



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y
OCEANOGRÁFICAS**



**ANÁLISIS DE LA PROFUNDIDAD DE VOCALIZACIÓN
DE LA BALLENA FIN (*Balaenoptera physalus*) EN SU ZONA DE
ALIMENTACIÓN ALREDEDOR DE LA RESERVA MARINA ISLA
CHAÑARAL,
BASADO EN MARCAS ACÚSTICAS.**

POR CONSTANZA JAVIERA ALARCÓN VERA

Seminario de título presentado al
DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFÍA
DE LA UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
para optar al título de BIÓLOGA MARINA.

Concepción - Chile

2023

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFÍA

Este Seminario de Título ha sido realizado en el Departamento de Oceanografía de la Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas.

Profesor(a) Guía

Dra. Susannah Buchan

Ha sido aprobada por la
Siguiente Comisión Evaluadora

Dr. Fabián Tapia

Dr. Carlos Olavarría

Jefe de Carrera

Dr. Ariel Valenzuela

AGRADECIMIENTOS

Quiero partir agradeciendo a mi familia, especialmente, a mi madre y padre por su apoyo y amor incondicional desde siempre. Gracias por confiar en mí, en mis anhelos más profundos y por incentivarme a cumplir mis sueños. A mi abuelo Ramón quien fue el primero en tener curiosidades sobre las ballenas y lo que sería mi tesis, hoy ya no está en este plano terrenal pero se que desde otro lugar está celebrando conmigo el término de mi etapa universitaria. Gracias por siempre recolectar notas de diarios sobre ballenas, el mar y la ciencia.

A mis grandes amigas y amigos que me entregó la biología y biología marina: Paci, Marita, Dani, Fran, Mario y Charly, hicieron que mi paso por Concepción sea inolvidable, estaré siempre agradecida de ustedes por hacerme parte de sus familias y por el cariño que tenemos. A Pablo por haber sido parte importante de este proceso, gracias por haberme acompañado. A la Cami por ser la primera persona que me ayudó cuando estaba en segundo año de universidad y quería aprender más sobre cómo estudiar mamíferos marinos. Al maestro Anelio Aguayo por recibirme como alumna pasante para aprender sobre mamíferos marinos, gracias por las enseñanzas. A mi equipo del CEMM con quienes inicié mis primeros terrenos monitoreando ballenas sei en Caleta Chrome marcando un momento muy importante. Agradecer también a mi gente de Punta Arenas quienes han vivido conmigo y me han inspirado en la última etapa de este proceso: Javi, Coli, Pauli, Cristóbal, Claudio, mi abuelita Gaby, mi padrino y tío Max.

Agradezco a mi profesora guía, Dra Susannah Buchan, gracias por su dedicación, paciencia y apoyo durante el desarrollo de la tesis a pesar de encontrarnos en diferentes partes del mundo y por darme la posibilidad de realizar mi tesis estudiando a ballenas, contribuyendo a mejorar mi rendimiento en la realización de la tesis. Agradezco mi comisión, Dr. Fabian Tapia, profesor desde primer año de universidad, por su dedicación,

enseñanzas como docente y buena disposición siempre. Al Dr. Carlos Olavarría por aceptar ser parte de mi comisión, por los aprendizajes entregados durante el terreno de marcaje de ballenas y por el apoyo entregado durante la primera etapa de la tesis. También agradecer a Laura Gutierrez por su ayuda y disposición para enseñarme a utilizar herramientas que servirían en el desarrollo de esta tesis. Gracias a los colaboradores internacionales de este proyecto, la Dra. Kate Stafford (Oregon State University), el Dr. Gaetan Richard (Bureau d'Etudes SOMME), la Dra Flore Samaran y Julie Beesau (ENSTA Bretagne). Gracias al capitán don Patricio Ortiz, que hizo posible el trabajo de marcaje.

Finalmente, deseo agradecer al Centro de Estudios Avanzado de Zonas Áridas (CEAZA) por permitirme desarrollar la tesis bajo el proyecto *Acousonde*, así como el Centro de Investigación Oceanográfica en el Pacífico Sur-Oriental, COPAS Coastal y también a la escuela de ingeniería ENSTA Bretagne (Francia) quienes colaboraron en el desarrollo de este seminario de título. Se agradecen las fuentes de financiamiento que hacen posible y dan continuidad al proyecto de marcaje de ballenas: Fonds Européen de Développement Régional (FEDER); ENSTA Bretagne, ISBlue; LIA MAST; Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) Vinculación FOVI210037; Oregon State University.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	i
ÍNDICE DE TABLAS	ii
INDICE DE ANEXOS.....	iii
RESUMEN	1
ABSTRACT	2
1 INTRODUCCIÓN	4
1.1 Presencia de ballenas fin en el Pacífico Sur Oriental	4
1.2 Bioacústica y comportamiento asociado de la ballena fin.....	5
1.3 Monitoreo acústico pasivo (PAM)	7
1.4 Propagación del sonido y profundidad de vocalización	8
2 HIPÓTESIS.....	10
3 OBJETIVOS	11
3.1 Objetivo general	11
3.2 Objetivos específicos.....	11
4 METODOLOGÍA.....	12
4.1 Área de estudio	12
4.2 Recolección de datos con marcas acústicas	13
4.3 Análisis y procesamiento de las señales acústicas	15
4.4 Identificación de la ballena vocalizadora (“caller ID”)	16
4.5 Procesamiento de los perfiles de buceo	17
4.6 Cálculo de la tasa de vocalización.....	18
4.7 Análisis de la profundidad de vocalización y calibración del sensor de presión.....	18
4.8 Caracterización propagación del sonido: capa superficial vs capa profunda	19
5 RESULTADOS	24
5.1 Detección de señales acústicas de la ballena fin	24
5.2 Perfiles de buceo y profundidad de vocalización de la ballena fin	28
5.3 Propagación del sonido: capa superficial vs capa profunda.....	31
6 DISCUSIÓN	35
6.1 Caracterización de las vocalizaciones de ballenas fin marcadas fuera de la Reserva Marina Isla Chañaral.	35
6.1.1 Evaluación de metodología de análisis acústico y posibles sesgos.....	35
6.1.2. Evaluación metodológica del análisis de profundidad de vocalización.....	36
6.1.3 Tasa de vocalización.....	40
6.2 Profundidad de inmersión y profundidad de vocalización.....	41
6.2.1 Conducta de buceo	41

6.2.2	Profundidad de vocalización	43
6.3	Condiciones de propagación de vocalizaciones en la columna de agua y su relación con la profundidad de vocalización	44
6.3.1	Condiciones físicas de la columna de agua	44
6.3.2	Evaluar modelo de propagación.....	45
6.3.3	La relación entre profundidad de vocalización observada y las condiciones de propagación de las vocalizaciones	46
6.4	Implicancias para el monitoreo y la conservación	48
7	CONCLUSIONES	50
8	REFERENCIAS	52
9	ANEXO 1: POTENCIA ACÚSTICA PROMEDIO POR DESPLIEGUE CON PRESENCIA DE VOCALIZACIONES.....	63
10	ANEXO 2: CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA, AÑO 2020 Y 2021.....	66
11	ANEXO 3: PERFILES DE BUCEO.....	68
12	ANEXO 4: PÉRDIDA DE TRANSMISIÓN DE <i>DOWNSWEEP</i>.....	78

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Mapa del área de estudio de marcaje de ballenas. El círculo negro entorno a isla representa la Reserva Marina Isla Chañaral. Los asteriscos (*) color celeste corresponden al marcaje del año 2020. Los asteriscos (*) color naranja corresponden al marcaje del año 2021.	12
Figura 2.	Esquema detallado de la marca Acousonde 3B. Obtenido de http://www.acousonde.com/	13
Figura 3.	Marca acústica Acousonde adaptada a la empuñadura. Obtenido de http://www.acousonde.com/	14
Figura 4.	Espectrograma de tres vocalizaciones tipo downsweep de ballena fin. Datos acústicos correspondientes al despliegue 1 del año 2021. Los parámetros utilizados en Raven Pro 1.6.1 son: fft = 16.384, luz = 50, contraste = 55%, overlap = 90%.	25
Figura 5.	Ejemplos de perfiles de buceo de ballena fin (<i>Balaenoptera physalus</i>): Perfil de buceo con presencia de vocalizaciones tipo downsweep (arriba) correspondiente al despliegue 11 del año 2021. Perfil de buceo sin vocalizaciones (abajo) correspondiente al despliegue 15 del año 2021. Los puntos color rojo representan las vocalizaciones registradas en el despliegue.	28
Figura 6.	Comparación de los valores de (a) profundidad de inmersión o buceo versus valores de (b) profundidad de vocalización de la ballena fin. Los gráficos de boxplot muestra: percentil 25 y 75 (bordes superior e inferior de la caja), mediana (línea central roja dentro de la caja), valores extremos (bigotes) y valores atípicos (línea roja y punto rojo).....	29
Figura 7.	Histograma de distribución de la profundidad de vocalización (azul) y su mediana (línea roja).	30
Figura 8.	Perfiles de a) temperatura (°C), b) salinidad (PSU) y c) velocidad del sonido (m/s) a lo largo de la columna de agua hasta los 124 metros de profundidad.	31
Figura 9.	Pérdida de transmisión (dB) del sonido respecto a la profundidad del emisor y receptor (m) a lo largo de la columna de agua hasta los 120 m de profundidad sobre una distancia de 16,6 km. Las secciones color rojo representan el área bajo la curva (%) cada intervalo respecto al área total. 32	

Figura 10: Los gráficos muestran el modelo de pérdida de transmisión (dB) a lo largo de la transecta de 16,6 km con una profundidad de emisor a 10 m (a), 60 m (b) y 120 m (c).33

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros a considerar en el modelo RAM junto con sus respectivos valores y fuente.....	23
Tabla 2. Tabla de la característica de frecuencia, duración y potencia (promedio $\pm$ desviación estándar) de las vocalizaciones tipo downsweep de ballena fin (<i>Balaenoptera physalus</i>), además de la tasa de vocalización (número de downsweep / esfuerzo de grabación) por año.	27
Tabla 3. Características acústicas (rango de frecuencia y duración) de los downsweep de ballena fin descritos en la literatura.	39
Tabla 4: Profundidad máxima de buceo (m) de la ballena fin (<i>Balaenoptera physalus</i>) reportado en la literatura.....	42

INDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: Potencia acústica promedio por despliegue con presencia de vocalizaciones.....	60
ANEXO 2: Caracterización acústica, año 2020 y 2021.....	64
ANEXO 3: Perfiles de buceo.....	66
ANEXO 4: Pérdida de transmisión de downsweep	76

RESUMEN

La Reserva Marina Isla Chañaral es una importante área de alimentación para las ballenas fin (*Balaenoptera physalus*) que año tras año llegan para alimentarse durante el verano. Esta especie produce vocalizaciones que se clasifican en cantos y vocalizaciones. La presencia acústica de la ballena fin en Chile se ha reportado únicamente alrededor de la Reserva Marina Isla Chañaral (*downsweep*) y en el Archipiélago de Juan Fernandez (cantos) a partir del uso de hidrófonos anclados. La profundidad de vocalización de la ballena es un parámetro fundamental para estudios que utilicen hidrófonos anclados y busquen estimar el rango de detección de esta herramienta acústica. La profundidad de vocalización ha sido descrita para los cantos de 20 Hz en el hemisferio norte, pero hasta ahora no hay información sobre las vocalizaciones tipo *downsweep*.

El objetivo principal de este trabajo fue caracterizar la profundidad de vocalización de la ballena fin y determinar si la profundidad de vocalización más frecuente coincide con condiciones hidrográficas favorables para la propagación del sonido. Para ello, se realizaron 20 despliegues de marcas acústicas durante 15 días no consecutivos durante los veranos de 2020 y 2021, obteniendo registros acústicos y de buceo de los animales marcados. Además, se modeló la pérdida de transmisión del sonido en función de la profundidad a intervalos de 10 m y hasta una profundidad máxima de 120 m. Se identificó la presencia acústica de vocalizaciones tipo *downsweep* de 63 Hz en un 40% del total de los animales marcados, cuya producción de vocalizaciones ocurrió principalmente (93,5% del total) en la capa superficial de la columna de agua (< 20m), con una profundidad de vocalización promedio de 12,1 m. Por otro lado, el modelo mostró que a los 60 m se produce una mayor propagación de las vocalizaciones, misma profundidad a la que se observó un conducto acústico, independiente de la profundidad a la que se encuentre el emisor y receptor. Por lo tanto, el conducto acústico contribuye a la propagación de los *downsweep* aunque la profundidad de

vocalización sea 12,1 m. Aquí se presentan explicaciones de por qué la profundidad de vocalización ocurre en la capa superficial y cómo se relaciona con las condiciones de propagación favorables a lo largo de la columna de agua. Además, el desarrollo de esta tesis permitió identificar desafíos para futuros trabajos con la finalidad de mejorar y/o establecer criterios estándares para trabajar con los datos obtenidos de las marcas acústicas.

ABSTRACT

The Isla Chañaral Marine Reserve is the most important feeding ground for fin whales (*Balaenoptera physalus*) that arrive year after year to feed during summer. The calls of this species are classified in songs and vocalizations. The acoustic presence of fin whale in Chile have been described only around Marine Reserva Isla Chañaral (*downsweeps*) and Archipelago Juan Fernandez (songs) through the of used anchored hydrophone. The depth call whale is an important parameter for studies that use anchored hydrophones and require an estimate of the detection range of this acoustic equipment. The depth call has been described for 20 Hz songs in the northern hemisphere, but actually there is not information about calls type *downsweep*.

The principal object of this project was characterization of fin whale depth call and determine if the most frequently depth call coincided with better hydrographics condition to sound propagation. For them, 20 acoustic tag deployments were conducted for 15 non-consecutive days during the summer 2020 and 2021, obtaining acoustic and diving recordings of the tagging animals. Also, sound transmission loss was modeled in function of the depth to intervals of 10 m to maxim depth of 120 m. The acoustic presence of calls type *downsweep* 63 Hz was identified in 40% of the total number of tagging animals, whose call production occurred mainly (93,5% of the total) in the surface layer of the water column (<20 m), with an average depth call of 12, 1 m. The model showed that the zone with major propagation sound of *downsweep* is to 60 m, independent of the depth sender and receiver. Therefore, the acoustic conduct contributes to *downsweep* propagation even

if the call depth is 12, 1 m. Here we present explanations of why the call depth occurred in the surface layer and how is the relationship with better propagation conditions along to water column. The development of this thesis allowed us to identify challenges for future work in order to improve and/or establish standard criteria for working with the data obtained from the acoustic.

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Presencia de ballenas fin en el Pacífico Sur Oriental

Durante la época de caza comercial de cetáceos, la ballena de aleta o ballena fin fue el primer recurso ballenero del grupo de los misticetos (46,9%) en Chile Continental (1929–1983) y la Antártica Chilena (1911-1929) (Aguayo-Lobo et al., 1998a). Se estima que alrededor de 750.000 ballenas fin fueron capturadas en el hemisferio sur durante el siglo XX (Clapham & Baker, 2001), llegando casi al borde de la extinción. Actualmente, la ballena fin se encuentra en la Lista Roja de Especies Amenazadas de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN), categorizada como una especie “Vulnerable” por la UICN y “En Peligro Crítico” por el Ministerio de Medio Ambiente de Chile (MMA).

Posterior a la caza comercial de ballenas (1982) la presencia de la ballena fin ha sido informada mediante avistamientos a lo largo de Chile continental (Aguayo-Lobos et al., 1998a), fuera de la Bahía Mejillones (Pachecho et al., 2015), el Archipiélago de Humboldt (Pérez et al., 2006), entre Valparaíso e Isla de Pascua (Aguayo-Lobo et al., 1998b), el Archipiélago de Chonos (González, 2003) y la Antártica (Aguayo & Torres, 1967). Además, acústicamente su presencia en Chile se ha reportado en el Archipiélago de Juan Fernández y en la Reserva Marina Isla Chañaral (Buchan et al., 2019; Vega et al., 2023).

