns* durante el periodo de monitoreo. Las bandas rojas corresponden a los niveles de espectro de 100 a 110 dB re  $1 \mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$  correspondientes a la presencia de *airguns*, así como la intensidad en la amplitud del sonido, las frecuencias del ruido monitoreado se mantienen entre los 10-100 Hz.



**Figura 14. Detecciones de airguns por día en las Cordilleras Mexicanas.** Se muestra la presencia del ruido antropogénico generado por los *airguns* durante los meses de monitoreo.



**Figura 15. Amplitud de los airguns detectados en las Cordilleras Mexicanas.** Las amplitudes varían a lo largo del año de monitoreo aun cuando en algunos de los meses no se haya registrado gran actividad de este sonido.



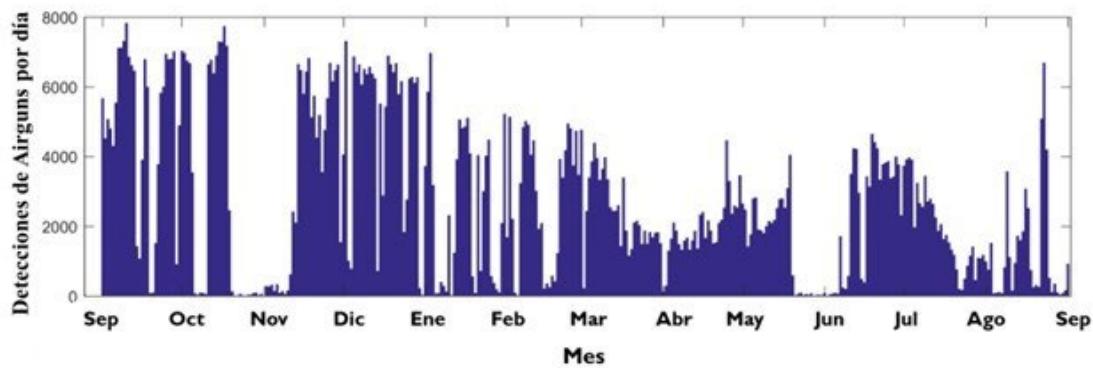
**Figura 16. Ruido de baja frecuencia diario en las Cordilleras Mexicanas.** El nivel de espectro muestra que a lo largo del año de monitoreo la fuente del ruido concuerda con la presencia de *airguns* en esta zona. De izquierda a derecha en el espectrograma se muestran los meses de septiembre 2020 a 2021.

### 7.2.2 Ruido Ambiental en el Escarpe de Campeche

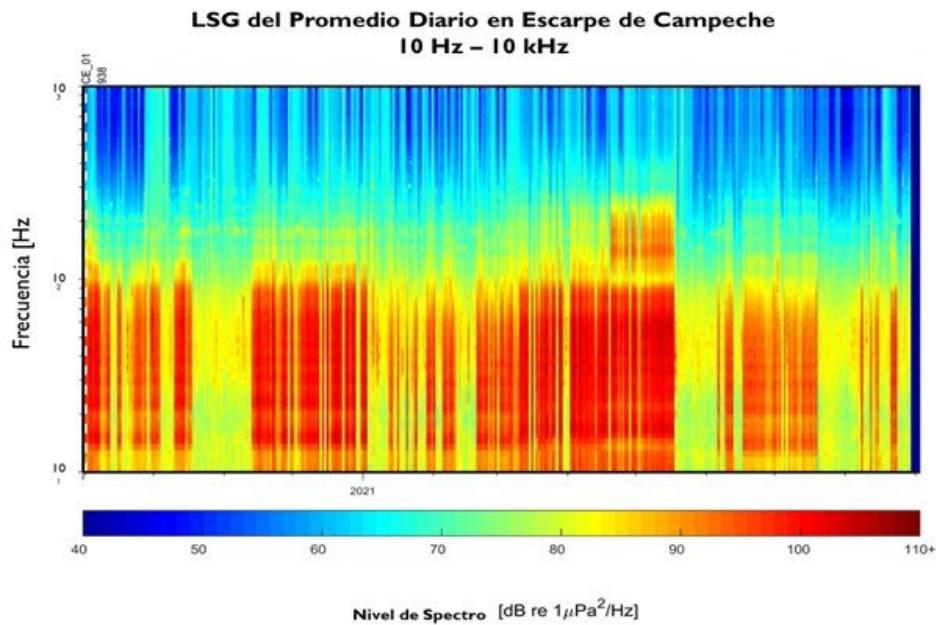
Durante el análisis de ruido se observa la presencia altamente constante de *airguns* provenientes de exploraciones sísmicas para la búsqueda de hidrocarburos durante el periodo de monitoreo. La Figura 17 muestra que los días de mayor frecuencia diaria de *airguns* corresponden al mes de septiembre y a finales de octubre, periodo en el que se detectaron hasta 8,000 pulsos diarios de *airguns*. Durante noviembre las detecciones bajaron a menos de 500 pulsos diarios, es el mes en el que menos pulsos fueron registrados, pero estos no cesaron, entre diciembre y enero el número de detecciones volvió a incrementar hasta 6000 pulsos. Es hasta el mes de junio que los pulsos son menores de 500 pulsos, también se observó una reducción entre julio-septiembre de 4,000-5,000 pulsos diarios.

En el caso de Escarpe de Campeche se observa el espectrograma, muestra el promedio diario del ruido de baja frecuencia, alcanza el nivel de espectro de 110 dB re  $1 \mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$  desde septiembre 2020-septiembre 2021, la fuente del sonido proviene principalmente de *airguns*, esto, aunque no se ha determinado las detecciones diarias, parece existir una similitud con respecto al LGS de las cordilleras mexicanas, pero el nivel de espectro en este sitio es más intenso y recurrente. Incluso durante los meses de marzo a mayo el número de pulsos diarios

disminuyó, pero esto no interfirió en la intensidad de estos pulsos, ya que el nivel de espectro es igual de intenso que el resto del año (Figura 18).



**Figura 17. Detecciones de airguns por día en el Escarpe de Campeche.** Se muestra la presencia del ruido antropogénico generado por exploraciones de prospección sísmica durante los meses de monitoreo.



**Figura 18. Ruido de baja frecuencia diario en el Escarpe de Campeche.** El nivel de espectro muestra que a lo largo del año de monitoreo la fuente del ruido concuerda con la presencia de airguns (exploraciones de prospección sísmica) en esta zona. De izquierda a derecha en el espectrograma se muestran los meses de septiembre 2020 a 2021.

### 7.3 Comparación entre sitios

Los resultados aquí descritos permiten comparar ambos sitios basándose en diferentes características. Como se puede observar anteriormente, ambas áreas de estudio presentan actividad acústica de cachalotes y ruido generado por exploraciones de prospección sísmica para la búsqueda de hidrocarburos (Cuadro 4). Se han reportado alrededor de 21 especies de mamíferos marinos en el GOM de las cuales solo una se ha reportado como especie residente en el GOMn (Rosel *et al.*, 2021). A pesar de contar con estos reportes, no se ha reportado la presencia de mamíferos marinos en las Cordilleras Mexicanas y el Escarpe de Campeche. Por lo que, los resultados aquí presentes representan uno de los primeros reportes de Cachalote en estos sitios y nueva información dentro del GOMs.

Ambas zonas presentan profundidades que superan los 2500 m, temperaturas similares, y son áreas con cercanía a puertos comerciales y el paso de barcos de carga (Herzka *et al.*, 2021; Rafter *et al.*, 2022). La presencia de Cachalotes en ambos sitios es constante durante el año de monitoreo, la información satelital del *AIS* (Automatic Identification System) que es un sistema de seguimiento satelital de barcos en los Estados Unidos permite observar la densidad de los trayectos de barcos conectados a su sistema dentro del GOM, aunque esta información se ve interrumpida a medida que los barcos se acercan a aguas mexicanas. Durante el periodo 2020-2021 las Cordilleras Mexicanas son el sitio con mayor densidad de trayectos de barcos, mientras que en el Escarpe de Campeche estos trayectos son menos marcados, esto puede deberse a la lejanía de las estaciones en tierra del *AIS*. Si bien existen diversos factores que podrían estar interactuando con la presencia de los cachalotes, ambas zonas presentan niveles de ruido ambiental de 100-110 dB re 1  $\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ , los cuales se consideran niveles elevados de ruido que provienen principalmente de exploraciones con *airguns*.

**Cuadro 4. Comparación entre sitios del GOMs**

Sitio	Cordilleras Mexicanas Verano	Escarpe de Campeche
Rango de profundidad del sitio	400- 3500 m	200 - 2800 m
Profundidad del HARP	1245 m	2125 m
Temperatura	26° C	26° C
Puertos comerciales cercanos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tampico, Tamaulipas</li> <li>• Tuxpan, Veracruz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ciudad del Carmen, Campeche</li> <li>• Cayo Arcas, Campeche</li> <li>• Champotón, Campeche</li> <li>• Puerto Lerma, Campeche</li> </ul>
Mamíferos Marinos del GOM	N/A	N/A
Mamíferos Marinos reportados aquí	<i>Physeter macrocephalus</i>	<i>Physeter macrocephalus</i>
No. De Embarcaciones	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 179 embarcaciones de pesca de altura en Tamaulipas</li> <li>• 60 embarcaciones de pesca de altura en Veracruz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 114 embarcaciones de pesca de altura en Campeche</li> </ul>
Zona de exploración de hidrocarburos	Si	Si

**Nota:** N/A: se refiere a no contar con reportes de mamíferos marinos en estos sitios en específico.

## **VIII. Discusión**

### **8.1 Determinación acústica y estacionalidad de cachalotes en las Cordilleras Mexicanas y el Escarpe de Campeche**

En el presente trabajo se reporta la ocurrencia de la actividad acústica del cachalote en el GOMs (Cordilleras Mexicanas y el Escarpe de Campeche) mediante el uso de PAM durante el periodo 2020-2021. El análisis de la ocurrencia demostró que los clics de estos odontocetos se registraron todo el año de monitoreo, pero estos clics se observaron de manera diferente entre sitios. Los registros acústicos de las Cordilleras Mexicanas presentaron un patrón diurno en el que la actividad acústica se intensificó en las horas de oscuridad (0-11:59 UTC), mientras que en el Escarpe de Campeche este patrón se contempla diferente, siendo las horas de luz en las que mayor actividad acústica se presentó (12-23:59 UTC). Por otro lado, el análisis comparativo entre ambas áreas demostró mayor actividad acústica de cachalote en las Cordilleras Mexicanas que en el Escarpe de Campeche.

Al observar a fondo los resultados de la actividad acústica de cada estación para cada sitio. La aplicación de las pruebas de comparación de varianzas indicó que no existieron diferencias significativas. Por lo que, no se reporta un patrón estacional en estos sitios del GOMs. Cabe destacar que se analizaron un total de 8,517.83 horas de grabaciones provenientes de las Cordilleras Mexicanas y 8,772 horas del Escarpe de Campeche, periodo que representa todo un año de grabaciones, en el cual la actividad acústica del cachalote fue constante, lo cual permite corroborar que esta especie también habita las aguas mexicanas del GOM. Posiblemente, el “stock estratégico” del GOMn recorra estos sitios y habite en ellos.

Dentro del GOM los cachalotes son muy móviles, pero hay que tomar en cuenta que la distribución de esta especie está más ligada a la disponibilidad de alimento (Baumgartner *et al.*, 2000). Esto a su vez, está relacionado con las condiciones ambientales en las zonas donde los cachalotes se agregan para reproducirse, por lo general estas áreas son principalmente de mayor productividad biológica. Incluso se ha observado a los cachalotes forrajeando en zonas de convergencia donde son comunes los hundimientos alrededor del frente polar Atlántico (Baumgartner *et al.*, 2000; O’ Hern y Biggs, 2009). La distribución de esta especie también se ve influenciada por las dinámicas oceanográficas, durante el tiempo

de monitoreo se registró la presencia de tres giros provenientes de la Corriente de Lazo en el GOM.

Los giros Thor, Ursa y Verne se separaron de la Corriente de Lazo en enero 2020, marzo 2021 y agosto 2021, respectivamente, para disiparse meses más tarde en el sureste del GOM (Woods Hole Group., 2022). A pesar de no contar con el análisis de los fenómenos oceanográficos como parte de la investigación de los cachalotes en los sitios del GOMs. La presencia de estos giros anticiclónicos, cercanos al Escarpe de Campeche, podría estar relacionada con la baja ocurrencia de actividad acústica del cachalote, en comparación con la ocurrencia registrada en las Cordilleras Mexicanas. Aunque no existe un patrón estacional, sí hay diferencias entre sitios. Se ha demostrado que la presencia de los cachalotes es menor cuando la isoterma de 15 °C alcanza mayor profundidad. Lo cual sugiere que los cachalotes evitan estar dentro del trayecto de la corriente de lazo y de giros mesoescala anticiclónicos (Baumgartner *et al.*, 2001).

Una de las características oceanográficas dentro del GOMs es la Corriente de Lazo, cuya circulación atraviesa el Escarpe de Campeche, proveyendo a este sitio con diferentes características que las de las Cordilleras (Wikilson *et al.*, 2009). Se ha presentado un modelo de seguimiento de los giros mesoescala provenientes de la Corriente de Lazo. En dicho modelo se muestran las características superficiales de los giros, los cuales se propagan al oeste del GOM y hacia el norte de la Bahía de Campeche (Brokaw *et al.*, 2020). Esto podría explicar que estos giros provenientes de la Corriente de Lazo podrían indicar las diferencias en las dinámicas oceanográficas de las áreas de estudio de este trabajo y por ende podría relacionarse con la baja actividad acústica del cachalote en el Escarpe de Campeche en comparación con las Cordilleras Mexicanas.

Se ha reportado la presencia de un patrón diurno al analizar la ocurrencia de cachalotes en aguas oceánicas de Sudáfrica, dicho patrón se encuentra influenciado por un régimen de horas de luz, al menos para las estaciones de invierno, primavera y verano, disminuyendo la ocurrencia en otoño, esta disminución coincide potencialmente con el declive estacional en productividad biológica de los sitios monitoreados en este estudio (Shabangu y Andrew, 2020). En el presente estudio se reporta que las horas oscuras presentan mayor ocurrencia en la actividad acústica en Las Cordilleras Mexicanas y en el Escarpe de Campeche son las horas de luz las que presentaron mayor actividad acústica, pero este patrón no se analiza para cada estación. El Escarpe de Campeche tuvo mayor influencia de procesos

dinámicos como los giros anticiclónicos durante 2020-2021, la baja actividad acústica podría deberse al desplazamiento de los cachalotes fuera del área de estudio, se tendrían que analizar datos de más años de grabaciones acústicas de estos sitios para comprender mejor si estos patrones diurnos están también influenciados por las variables oceanográficas y estacionales.

Si bien no se identifica un patrón en la estacionalidad, para ambos sitios el verano es una de las estaciones con mayor número de registros en la actividad acústica. Se puede observar una similitud a lo reportado en zonas centrales del borde continental de Luisiana (GOMn) entre 2010-2012. Donde el verano presenta mayor ocurrencia de cachalotes, disminuyendo en otoño e invierno (Morano *et al.*, 2020). Posiblemente, el desplazamiento de la especie alrededor del GOM permita explicar por qué en las Cordilleras Mexicanas, durante verano y otoño, y en el Escarpe de Campeche, en durante verano e invierno, la actividad acústica del cachalote tuvo más registros, considerando también estudios previos que han indicado que durante el verano los cachalotes tienden a migrar a mayores latitudes (Gosho *et al.*, 1994; Würsig 2017).

Aquí se reporta que la presencia de los cachalotes fue constante todo el año en el cual se realizó el monitoreo, incluso se reporta la ocurrencia semanal y diaria de esta actividad acústica. Pero el estudio no determina qué clase de grupos están emitiendo los clics que fueron analizados, puesto que el tiempo invertido para el desarrollo de la investigación implicó obtener una base de PAM para la especie dentro del GOMs. No se descarta la inquietud de caracterizar los clics para conocer si son hembras, crías o machos quienes están en las Cordilleras y el Escarpe de Campeche.

Se ha reportado en el GOMn la presencia de grupos de hembras y crías rastreados satelitalmente, cuyos rangos de movimiento son de 200-700 km dentro de esta ecorregión (Whitehead *et al.*, 2012). Aunque se tiene conocimiento de que los cachalotes machos suelen viajar a zonas polares durante el verano en comparación con las hembras y juveniles (Gosho *et al.*, 1994; Würsig 2017), no se puede asegurar que los registros aquí encontrados pertenezcan exclusivamente a hembras o crías. Ya que, la estructura social por unidades y grupos varía dependiendo de la zona geográfica (Whitehead *et al.*, 2012). Es posible realizar la caracterización de clase y talla de los cachalotes al analizar el intervalo entre clics o ICI (*Inter-Click-Interval*) esta es una herramienta que permite caracterizar el sexo de los

ejemplares detectados acústicamente [grupos mixtos (unidades sociales), tallas medias (hembras adultas y machos sub-adultos) o machos adultos].

Hasta el momento, los estudios sobre los cachalotes en el GOMs (Galindo *et al.*, 2009 y Vázquez-Castán *et al.*, 2009) no identifican acústicamente a la especie o analizan las clases y tallas presentes. Los resultados aquí presentados proveen datos acústicos y la ocurrencia de la actividad acústica de las Cordilleras mexicanas y el Escarpe de Campeche; pero se incita a investigar si en estos sitios habitan grupos con variaciones entre estaciones, ya que sabemos que la especie estuvo presente durante el año, pero es posible que la estructura social sea diferente. En el GOMn se ha reportado que en la zona norte de esta ecorregión la presencia de grupos mixtos es mayor en invierno y primavera, en cuanto a las tallas medias la ocurrencia fue mayor en verano y otoño y los machos adultos alcanzaron pico en la ocurrencia a finales de verano y durante el otoño (Solsona-Berga, 2019).

Las diferencias en la actividad acústica entre sitios podrían tener diversas fuentes de origen, por lo que relacionar diversas variables oceanográficas de las áreas de estudio con el estudio de las señales acústicas de los cachalotes brindaría una idea más clara de los patrones estacionales de ocurrencia alrededor del GOM. Este trabajo de investigación se enfocó en conocer la ocurrencia acústica de los cachalotes y el ruido ambiental de baja frecuencia, como parte de un primer acercamiento a datos acústicos para la especie y para las áreas de estudio dentro del GOMs. Sin embargo, se mantiene abierta la oportunidad de continuar investigando las variables que complementarían lo reportado.