En general, los misticetos se caracterizan por ser especies migratorias que recorren largas distancias (de miles de kilómetros) para alimentarse en aguas polares o subpolares durante el verano austral y, posteriormente, viajar hacia aguas tropicales o subtropicales durante el invierno austral para reproducirse en aguas más cálidas (Mackintosh, 1966). En las últimas décadas, diversos estudios han cambiado el paradigma tradicional de migración de la ballena fin en el Pacífico Sur Oriental (PSO), con una destacada presencia en latitudes medias, principalmente en la zona norte-centro de Chile durante la temporada primavera-verano austral (Pérez et al.,

2006; Pachecho et al., 2015; Acevedo et al., 2012; Toro et al., 2016; Sepúlveda et al., 2018). Se han avistado individuos, aunque en menor cantidad, incluso durante el invierno austral en la zona centro-norte de Chile (S. Buchan, com. pers.). En el PSO y en el Océano Austral se han descrito áreas de alimentación para la ballena fin: 1) en aguas costeras alrededor del Sistema insular del Archipiélago de Humboldt (Pérez et al., 2006; Toro et al., 2016; Sepúlveda et al., 2018; Buchan et al., 2021) y 2) en aguas alrededor de la Península Antártica (Burkhardt & Lanfredi, 2012; Herr et al., 2016). Sin embargo, las rutas migratorias y áreas de reproducción no han sido anteriormente estudiadas para la población de ballenas fin que se alimentan en el Pacífico Sur Oriental y en el Océano Austral.

1.2 Bioacústica y comportamiento asociado de la ballena fin.

La producción y recepción de sonido en cetáceos tiene como finalidad varias funciones asociadas a su ciclo de vida, tales como la comunicación, navegación, detección de presas y/o la evasión de obstáculos (Au & Hasting, 2008). Los rorcuales (familia: Balaenopteridae) como la ballena azul y la ballena fin producen sonidos cortos de baja frecuencia (< 1 kHz) y alta intensidad (por encima de 180 dB re: $1\mu\text{Pa}$ a 1m) que pueden ser detectados en todos los océanos (Clarke, 1990). En general, sus sonidos se pueden clasificar en: 1) vocalizaciones, definidas como sonidos individuales producidos de forma aleatoria; y 2) cantos, que corresponden a secuencias repetidas de sonidos con un patrón reconocible en el tiempo (McDonald et al., 2006).

La ballena fin produce diferentes vocalizaciones o cantos que varían según la ubicación geográfica, población y temporada (p. ej. Širović et al., 2013; Buchan et al., 2019; Romagosa et al., 2021; Constaratas et al., 2021), y el conocimiento sobre el comportamiento o función asociada a sus vocalizaciones es limitado. El canto más conocido de la ballena fin fue descrito por Watkins et al. (1987), y consiste en pulsos o notas de corta duración (1 s) y con frecuencias de 23 Hz a 18 Hz, centradas en 20 Hz, y con niveles de fuente variables hasta 186 dB re $1\mu\text{Pa}$ a 1 m. Los pulsos de 20 Hz ocurren

en intervalos regulares que pueden variar según la zona geográfica. El tiempo transcurrido entre una señal y otra se denomina intervalo entre notas (INI) o intervalo entre pulsos (IPI), y es una característica fundamental para describir los cantos de ballenas y ayudar a diferenciar patrones acústicos entre poblaciones (Oleson et al., 2014; Širović et al., 2017; Constaratas et al., 2021). El canto de 20 Hz se ha documentado en machos (Croll et al., 2002) y se ha planteado la hipótesis de que cumple una función reproductiva (Watkins et al., 1987; Croll et al., 2002). Además de los cantos, se han descrito vocalizaciones de 40 Hz o *downsweep* para la ballena fin (Watkins, 1981, Širović et al., 2013) producidas principalmente durante el verano, mientras que los cantos de 20 Hz ocurren durante el otoño (Širović et al., 2013) y el invierno (Buchan et al. 2019). Estas variaciones estacionales de las vocalizaciones, son indicadores de una diferencia en el contexto de comportamiento acústico de cada vocalización. Por ejemplo, los *downsweeps* de 40 Hz se han asociado a contextos de alimentación y durante inmersiones profundas, probablemente en busca de alimento (Croll et al., 2001). Así mismo, Romagosa et al (2021) ha reportado la presencia de *downsweeps* de 40 Hz de ballena fin en una importante área de alimentación en el Atlántico Norte, demostrando a través del uso del Monitoreo Acústico Pasivo (o PAM por su sigla en inglés) y retrodispersión acústica que la tasa de vocalización de *downsweep* de 40 Hz aumenta junto con el aumento de la biomasa de zooplancton, corroborando el uso de *downsweep* de 40 Hz en contextos de alimentación. Así mismo, un estudio de Vega et al. (2023) encontró diferencias en la presencia de *downsweep* de 62 Hz en los veranos de 2018 y 2019 en la Reserva Marina Isla Chañaral, destacando un aumento de estas vocalizaciones en el verano de 2018 y una disminución en el verano de 2019, posiblemente relacionado a cambios interanuales en la biomasa de presas, lo cual sería consistente con un estudio que registró una mayor retrodispersión acústica de zooplancton en febrero 2018 en comparación con 2019 en la Reserva Marina Isla Chañaral (Oyanadel, 2020). Análogamente, los *downsweep* (o *D-calls*) de ballena azul han sido descritos para machos y hembras registrando en contextos de varios individuos conformando un grupo o individuos cercanos entre si dentro de una misma area (Oleson et al., 2007).

En aguas chilenas y el Pacífico Sur Oriental, se ha documentado la presencia acústica de la ballena fin alrededor del Archipiélago de Juan Fernández y en la Reserva Marina Isla Chañaral. El canto de la ballena fin en Juan Fernández está compuesto de notas regulares de 17 Hz asociadas a componentes de alta frecuencia de 85 Hz, con un INI de 14.4 s, detectadas entre febrero y junio, con una ocurrencia peak durante el invierno austral (Buchan et al., 2019). Las vocalizaciones detectadas durante el verano austral en la Reserva Marina Isla Chañaral consisten en *downsweep* que van de 81,3 a 48,9 Hz con una frecuencia peak promedio de 62,1 Hz (Vega et al., 2023). Sin embargo, aún no se ha determinado con exactitud el destino migratorio de estos grupos de ballenas fin ni el comportamiento asociado a las vocalizaciones registradas. Además, cabe destacar que estos son los únicos reportes publicados sobre acústica de ballena fin en aguas chilenas.

1.3 Monitoreo acústico pasivo (PAM)

El monitoreo acústico pasivo es un método ampliamente utilizado para estudiar los sonidos producidos por cetáceos en contextos de comunicación, navegación, y detección de presas y depredadores (Acevedo-Ramírez et al., 2019). Este método permite detectar señales acústicas a grandes distancias y, en comparación con métodos visuales, ofrece la ventaja de recolectar datos continuos durante largos períodos de tiempo (Mellinger et al., 2007), en lugares remotos con acceso limitado y condiciones ambientales extremas. El PAM utiliza equipos de grabación de sonido (hidrófonos) para registrar señales acústicas del entorno, como vocalizaciones o cantos producidos por misticetos (Blumstein et al., 2011). Los hidrófonos anclados son el tipo de PAM más utilizado en los océanos del mundo, incluyendo Chile (Stafford et al., 1998; Buchan, 2014; Buchan et al., 2019; Buchan et al., 2020). Sin embargo, la interpretación de datos acústicos provenientes de hidrófonos anclados durante largos periodos de tiempo presenta algunas limitaciones: 1) la especie debe vocalizar para que su presencia sea detectada; 2) existe una falta de información sobre el contexto conductual de las vocalizaciones detectadas, como la profundidad de vocalización, la tasa de vocalización, o el tipo de conducta durante la vocalización; 3) para ciertas señales, existe una dificultad

en identificar a qué especie corresponde una señal acústica (Parks et al., 2011). A partir de las limitaciones del uso de hidrófono, se han desarrollado dispositivos denominados marcas acústicas (o *acoustic tags*) que se adhieren al cuerpo del animal midiendo el entorno sonoro, actividad de vocalización y comportamiento, tales como profundidad de inmersión y otros movimientos corporales (Johnson & Tyack, 2003; Johnson et al., 2009). Esta tecnología permite comprender el contexto conductual de las ballenas cuando vocalizan y no vocalizan, complementando y mejorando la interpretación del monitoreo acústico a largo plazo.

1.4 Propagación del sonido y profundidad de vocalización

El sonido es una onda mecánica que se produce cuando se perturba un medio, es decir, cuando se produce un cambio en la presión acústica o la velocidad de las partículas suspendidas en un fluido. La perturbación y la energía asociada a la producción del sonido viaja a través del medio, proceso que es conocido como propagación del sonido (Bradley & Stern, 2008).

La propagación del sonido en el agua depende de varios factores como: el nivel de fuente (dB) y la frecuencia (Hz) de la señal, la profundidad del receptor y el emisor, la velocidad del sonido, la profundidad del agua, la variabilidad del fondo, la rugosidad de la superficie, entre otros (Mercado III & Frazer, 1999). La velocidad del sonido a su vez depende de la temperatura, salinidad y presión del agua, los que varían geográficamente y se ven afectados por los cambios estacionales y diurnos (Jensen et al., 2011).

La propagación del sonido en el océano se mide a través de la pérdida de transmisión del sonido (TL por sus siglas en inglés), definida como la pérdida de energía acústica en decibeles a medida que el sonido se propaga desde una fuente (Jensen et al., 2011). La pérdida de energía acústica se debe a varios fenómenos físicos como la dispersión, la absorción y la atenuación (Urlick, 1983). La energía acústica que se propaga desde una fuente hacia un receptor experimenta pérdidas de transmisión, lo cual se refleja en la pérdida de intensidad de la onda entre la fuente y el receptor (Randall, 1999). De modo

simplificado, mientras menor sea la pérdida de transmisión, mayor será la propagación del sonido y viceversa (Erbe et al., 2022).

En estudios con hidrófonos anclados, estimar el rango de detección del hidrófono en un determinado lugar es fundamental para la interpretación de los datos. Para los modelos de propagación de sonido utilizados para estimar el rango de detección, es necesario tener información oceanográfica del sitio, la profundidad de vocalización y las características acústicas de la señal (frecuencia y decibeles). Por esto, determinar la profundidad de vocalización para las ballenas fin en Chile es primordial para obtener mejores estimaciones del rango de detección, las que hasta ahora se han basado en profundidades de vocalización medidas en otras áreas geográficas (ej. Buchan et al., 2019). La profundidad de vocalización, específicamente, de la ballena fin es un parámetro poco estudiado (Watkins, 1981; Stimpert et al., 2015) y ha sido descrito por Stimpert et al. (2015) únicamente para los cantos de 20 Hz en el Sur de California, cuya profundidad de vocalización ocurre en aguas someras, inferiores a 15 m. Dado que en Chile la profundidad de vocalización no ha sido descrita para ninguna especie de ballena, surgen interrogantes a partir del desconocimiento en torno a la biología/acústica de la ballena fin, abriendo espacio para otras preguntas sobre la conducta acústica de las ballenas y la propagación de sus vocalizaciones, como por ejemplo: ¿Están las ballenas fin vocalizando en aguas someras en el área de estudio? ¿Hay una profundidad óptima de vocalización que permite mayor propagación de las vocalizaciones?

El presente trabajo de tesis tuvo como objetivo determinar la profundidad de vocalización de las ballenas fin y verificar si la profundidad de vocalización se asocia a condiciones favorables de propagación en la columna de agua.

2 HIPÓTESIS

Actualmente, estudios en Chile ocupan valores de la profundidad de vocalización de la ballena fin obtenidos en otras regiones del mundo. A partir de observaciones realizadas en la costa de California, Estados Unidos, Stimpert et al. (2015) reportaron que la ballena fin vocaliza entre los 10 y 20 m de profundidad. A partir de esto, surge la pregunta: ¿Están las ballenas fin vocalizando a la misma profundidad en el norte de Chile?

De confirmarse lo anterior, surge una segunda pregunta: ¿hay una mayor propagación del sonido (i.e. menor pérdida de transmisión del sonido) en la capa superficial? (ej. DeRuiter et al., 2006).

A partir de las preguntas recién enunciadas, las hipótesis planteadas son las siguientes:

H1: La ballena fin vocaliza en la capa superficial de la columna de agua entre los 0 y 20 metros de profundidad.

H2: La pérdida de transmisión de vocalizaciones de la ballena fin es menor en la capa superficial (0-20) que en la capa profunda (>20 m).

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Evaluar la conducta acústica y de buceo de la ballena fin en su área de alimentación alrededor de la Reserva Marina Isla Chañaral, Chile.

3.2 Objetivos específicos

- I. Determinar la presencia de señales acústicas de ballena fin a partir del registro en marcas acústicas en la zona de estudio.
- II. Caracterizar la profundidad de vocalización de la ballena fin en su área de alimentación.
- III. Modelar la propagación del sonido a diferentes profundidades a lo largo de su rango de buceo y contrastar la profundidad de menor pérdida de transmisión con la profundidad de vocalización registrada (Objetivo II).

4 METODOLOGÍA

4.1 Área de estudio

El estudio se realizó dentro del sistema insular Archipiélago de Humboldt, específicamente en aguas aledañas a la Reserva Marina Isla Chañaral ($29^{\circ}01' S$, $71^{\circ}34' W$), cuya zona marítima comprende 1 mn en torno al perímetro costero de la Isla Chañaral (Sepúlveda et al., 2018), cerca del límite sur de la región de Atacama, Chile.

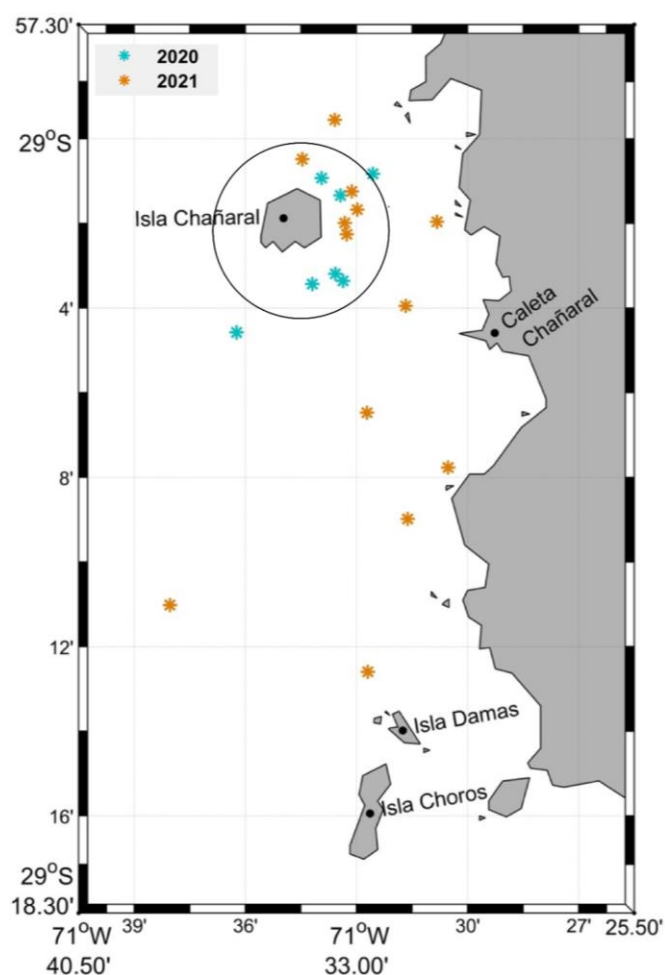


Figura 1. Mapa del área de estudio de marcate de ballenas. El círculo negro en torno a la isla representa la Reserva Marina Isla Chañaral. Los asteriscos (*) de color celeste y naranja corresponden a los marcate realizados en 2020 y 2021, respectivamente.