Los resultados aquí obtenidos brindan la línea base de investigación con acústica para el cachalote dentro del GOMs en conjunto con la identificación de las fuentes de ruido ambiental de baja frecuencia (10 Hz – 10 kHz). Los datos analizados y los resultados observados sentarán el antecedente para próximas investigaciones, la base de datos que surge de esta investigación puede ser analizada para extraer más información, como es la clasificación de clase y talla de los cachalotes, además, se podrán relacionar estos datos con variables oceanográficas.

## 8.2 Ruido ambiental de baja frecuencia en las Cordilleras Mexicanas y el Escarpe de Campeche y la ocurrencia reportada del cachalote

El panorama del ruido ambiental en ambos sitios marca la presencia de ruido generado por exploraciones para la búsqueda de hidrocarburos con *airguns*. Tanto las Cordilleras Mexicanas como el Escarpe de Campeche se caracterizan por ser zonas con altos niveles de ruido ambiental, donde el nivel de espectro alcanzó los 100 - 110 dB re 1  $\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$  y 110 dB re 1  $\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$  respectivamente. Dichos niveles de intensidad corresponden al ruido generado por *airguns*, este tipo de ruido estuvo presente en ambas áreas de estudio durante todo el año. Los meses con mayor registro de pulsos diarios en las Cordilleras Mexicanas fueron septiembre y octubre, con un total de 7,500 pulsos diarios. De forma similar se observa en el Escarpe de Campeche, que septiembre y octubre también son los meses con mayor registro de pulsos, siendo 8,000 los pulsos diarios.

Cabe considerar que las áreas de estudio son importantes para la exploración de hidrocarburos, y las campañas de exploración son frecuentes tanto en estos sitios como alrededor del GOM. Se tiene registro de una campaña de exploración de agosto a octubre en el GOMn y otras actividades provenientes de campañas de exploración dentro de la zona exclusiva económica de México, durante noviembre, diciembre y principios de enero (Rafter *et al.*, 2022) Por lo que, los registros de los HARPs en los sitios del GOMs detectaron sus *airguns*. Ya que, la conducción del sonido de *airguns* a través del medio oceánico puede elevar los niveles normales de este ruido de baja frecuencia de 250 Hz a 500 Hz, este cambio en la intensidad del ruido está relacionado con la variabilidad de las condiciones oceanográficas de manera temporal y espacial (DeRutiter *et al.*, 2006).

La potencia de los *airguns* alcanza los 3000 km<sup>2</sup> de distancia, al ser un sonido con niveles de presión de 90-110 dB re 1 lPa<sup>2</sup> se propagan de manera efectiva y se consideran dentro de la banda de baja frecuencia (Estabrook *et al.*, 2016; Rolland *et al.*, 2012; Wiggins *et al.*, 2016). Estos *airguns* generan 100 pulsos/ ms cada par de segundos y la comunicación de los mamíferos marinos que se encuentren cercanos a la fuente de este sonido pueden verse afectados (Erbe *et al.*, 2018). Los resultados aquí reportados no permiten afirmar o descartar la posibilidad de que los *airguns* afecten la presencia de los cachalotes en las Cordilleras Mexicanas y el Escarpe de Campeche. Un ejemplo de los efectos de este tipo de ruido, ha sido observar el comportamiento de cachalotes marcados con Dtags (tags de seguimiento

satelital) al estar expuestos a *airguns*, y se ha determinado que este ruido puede ser detectado por estos odontocetos cuando se encuentran en la superficie (DeRutiter *et al.*, 2006).

El efecto que el ruido puede tener en los cachalotes ha sido una constante duda, pero el interés ha incrementado. Algunos avances nos permiten comprender esto; se ha reportado la presencia de *airguns* en un área de más de 880,000 km<sup>2</sup> en el Noreste de Atlántico, cercano a aguas irlandesas, este hecho ha afectado los avistamientos de misticetos en un 88 % y en 53 % a los avistamientos de odontocetos (Kacanagh *et al.*, 2019). Aunque las Cordilleras Mexicanas y el Escarpe de Campeche son sitios altamente ruidosos, no impidió el registro acústico de los cachalotes, como se dijo antes, el Escarpe de Campeche presentó menor ocurrencia en esta actividad acústica. Por ejemplo, se ha demostrado que la presencia de *airguns* está relacionada con cambios en el comportamiento de forrajeo y buceo del cachalote (Weilgart, 2007).

Aunque aún no se puede determinar la causa de esta baja ocurrencia, tampoco se descarta que el ruido generado por las exploraciones sísmicas esté causando esta baja ocurrencia en el Escarpe, o cuáles son los posibles factores oceanográficos y movimientos estacionales también influyen. Sin embargo, se han observado disminuciones en los tiempos de forrajeo de los cachalotes cuando están expuestos a *airguns* con niveles de presión por debajo de los 160 dB re 1 mPa (Miller *et al.*, 2009). Los niveles de ruido ambiental en este trabajo están dentro de un rango de 100-110 dB re 1 µPa<sup>2</sup>/Hz en ambos sitios, dónde en las Cordilleras Mexicanas la ocurrencia de cachalotes parece no estar comprometida por la presencia de *airguns*.

Sin embargo, en el GOMn se ha reportado que en diversos sitios cercanos a la costa de Luisiana con profundidades de 600-1,400 m se observa un cambio en la abundancia de los cachalotes, esta disminución se registró al comparar la abundancia de esta especie durante una campaña de exploración de hidrocarburos con *airguns* (Mate *et al.*, 1994). Estos cambios podrían describir el comportamiento de la especie ante la presencia de este tipo de ruido, aun cuando Mate *et al.* 1994 reporta esta disminución en la abundancia no se mencionan detalles acerca de las afectaciones que los niveles de presión del sonido pueden causar en estos cetáceos, como ocurre en otras especies de odontocetos.

Los sitios monitoreados en este trabajo están dominados por la presencia de *airguns*. Los cuales han sido reportados, también, como una de las fuentes de ruido ambiental predominantes en el GOMn (Estabrook *et al.*, 2016). Sin embargo, no se define si este ruido es capaz de intervenir en la presencia de los cachalotes en las áreas estudiadas del GOMs, también se debe considerar el ruido generado por el viento, lluvias y tormentas como los huracanes, que de igual forma están muy presentes en el GOM debido a su gran dinamismo. Además de la presencia de otras fuentes de ruido antrópico como los barcos. En el Cuadro 5 se puede observar la comparación entre los sitios monitoreados en esta investigación y algunos de los sitios históricos más importantes dentro del GOMn de los cuales se cuenta más información tanto de mamíferos marinos como del paisaje sonoro.

El Cañón de Misisipi, *Green Canyon* y *Dry Tortugas* han pertenecido a la red de sitios monitoreados con PAM desde el derrame de petróleo de DWH y la presencia de diversidad especies ha sido registrada año con año. Se han registrado diversos cambios en la estacionalidad de los cachalotes y la presencia de grupos sociales que (Solsona -Berga., 2019). Así como la presencia de otras especies de odontocetos, cabe recalcar que con los resultados aquí presentes se puede hablar de manera general de la distribución de *Physeter macrocephalus* dentro de todo el GOM y se hipotetiza que en ambos sitios del GOMs también se cuente con la presencia de las mismas especies reportadas para el GOMn, por lo que, la información presentada establece el antecedente para continuar generando nueva información en que permita conocer los movimientos de distribución, estacionalidad, abundancias y densidades de estas especies acompañadas de la caracterización del paisaje sonoro del GOM.

**Cuadro 5. Comparación entre sitios del GOMs y GOMn**

Sitio	Cordilleras Mexicanas Verano	Escarpe de Campeche	Cañón de Mississippi	Green canyon	Dry Tortugas
Distancia a la zona costera	172 km	172 km	230 km	225.308 km	101.38 km
Rango de profundidad del sitio	400- 3500 m	200 - 2800 m	1200 m	1100 m	1200 m
Temperatura	24 – 28.5° C	24 – 28.5° C	24-28 ° C	24-28° C	24-28° C
Dinamismo	Corriente de Lazo.  Deposición de agua dulce y nutrientes provenientes de los ríos Grijalva – Usumacinta.	Corriente de Lazo.  Giros ciclónicos y anticiclónicos.  Deposición de agua dulce y nutrientes provenientes de los ríos Grijalva- Usumacinta.	Corriente de Lazo.  Deposición de agua dulce y nutrientes provenientes de los ríos Mississippi-Atchafalaya.	Corriente de Lazo.  Deposición de agua dulce y nutrientes provenientes de los ríos Mississippi-Atchafalaya.	Corriente de Lazo.  Deposición de agua dulce y nutrientes provenientes de los ríos Mississippi-Atchafalaya.
Mamíferos Marinos del GOM	<i>Physeter macrocephalus</i>	<i>Physeter macrocephalus</i>	<i>Physeter macrocephalus</i> <i>Ziphius cavirostris</i> <i>Mesoplodon europeus</i> <i>Mesoplodon densirostris</i> <i>Grampus griseus</i> <i>Koggia spp.</i> Otras especies de delfines	<i>Physeter macrocephalus</i> <i>Ziphius cavirostris</i> <i>Mesoplodon europeus</i> <i>Mesoplodon densirostris</i> <i>Grampus griseus</i> <i>Koggia spp.</i> Otras especies de delfines	<i>Physeter macrocephalus</i> <i>Ziphius cavirostris</i> <i>Mesoplodon europeus</i> <i>Mesoplodon densirostris</i> <i>Grampus griseus</i> <i>Koggia spp.</i> Otras especies de delfines
Tráfico de barcos	Si	Si	Si	Si	Si
Zona de exploración de hidrocarburos en la	Si	Si	Si	Si	Si

## **IX. Conclusiones**

### **9.1 la ocurrencia acústica de cachalotes en “las Cordilleras Mexicanas” y “el Escarpe de Campeche” dentro del GOMs**

Los resultados obtenidos permiten concluir que en ambas áreas de estudio se presenta actividad acústica de *P. macrocephalus*. Por lo tanto, se confirma la presencia de esta especie transitando el GOMs durante todo el periodo 2020-2021. Esta información será indispensable para generar estudios alrededor de la especie. En cuanto a las diferencias entre sitios, las Cordilleras Mexicanas presentaron mayor ocurrencia de cachalotes en comparación con el Escarpe de Campeche durante el año.