4.2 Recolección de datos con marcas acústicas

Para obtener la data acústica y de profundidad de buceo de la ballena fin se utilizó la marca acústica *Acousonde* modelo 3B, fabricada por *Acoustimetrics*, una marca de *Greenridge Sciences Inc* (Figura 2). La marca mide 23 cm de longitud y su peso en el aire es de 360 g, está equipada con hidrófonos y sensores de orientación, temperatura y presión (profundidad), batería de litio y sistema de flotación positiva. Tiene cuatro ventosas de silicona en la parte inferior para adherirse al dorso de la ballena y un receptor para el transmisor VHF. Además, tiene una capacidad de almacenamiento de datos de hasta 128 gigabytes (*Acousonde*, s.f).

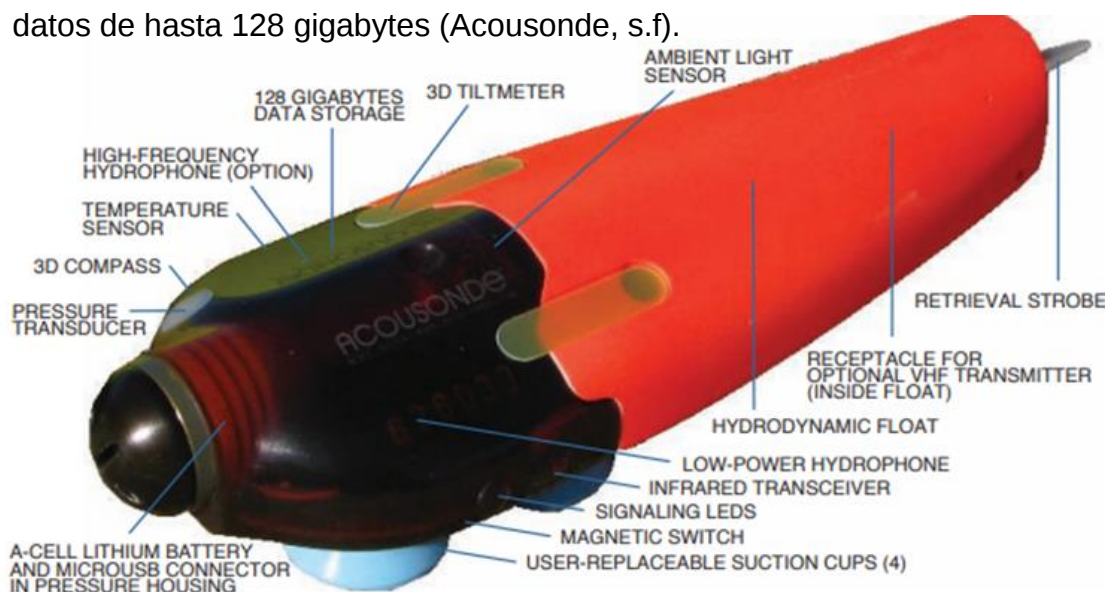


Figura 2. Esquema detallado de la marca *Acousonde* 3B. Obtenido de <http://www.acousonde.com/>

El trabajo en terreno se realizó desde Caleta Chañaral de Aceituno, a bordo de una embarcación menor. La marca acústica se conecta a una empuñadura de acero inoxidable sobremoldeado con silicona para adaptarse a la superficie de la *Acousonde* 3B. Esta empuñadura se puede ajustar para

proporcionar un mejor agarre. A su vez, a la empuñadura se le añade una vara de policarbonato de 6 - 8 m de longitud que se usa para aplicar la marca sobre el animal.



Figura 3. Marca acústica Acousonde adaptada a la empuñadura. Obtenido de <http://www.acousonde.com/>

La aplicación de la marca acústica debe realizarse por un equipo especializado en acercamiento a ballenas para intervenir lo menos posible en su tránsito. La marca acústica se aplica mientras la ballena sale a la superficie, adosándose mediante ventosas en la parte anterior de la aleta dorsal de la ballena. En el momento de realizar cada despliegue (marcaje) se registró la hora y coordenadas geográficas mediante GPS. Luego de aproximadamente 12 horas, la marca se suelta y queda flotando a la deriva hasta su recuperación. Se rastrea utilizando antenas Yagi sintonizadas a la frecuencia del transmisor VHF de la marca, realizando barridos en 360° con la antena apuntando hacia el horizonte desde la proa de la embarcación. Una vez detectada la señal del transmisor VHF, la embarcación se dirigió hacia el lugar

donde se encontraba la marca y se recuperó. Se anotó la hora y waypoint en el GPS al momento de recuperar la marca. Finalmente, se conectó la marca acústica a un computador y se procedió a la descarga de datos.

Cabe destacar que la metodología utilizada para marcar ballena fin vela para que el marcaje no ocurra en el mismo animal dos veces, pero no se asegura. Por ende, es posible que un animal se haya marcado más de una vez. Para fines de esta tesis, vamos a asumir que cada despliegue es un individuo diferente pero habría que corroborar con análisis de foto identificación en futuros estudios.

Este estudio se realiza dentro del marco del proyecto Acousonde del Centro de Estudios Avanzado de Zonas Áridas (CEAZA) y de la escuela de ingeniería ENSTA Bretagne (Francia).

4.3 Análisis y procesamiento de las señales acústicas

La tasa de muestreo del hidrófono fue 51622 Hz para todos los despliegues de marcas, menos un día en donde fue configurado por error a 24452 Hz.

Para la identificación de señales acústicas de la ballena fin se realizó una inspección manual (visual y auditiva) de las grabaciones de audio a través de espectrogramas generados en el *software* Raven Pro 1.6.1 (Bioacoustics Research Program, 2019). Los espectrogramas presentaron la frecuencia de una señal en función del tiempo y su configuración para la visualización de la data consistió en: tamaño de ventana (FFT) = 16384; brillo = 50; contraste = 55% y una ventana con rango de frecuencias entre 0 – 130 Hz.

Los archivos registrados por el hidrófono de las marcas acústicas son entregados en formato MT. Para ser leídos en el *software* Raven Pro los archivos fueron transformados a formato audio .wav, a través de rutinas en el *software* MatLab 2022a desarrolladas por la Dra. Kate Stafford (Oregon State University) y el Dr. Gaetan Richard (Bureau d'Etudes SOMME).

Se analizó un total de 587 archivos de audio. Se revisó cada archivo de audio por despliegue y un analista bioacústico (en este caso la autora de esta tesis) realizó una anotación manual de las señales acústicas registradas con la función “*Selection Table*” de Raven Pro. El analista fue entrenado previamente debido a que este es un método laborioso que consume mucho tiempo de análisis para realizar adecuadamente la selección de las vocalizaciones. El *software* Raven Pro compila variables de interés sobre cada vocalización y las almacena en una tabla (*Selection Table*). En este caso, las variables de interés fueron: frecuencia peak (Hz), definida como la frecuencia a la que se produce la máxima energía dentro de un rango de frecuencia; frecuencia máxima y mínima (Hz); duración (s); tiempo de inicio (s) y tiempo de término (s); potencia acústica promedio (dB), definida como la energía promedio dentro de un rango de frecuencia; y la fecha y hora de inicio cada vocalización (h, min, s). Estos datos se descargaron en formato de texto, se recopiló y se calculó el promedio y desviación estándar de cada variable incluida en la tabla de selección.

4.4 Identificación de la ballena vocalizadora (“*caller ID*”)

A partir del análisis y procesamiento de las señales acústicas (sección 4.3) para ambos años de registro de datos se detectó un total de 128 vocalizaciones con un rango de potencia acústica promedio (dB) que varió entre -72.8 y 30.1 dB (Anexo 1), lo que indica que se registró la presencia de vocalizaciones provenientes de animales marcados y no marcados. Se asume que el animal marcado vocaliza siempre en un determinado rango de dB (-56 a -30.1 dB), por lo tanto, se aplicó un criterio estándar por despliegue para discernir entre la data correspondiente a los animales marcados y los animales no marcados (Anexo 1), descartando aquellas señales más débiles (< -56 dB). Para resolver lo anterior, se realizaron histogramas de la potencia acústica promedio (dB) por despliegue a través del *software* MatLab 2022a. Se revisó cada histograma y a partir de la distribución de los datos se detectó la (s) moda (s) de dB (valor más frecuente de dB) y en base a esto, se estableció el criterio estándar: a partir de la potencia acústica promedio (dB) más alta se abarcaron 15 dB (Anexo 1, Figura A1, A3, A6, A7). En caso de detectar dos o más modas,

nos basamos en la moda con dB más altos. Así, en la presente tesis se trabajó únicamente con la data proveniente de las ballenas marcadas.

Posterior a la obtención de los *caller ID*, se seleccionaron las variables de interés (Sección 4.3) de cada vocalización anotada y se calculó el promedio y desviación estándar de cada variable para realizar una caracterización acústica (Anexo 2).

4.5 Procesamiento de los perfiles de buceo

Para responder el objetivo II se trabajó con los datos de buceo obtenidos del transductor de presión integrado en la marca acústica, entregados en formato .MT. Los perfiles de buceo de la ballena fin se obtuvieron mediante una rutina de análisis en MatLab 2022a que combina un código desarrollado por el Dr. Gaetan Richard (Bureau d'Etudes SOMME) y el Dr. Fabian Tapia (UdeC). Del registro original de profundidad en cada despliegue de una marca acústica, que contenía datos desde el momento en que se encendió el equipo hasta que se recuperó y apagó, se extrajo la información sobre profundidades de buceo de ballena fin usando el registro de la hora de inicio y término de cada despliegue. Sumado a lo anterior, con los datos de fecha, hora de inicio y duración de cada vocalización registrada (sección 4.3), la rutina recorrió los archivos .MT detectando para cada despliegue la presencia y/o ausencia de vocalización a lo largo del buceo (Anexo 3). Se utilizó diagramas de cajas (o *boxplots*) para caracterizar y comparar los registros de buceo, y obtener información estadística como la mediana, cuartiles, valor máximo y mínimo, y valores atípicos para todo el conjunto de datos. Cabe destacar, que en la presente tesis no se describen buceos individuales sino que se realiza el análisis con todas las profundidades registradas

4.6 Cálculo de la tasa de vocalización

Para determinar la presencia o ausencia de vocalizaciones (Objetivo I), se calculó la tasa de vocalización, es decir, el número total de vocalizaciones detectadas en cada despliegue (Sección 4.4) dividido por el tiempo de duración total de cada despliegue, en horas (Sección 4.5, Anexo 2).

Con el número total de vocalizaciones y la duración de cada despliegue (transformado a horas-decimales) se obtuvo la tasa de vocalización para cada despliegue. A partir de esto, se obtuvo dos valores de tasas de vocalización: 1) para los despliegues con presencia de vocalizaciones (animales vocales) y 2) para todos los despliegues (es decir, con presencia y ausencia de vocalizaciones). Se reportó el promedio y rango de la tasa de vocalización para cada año y para todo el conjunto de datos (Tabla 2).

4.7 Análisis de la profundidad de vocalización y calibración del sensor de presión.

Para determinar la profundidad de vocalización (Objetivo II) y poner a prueba la primera hipótesis (H1) se utilizó la fecha y hora de inicio de cada vocalización y la fecha de cada despliegue. En este caso, no se utilizó el tiempo total de duración de cada vocalización dado que en la creación de los perfiles de buceo (Sección 4.5) se observó variaciones en la profundidad asociadas a cada vocalización (Anexo 3). En la presente tesis, se define la profundidad de vocalización como la profundidad a la que se inicia una vocalización. La primera hipótesis (H1) es aceptada si la profundidad de vocalización promedio se produce entre los 0 y 20 m de profundidad, de lo contrario la H1 será rechazada.

En la revisión de los perfiles de buceo (Sección 4.5) se observó una discrepancia entre marcas acústicas en cuanto al error asociado al sensor de presión integrado y a las estimaciones de profundidades derivadas de éste. En los registros generados por la marca acústica “*Acousonde 3B orange*” se

observó profundidades <0 m (sobre la superficie), mientras que en los datos obtenidos por las marcas acústicas “*Acousonde 3B yellow*” todas las profundidades fueron negativas (bajo la superficie). Dadas estas discrepancias, se estableció un factor de corrección para estandarizar el nivel superficial del mar. Se revisó manualmente cada perfil de buceo original (Sección 4.5) y se anotó la profundidad a la que se encontraba la marca acústica cuando estaba flotando a la deriva (etapa de recuperación de la marca). En base a cada profundidad anotada, se estableció el factor de corrección para el nivel superficial del mar. El factor de corrección se sumó a las profundidades de vocalización registradas para obtener la profundidad de vocalización real. Mediante funciones en MatLab 2022a, se realizó un diagrama de cajas (o *boxplot*) para obtener estadígrafos como la mediana, cuartiles y valores máximo y mínimo, además de detectar valores atípicos para todo el conjunto de datos de profundidad de vocalización (Figura 6). Además, se reporta el promedio y desviación estándar.

4.8 Caracterización de la propagación del sonido: capa superficial vs capa profunda

Para responder el objetivo III y poner a prueba la segunda hipótesis (H2), se calculó la TL a diferentes profundidades en la columna de agua por medio del Modelo Acústico Dependiente del Rango (RAM) (Collins, 1993) implementado en MatLab 2022a.

El RAM es un modelo de la ecuación parabólica que permite estimar la TL (dB) de un sonido, sobre una distancia (km) entre una fuente (ballena) y un receptor (hidrófono u otra ballena, por ejemplo) (Stafford et al., 2007). Para ejecutar el modelo se requiere de determinados datos de entrada (“*input*”) mencionados en la Tabla 1, y que incluyen el perfil de la velocidad del sonido. Se utilizó datos de temperatura y salinidad en función de la profundidad obtenidos desde perfiles de CTD obtenidos en febrero de 2019 por el Proyecto Puente del Centro de Estudios Avanzados de Zonas Áridas (CEAZA) para crear perfiles de cada parámetro y calcular mediante una función la velocidad del sonido. El perfil de velocidad del sonido se guardó en formato .spp para

ser ingresado al modelo RAM. Una vez ingresado el perfil de velocidad del sonido, se integraron los valores de salida (Tabla 1):

- a) Perfil de temperatura: Generado en MatLab 2022a a partir de los datos de CTD.
- b) Perfil de salinidad: Generado en MatLab 2022a a partir de los datos de CTD.
- c) Perfil de velocidad del sonido: Generado a partir de los datos de temperatura y salinidad (a y b).
- d) Profundidad de la columna de agua: Se estableció un valor fijo de profundidad para la transecta, en base a la profundidad máxima obtenida desde el perfil de CTD.
- e) Transecta: Se calculó la TL en un en base a una transecta de 16,6 km establecida aleatoriamente dentro del área de estudio.
- f) Frecuencia de vocalización: Se consideró la frecuencia peak obtenida del análisis de señales acústicas (Objetivo I).
- g) Profundidad del emisor: Este parámetro fue variando cada 10 m de profundidad hasta la profundidad máxima (120 m).
- h) Profundidad del receptor: Este parámetro fue variando cada 10 m de profundidad hasta la profundidad máxima (120 m).
- i) Tipo de sedimento: Dada la falta de información científica respecto al tipo de sedimento en el área de estudio. El tipo de sedimento establecido en el RAM fue arena, según lo informado por la comunidad local.

- j) Velocidad del sonido en el sedimento: Puesto que no se obtuvieron datos *in situ* del tipo de sedimento, se estableció el valor de velocidad del sonido en arena a partir de lo reportado por Hamilton (1972).
- k) Densidad del sedimento: Puesto que no se obtuvieron datos *in situ* del tipo de sedimento, se estableció el valor densidad de la arena a partir de lo reportado por Hamilton (1972).
- l) Atenuación del sedimento: Puesto que no se obtuvieron datos *in situ* del tipo de sedimento, se estableció el valor de atenuación del sonido en arena a partir de lo reportado por Hamilton (1972).

El único parámetro que varió en el modelo RAM fue la profundidad del emisor y receptor. Al ejecutar el modelo, se obtuvo una gráfica que muestra la pérdida de transmisión (dB) a lo largo de la transecta (16,6 km) definida operacionalmente en el programa RAM de forma aleatoria. En base a la transecta definida se compara la propagación de las vocalizaciones en función de la profundidad (Figura 10). Los valores de TL varían si se cambia la profundidad del emisor. Para este caso, la profundidad del receptor no produce cambios en los valores generados. Posteriormente, se le indicó al modelo RAM variar la profundidad del emisor y receptor cada 10 m de profundidad, por lo que se obtuvo valores de TL (dB) cada 10 m de profundidad hasta los 120 m y se graficó estos valores sobre la transecta de 16,6 km (Anexo 4). Se obtuvo valores específicos de TL cada 10 m y para determinar cómo se comporta la TL entre intervalos de profundidad (por ejemplo: entre 10 - 20 m) se calculó el área bajo la curva por método de los trapecios mediante una rutina en MatLab: 1) se calculó el área total bajo la curva, 2) el área bajo la curva por intervalo cada 10 m hasta la profundidad máxima y 3) se calculó los porcentajes de cada intervalo respecto del área total. Por lo que, los resultados de TL por intervalo de profundidad son representados mediante porcentajes. Se realizó un perfil vertical de la pérdida de transmisión del sonido (dB) respecto a la profundidad del emisor y receptor

(m) obtenidos del Anexo 4. Además, en el perfil se representa cada intervalo y su porcentaje de TL (Figura 9).

Finalmente, se comparó la profundidad de menor pérdida de transmisión con la profundidad de vocalización obtenida del objetivo II para responder la H2. Si la TL es menor en la capa superficial (0-20) que la capa profunda (>20m) se acepta la H2 y viceversa.

Tabla 1. Parámetros a considerar en el modelo RAM junto con sus respectivos valores y fuente.

Parámetros RAM	Valores	Fuente
Perfil de temperatura	Ver figura 6.	Proyecto Puente, CEAZA.
Perfil de salinidad	Ver figura 6.	Proyecto Puente, CEAZA.
Perfil velocidad del sonido	Ver figura 6.	Proyecto Puente, CEAZA.
Profundidad columna de agua	124 m	No aplica.
Transecta	16.6 km	No aplica
Frecuencia vocalización	63 Hz	Obtenido del objetivo I.
Profundidad emisor	Cada 10 m hasta 100 m.	No aplica.
Profundidad receptor	Cada 10 m hasta 100 m	No aplica.
Tipo de sedimento	Arena	No hay información científica al respecto, por lo que, se asumirá que el sedimento es arena, según lo reportado por la comunidad local.
Velocidad del sonido en el sedimento	1630 m/s	Obtenido de Hamilton (1972), tabla 2.
Densidad del sedimento	2 gm/cm ³	Obtenido de Hamilton (1972), tabla 2.
Atenuación de sedimento	47.3 dB/m	Obtenido de Hamilton (1972), tabla 2.

5 RESULTADOS

Se realizó un total de 20 despliegues de marcas acústicas sobre especímenes de ballena fin en los meses de verano: siete despliegues se realizaron en cuatro días de febrero de 2020, y trece despliegues se realizaron entre enero (1) y febrero (12) de 2021. En términos de esfuerzo de muestreo, se registró un total de 79 horas y 57 segundos de datos acústicos y de conducta de inmersión de la ballena fin para los 20 despliegues realizados (Anexo 2). Los días efectivos de registro de datos fueron 15 días no consecutivos ni continuos durante un día (<24 h).

El máximo tiempo de permanencia de la marca acústica sobre una ballena fin fue 13 horas y 57 minutos, mientras que el mínimo tiempo de permanencia fue 2 minutos y 27 segundos. El año 2021 presentó un mayor rango de duración de despliegues, entre 2 minutos y 13 horas, con un promedio de 5 horas y 33 minutos (Anexo 2, Figura 1). Para el año 2020 la duración de los despliegues varió entre 5 minutos y 3 horas, con un promedio de 1 hora de registro continuo de datos (Anexo 2, Figura 2).

5.1 Detección de señales acústicas de la ballena fin

A partir de la visualización y análisis de las señales acústicas en espectrogramas se determinó que las vocalizaciones registradas alrededor de la Reserva Marina Isla Chañaral corresponden a vocalizaciones tipo *downsweep* (Figura 4), sonidos con una frecuencia decreciente en el tiempo.

Posterior al análisis de identificación del vocalizador, se obtuvo un total de 107 *downsweeps* correspondientes a ballenas marcadas. En cada año se identificó la presencia de señales acústicas de ballena fin: 3 vocalizaciones en 2020 en 7 h de grabación (Anexo 2, Tabla A1); y 104 vocalizaciones en ~72 h de grabación en 2021 (Anexo 2, Tabla A2). En ningún caso se registró la presencia de cantos de 20 Hz.

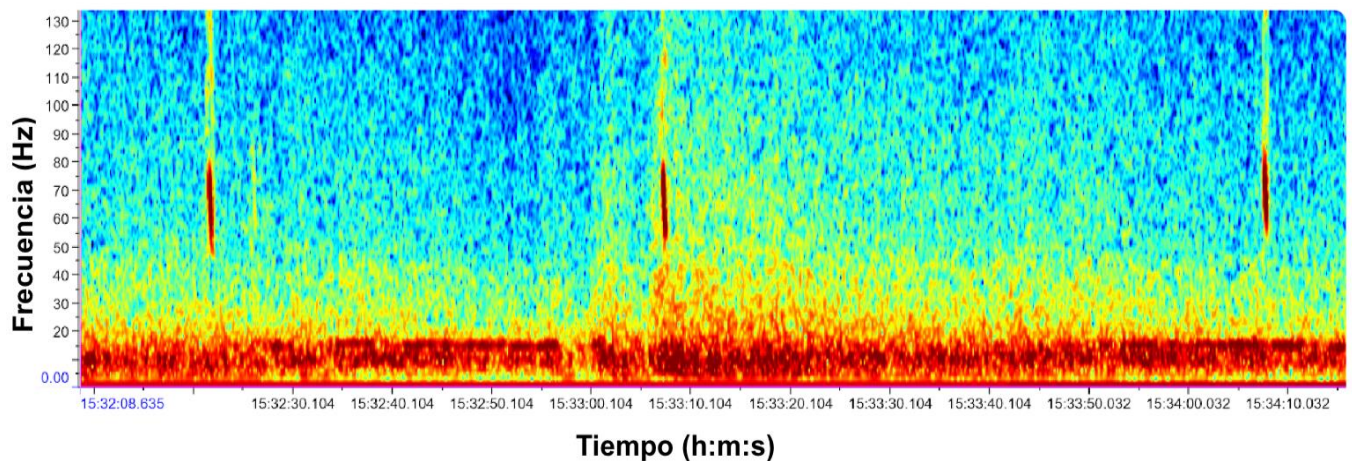


Figura 4. Espectrograma de tres vocalizaciones tipo *downsweep* de ballena fin. Los datos acústicos corresponden al despliegue 1 del año 2021. Los parámetros utilizados en Raven Pro 1.6.1 son: $\text{fft} = 16.384$, $\text{luz} = 50$, $\text{contraste} = 55\%$, $\text{overlap} = 90\%$.

En 2020, las vocalizaciones variaron desde una frecuencia máxima promedio de 84,5 Hz hasta una frecuencia mínima promedio de 45,4 Hz durante un tiempo promedio de 0,7 s con una frecuencia peak promedio de 68,3 Hz (Tabla 2). En 2021 las vocalizaciones variaron desde una frecuencia máxima promedio de 85,0 Hz a una frecuencia mínima promedio de 48,4 Hz durante un tiempo de 0,7 s con una frecuencia peak promedio de 63,4 Hz (Tabla 2). En promedio para ambos años, las vocalizaciones se caracterizaron por una frecuencia máxima de 85,0 Hz hacia una frecuencia mínima de 48,3 Hz con una duración de 0,7 s y una frecuencia peak de 63,5 Hz. Para todo el conjunto de datos la frecuencia mínima registrada fue 33,7 Hz y la frecuencia máxima 105,6 H (Tabla 2).

En 8 de 20 despliegues (40%) se detectaron vocalizaciones: 1 despliegue en 2020 y 7 despliegues en 2021 (Tabla 2). En 12 despliegues (60%), que duraron entre 40 min y 6 h, no se registraron señales acústicas. Las tasas de vocalización (en los despliegues sobre animales vocales) variaron desde 0,5 a 4,1 vocalizaciones por hora por animal, con un promedio de 1,6 para ambos años (Tabla 2). La tasa más alta ocurrió en el despliegue 1 del año 2021, con

4,1 vocalizaciones por hora, seguido del despliegue 11 del año 2021 con una tasa de 2,7 vocalizaciones por hora siendo estos los despliegues de mayor duración (>9 h) (Anexo 2, Tabla A2). Para el 100% de los despliegues la tasa de vocalización promedio fue de 0,6 vocalizaciones por hora (Tabla 2). Al contrario de lo sucedido con los despliegues del año 2021, el año 2020 presentó una tasa de vocalizaciones significativamente más baja para todos los despliegues y para los despliegues con presencia de *downsweep* (Tabla 2).

Tabla 2. Tabla de la característica de frecuencia, duración y potencia (promedio $\pm$ desviación estándar) de las vocalizaciones tipo *downsweep* de ballena fin (*Balaenoptera physalus*), además de la tasa de vocalización (número de downsweep / esfuerzo de grabación) por año.

Parámetros	2020	2021	Total
Número de despliegues	7	13	20
Número de downsweep (n)	3	104	107
Número de despliegue con vocalización (n)	1	7	8
Frecuencia peak (Hz)	68,3 $\pm$ 10,1	63,3 $\pm$ 8,0	63,5 $\pm$ 8,1
Frecuencia máxima (Hz)	84,5 $\pm$ 14,8	85,0 $\pm$ 7,6	85,0 $\pm$ 7,8
Frecuencia mínima (Hz)	45,4 $\pm$ 5,4	48,4 $\pm$ 6,3	48,3 $\pm$ 6,3
Duración downsweep (s)	0,7 $\pm$ 0,1	0,7 $\pm$ 0,1	0,7 $\pm$ 0,1
Promedio y rango de tasa vocalización (vocalización/hr) de todos los despliegues	0,2 (0 - 1,1)	1,0 (0 - 4,1)	0,6 (0 - 4,1)
Promedio y rango de tasa vocalización (vocalización/hr) de animales vocales	1,1 (no aplica)	1,7 (0,5 - 4,1)	1,6 (0,5 - 4,1)
Potencia promedio (dB)	-48,6	-44,7	-44,8
Duración despliegue (=esfuerzo de grabación) (hr:m:s)	7:02:54	71:58:03	79:00:57

5.2 Perfiles de buceo y profundidad de vocalización de la ballena fin

Se obtuvo un total de 20 perfiles de buceo de ballenas fin y 8 perfiles de buceo con presencia de vocalizaciones (ver Anexo 2).

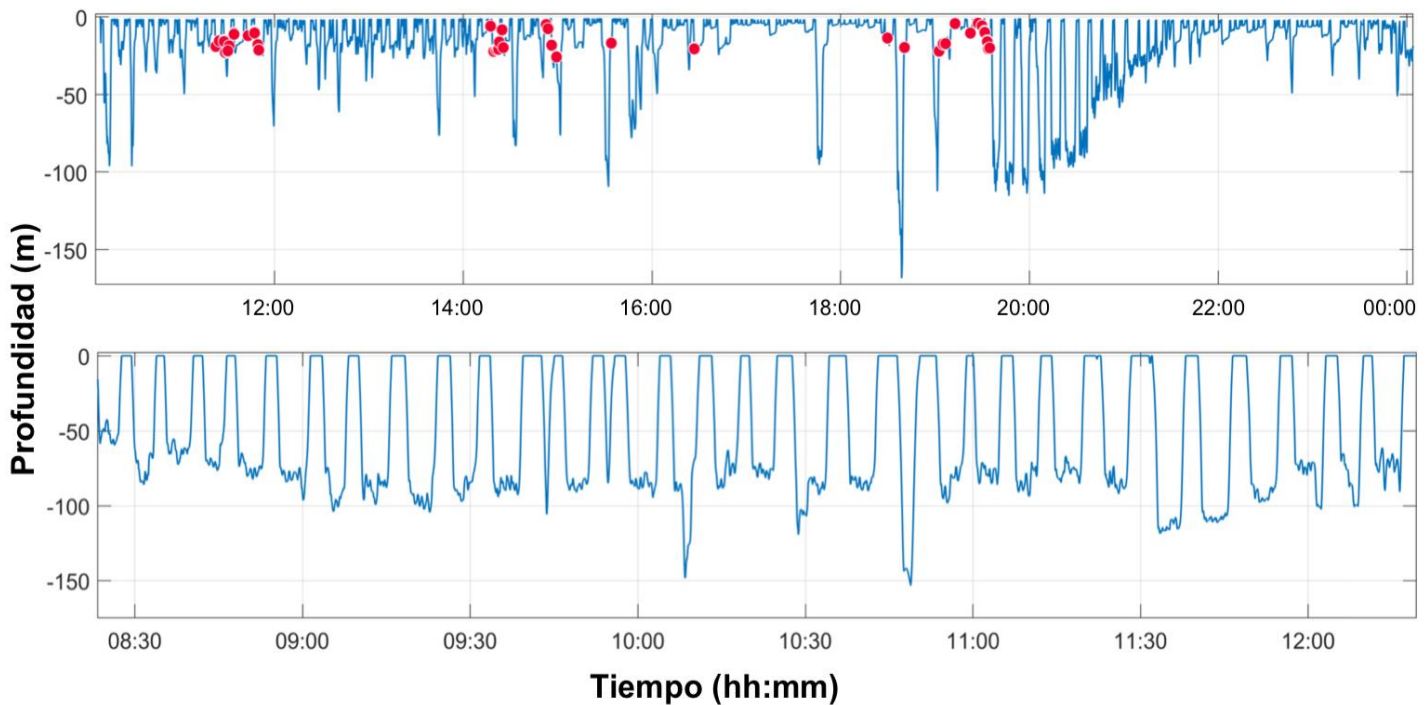


Figura 5. Ejemplos de perfiles de buceo de ballena fin (*Balaenoptera physalus*): Perfil de buceo con presencia de vocalizaciones tipo *downsweep* (arriba, puntos rojos) correspondiente al despliegue 11 del año 2021. Perfil de buceo sin vocalizaciones (abajo) correspondiente al despliegue 15 del año 2021.

Los datos de inmersión de ballenas fin muestran que el 75% de los datos de uso de la columna de agua durante los buceos ocurre dentro del rango de 3 a 19 m de profundidad. El uso de la columna de agua durante el buceo fue en promedio 18 m. La profundidad máxima de inmersión registrada en la marcas acústicas fue de 234 m (Figura 6a).