Además, la actividad acústica dentro de las Cordilleras Mexicanas fue más recurrente durante horas oscuras de cada día dentro del periodo de monitoreo. Mientras que, para el Escarpe de Campeche fueron las horas de luz las que presentaron mayor ocurrencia.

En relación a lo anterior estas áreas de estudio son potencialmente *hotspots* para estos organismos, tomando en cuenta que son especies indicadoras y depredadores tope en la cadena trófica.

### **9.2 Identificar la estacionalidad en la ocurrencia acústica de cachalotes en el GOMs durante el periodo 2020-2021**

Los cachalotes están presentes en los dos sitios de monitoreo todo el año. Ya que, no se observa un patrón estacional en la ocurrencia de la actividad acústica de los cachalotes. No se puede asegurar que se trate de una población diferente o única del GOMs pero, es claro que estos hábitats oceánicos cuentan con las condiciones necesarias para resguardar la vida de estos odontocetos. la ocurrencia de la actividad acústica semanal y diaria, en ambos sitios, permitieron observar a detalle la proporción de horas registradas en el año de monitoreo.

### **9.3 Identificar las fuentes principales del ruido ambiental y medir las variaciones a escala temporal (diaria) del mismo en “las Cordilleras Mexicanas” y “el Escarpe de Campeche”.**

En cuanto al ruido presente en el GOMs, se concluye que las observaciones en las variaciones de los niveles del ruido ambiental presente en ambas áreas, proviene de exploraciones de prospección sísmica con el uso de *airguns*, tanto las Cordilleras Mexicanas como el Escarpe de Campeche presentan altos niveles de ruido de *airguns*. Aunque no se observaron las relaciones de esta fuente de ruido con la ocurrencia de los cachalotes, se sugiere que, al menos para el Escarpe de Campeche, la presencia de *airguns* aunada a los procesos oceanográficos

que ocurren en esta zona podrían estar influyendo con la ocurrencia registrada durante el periodo de monitoreo. Esto también podría explicar por qué solo en el Escarpe de Campeche se registró menor actividad acústica si en Cordilleras Mexicanas también hay niveles de presión altos, pero no se observan un claro impacto en la ocurrencia de cachalotes.

#### **9.4 Consideraciones y recomendaciones finales**

Este primer acercamiento con PAM en estas zonas del GOMs nos brinda información para la comprensión de esta especie en aguas mexicanas del Golfo, con esta información disponible se generan otras preguntas e hipótesis, se tiene que identificar por medio de estas detecciones de clics y de ocurrencia las clases presentes en las Cordilleras Mexicanas y el Escarpe de Campeche para conocer si estamos registrando unidades sociales. Esta investigación toma en cuenta un año de monitoreo, pero será posible incluir nuevos años a futuro.

La importancia de estudiar estas variaciones a escala temporal permitirá entender mejor los patrones estacionales, la distribución, las relaciones y los efectos que el ruido ambiental tenga sobre la especie. Además, se podrán establecer estimaciones de densidad y abundancia relativa y con ello contribuir a completar los vacíos de información que actualmente existen. Lo anterior también permite comenzar a caracterizar estas áreas de estudio como hábitats para cachalotes y para otras especies de cetáceos, pues recordando que el PAM con el empleo de HARPs no se limita a especies con vocalizaciones de alta frecuencia, sino que es posible estudiar todos los sonidos provenientes del medio oceánico y con ello conocer mejor el paisaje sonoro del GOMs.

## **X. Aplicación práctica**

Este trabajo de investigación, al ser el primer acercamiento a la actividad acústica de cachalote en el Golfo de México sur busca ser la línea base de información para futuras investigaciones. Gracias a este trabajo se conoce la ocurrencia en la actividad acústica de los cachalotes y que su presencia es latente todo el año, esta información servirá para generar planes de manejo en torno a los cachalotes en el GOMs. Ya que, se podrían proponer proyectos en los que se involucre el PAM y censos visuales o monitoreos aéreos con el uso de drones. Si bien los resultados no buscan determinar causas absolutas de la ocurrencia de los cachalotes y del paisaje sonoro de las Cordilleras Mexicanas y del Escarpe de Campeche, se procura dar a conocer la información disponible.

Haciendo un llamado a la SEMARNAT, CONPESCA, CONANP, El INECC y a los institutos de investigación pertenecientes a las universidades mexicanas involucradas en la investigación marina. Esto con el fin de actualizar bases datos sobre las características de estos cetáceos en aguas mexicanas (GOM), tal como hace falta en la base de datos de la CONABIO EncicloVida, considerada una de las mejores fuentes de información sobre flora y fauna de México. El impacto que tendrán estos resultados en la población será, en primera instancia, dar a conocer que la biodiversidad marina en esta zona incluye a los cachalotes, de las cuales poco se conocía dentro del GOMs. Esto se logrará con base en actividades que incluyan la publicación del artículo o artículos científicos, actividades de divulgación como infografías, clips informativos, charlas en plataformas de divulgación, como la iniciativa Divulgólogas y talleres participativos.

Se busca generar conciencia de la importancia de esta especie, pero a la par se plantea generar conciencia en la comunidad pesquera. Otro sector que no debe ser olvidado y que es igual de importante que las instituciones gubernamentales. Principalmente porque al generar este tipo de acercamientos se buscará que los pescadores realicen ciencia ciudadana al reportar avistamientos de los cachalotes, además fomentar el respeto a la vida de estos mamíferos marinos. Pues, si bien la caza de ballenas no es una amenaza latente para estos cetáceos dentro del GOM, actualmente, se ven expuestos a las capturas accidentales, choques con los barcos e incluso la muerte ocasionada por la industria pesquera (Ritter y Panigada, 2018). El trabajo con el sector pesquero no se limita a la pesca comercial, sino también incluye a los

practicantes de la pesca deportiva. Esta alianza no solo buscará crear conciencia, también busca la participación y colaboración entre pescadores e investigadores.

En cuanto a la practicidad de esta investigación referente al paisaje sonoro del GOMs, se tendrá en cuenta buscar el acercamiento con instituciones como PEMEX para obtener los reportes sobre las exploraciones de prospección sísmica que se lleven a cabo en esta zona del Golfo. De igual manera, proponer como parte de un plan de monitoreo la presencia de un equipo científico para avistamientos de estos y otros cetáceos, generaría una fuente más de información para complementar la línea base.

Otro objetivo que se busca es generar una red de colaboración con estudiantes e investigadores de otras universidades interesados en los cetáceos del GOMs, esto de manera que se puedan abrir nuevas oportunidades de estudio para continuar con el monitoreo y las estrategias que se plantean a partir de esta investigación. Permitiendo generar información desde los avistamientos hasta las posibles autopsias que puedan ejecutarse para conocer más aspectos de la especie al estar circundando el GOM.

Este trabajo de investigación, al ser el primer acercamiento a la actividad acústica de cachalote en el Golfo de México sur busca ser la línea base de información para futuras investigaciones. Gracias a este trabajo se conoce la ocurrencia en la actividad acústica de los cachalotes y que su presencia es latente todo el año, esta información servirá para generar planes de manejo en torno a los cachalotes en el GOMs. Ya que, se podrían proponer proyectos en los que se involucre el PAM y censos visuales o monitoreos aéreos con el uso de drones. Si bien los resultados no buscan determinar causas absolutas de la ocurrencia de los cachalotes y del paisaje sonoro de las Cordilleras Mexicanas y del Escarpe de Campeche, se procura dar a conocer la información disponible.

Haciendo un llamado a la SEMARNAT, CONPESCA, CONANP, El INECC y a los institutos de investigación pertenecientes a las universidades mexicanas involucradas en la investigación marina. Esto con el fin de actualizar bases datos sobre las características de estos cetáceos en aguas mexicanas (GOM), tal como hace falta en la base de datos de la CONABIO EncicloVida, considerada una de las mejores fuentes de información sobre flora y fauna de México. El impacto que tendrán estos resultados en la población será, en primera instancia, dar a conocer que la biodiversidad marina en esta zona incluye a los cachalotes, de las cuales poco se conocía dentro del GOMs. Esto se logrará con base en actividades que incluyan la publicación del artículo o artículos científicos, actividades de divulgación como

infografías, clips informativos, charlas en plataformas de divulgación, como la iniciativa Divulgólogas y talleres participativos.