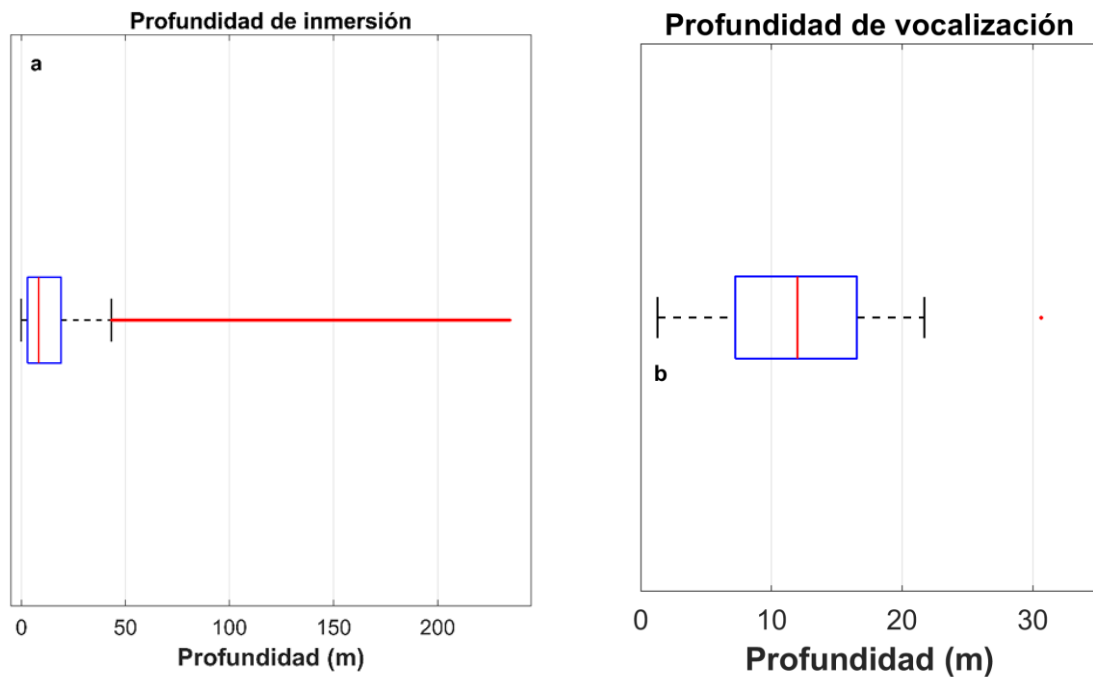


Figura 6. Comparación de los valores de (a) profundidad de inmersión o buceo versus valores de (b) profundidad de vocalización de la ballena fin. Los gráficos de boxplot muestran: percentil 25 y 75 (bordes superior e inferior de la caja), mediana (línea central roja dentro de la caja), valores extremos (bigotes) y valores atípicos (línea roja y punto rojo).

Los downsweep de 63 Hz se detectaron a una profundidad promedio de $12,1 \text{ m} \pm 5,7$ (Figura 7). Las vocalizaciones fueron detectadas en zonas poco profundas de la columna de agua y cercanas a la superficie, variando entre 1,3 m y 30,7 m de profundidad (Figura 7), ampliamente distribuidos, con un 75% de los datos concentrados principalmente entre los 1,3 m y 16,5 m de profundidad (Figura 6b, percentil 75). De un total de 107 *downsweep*, un 93,5% se produjo en la capa superficial ($< 20\text{m}$) (Figura 6b). La profundidad máxima de vocalización fue de 30,7 m.

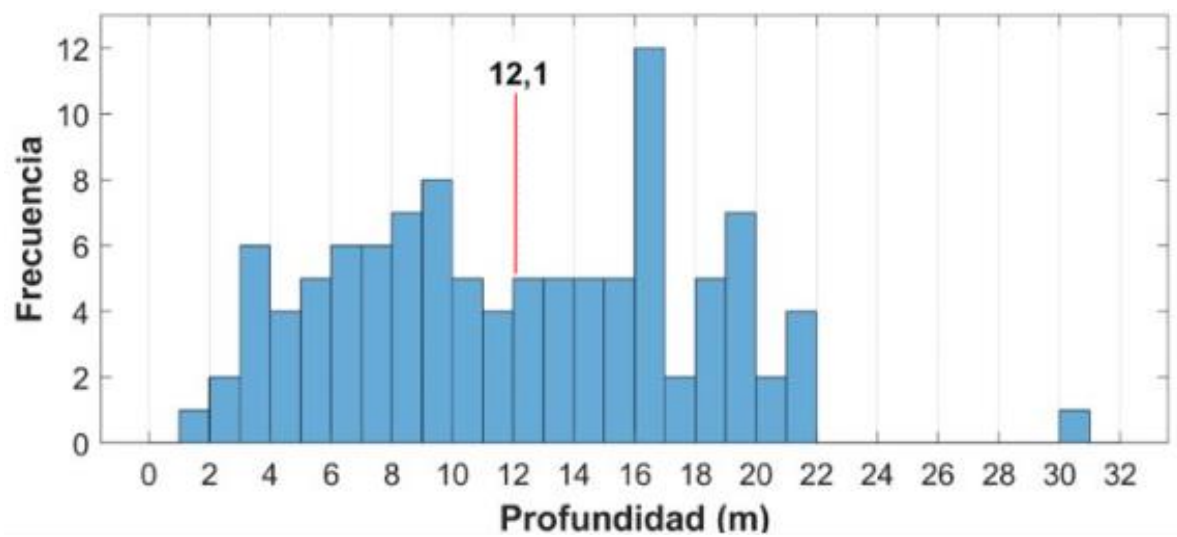


Figura 7. Histograma de distribución de la profundidad de vocalización (azul) y su promedio (línea roja).

5.3 Propagación del sonido: capa superficial vs capa profunda

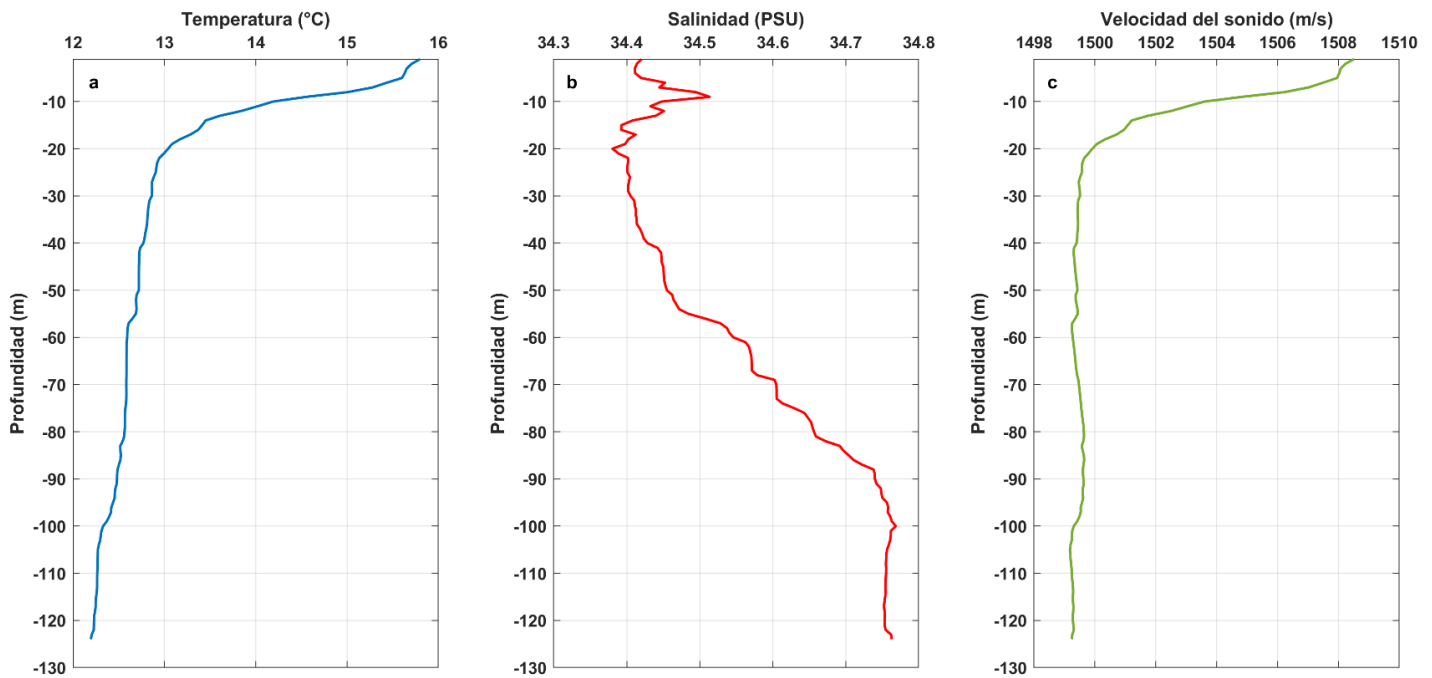


Figura 8. Perfiles de a) temperatura (°C), b) salinidad (PSU) y c) velocidad del sonido (m/s) a lo largo de la columna de agua hasta los 124 metros de profundidad.

Los perfiles oceanográficos muestran una columna de agua estratificada, principalmente en términos de temperatura (Figura 8a), que mostró una mayor variación en la capa superficial (0 – 20 m) fluctuando entre los 15,8 a 12,0 °C, con presencia de una termoclina sobre los 20 m de profundidad. Bajo los 20 m, la temperatura se mantuvo relativamente constante alrededor de los 12°C hasta la profundidad máxima. El perfil de salinidad presentó valores en torno a los 34 psu en toda la columna de agua. Se identificaron tres zonas: entre 0 y 10 m de profundidad con valores entre 34,4 – 34,5 psu, entre 10 y 20 m con una disminución hasta 34,4 psu, y bajo los 20 m con un aumento gradual de la salinidad hasta los 100 m. Bajo los 100 m la salinidad se mantuvo constante a 34,75 psu hasta la profundidad máxima de muestreo. La velocidad del sonido (Figura 8c) en la columna de agua presentó un patrón similar a la temperatura, con mayores valores (entre 1508 y 1499 m/s) en la capa superficial (0 - 20 m). Bajo los 20 m de profundidad y

hasta la profundidad máxima, la velocidad del sonido se mantuvo constante alrededor de 1499 m/s.

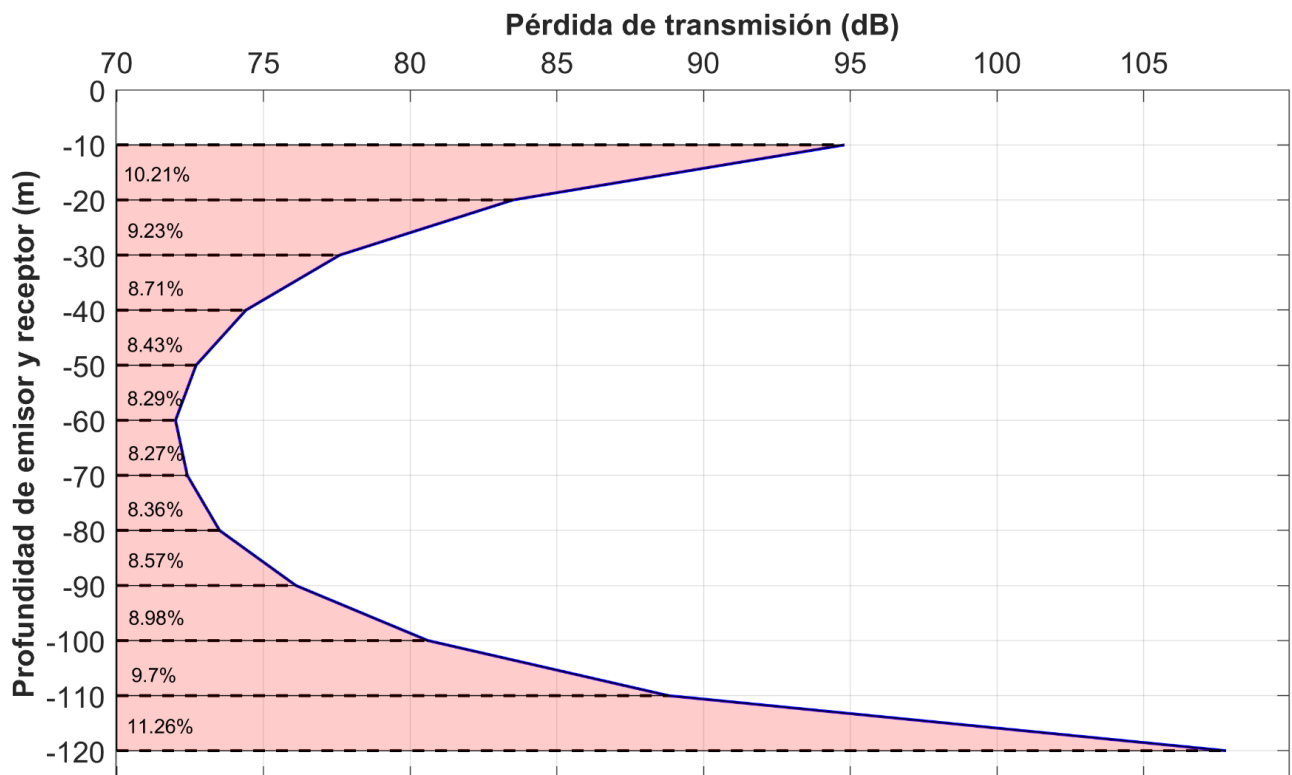


Figura 9. Perfil vertical de la pérdida de transmisión (dB) del sonido sobre una distancia de 16,6 km, en función de la profundidad del emisor y receptor (m). Las secciones sombreadas en color rojo representan el área bajo la curva (%) de cada intervalo respecto al área total.

La TL de las vocalizaciones de 63 Hz presentó variaciones notorias a lo largo de la columna de agua (Figura 9), con tres zonas distintas en el perfil: una zona superficial de los 10 a 50 m, una segunda intermedia entre los 50 a 80 m y una zona profunda desde los 80 a 120 m. En la zona superficial se observó una disminución de la TL con la profundidad, variando entre 95 y 74 dB y abarcando cerca de un 36% del área bajo la curva. En la zona intermedia se presentaron los valores más bajos de TL (< 73.5 dB), representando la zona con menor pérdida de transmisión de vocalizaciones de 63 Hz. El

intervalo entre los 60 y 70 m de profundidad exhibió el porcentaje más bajo del área bajo la curva. Finalmente, en la zona profunda (>80 m) la TL aumenta progresivamente hasta alcanzar valores máximos de TL (>95 dB) en el intervalo de 120 m de profundidad.

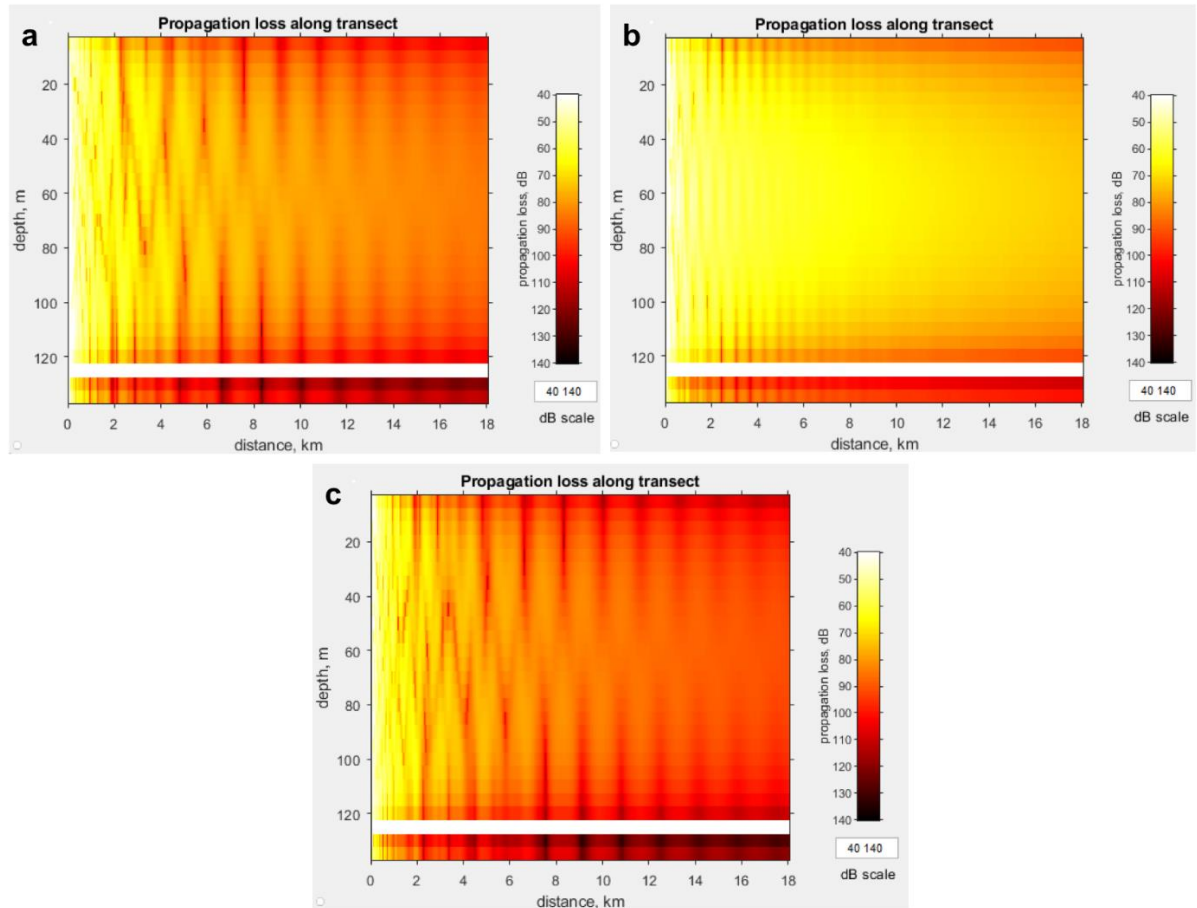


Figura 10: Los gráficos muestran el modelo de pérdida de transmisión (dB) a lo largo de la transecta de 16,6 km con una profundidad de emisor a 10 m (a), 60 m (b) y 120 m (c). El cero en el eje x corresponde al emisor.

La figura 10, muestra el modelo de pérdida de transmisión en dos dimensiones y una representación más realista (y no-lineal) de la TL comparado con la figura 9. En todos los escenarios se observa un patrón a media agua (60 m) donde los niveles de TL presentan valores más bajos independiente de la profundidad del emisor. Además, en base a los 60 m se observa un aumento progresivo de la TL (dB) hacia la superficie o el fondo. En otras palabras, cuando la profundidad del emisor es 10 m (Figura 10a), 60

m (Figura 10b) y 120 m (Figura 10c) la propagación de los *downsweep* de 63 Hz sigue siendo mayor a los 60 m comparado con las profundidades menores o mayores.

6 DISCUSIÓN

El presente trabajo corresponde al primer reporte de la profundidad de vocalización de ballenas fin en aguas chilenas y en el Hemisferio Sur. Además, también es el primer estudio en utilizar marcas acústicas en ballenas fin en Chile, con la finalidad de estudiar la conducta acústica de la ballena fin en la Reserva Marina Isla Chañaral, Chile.

6.1 Caracterización de las vocalizaciones de ballenas fin marcadas fuera de la Reserva Marina Isla Chañaral.

6.1.1 Evaluación de metodología de análisis acústico y posibles sesgos

Dada la cantidad de datos acústicos obtenidos (relativamente bajas en comparación con otros estudios acústicos que utilizan “*big data*”) la metodología utilizada para detección de señales acústicas fue la anotación manual. Sin embargo, la capacidad del analista para detectar vocalizaciones podría verse afectada ante la presencia de ruido, puesto que ante cualquier movimiento corporal del animal marcado aumentará la presión sonora en el acelerómetro y el flujo, enmascarando o impidiendo la detección de vocalizaciones menos intensas que se reciben de animales distantes (Stimpert et al., 2015). Si bien esto podría influir en la detección de la señal, al estar la marca acústica sobre el animal, la intensidad y la forma de las vocalizaciones son claras y la probabilidad de cometer errores en este proceso o de haber seleccionado vocalizaciones de otra especie de ballena son bajas, por lo que la detección de vocalizaciones realizada en la presente tesis se considera confiable.

Durante el proceso de revisión de la data acústica se identificó vocalizaciones que provenían de los especímenes marcados y de otras ballenas que se encontraban alrededor. A partir de esto, se estableció un criterio basado en la intensidad de las vocalizaciones para separar la data y trabajar únicamente las señales acústicas provenientes de las ballenas marcadas. Esto es una aproximación razonable pero existen métodos más

robustos para identificar el vocalizador. Recientemente se ha desarrollado una metodología (Goldbogen et al., 2014) que sugiere que las señales de acústicas registradas en el acelerómetro (sensor integrado en la marca acústica) pueden ser utilizadas para identificar si las vocalizaciones provienen efectivamente del individuo marcado. No obstante, esta metodología podría no ser fiable ante la presencia de otras ballenas vocalizando según Saddler et al. (2017), quienes identificaron que las vocalizaciones de individuos cercanos también podrían registrar señales en el acelerómetro de la ballena marcada, por lo que, a partir de esto han desarrollado un método de correlación cruzada de las señales acústicas y de aceleración para determinar la procedencia de las vocalizaciones por parte de ballenas marcadas y otras ballenas vocalizando. Utilizar los datos del acelerómetro en un futuro sería ideal para evaluar la fiabilidad del método para la identificación del *caller ID* y compararlo con otras metodologías (ej. Saddler et al., 2017).

6.1.2. Evaluación metodológica del análisis de profundidad de vocalización

En la metodología utilizada para determinar la profundidad de vocalización hay elementos que podrían sesgar los resultados, específicamente la hora exacta de vocalización y la corrección del nivel de superficie.

Durante el análisis acústico y creación de los perfiles de buceo, el analista detectó que para una determinada vocalización existe más de una profundidad asociada. Esto se debe, probablemente, a que mientras el animal vocaliza estaría en movimiento y al ser animales que pueden llegar a medir 25 m de largo, mientras vocaliza y nada está abarcando un rango de profundidades de vocalización más amplio. Es por esto que se utilizó únicamente la profundidad registrada en el momento de iniciarse la vocalización.

La corrección del nivel de superficie fue un desafío para determinar la profundidad de vocalización, debido a que se identificó una discrepancia entre

marcas en cuanto a la calibración del sensor de presión, que generó datos anómalos respecto a la profundidad de buceo de la ballena fin. Dado que no hay metodologías en la literatura que apliquen criterios de corrección en el sensor de presión de las marcas acústicas, se desarrolló una técnica manual para corregir el problema. Si bien la metodología es confiable aún así puede ser subjetiva. Las marcas acústicas son dispositivos relativamente nuevos, por lo que es importante desarrollar una metodología estándar para trabajar con los datos provenientes de las marcas acústicas.

6.1.3. Caracterización de *downsweeps* de Ballena fin

Durante el periodo de estudio en los años 2020 y 2021 se registró un total de 107 *downsweep*. El análisis acústico mostró vocalizaciones individuales y aleatorias sin un patrón repetitivo en el tiempo, lo que descarta la posibilidad de que los *downsweep* detectados conformen un canto.

Los *downsweep* de ballena fin en el área de estudio consisten en señales que van desde 85 a 48 Hz con una duración de 0.7 s y una frecuencia peak de 63 Hz en promedio. El rango de frecuencias registrado en el presente estudio es más amplio en comparación con los *downsweep* de ballena fin registrados en otras partes del mundo (Tabla 3). Sin embargo, el rango de frecuencias registrado en la presente tesis se asemeja a lo registrado anteriormente en el Océano Austral (Miller et al., 2021), la Reserva Marina Isla Chañaral (Vega et al., 2023) y áreas de alimentación en el hemisferio norte (Bosseau et al., 2008). Además, en grabaciones realizadas en las Islas de Juan Fernández se han registrado vocalizaciones similares a las del presente estudio junto a cantos de 20 Hz (Buchan et al., datos no publicados). La frecuencia peak de los *downsweep* de ballena fin de la Reserva Marina Isla Chañaral tiende a situarse entre 50 - 70 Hz (Vega et al., 2023), y nuestros resultados muestran una frecuencia peak dentro de este rango, con un promedio de 63 Hz, similar al reportado por Vega et al. (2023) de 62 Hz. En general, la duración de los *downsweep* se ha reportado en la literatura dentro del rango de 0,5 – 1,3 s (Tabla 3), nuestros datos muestran una duración promedio de 0,7 s, dentro del rango reportado para el resto del mundo. La

duración promedio registrada para los *downsweep* de ballena fin en el presente estudio fue menor que el promedio de ~1 segundo reportado por Vega et al. (2023) para la misma área de estudio.

La similitud en las características acústicas de los *downsweep* de ballena fin en Juan Fernandez, la Antártica y el Archipiélago de Humboldt (Buchan et al., datos no publicados; Miller et al., 2021; Vega et al., 2023) podría informar sobre la identidad acústica de la población de ballenas fin que habitan el PSO y Antártica. Sin embargo, el actual escenario frente a los estudios que se han desarrollado para comprender los patrones de movimiento de las ballenas fin y determinar las rutas migratorias de estos animales aún es un enigma. Sepúlveda et al. (2018) siguieron a 6 individuos de ballenas fin marcados en el Archipiélago de Humboldt, y constataron que cinco individuos permanecieron en bajas latitudes durante el verano, mientras que un individuo siguió su trayecto hacia altas latitudes. Además, un estudio reciente de Herr et al. (2022) reportó la primera evidencia de migración de la población de ballenas fin en Antártica hacia el PSO, mediante el uso de transmisores satelitales que dejaron de transmitir cuando los animales se encontraban en tránsito al SO de extremo sur de Sudamérica. Por lo tanto, hay evidencia preliminar sobre los patrones de movimiento de la población de ballenas y es sabido que hay animales que migran entre la costa de Chile y Antártica, pero aún no se ha establecido la existencia de una conexión entre las poblaciones de Juan Fernandez, Antártica y el Archipiélago de Humboldt. Con base en estudios genéticos (Pérez et al., 2021) y acústicos se ha sugerido que algunas ballenas fin permanecen en latitudes medias frente a la costa de Chile utilizando el hábitat como área de alimentación durante el verano, mientras que otras migran hacia altas latitudes (Sepúlveda et al., 2018). También se ha sugerido que existen dos poblaciones separadas: una que se alimenta en el Archipiélago de Humboldt y otra que se alimenta en el Océano Austral, y que ambas pasarían el invierno mar adentro en el Pacífico Sur Oriental (Buchan et al., 2019). Una manera de responder estas interrogantes es realizar un análisis detallado de los INI de los cantos de la ballena fin detectados en el PSO y Antártica.

Tabla 3. Características acústicas (rango de frecuencia y duración) de los *downsweep* de ballena fin descritos en la literatura.

Referencias	Frecuencia máxima (Hz)	Frecuencia mínima (Hz)	Duración (s)
Schevill & Watkins (1962)	75	40	0,5 s
Watkins (1987)	~75	~40	~0,3 s
Cummings et al (1986)	~68	~34	~0,59
Boisseau et al (2008)	84 ± 14	52 ± 16	0,96 ± 0,64
	73 ± 15	34 ± 9	1,05 ± 0,62
Širović et al (2013)	61,2 ± 6,6	47,6 ± 5,7	1 s
De Vreese et al (2017)	63,25 ± 3,3	46 ± 5,48	0,54 ± 0,09
García et al (2019)	61 ± 11,7	43 ± 9,3	0,69 ± 0,28
Wiggins & Hildebrand (2020)	60,5 ± 11,7	47,1 ± 4,7	-
	47,1 ± 4,3	33,5 ± 3,5	-
Miller et al (2021)	~83	~49	-
Romagosa et al (2021)	75	40	0,3 - 1 s
Vega et al (2023)	81,3 ± 11,0	48, 9 ± 8,1	1,0 ± 0,1
Este estudio	85,0 ± 7,8	48,3 ± 6,3	0,7 ± 0,1

6.1.3 Tasa de vocalización

La presencia de *downsweep* se identificó para un 40% del total de animales marcados para un total de 79 h de registro de datos. Si bien los resultados mostraron una tasa de vocalización para animales vocales que va desde 0,5 a 4,1 vocalizaciones por hora, estos valores son bajos en comparación con lo reportado por Vega et al. (2023), quienes usando un hidrófono anclado reportaron una tasa de vocalización de 0 a 14 vocalizaciones por hora para el año 2018 y de 0 a 9 vocalizaciones por hora para 2019. Es probable que la baja tasa de vocalización detectada en la presente tesis se deba a una menor cantidad de datos en comparación con Vega et al. (2023). Por lo tanto, es probable que la tasa de vocalización aumente si se aumentara las horas de esfuerzo de las marcas acústicas. Aun así, un 60% del total de los animales marcados no vocalizaron, es decir, la tasa de vocalización fue igual a cero. Stimpert et al. (2015) informaron que un 33% de las marcas acústicas desplegadas en ballenas fin contenían presencia de vocalizaciones, con total de 1.722 vocalizaciones durante 17,9 h de registro de datos. Sin embargo, estas vocalizaciones corresponden a cantos de 20 Hz, los cuales no son comparables con las vocalizaciones detectadas en este trabajo. Aún así, un 67% de las marcas acústicas no registraron cantos de ballenas fin (Stimpert et al., 2015). Los resultados de la presente tesis apuntan a que la ballena fin es una especie poco vocal durante la temporada de verano, época en la que se registró la presencia de *downsweep*. Esto es similar a lo que sucede con los *downsweep* de 40 Hz en el Archipiélago de Azores, donde las tasas de vocalización son más bajas en verano (Romagosa et al., 2021).

6.2 Profundidad de inmersión y profundidad de vocalización

6.2.1 Conducta de buceo

En base a observaciones no sistemáticas de los perfiles de buceo (Anexo 3) se observaron conductas de alimentación así como periodos de descanso en superficie (ej. Croll et al., 2001; Acevedo-Gutierrez et al., 2002). Los resultados mostraron que un 75% de los animales marcados pasaron gran parte del tiempo en superficie (<19 m). Sin embargo, en la presente tesis no se realizó un análisis de las inmersiones en cada perfil de buceo, por lo que estos resultados son esperados dado que en general los mysticetos al ser mamíferos suelen pasar gran parte del tiempo en superficie para respirar. Por otro lado, la profundidad máxima registrada en la presente tesis fue 234 m, menor en comparación con estudios anteriores en el Océano Pacífico y Atlántico Norte (Tabla 4) a excepción de lo reportado por Acevedo-Gutiérrez et al. (2002). Las conductas de buceo a menudo están influenciadas por la distribución de presas de krill (Buchan et al., 2014; Fonseca et al., 2022), específicamente *Euphausia mucronata*, la especie de krill dominante en la corriente de Humboldt y principal alimento de las ballenas fin en el Archipiélago de Humboldt (Capella et al., 1999; Perez et al., 2006; Toro et al., 2016; Buchan et al., 2021). En ballenas fin se ha registrado las profundidades máximas asociadas a conducta de alimentación, entre 22 y 329 m (Friedlaender et al., 2019). Por esto, es probable que la profundidad máxima registrada en la presente tesis se relacione con eventos de alimentación. Sin embargo, para determinar objetivamente lo anterior, es necesario realizar análisis detallados de los tipos de inmersión y el tiempo dedicado a cada inmersión para realizar una caracterización de la conducta asociada a los buceos (ej. Fonseca et al., 2022). Este es un desafío importante para estudios futuros que busquen comprender la conducta asociada a las vocalizaciones.

Tabla 4: Profundidad máxima de buceo (m) de la ballena fin (*Balaenoptera physalus*) reportada en la literatura.