Se busca generar conciencia de la importancia de esta especie, pero a la par se plantea generar conciencia en la comunidad pesquera. Otro sector que no debe ser olvidado y que es igual de importante que las instituciones gubernamentales. Principalmente porque al generar este tipo de acercamientos se buscará que los pescadores realicen ciencia ciudadana al reportar avistamientos de los cachalotes, además fomentar el respeto a la vida de estos mamíferos marinos. Pues, si bien la caza de ballenas no es una amenaza latente para estos cetáceos dentro del GOM, actualmente, se ven expuestos a las capturas accidentales, choques con los barcos e incluso la muerte ocasionada por la industria pesquera (Ritter y Panigada, 2018). El trabajo con el sector pesquero no se limita a la pesca comercial, sino también incluye a los practicantes de la pesca deportiva. Esta alianza no solo buscará crear conciencia, también busca la participación y colaboración entre pescadores e investigadores.

En cuanto a la practicidad de esta investigación referente al paisaje sonoro del GOMs, se tendrá en cuenta buscar el acercamiento con instituciones como PEMEX para obtener los reportes sobre las exploraciones de prospección sísmica que se lleven a cabo en esta zona del Golfo. De igual manera, proponer como parte de un plan de monitoreo la presencia de un equipo científico para avistamientos de estos y otros cetáceos, generaría una fuente más de información para complementar la línea base.

Otro objetivo que se busca es generar una red de colaboración con estudiantes e investigadores de otras universidades interesados en los cetáceos del GOMs, esto de manera que se puedan abrir nuevas oportunidades de estudio para continuar con el monitoreo y las estrategias que se plantean a partir de esta investigación. Permitiendo generar información desde los avistamientos hasta las posibles autopsias que puedan ejecutarse para conocer más aspectos de la especie al estar circundando el GOM.

## XI. Referencias

- Ackleh, A. S., loup, G. E., loup, J. W., Ma, B., Newcomb, J. J., Pal, N., Sidorovskaia, N. A., y Tiemann, C. (2012). Assessing the Deepwater Horizon oil spill impact on marine mammal population through acoustics: Endangered sperm whales. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 131(3), 2306–2314. <https://doi.org/10.1121/1.3682042>.
- Amon, R. M. W., Ochoa, J., Candela, J., Herzka, S. Z., Pérez-Brunius, P., Sheinbaum, J., Camacho Ibar, V. F., Herguera, J. C., Hernández Ayon, M., Key, R. M., y Molodtsov, S. (2023). Ventilation of the deep Gulf of Mexico and potential insights to the Atlantic Meridional Overturning Circulation. *Science Advances*, 9(11), 1–16. <https://doi.org/10.1126/sciadv.ade1685>
- Amorim, T. O. S., Rendell, L., Di Tullio, J., Secchi, E. R., Castro, F. R., y Andriolo, A. (2020). Coda repertoire and vocal clans of sperm whales in the western Atlantic Ocean. *Deep-Sea Research Part I: I* (160) (February). <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2020.103254>.
- André, M., van der Schaar, M., Zaugg, S., Houégnigan, L., Sánchez, A. M., y Castell, J. V. (2011). Listening to the Deep: Live monitoring of ocean noise and cetacean acoustic signals. *Marine Pollution Bulletin*, 63(1–4), 18–26. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.04.038>
- Antunes, R., Schulz, T., Gero, S., Whitehead, H., Gordon, J., y Rendell, L. (2011). Individually distinctive acoustic <https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2010.12.019>
- Arredondo-Godínez, L. A. (2016). Batimetría de alta resolución en el Escarpe de Campeche, al sur del Golfo de México. Universidad Autónoma de México.
- Au, W. W. L., y Lammer, M. O. (2016). Introduction: Listening in the Ocean. In W. W. L. Au y M. O. Lammer (Eds.), *Listening in the Ocean New Discoveries and Insights on Marine Life from Autonomous Passive Acoustic Recorders* (pp. 1–19). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3176-7\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3176-7_1)
- Avila, I. C., Fariñas-Curtidor, N., Castellanos-Mora, L., Do Amaral, K. B., Barragán-Barrera, D. C., Orozco, C. A., León, J., y Puentes, V. (2022). The Colombian Caribbean Sea: A tropical habitat for the Vulnerable sperm whale *Physeter macrocephalus Oryx*, 1–11. <https://doi.org/10.1017/S0030605321001113>
- Baumgartner, M. F., Mullin, K. D., May, L. N., y Leming, T. D. (2001). Cetacean habitats in the northern Gulf of Mexico. *Fishery Bulletin*, 99(2), 219–239.
- Becerril-Gómez, C. I. (2020). “Análisis de tendencias de investigación en cinco especies de odontocetos en el golfo de México” [Universidad Veracruzana]. <https://cdigital.uv.mx/bitstream/handle/123456789/46427/QuirozCortesMCarmen.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- Biggs, D. C., Leben, R. R., y Ortega-Ortiz, J. G. (2000). Ship and satellite studies of mesoscale circulation and sperm whale habitats in the Northeast Gulf of Mexico during GulfCet II. *Gulf of Mexico Science*, 18(1), 15–22. <https://doi.org/10.18785/goms.1801.02>
- Brokaw, R. J., Subrahmanyam, B., Trott, C. B., y Chaigneau, A. (2020). Eddy Surface Characteristics and Vertical Structure in the Gulf of Mexico from Satellite Observations and Model Simulations. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125(2), 1–25. <https://doi.org/10.1029/2019JC015538>
- Browning, E., Gib, R., Glover-Kapfer, P., y Jones, K. E. (2017). Passive acoustic monitoring in ecology and conservation. *WWF Conservation Technology Series*, 1(2), 75. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.18158.46409>
- Burnham, R. (2017). Whale geography: Acoustics, biogeography and whales. *Progress in Physical Geography*, 41(5), 676–685. <https://doi.org/10.1177/0309133317734103>
- CNH. (2019). Recursos Prospectivos de México: Área Perdido, Cordilleras Mexicanas y Cuenca Salina, aguas profundas del Golfo de México. Comisión Nacional de Hidrocarburos.
- D.O.F. 30/12/2010. NORMA Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo. México, D. F., México. 36.
- Davis, R. W., Evans, W. B., y Wursig Bernd. (2000). Cetaceans, Sea Turtles and Seabirds in the Northern Gulf of Mexico: Distribution, Abundance and Habitat Associations. In Technical Report: Vol. II.
- Debich, A., Baumann-Pickering, S., Širović, A., Hildebrand, J. A., Alldredge, A. L., Gottlieb, R. S., Herbert, S. T., Johnson, S. C., Rice, A. C., Roche, L. K., Thayre, B. J., Trickey, J. S., Varga, L. M., y Wiggins, S. M. (2015). Passive Acoustic Monitoring for Marine Mammals in the SOCAL Naval Training Area 2012–2014. In MPL Technical Memorandum #552 (Issue August).