Referencias	Profundidad máxima de buceo (m)	Locación
Panigada et al. (1999)	470	Mar de Liguria Occidental, Europa.
Croll et al. (2001)	316	Bahía La Paz, Bahía Loreto, México - Bahía Monterey, Isla Canales, EEUU.
Acevedo-Gutiérrez et al. (2002)	109	Baja California, México - Baja California, EEUU.
Panigada et al. (2003)	565	Mar de Liguria Occidental, Europa.
Goldbogen et al. (2006)	271	Sur de Bahía California, EEUU.
Irvine et al. (2019)	365	Sur de California, EEUU.
Fonseca et al. (2022)	339	Archipiélago de Azores, Portugal.
Este estudio	234	Archipiélago de Humboldt, Chile

6.2.2 Profundidad de vocalización

La profundidad de vocalización es un parámetro escasamente estudiado. Hasta el momento, se conoce la profundidad de vocalización de la ballena fin únicamente para los cantos de 20 Hz en el hemisferio norte, descrito a 50 m y entre 10 - 15 m (Watkins et al., 1987; Stimpert et al., 2015).

Observamos que el comportamiento de buceo varió respecto a la presencia/ausencia de vocalizaciones. El análisis acústico en conjunto con los datos de buceo mostró que en promedio la profundidad de vocalización de la ballena fin es a los 12,1 m. A partir de los resultados de la presente tesis, **aceptamos la primera hipótesis propuesta**, puesto que la profundidad de vocalización de los *downsweep* de 63 Hz de ballena fin efectivamente son emitidos entre los 0 y 20 m de profundidad.

En este contexto, la profundidad de vocalización de los *downsweep* de 63 Hz en el Archipiélago de Humboldt ocurre en promedio a los 12,1 m de profundidad. Como la profundidad de vocalización no ha sido descrita previamente para los *downsweep* de ballena fin, estos resultados serían comparables con los *downsweep* o también llamados *d-calls* de ballena azul. Los resultados de esta tesis son similares a los reportados para ballenas azules por Saddler et al. (2007) quienes describen que los *d-calls* ocurren entre 1 y 36 m, con una profundidad de vocalización promedio de 12 m, detectadas en presencia de conductas de alimentación superficial. Otros autores (Oleson et al., 2007; Lewis et al., 2018) también reportan la producción de *d-calls* en la capa superficial durante inmersiones poco profundas (<30 m) en periodos de descanso posterior a la búsqueda de alimento en profundidad. Cabe destacar que Stimpert et al. (2015) también describe una profundidad de vocalización entre 10 - 15 m, similar a lo reportado en la presente tesis, sin embargo, esta profundidad ha sido descrita para los cantos de 20 Hz de la ballena fin.

6.3 Condiciones de propagación de vocalizaciones en la columna de agua y su relación con la profundidad de vocalización observada

6.3.1 Condiciones físicas de la columna de agua

Los perfiles de salinidad y temperatura mostraron una variabilidad gradual en función de la profundidad. Nuestros resultados son similares a lo presentado en el proyecto FIP 2006-56 (Gaymer et al., 2008), con valores de temperatura que fluctuaron entre 15°C y 11,5°C desde la superficie hasta 120 m de profundidad en verano. Al igual que la salinidad, los valores presentados por el proyecto FIP variaron entre 35 psu a 34,4 psu desde la capa superficial hasta la profundidad máxima. Sin embargo, en nuestro caso la salinidad se mantuvo alrededor de 34 psu, variando 0,3 psu a lo largo de la columna de agua, con poca variación salina. En la zona de estudio las condiciones oceanográficas exhiben cambios estacionales marcados, especialmente entre verano e invierno, con claros ciclos estacionales en la temperatura y con presencia de una termoclina estacional en verano y su posterior desaparición en invierno (Gaymer, 2008). Si bien esta información nos entrega una aproximación a las condiciones oceanográficas en que se encuentra la zona de estudio, no nos proporciona mayor información para realizar una caracterización y/o determinar algún ciclo estacional en cuanto a la salinidad y temperatura.

6.3.2 Evaluación del modelo de propagación

La ejecución del modelo RAM considera varios parámetros específicos para poder obtener una estimación de la TL (Tabla 1). Para simplificar el modelo y trabajo no se consideró todas las variables ambientales. Algunos de los supuestos y parámetros a considerar que podrían modificar los valores de TL se detallan a continuación:

- a) Se asumió que el fondo marino era parejo a una profundidad constante de 124 m, por lo que no se consideró la batimetría real del área de estudio. La profundidad de 124 m fue el valor máximo de obtención de datos de temperatura y salinidad del CTD.
- b) El tipo de sedimento y grosor de la capa no es conocido para la zona de estudio. El tipo de sedimento puede causar cambios en la TL ya que la interacción entre el sonido y el sedimento puede provocar que el sonido se refleja o refracta según el tipo de composición del fondo (Jensen et al., 2011).
- c) Los datos obtenidos del CTD para realizar los perfiles de velocidad del sonido corresponden a una toma de muestra diaria en fechas diferentes a las del marcaje de ballenas fin. Para este caso, lo ideal sería tener datos de temperatura y salinidad por mes puesto que las condiciones oceanográficas van cambiando estacionalmente y así poder medir variabilidad estacional o temporal de la velocidad del sonido. Para futuros trabajos esta falta de información se podría resolver accediendo a la plataforma ARGOS con el fin de obtener información de temperatura y salinidad a partir de las boyas que hayan pasado por la zona de estudio.

6.3.3 La relación entre profundidad de vocalización observada y las condiciones de propagación de las vocalizaciones

A partir del modelo de propagación de los *downsweep* de 63 Hz, se identificó la presencia de una “ventaja acústica” aproximadamente a media agua entre los 60 - 70 m de profundidad, donde se observaron los valores más bajos de TL. Por lo tanto, estos resultados indicarían que los *downsweep* a esta profundidad tendrían mayor alcance. A partir de estos resultados, se rechaza la segunda hipótesis propuesta, debido a que la pérdida de transmisión del sonido fue menor en la capa profunda (>20 m) que en la capa superficial (<20 m).

Si bien los resultados de pérdida de transmisión mostraron mejores condiciones de propagación de los *downsweep* de 63 Hz a media agua (60 m), el modelo también sugiere la presencia de un ducto acústico (también llamado guía de ondas o *waveguide*) a media agua (Figura 10). El término ducto se refiere a la situación en la que el sonido se limita a una determinada profundidad por reflexión, refracción o una combinación de ambas (Erbe & Thomas, 2022). Estos conductos son comunes en aguas someras debido a la reflexión tanto de la superficie del mar como del fondo marino (Erbe & Thomas, 2022). Por lo tanto, mientras más cerca del ducto se encuentre el emisor de sonido (en este caso 60m), mayor es la propagación en toda la columna de agua. Sin embargo, la presencia de este ducto se mantiene independiente de la profundidad del emisor. Así, aunque la profundidad de vocalización sea 12,1 m y no a media agua (60 m) este ducto acústico contribuye igualmente a una mayor propagación de las vocalizaciones, pudiendo aumentar su alcance.

Dado que la profundidad promedio de vocalización de las ballenas fin es a los 12,1 m de profundidad y que la profundidad de producción de sonido con mejores condiciones de propagación es a media agua (60-70 m), cabe preguntarse ¿por qué las ballenas no estarían utilizando la profundidad que ofrece las condiciones más favorables para la propagación de sus

vocalizaciones? Algunas explicaciones de la producción de sonido en misticetos en la capa superficial sugieren factores fisiológicos y energéticos.

Fisiológico:

- Algunos autores han propuesto que la producción de sonido de las ballenas en zonas poco profundas estaría relacionada con factores fisiológicos propios de la anatomía de producción de vocalización en los misticetos (Reidenberg & Laitman, 2007; Adam et al., 2013; Stimpert et al., 2015).
- Los misticetos tienen un mecanismo único de transmisión de sonido hacia el medio acuático (Adam et al., 2013). Las ballenas contraen los músculos de la garganta y el pecho, permitiendo que el aire que pasa a través de la tráquea recircule internamente entre los pulmones y el saco laríngeo (Adam et al., 2013). La expansión y contracción alterna de los pulmones y el saco laríngeo impulsa el aire a través del pliegue en “U”, lo que hace que vibre y se produzca el sonido. Las vibraciones del saco laríngeo se propagan a través de los tejidos de la garganta (o también llamados pliegues gulares) hacia el medio circundante en forma de onda y los cambios en la forma del saco laríngeo pueden cambiar la frecuencia de los sonidos producidos (Reidenberg & Laitman, 2007).
- Para impulsar la producción de sonido los misticetos requieren de una gran cantidad de aire entre los pulmones y el saco laríngeo o un gran volumen de aire para mantener una determinada frecuencia, por lo que vocalizar a mayores profundidades puede verse limitado por la reducción de volumen de aire debido al aumento de presión en profundidad (Reidenberg & Laitman, 2007). Por lo tanto, vocalizar a mayores profundidades podría implicar daños en los pulmones u otros órganos, debido al aumento de la presión.

Energético:

- Las ballenas fin tienen una flotabilidad neutra o ligeramente positiva a profundidades menores que 30 m (Goldbogen et al., 2006), lo que sugiere que vocalizar en zona de flotabilidad neutra reduciría aún más el costo de producir vocalizaciones, ya que la ballena puede mantener la profundidad mientras vocaliza sin nadar activamente.
- Oleson et al. (2007) sugieren que las ballenas azules coordinan sus comportamientos de producción de sonido y alimentación vocalizando cuando las presas están menos disponibles, disminuyendo así el costo energético, ya que la actividad de alimentación por embestida es energéticamente costosa debido a los cambios en la velocidad del nado (Acevedo-Gutierrez et al., 2002).

6.4 Implicancias para el monitoreo y la conservación

La ballena fin es la especie de cetáceo más abundante en la porción chilena del ecosistema de Corriente de Humboldt (desde la región de Arica y Parinacota hasta la región de los Ríos), con mayor cantidad de avistamientos registrados en la zona costera y frecuente en la parte centro y norte del país (Bedriñana-Romano et al., 2022). Además, es la especie de cetáceo más vulnerable a la colisión o choque con embarcaciones a nivel mundial, siendo esta una de las principales amenazas antropogénicas para las poblaciones de cetáceos en el mundo (Laist et al., 2001; Winkler et al., 2020). La implementación de boyas acústicas en tiempo real puede ser una herramienta efectiva para prevenir la colisión de embarcaciones con ballenas. El sistema de boyas en tiempo real equipadas con hidrófonos y otros sensores oceanográficos monitorean acústicamente el entorno marino, mediante el registro de señales acústicas emitidas por ballenas. Estas señales acústicas son enviadas en tiempo real a un centro de operaciones que da aviso a operadores de transporte marítimo sobre la presencia de cetáceos en el lugar donde transitan, con la finalidad de evitar la colisión con cetáceos. Es por esto, que seguir realizando estudios acústicos, describir y conocer el repertorio acústico de las diferentes especies de ballenas y otros cetáceos es

fundamental para la conservación y monitoreo de estos animales. Realizar monitoreos de la población de ballenas fin que utiliza el Archipiélago de Humboldt es relevante para describir el uso de hábitat, conocer las rutas migratorias y describir la conducta de estos animales. Los hallazgos de esta tesis indican que la ballena fin tiende a ser una especie poco vocal durante el verano, ya que aproximadamente el 60% de los individuos marcados no emitieron vocalizaciones. Por lo tanto, es probable que la presencia acústica de esta especie no pueda ser detectada con certeza mediante la utilización de hidrófonos anclados, lo que dificulta la determinación de la densidad poblacional utilizando exclusivamente la tasa de vocalización (ej. Marques et al., 2013). Por lo tanto, en futuros estudios es imperativo considerar esta limitación y complementar el uso de hidrófonos anclados con otras metodologías, como prospecciones visuales y análisis genéticos, con el fin de obtener resultados más sólidos y fiables. Continuar el uso de marcas acústicas en futuras investigaciones para estudiar ballenas fin es especialmente útil para esta especie poco vocal, permitiendo rastrear la presencia de un animal incluso cuando no lo vemos, y proporcionando información valiosa para la comprensión de su comportamiento no vocal.

Por otro lado, la información de profundidad de vocalización de la ballena fin obtenida en la presente tesis será un parámetro fundamental para futuras investigaciones que busquen estimar la presencia acústica de ballena fin mediante el uso de hidrófonos anclados. Esto permitirá calcular con mayor precisión la distancia máxima a la que un hidrófono anclado puede detectar los *downsweep* (rango de detección) de la ballena fin. El rango de detección permite comparar entre sitios geográficos y comprender la distribución espacial y temporal de las ballenas fin, influyendo directamente en la toma de decisiones sobre la conservación de esta población de ballenas fin. Por lo que, la relevancia de conocer la profundidad de vocalización radica en que la profundidad desde la cual proviene el sonido (ballena) puede influir en las diferencias observadas en el rango de detección (Stafford et al., 2007). Esta información será fundamental para predecir cómo se comporta la vocalización a medida que viaja hacia el hidrófono. Ampliar la red de monitoreo acústico es

fundamental para mejorar los estudios que busquen comprender la ecología y comportamiento de las ballenas fin a través de sus vocalizaciones (cantos o *downsweep*).

7 CONCLUSIONES

En la presente tesis se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- La caracterización de las vocalizaciones tipo “*downsweep*” de la ballena fin resultó en vocalizaciones de corta duración (0.7 s) en un rango de frecuencias de 85 a 40 Hz y una frecuencia *peak* de 63 Hz, similar a lo reportado previamente en el área de estudio. Por esto se propone que los *downsweep* de 63 Hz son parte del repertorio e identidad acústica de las ballenas fin que frecuentan cada año su área de alimentación en el Archipiélago de Humboldt durante la temporada estival.
- Los *downsweep* de 63 Hz de ballena fin son producidos en la capa superficial de la columna de agua (<20m) con una profundidad de vocalización promedio de 12,1 m. En la presente tesis se describió por primera vez la profundidad de vocalización de los *downsweep*, parámetro necesario para la estimación de rangos de detección de hidrófonos anclados.
- El modelo de pérdida de transmisión (TL) mostró la presencia de un conducto acústico a media agua (60 m) existente en toda la columna de agua, independiente de la profundidad del emisor. Este conducto estaría contribuyendo a una mayor propagación de los *downsweep* de 60 Hz aunque la profundidad de vocalización sea 12,1 m.
- La producción de *downsweep* en la capa superficial (< 20 m) podría ser explicada por restricciones fisiológicas y/o energéticas propias de los misticetos.

- Las marcas acústicas son herramientas relativamente nuevas en este tipo de investigación, y actualmente es un desafío establecer criterios o metodologías estándar para: 1) Calibrar sensores de presión; 2) Reportar la caracterización de señales acústicas; 3) Determinar la hora de vocalización a utilizar (inicial o promedio); 4) Establecer una metodología estándar para identificación del *caller ID*.

El trabajo realizado en la presente tesis ocurre exclusivamente durante la temporada de alimentación en la Reserva Marina Isla Chañaral y aguas aledañas, durante horas diurnas y durante la temporada de verano. En futuros estudios se debe considerar el comportamiento acústico durante otras estaciones del año y determinar si existen variaciones en la profundidad de vocalización. Además, intentar abarcar horas de marcaje nocturno y un área de marcaje más extensa ya que probablemente el área de alimentación sea más grande a lo reportado en la literatura. Asimismo, un gran desafío y fundamental para comprender el comportamiento de la presente población de ballenas fin es estudiar sus rutas migratorias y destinos de áreas de reproducción y crianza. Complementar estos estudios con análisis genéticos para determinar el sexo de los individuos marcados (Pérez et al., 2021) nos podría dar un contexto mucho más completo de la población de ballenas fin del Archipiélago de Humboldt.