- DeRuiter, S. L., Tyack, P. L., Lin, Y.-T., Newhall, A. E., Lynch, J. F., y Miller, P. J. O. (2006). Modeling acoustic propagation of airgun array pulses recorded on tagged sperm whales (*Physeter macrocephalus*). The Journal of the Acoustical Society of America, 120(6), 4100–4114. <https://doi.org/10.1121/1.2359705>
- Dovgan, A. (2020). *Detección, Identificación y Localización de Cetáceos con Técnicas de Acústica Pasiva*. Universitat Politècnica de Valencia Escola Politècnica Superior de Gandia.
- Dudzinski, K. M., y Gregg, J. D. (2018). Communication. Encyclopedia of Marine Mammals, 210–215. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-804327-1.00096-0>
- Erbe, C., Dunlop, R., y Dolman, S. (2018). Effects of Noise on Marine Mammals. In Effects of Anthropogenic Noise on Animals (Issue October, pp. 179–208). <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-8574-6>
- Estabrook, B. J., Ponirakis, D. W., Clark, C. W., y Rice, A. N. (2016). Widespread spatial and temporal extent of anthropogenic noise across the northeastern Gulf of Mexico shelf ecosystem. Endangered Species Research, 30(1), 267–282. <https://doi.org/10.3354/esr00743>
- Farmer, N. A., Noren, D. P., Fougères, E. M., Machernis, A., y Baker, K. (2018). Resilience of the endangered sperm whale *Physeter macrocephalus* to foraging disturbance in the Gulf of Mexico, USA: A bioenergetic approach. Marine Ecology Progress Series, 589(Hoyt 2012), 241–261. <https://doi.org/10.3354/meps12457>
- Fernández-Casado, M. (2000). EL CACHALOTE (*Physeter macrocephalus*). Mamíferos de España, 12(2), 3–22.
- Frankel, A. (2018). Sound. In B. Würsig, J. G. Thewissen, y K. M. Kovacs (Eds.), Encyclopedia of Marine Mammals. (Third Edit, pp. 889–901). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804327-1.00235-1>
- Frasier, K. E., Wiggins, S. M., Harris, D., Marques, T. A., Thomas, L., y Hildebrand, J. A. (2016). Delphinid echolocation click detection probability on near-seafloor sensors. The Journal of the Acoustical Society of America, 140(3), 1918–1930. <https://doi.org/10.1121/1.4962279>
- Galindo, J. A., Serrano, A., Vásquez-Castán, L., González-Gándara, C., y López-Ortega, M. (2009). Cetacean diversity, distribution, and abundance in Northern Veracruz, Mexico. Aquatic Mammals, 35(1), 12–18. <https://doi.org/10.1578/AM.35.1.2009.12>
- García-Vital, M., Morteo, E., Martínez-Serrano, I., Delgado-Estrella, A. y Bazúa-Durán, C. (2015). Inter-individual association levels correlate to behavioral diversity in coastal bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*) from the Southwestern Gulf of Mexico. Therya, 6(2), 337–350. <https://doi.org/10.12933/therya-15-270>
- Gosho, M. E., Rice, D., y Breiwick, J. M. (1994). The Sperm Whale *Physeter macrocephalus*. In J. M. Breiwick y H. Braham (Eds.), The Status of Endangered Species (p. 81). Marine Fisheries Review.
- Hayes, S., Josephson, E., Maze-Foley, K., Rosel, P. E., y Wallace, J. (2022). U.S. Atlantic and Gulf of Mexico Marine Mammal Stock Assessments 2021. NOAA Tech. Memo. NMFS-NE-288, August, 380. <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/45014>
- Hayes, Sean A. (Sean Arthur (ed.); Josephson, Elizabeth (ed.); Maze-Foley, Katherine (ed.); Rosel, P. E. (ed. N. F. S. C. (U. S. (2017). Sperm whale (*Physeter macrocephalus*): Northern Gulf of Mexico Stock. En National Marine Fisheries Service (NMFS). <https://doi.org/http://doi.org/10.7289/V5/TM-NEFSC-241>
- HDR (Athens, AL). 2022. Passive acoustic monitoring program for the Northern Gulf of Mexico: project report. New Orleans (LA): US Department of the Interior, Bureau of Ocean Energy Management. 337 p. Contract No.: M17PC00001. Report No.: OCS Study BOEM: 2022-074.
- Heckel, G., Ruiz Mar, M. G., Schramm, Y., y Gorter, U. (2018). *Atlas de Distribución y Abundancia de Mamíferos Marinos en México*. Universidad Autónoma de Campeche. <https://doi.org/10.26359/epomex.cemie022018>
- Hernández-Landeros, P. K. (2021). Paisajes sonoros “De contaminación acústica a bellos sonidos.” Universidad Autónoma Metropolitana.
- Hernández-Mendoza, J. J. (2004). *Cañones Submarinos Cuaternarios en la Porción Norte del Golfo de México*. [https://archives.datapages.com/data/amgp/pdf-content/2004/2004\\_JULIO-DICIEMBRE\\_2\\_Xop.htm](https://archives.datapages.com/data/amgp/pdf-content/2004/2004_JULIO-DICIEMBRE_2_Xop.htm)
- Herzka, S. Z., Zaragoza Álvarez, R. A., Peters, E. M., & Hernández Cárdenas, G. (2021). ATLAS de Línea Base Ambiental del Golfo de México. In *Atlas De Línea Base Ambiental Del Golfo De México: Vol. INTRODUCCIÓN*.
- Hildebrand, J. A. (2005). Impacts of Anthropogenic Sound. In J. E. Reynolds III, W. F. Perrin, R. R. Reeves, y S. Montgomery (Eds.), *Marine Mammal Research: Conservation Beyond Crisis* (pp. 101–124). The Johns Hopkins University Press.

- Hildebrand, J. A. (2009). Anthropogenic and natural sources of ambient noise in the ocean. *Marine Ecology Progress Series*, 395, 5–20. <https://doi.org/10.3354/meps08353>
- Hildebrand, J. A., Frasier, K. E., Baumann-Pickering, S., Wiggins, S. M., Merkens, K. P., Garrison, L. P., Soldevilla, M. S., y McDonald, M. A. (2019). Assessing seasonality and density from passive acoustic monitoring of signals presumed to be from pygmy and dwarf sperm whales in the gulf of Mexico. *Frontiers in Marine Science*, 6(FEB), 1–17. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00066>
- INAPESCA. (2018). CAMPAÑA SONDA DE CAMPECHE 2017. chrome-extension://efaidnbmnnibpcajpcgclefindmkaj/https://journals.plos.org/ploscompbiol/article/file?id=10.1371/journal.pcbi.1007598&type=printable
- IPCC, 2018: Annex I: Glossary [Matthews, J.B.R. (ed.)]. In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, y T. Waterfield (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 541–562, doi:10.1017/9781009157940.008.
- Jaramillo, A. M. (2007). Acústica: la ciencia del sonido. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/20.500.12622/1763>.
- Jefferson, T. A., Webber, M. A., y Pitman, R. L. (2015). Cetaceans. In *Marine Mammals of the World a Comprehensive Guide to Their Identification* (Second Edi, pp. 88–101). Elsevier. <https://books.google.com.mx/books?id=sc-cBAAAQBAJylpg=PP1ydg=marine+mammalsyhl=esypg=PR3#v=onepageyq=marine+mammalsyf=false>
- Jochens, A., Biggs, D., Benoit-Bird, K., Engelhardt, D., Gordon, J., Hu, C., Jaquet, N., Johnson, M., Leben, R., Mate, B., Miller, P., Ortega-Ortiz, J., Thode, A., Tyack, P., y Würsig, B. (2008). Sperm whale seismic study in the Gulf of Mexico: Synthesis report. U.S. Dept. of the Interior, Minerals Management Service, Gulf of Mexico OCS Region, New Orleans, LA. OCS Study MMS 2008-006. 341.
- Kavanagh, A. S., Nykänen, M., Hunt, W., Richardson, N., y Jessopp, M. J. (2019). Seismic surveys reduce cetacean sightings across a large marine ecosystem. *Scientific Reports*, 9(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55500-4>
- Kenning, J. J., y Mann, P. (2020). Control of structural style by large, Paleogene, mass transport deposits in the Mexican Ridges fold-belt and Salina del Bravo, western Gulf of Mexico. *Marine and Petroleum Geology*, 115(January), 104254. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2020.104254>
- Li, K., Sidorovskaia, N. A., Guilment, T., Tang, T., y Tiemann, C. O. (2021). Decadal assessment of sperm whale site-specific abundance trends in the northern gulf of mexico using passive acoustic data. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(5). <https://doi.org/10.3390/jmse9050454>
- Manzanilla-Naim, S. (1998). Mamíferos Marinos del Golfo de México y el Caribe Problemática de Conservación. *Proceedings of the 50th Gulf and Caribbean Fisheries Institute*, 1138–1151.
- Marques, T. A., Thomas, L., Ward, J., DiMarzio, N., y Tyack, P. L. (2009). Estimating cetacean population density using fixed passive acoustic sensors: An example with Blainville's beaked whales. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 125(4), 1982–1994. <https://doi.org/10.1121/1.3089590>.
- Martínez-Serrano, I., Serrano, A., Heckel, G., y Schramm, Y. (2011). Distribution and home range of bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*) off Veracruz, Mexico. *Ciencias Marinas*, 37(4A), 379–392. <https://doi.org/10.7773/cm.v37i4a.1860>
- Mate, B.R., Stafford, K.M., y Ljungblad, D.K. 1994. A change in sperm whale (*Physeter macrocephalus*) distribution correlated to seismic surveys in the Gulf of Mexico. *The Journal of the Acoustical Society of America* 96: 3268-3269, doi:10.1121/1.410971.
- Mathias, D., Thode, A. M., Straley, J., Calambokidis, J., Schorr, G. S y Folkert, K. (2012). Acoustic and diving behavior of sperm whales (*Physeter macrocephalus*) during natural and depredation foraging in the Gulf of Alaska. *Acoustical Society of America*, 132(1), 518–532. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1121/1.4726005>
- Maze-Foley, K., y Mullin, K. D. (2023). Cetaceans of the oceanic northern Gulf of Mexico: Distributions, group sizes and interspecific associations. *J. Cetacean Res. Manage.*, 8(2), 203–213. <https://doi.org/10.47536/jcrm.v8i2.716>

- Medrano-González, L. (2006). Hacia una dinámica de la mastofauna marina mexicana: análisis de composición funcional y de algunas estructuras genéticas poblacionales. In E. Vázquez-Domínguez y D. J. Hafner (Eds.), *Genética y Mamíferos Marinos: presente y futuro* (Issue 32, pp. 9–19).
- Medrano-González, L., y Urbán-Ramírez, J. (2019). Mamíferos marinos: identidad, diversidad y conservación. *Ciencia*, 70(3), 8–19. [https://www.amc.edu.mx/revistaciencia/images/revista/70\\_3/PDF/MamiferosMarinos.pdf](https://www.amc.edu.mx/revistaciencia/images/revista/70_3/PDF/MamiferosMarinos.pdf)
- Merkens, K., Mann, D., Janik, V. M., Claridge, D., Hill, M., y Oleson, E. (2018). Clicks of dwarf sperm whales (*Kogia sima*). *Marine Mammal Science*, 34(4), 963–978. <https://doi.org/10.1111/mms.12488>.
- Miller, P. J. O., Johnson, M. P., Madsen, P. T., Biassoni, N., Quero, M., y Tyack, P. L. (2009). Using at-sea experiments to study the effects of airguns on the foraging behavior of sperm whales in the Gulf of Mexico. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 56(7), 1168–1181. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2009.02.008>
- Morano, J. L., Tielens, J. T., Muirhead, C. A., Estabrook, B. J., Sullivan, P. J., Dugan, P. J., Clark, C. W., y Rice, A. N. (2020). Seasonal movements of Gulf of Mexico sperm whales following the Deepwater Horizon oil spill and the limitations of impact assessments. *Marine Pollution Bulletin*, 161 (August), 111627. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111627>
- Morrissey, R. P., Ward, J., DiMarzio, N., Jarvis, S., y Moretti, D. J. (2006). Passive acoustic detection and localization of sperm whales (*Physeter macrocephalus*) in the tongue of the ocean. *Applied Acoustics*, 67 (11–12), 1091–1105. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2006.05.014>
- Mullin, K. D., Hoggard, W., y Hansen, L. J. (2004). Abundance and seasonal occurrence of cetaceans in outer continental shelf and slope waters of the north-central and northwestern Gulf of Mexico. *Gulf of Mexico Science*, 22(1), 62–73. <https://doi.org/10.18785/goms.2201.06>
- Muto, M. M., Helker, V. T., Angliss, R. P., Boveng, P. L., Breiwick, J. M., Cameron, M. F., Clapman, P. J., Dahle, S. P., Dahlheim, M. E., Fadely, B. S., Ferguson, M. C., Fritz, L. W., Hobbs, R. C., Ivashchenko, Y. C., Kennedy, A. S., London, J. M., Mizroch, S., Ream, R. R., Richmond, E. L., ... Zerbini, A. N. (2019). Alaska Marine Mammal Stock Assessments, 2018. In NOAA technical Memorandum (Issue NMFS-AFSC-245). [https://scholar.google.no/scholar?q=Allen+and+Angliss+2013+marine+mammals&btnG=&hl=no&as\\_sdt=0,5#5](https://scholar.google.no/scholar?q=Allen+and+Angliss+2013+marine+mammals&btnG=&hl=no&as_sdt=0,5#5)
- Niño-Torres, C. A., Urbán-Ramírez, J., y Vidal, O. (2011). *Mamíferos Marinos del Golfo de California* (Primera ed). Alianza WWF México-Telcel.
- Núñez-Useche, F., y Barragán. (2013). Sedimentación carbonatada, silícica y otros sedimentos químicos en los ambientes marinos profundos. In *La frontera final: el océano profundo*. (Issue January 2015, pp. 57–84).
- Ortega-Ortiz, J. G. (2002). Multiscale analysis of cetacean distribution in the Gulf of Mexico. Ph.D. dissertation, Texas A&M University, College Station.
- Ortega-Ortiz, J., Delgado-Estrella, A., y Ortega-Argueta, A. (2004). Mamíferos marinos del Golfo de México: Estado actual del conocimiento y recomendaciones para su conservación. In M. Caso, I. Pisanty, y E. Ezcurra (Eds.), *Diagnóstico Ambiental del Golfo de México* (1st ed., Vol. I, pp. 137–160). Instituto Nacional de Ecología, México.
- Park, T., Evans, A. R., Gallagher, S. J., y Fitzgerald, E. M. G. (2017). Low-frequency hearing preceded the evolution of giant body size and filter feeding in baleen whales. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 284(1848), 9–11. <https://doi.org/10.1098/rspb.2016.2528>
- Pearson, H. C., Savoca, M. S., Costa, D. P., Lomas, M. W., Molina, R., Pershing, A. J., Smith, C. R., Villaseñor-Derbez, J. C., Wing, S. R., y Roman, J. (2022). Whales in the carbon cycle: can recovery remove carbon dioxide? *Trends in Ecology & Evolution*, 38(3), 238–249. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2022.10.012>
- Rafter, M.R., Frasier K.E., Soldevilla, M.S., Hodge, L., Frouin-Mouy H., Pérez-Carballo, I. (2022) LISTEN GoMex:2010-2021 - Long-term Investigations into Soundscapes, Trends, Ecosystems, and Noise in the Gulf of Mexico. Marine Physical Laboratory, Scripps Institution of Oceanography, University of California San Diego, La Jolla, CA. MPL Technical Memorandum #662.
- Rama-Torres, P. (2020). Revisión bibliográfica: Estudio sobre los mecanismos de comunicación de los cetáceos. Universidad Da Coruña.

- Ramírez-León, M. R., García-Aguilar, M. C., Aguayo-Lobo, A., Fuentes-Allen, I., y Sosa-Nishizaki, O. (2020). What Do We Know About Cetaceans in the Mexican Waters of the Gulf of Mexico? A Review. *Aquatic Mammals*, 46(6), 623–632. <https://doi.org/10.1578/AM.46.6.2020.623>
- Read, A. J., y Wade, P. R. (2000). Status of marine mammals in the United States. *Conservation Biology*, 14(4), 929–940. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.2000.99107.x>
- Ríos-Muñoz, C. A., Arroyo-Cabral, J., y León-Paniagua, L. (2014). Historia de la Mastozoología en México: de dónde venimos y hacia dónde vamos. In J. Ortega, J. L. Martínez, y D. G. Tirira (Eds.), *Mastozoología en Latinoamérica, las Guyanas y el Caribe* (Issue September, pp. 293–314). Murciélagos Blancos y Asociación Ecuatoriana de Mastozoología.
- Ritter, F., y Panigada, S. (2018). Collisions of vessels with cetaceans—the underestimated threat. In *World Seas: An Environmental Evaluation Volume III: Ecological Issues and Environmental Impacts* (Second Edition). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805052-1.00026-7>
- Rolland, R. M., Parks, S. E., Hunt, K. E., Castellote, M., Corkeron, P. J., Nowacek, D. P., Wasser, S. K., y Kraus, S. D. (2012). Evidence that ship noise increases stress in right whales. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 279(1737), 2363–2368. <https://doi.org/10.1098/rspb.2011.2429>
- Rosel, P. E., Wilcox, L. A., Yamada, T. K., y Mullin, K. D. (2021). A new species of baleen whale (*Balaenoptera*) from the Gulf of Mexico, with a review of its geographic distribution. *Marine Mammal Science*, 37(2), 577–610. <https://doi.org/10.1111/mms.12776>
- Shabangu, F. W., y Andrew, R. K. (2020). Clicking throughout the year: sperm whale clicks in relation to environmental conditions off the west coast of South Africa. *Endangered Species Research*, 43(Best 1974), 475–494. <https://doi.org/10.3354/ESR01089>
- Shah, P., Sajeev, R., Thara, K. J., George, G., Shafeeqe, M., Akash, S., y Platt, T. (2019). A Holistic Approach to Upwelling and Downwelling along the South-West Coast of India. *Marine Geodesy*, 42(1), 64–84. <https://doi.org/10.1080/01490419.2018.1553805>
- Soldevilla, M. S., Garrison, L. P., Fraiser, K. E., Hildebrand, J. A., Ortega-Ortiz, J., Serrano, A., Garcia, A., Hanaff, M. Le, y Wall-Bell, C. (2019). Assessing Long-term Trends and Processes Driving Variability in Cetacean Density throughout the Gulf of Mexico using Passive Acoustic Monitoring and Habitat Modeling. <https://doi.org/10.1121/1.2932059>
- Solsona-Berga, A. (2019). Advancement of methods for passive acoustic monitoring: a framework for the study of deep-diving cetacean. In TDX (Tesis Doctorals en Xarxa). Universitat Politècnica de Catalunya.
- Solsona-Berga, A., Frasier, K. E., Baumann-Pickering, S., Wiggins, S. M., y Hildebrand, J. A. (2020). Detedit: A graphical user interface for annotating and editing events detected in long-term acoustic monitoring data. *PLoS Computational Biology*, 16(1), 1–10. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1007598>
- Sousa, A., Alves, F., Dinis, A., Bentz, J., Cruz, M. J., y Nunes, J. P. (2019). How vulnerable are cetaceans to climate change? Developing and testing a new index. *Ecological Indicators*, 98 (June 2018), 9–18. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.10.046>
- Stanistreet, J. E., Nowacek, D. P., Bell, J. T., Cholewiak, D. M., Hildebrand, J. A., Hodge, L. E. W., Van Parijs, S. M., y Read, A. J. (2018). Spatial and seasonal patterns in acoustic detections of sperm whales *Physeter macrocephalus* along the continental slope in the western North Atlantic Ocean. *Endangered Species Research*, 35, 1–13. <https://doi.org/10.3354/esr00867>
- Stone, C., y Tasker, M. (2006). The effects of seismic airguns on cetaceans in UK waters. *Journal of Cetacean Research and Management*, 8(3), 255.
- Takeshita, R., Sullivan, L., Smith, C., Collier, T., Hall, A., Brosnan, T., Rowles, T., y Schwacke, L. (2017). The Deepwater Horizon oil spill marine mammal injury assessment. *Endangered Species Research*, 33(1), 95–106. <https://doi.org/10.3354/esr00808>
- Taylor, B.L., Baird, R., Barlow, J., Dawson, S.M., Ford, J., Mead, J.G., Notarbartolo di Sciara, G., Wade, P. y Pitman, R.L. 2019. *Physeter macrocephalus* (amended version of 2008 assessment). The IUCN Red List of Threatened Species 2019: e.T41755A160983555. <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2008.RLTS.T41755A160983555.en>. Accessed on 18 May 2023.
- Tejero-Caballo, E. (2020). *Aplicaciones de Machine Learning a la bioacústica marina*. Universidad de Salamanca.
- Thode, A. (2004). Tracking sperm whale (*Physeter macrocephalus*) dive profiles using a towed passive acoustic array. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 116(1), 245–253. <https://doi.org/10.1121/1.1758972>
- Thode, A., Mathias, D., Straley, J., O'Connell, V., Behnken, L., Falvey, D., Wild, L., Calambokidis, J., Schorr, G., Andrews, R., Liddle, J., y Lestenkof, P. (2015). Cues, creaks, and decoys: Using passive acoustic

- monitoring as a tool for studying sperm whale depredation. *ICES Journal of Marine Science*, 72(5), 1621–1636. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsv024>
- Thomson, D. H., y Richardson, W. J. (1995). MARINE MAMMAL SOUNDS. In W. J. Richardson, C. R. Greene, C. I. Malme, y D. H. Thomson (Eds.), *Marine Mammals and Noise* (pp. 159–204). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-057303-8.50010-0>.
- Torreblanca-Fernández, E., Carlos Báez Barrionuevo, J., Antonio Camiñas Hernández, J., Real Giménez, R., Macías López, D., y García Barcelona, S. (2018). Distribución Diferencial De Grandes Cetáceos: Rorcual Y Cachalote Como Caso De Estudio. En Almud y Ediciones de Castilla-la Mancha (Eds.), *Bosque mediterráneo y humedales paisaje, evolución y conservación: aportaciones desde la biogeografía* (1st ed., Issue May, pp. 750–761). [https://www.researchgate.net/profile/Jose\\_Baez4/publication/324695165\\_Distribucion\\_diferencial\\_de\\_grandes\\_cetaceos\\_rorcual\\_y\\_cachalote\\_como\\_caso\\_de\\_estudio/links/5af197b7a6fdcc24364b1999/Distribucion-diferencial-de-grandes-cetaceos-rorcual-y-cachalote-com](https://www.researchgate.net/profile/Jose_Baez4/publication/324695165_Distribucion_diferencial_de_grandes_cetaceos_rorcual_y_cachalote_como_caso_de_estudio/links/5af197b7a6fdcc24364b1999/Distribucion-diferencial-de-grandes-cetaceos-rorcual-y-cachalote-com).
- Uribe-Martínez, A., Aguirre-Gómez, R., Zavala-Hidalgo, J., Ressl, R., y Cuevas, E. (2019). Unidades oceanográficas del Golfo de México y áreas adyacentes: La integración mensual de las características biofísicas superficiales Oceanographic units of Gulf of Mexico and adjacent areas: The monthly integration of surface biophysical features. *Geofísica Internacional*, 58(4), 295–315.
- Vázquez-Castán, L., Serrano, A., y Galindo, J. Á. (2009). Estudio preliminar sobre la diversidad, distribución y abundancia de cetáceos en aguas profundas del golfo de México. *Revista Científica UDO Agricola*, 9(4), 992–997.
- Vázquez-Castán, L., Serrano-Solís, A., López-Ortega, M., Galindo, J. Á., Valdes-Arellanes, M. P., y Naval-Ávila, C. (2007). Caracterización del hábitat de dos poblaciones de toninas (*Tursiops truncatus*, Montagu 1821) en la costa Norte del estado de Veracruz, México. *Revista UDO Agrícola*, 7(1), 285–292.
- Ward, J. A., Thomas, L., Jarvis, S., Dimarzio, N., Moretti, D., Marques, T. A., Dunn, C., Laridge, D., Hartvig, E., y Tyack, P. (2012). Passive acoustic density estimation of sperm whales in the Tongue of the Ocean, Bahamas. *Marine Mammal Science*, 28(4), 1–12. <https://doi.org/10.1111/j.1748-7692.2011.00560.x>.
- Watkins, W. A., y Schevill, W. E. (1977). Sperm whale codas. *Journal of the Acoustical Society of America*, 62(6), 1485–1490. <https://doi.org/10.1121/1.381678>
- Weilgart, L. (2013). A Review of the Impacts of Seismic Airgun Surveys on Marine Life. *A Review of the Impacts of Seismic Airgun Surveys on Marine Life*, February, 25–27.
- Weller, D. W., Würsig, B., Lynn, S. K., y Schiro, A. J. (2000). Preliminary Findings on the Occurrence and Site Fidelity of Photo-Identified Sperm Whales (*Physeter macrocephalus*) in the Northern Gulf of Mexico. *Gulf of Mexico Science*, 18(1), 1–6. <https://doi.org/10.18785/goms.1801.04>
- Whitehead, H. (2018). Sperm Whale *Physeter macrocephalus*. En B. Würsig, J. G. M. Thewissen, y K. M. Kovacs (Eds.), *Encyclopedia of Marine Mammals* (Third Edit, pp. 919–925). Elsevier. [https://books.google.com.mx/books?id=T3zGDgAAQBAJylpg=PP1ydq=marine\\_mammalsyhl=esypg=PA919#v=onepageyq=marine\\_mammalsyf=false](https://books.google.com.mx/books?id=T3zGDgAAQBAJylpg=PP1ydq=marine_mammalsyhl=esypg=PA919#v=onepageyq=marine_mammalsyf=false)
- Whitehead, H., Antunes, R., Gero, S., Wong, S. N. P., Engelhardt, D., y Rendell, L. (2012). Multilevel Societies of Female Sperm Whales (*Physeter macrocephalus*) in the Atlantic and Pacific: Why Are They So Different? *International Journal of Primatology*, 33(5), 1142–1164. <https://doi.org/10.1007/s10764-012-9598-z>
- Whitlow W.L., A. (2018). Echolocation. In *Encyclopedia of Marine Mammals* (Vol. 3, Issue 2013, pp. 289–299). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-804327-1.00113-8>
- Wiggins, S. M., Hall, J. M., Thayre, B. J., y Hildebrand, J. A. (2016). Gulf of Mexico low-frequency ocean soundscape impacted by airguns. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 140(1), 176–183. <https://doi.org/10.1121/1.4955300>
- Wiggins, S. M., y Hildebrand, J. A. (2007). High-frequency Acoustic Recording Package (HARP) for broad-band, long-term marine mammal monitoring. *International Symposium on Underwater Technology, UT 2007 - International Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies 2007*, April, 551–557. <https://doi.org/10.1109/UT.2007.370760>
- Wilkinson, T. A. C., Wiken, E., Creel, J. B., Hourigan, T. F., Agardy, T., Herrmann, H., Lisa Janishevski, Madden, C., Morgan, L., y Padilla, M. (2009). Golfo de México sur. In *Ecorregiones Marinas de América del Norte* (pp. 75–77). Comision para la Cooperacion Ambiental. <https://www.biodiversidad.gob.mx/region/ecorregionesI.html>

- Winsor, M. H., Irvine, L. M., y Mate, B. R. (2017). Analysis of the spatial distribution of satellite-tagged sperm whales (*Physeter macrocephalus*) in close proximity to seismic surveys in the Gulf of Mexico. *Aquatic Mammals*, 43(4), 439–446. <https://doi.org/10.1578/AM.43.4.2017.439>
- Würsig, B. (2017). Marine Mammals of the Gulf of Mexico. En H. C. Ward (Ed.), *Habitats and Biota of the Gulf of Mexico: Before the Deepwater Horizon Oil Spill* (First, Vol. 2, pp. 1489–1589). Springer Open.
- Yarbu, I., González-Fernández, A., Spelz-Madero, R. M., Negrete-Aranda, R., y Contreras, J. (2018). Development of Detachment Folds in the Mexican Ridges Foldbelt, Western Gulf of Mexico Basin. *Tectonics*, 37(7), 2013–2028. <https://doi.org/10.1029/2017TC004948>
- Yarbu, I., y Contreras, J. (2017). The interplay between deformation, erosion and sedimentation in the deep-water Mexican Ridges foldbelt, western Gulf of Mexico basin. *Basin Research*, 29, 446–464. <https://doi.org/10.1111/bre.12157>
- Zavala-Hidalgo, J., Morey, S. L., y O'Brien, J. J. (2003). Seasonal circulation on the western shelf of the Gulf of Mexico using a high-resolution numerical model. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 108(12), 1–19. <https://doi.org/10.1029/2003jc001879>
- Zavala-Hidalgo, J., Parés-Sierra, A., y Ochoa, J. (2001). Seasonal variability of the temperature and heat fluxes in the Gulf of Mexico. *Atmosfera*, 15(2), 81–104.
- Zavala-Hidalgo, J., Romero-Centeno, R., Mateos-Jasso, A., Morey, S. L., y Martínez-López, B. (2014). The response of the Gulf of Mexico to wind and heat flux forcing: What has been learned in recent years? *Atmosfera*, 27(3), 317–334. [https://doi.org/10.1016/S0187-6236\(14\)71119-1](https://doi.org/10.1016/S0187-6236(14)71119-1)
- Zimmer, W. M. X. (2011). Passive acoustic monitoring (putting it all together). In *Passive Acoustic Monitoring of Cetaceans* (first, pp. 237–257). Cambridge University Press.