8 REFERENCIAS

Acevedo-Ramírez, J., Cornejo Elices, S., Fuentes Larenas, A., Sielfeld Kowald, W., & Aguayo-Lobo, A. (2019). *Guía metodológica estandarizada para el levantamiento de líneas bases y seguimiento ambiental de mamíferos marinos para proyectos que se someten al sistema de evaluación de impacto ambiental en Chile*. Valparaíso, Chile: Licitación FIPA 2018-42. Fondo de Investigación Pesquera y de Acuicultura.

Acevedo, J., O'grady, M., & Wallis, B. (2012). Sighting of the fin whale in the Eastern Subtropical. *Revista de Biología Marina*, 47(3), 559-563.

Acousonde TM Applications Questions. (s.f.). Obtenido de Acousonde: <http://www.acousonde.com/faqapplications.html>

Acousonde TM Applications Questions. (n.d.). Obtenido de Acousonde: <https://www.acousonde.com/index.html>

Aguayo-Lobo, A., & Torres, D. (1967). Observaciones sobre mamíferos marinos durante la Vigésima Comisión Antártica Chilena. Primer censo de pinipedios en las islas Shetland del Sur. *Revista de Biología Marina*, 13:1-57.

Aguayo-Lobo, A., Torres Navarro, D., & Acevedo Ramírez, J. (1998a). Los mamíferos marinos de Chile: I. Cetacea. *Serie Científica INACH*, 48, 19-159.

Aguayo-Lobo, A., Bernal, R., Olavarría, C., Vallejos, V., & Huckle, R. (1998b). Observaciones de cetáceos realizadas entre Valparaíso e Isla de Pascua, Chile, durante los inviernos de 1993, 1994 y 1995. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 33(1): 101-123.

Argüelles, M., Coscarella, M., Fazio, A., & Bertellotti, M. (2016). Impact of whale-watching on the short-term behavior of Southern right whales (*Eubalaena australis*) in Patagonia, Argentina. *Tourism Management Perspectives*, 18, 118-124.

Au, W., & Hastings, M. (2008). *Principles of Marine Bioacoustics* (Vol. 510). New York, NY: Springer.

Bedriñana-Romano, L., Zarate, P. M., Huckle-Gaete, R., Viddi, F. A., Buchan, S. J., Cari, I., ... & Zerbini, A. N. (2022). Abundance and distribution patterns of cetaceans and their overlap with vessel traffic in the Humboldt Current Ecosystem, Chile. *Scientific Reports*, 12(1), 10639.

- Blumstein , D., Mennill, D., Clemins, P. J., Girod, L., Yao, K., Patricelli, G., . . . Kirschel, A. (2011). Acoustic monitoring in terrestrial environments using microphone arrays: Applications, technological considerations and prospectus. *Journal of Applied Ecology*, 48(3), 758-767.
- Bradley, D., & Stern, R. (2008). *Underwater Sound and the Marine Mammal Acoustic Environment: A Guide to Fundamental Principles*. East West Highway: Marine mammal commission.
- Boisseau, O., Gillespie, D., Leaper, R., & Moscrop, A. (2008). Blue (*Balaenoptera musculus*) and fin (*B. physalus*) whale vocalisations measured from northern latitudes of the Atlantic Ocean. *Journal of Cetacean Research and Management*, 10(1), 23–30.
- Buchan , S. (2014). *Presencia acústica de ballenas azules (Balaenoptera musculus) y condiciones de forrajeo en el Golfo Corcovado, Patagonia Chilena*. Concepción, Chile: Tesis Doctorado, Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas, Universidad de Concepción.
- Buchan, S., Gutierrez, L., Balcazar-Cabrera, N., & Stafford, K. (2019). Seasonal occurrence of fin whale song off Juan Fernandez, Chile. *Endangered Species Research*, 39, 135-145.
- Buchan, S., Balcazar-Cabrera, N., & Stafford, K. (2020). Seasonal acoustic presence of blue, fin, and minke whales off the Juan Fernández Archipelago, Chile (2007–2016). *Marine Biodiversity*, 50(5), 1-10.
- Buchan , S. J., Vásquez , P., Olavarria , C., & Castro, L. L. (2021). Prey items of baleen whale species off the coast of Chile from fecal plume analysis. *Marine Mammal Science*, 37(3), 1116-1127.
- Burkhardt, E., & Lanfredi, C. (2012). Fall feeding aggregations of fin whales off Elephant Island (Antarctica). IWC, SC/64/SH9. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/235746751_Fall_feeding_aggregations_of_fin_whales_off_Elephant_Island_Antarctica.
- Carrillo , M., & Ritter, F. (2010). Increasing numbers of ship strikes in the Canary Islands: proposals for immediate action to reduce risk of vessel-whale collisions. *Journal of cetacean research and management*, 11(2), 131-138.

- Capella, J., Vilina, Y., & Gibbons, J. (1999). Observación de cetáceos en isla Chañaral y nuevos registros para el área de la Reserva Nacional Pingüino de Humboldt, norte de Chile. *Estudios Oceanológicos*, 18, 57-64
- +*Report of the International Whaling Commission*, 53(3).
- Clark, C. (1990). *Acoustic Behavior of Mysticete Whales* (Vol. 196). Boston, Massachusetts: Springer.
- Collins, M. (1993). A split-step Pad solution for the parabolic equation method. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 93(4), 1736-1742.
- Constaratas, A., McDonald, M., Goetz, K., & Giorli, G. (2021). Fin whale acoustic populations present in New Zealand waters: Description of song types, occurrence and seasonality using passive acoustic monitoring. *Plos One*, 26(7), e0253737.
- Croll, D., Acevedo-Gutiérrez, A., Tershy, B., & Urbán-Ramírez, J. (2001). The diving behavior of blue and fin whales: is dive duration shorter than expected based on oxygen stores? *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 129(4), 797-809.
- Croll, D., Clark, C., Acevedo, A., Tershy, B., Flores, S., Gedamke, J., & Urban, J. (2002). Only male fin whales sing loud songs. *Nature*, 417 (6891), 809-809.
- Cummings, W. C., Thompson, P. O., & Ha, S. J. (1986). Sounds from Bryde, *Balaenoptera edeni*, and finback, *B. physalus*, whales in the Gulf of California. *Fishery Bulletin*, 84(2), 359–370.
- DeRuiter, S., Tyack, P., Lin, Y.-T., Lynch, J., & Miller, P. (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.
- De Vreese, S., van der Schaar, M., Erbs, F., Degollada, E., & André, M. (2017). *Fin whale acoustics in the Garraf Marine Area* (Report 2014–2017)

- Erbe, C., Duncan, A., Vigness-Raposa, K.J. (2022). Introduction to Sound Propagation Under Water. In: Erbe, C., Thomas, J.A. (eds) Exploring Animal Behavior Through Sound: Volume 1. Springer, Cham.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-97540-1_6
- Frid, A., & Dill, L. (2002). Human-caused disturbance stimuli as a form of predation risk. *Conservation ecology*, 6(1), 11.
- Friedlaender, Ari S. et al. (2019). The advantages of diving deep: Fin whales quadruple their energy intake when targeting deep krill patches. *Functional Ecology*, 34(2), 497-506.
- Fonseca, C. T., Pérez-Jorge, S., Prieto, R., Oliveira, C., Tobeña, M., Scheffer, A., & Silva, M. A. (2022). Dive behavior and activity patterns of fin whales in a migratory habitat. *Frontiers in Marine Science*, 9, 875731.
- García-Cegarra, A., & Pachecho, A. (2019). Collision risk areas between fin and humpback whales with large cargo. *Marine Policy*, 103, 182-186.
- Gaymer, C.F., Stotz, W., Garay-Flümann, R., Luna-Jorquera, G & Ramos, M. (2008). Evaluación de línea base de las Reservas Marinas "Isla Chañaral" e "Islas Choros y Damas". Informe Final Proyecto FIP 2006-56, 532 pp
- Goldbogen, J. A., Calambokidis, J., Shadwick, R. E., Oleson, E. M., McDonald, M. A., & Hildebrand, J. A. (2006). Kinematics of foraging dives and lunge-feeding in fin whales. *Journal of Experimental Biology*, 209(7), 1231-1244.
- Goldbogen, J., Stimpert, A., DeRuiter, S., Calambokidis, J., Friedlaender, A., Schorr, G., . . . Southall, B. (2014). Using accelerometers to determine the calling behavior of tagged baleen whales. *Journal of Experimental Biology*, 217(14), 2449-2455.
- Gonzalez, E. (2003). Interacciones entre la pesquería artesanal del bacalao de profundidad, *Dissostichus eleginoides*, y cetáceos, en aguas del centro (28º S)-sur (46º S) de Chile. *Tesis para optar al Grado de Biólogo Marino. Facultad de Ciencias del Mar, Universidad de Valparaíso*, 111 págs.
- Hamilton, E. (1972). Sound attenuation in marine sediments . *Naval undersea research and development center San Diego CA.*, 3.

- Herr, H., Viquerat, S., Siegel, V., Kock, K.-H., Dorschel, B., Huneke, W., . . . Gutt, J. (2016). Horizontal niche partitioning of humpback and fin whales around the West Antarctic Peninsula: evidence from a concurrent whale and krill survey. *Polar Biology*, 39,799-818.
- Herr, H., Hickmott, L., Viquerat, S., & Panigada, S. (2022). First evidence for fin whale migration into the Pacific from Antarctic feeding grounds at Elephant Island. *Royal Society Open Science*, 9(9), 220721.
- Irvine, L. M., Palacios, D. M., Lagerquist, B. A., & Mate, B. R. (2019). Scales of blue and fin whale feeding behavior off California, USA, with implications for prey patchiness. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 7, 338.
- Jensen , F., Kuperman, W., Porter, M., & Schmidt, H. (2011). *Computational ocean acoustics*. Springer, New York, NY.
- Jensen, A., & Silber, G. (2003). *Large Whales Ship Strike Database*. U.S. Department of Commerce, NOAA Technical Memorandum. NMFS-OPR- , 37 pp.
- Johnson, M., & Tyack, P. (2003). A Digital Acoustic Recording Tag for Measuring the Response of Wild Marine Mammals to Sound. *IEEE Journal Of Oceanic Engineering*, 28(1), 3-12.
- Johnson, M., Aguilar de Soto, N., & Madsen, P. (2009). Studying the behaviour and sensory ecology of marine mammals using acoustic recording tags: a review. *Marine Ecology Progress Series* , 395, 55-73.
- Laist, D. W., Knowlton, A. R., Mead, J. G., Collet, A. S., & Podesta, M. (2001). Collisions between ships and whales. *Marine Mammal Science*, 17(1), 35-75.
- Lewis, L. A., Calambokidis, J., Stimpert, A. K., Fahlbusch, J., Friedlaender, A. S., McKenna, M. F., ... & Širović, A. (2018). Context-dependent variability in blue whale acoustic behaviour. *Royal Society open science*, 5(8), 180241.
- Mackintosh, N. A. (1966). The distribution of southern blue and fin whales. In: Norris, K.S (eds). *Whales, dolphins, and porpoises*. (pp. 125-144). Berkeley: University of California Press.
<https://doi.org/10.1525/9780520321373-010>

- Marques, T., Thomas, L., Martin, S., Mellinger, D., Ward, J., ... & Tyack P. (2013) Estimating animal population density using passive acoustics. *Biology Reviews*, 88(2), 287-309.
- McDonald, M., Mesnick, S., & Hildebrand, J. (2006). Biogeographic characterisation of blue whale song worldwide: using song to identify populations. *Journal of Cetacean Research and Management*, 8(1), 55-56.
- Mellinger, D., Stafford, K., Moore, S., Dziak, R., & Matsumoto, H. (2007). An Overview of Fixed Passive Acoustic Observation Methods for Cetaceans. *Oceanography*, 20,(4), 36-45.
- Mercado III, E., & Frazer, L. (1999). Environmental constraints on sound transmission by humpback whales. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 106, 3004 - 3016.
- Merchant, N., Fristrup, K., Johnson, M., Tyack, P., Witt, M., Blondel, P., & Parks, S. (2014). Measuring acoustic habitats. *Methods in Ecology and Evolution*, 6(3), 257-265.
- Miller, B. S., Calderan, S., Leaper, R., Miller, E. J., Širović, A., Stafford, K. M., Bell, E., & Double, M. C. (2021). Source level of Antarctic blue and fin whale sounds recorded on sonobuoys deployed in the deep-ocean off Antarctica. *Frontiers in Marine Science*, 8, Article 792651.
- Milton, G., Folegot, T., Cosandey-Godin, A., Jacob, T., Lancaster, M., & Ushio, M. (2021). *Shipping and cetaceans: A review of impacts and mitigation options for policy makers and other stakeholders*. WWF Report.
- Reidenberg JS, Laitman JT (2007) Discovery of a low frequency sound source in mysticeti (Baleen whales): anatomical establishment of a vocal fold homolog. *The Anatomical Record*, 290(6), 745–759
- Oleson, E. M., Calambokidis, J., Burgess, W. C., McDonald, M. A., LeDuc, C. A., & Hildebrand, J. A. (2007). Behavioral context of Northeast Pacific blue whale call production. *Marine Ecology Progress Series*, 330, 269-284.
- Oleson, E. M., Širović, A., Bayless, A. R., & Hildebrand, J. A. (2014). Synchronous seasonal change in fin whale song in the North Pacific. *PloS one*, 9(12), e115678.

- Oyanadel, J. (2020). *Distribución espacial de la señal hidroacústica asociada al zooplankton alrededor de la Reserva Marina Isla Chañaral: Influencia de la batimetría.*
- Pachecho, A., Villegas, V., Riascos, J., & Van Waerebeek, K. (2015). Presence of fin whale (*Balaenoptera physalus*) in Mejillones Bay, a major seaport area in northern Chile. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 50(2) 383-389.
- Panigada, S., Zanardelli, M., Canese, S., & Jahoda, M. (1999). How deep can baleen whales dive?. *Marine Ecology Progress Series*, 187, 309-311.
- Panigada, S., Pesante, G., Zanardelli, M., & Oehen, S. (2003, September). Day and night-time diving behavior of fin whales in the western Ligurian Sea. In In: Proceedings of the conference Ocean 2003, San Diego, California, USA, pp 466–471.
- Parks, S., Searby, A., Célérier, A., Johnson, M., Nowacek, D., & Tyack, P. (2011). Sound production behavior of individual North Atlantic right whales: Implications for passive acoustic monitoring. *Endangered Species Research*, 15(1), 63-76.
- Pérez, M., Thomas, F., Uribe, F., Sepúlveda, M., Flores, M., & Moraga, R. (2006). Fin whales (*Balaenoptera physalus*) Feeding on *Euphausia mucronata* in Nearshore Waters off North-Central Chile. *Aquatic Mammals*, 32(1), 109-113.
- Pérez., M., Kraft., S., Segovia., N. I., Olavarría., C., Nigenda-Morales., S., Urbán., R, J., ... & Poulin., E. (2021). Contrasting phylogeographic patterns among Northern and Southern Hemisphere fin whale populations with new data from the Southern Pacific. *Frontiers in Marine Science*, 774.
- Randall, R. (1999). Underwater Acoustics. En *Developments in Offshore Engineering* (págs. 382-471). Texas, Estados Unidos: Gulf Professional Publishing.
- Romagosa, M., Pérez-Jorge, S., Cascão, I., Mouriño, H., Lehodey, P., Pereira, A., ...& Silva, M. (2021). Food talk: 40-Hz fin whale calls are associated with prey biomass. *Proceedings of the Royal Society*, 288(1954), 20211156.

- Saddler, M., Bocconcelli, A., Hickmontt, L., Chiang, G., Landea-Briones, R., Bahamonde, P., ... & Sayigh, L. (2017). Characterizing Chilean blue whale vocalizations with DTAGs: a test of using tag accelerometers for caller identification. *Journal of Experimental Biology*, 220, 4119-4129.
- Samaran, F., Adam, O., & Guinet, C. (2010). Detection range modeling of blue whale calls in Southwestern Indian Ocean. *Applied Acoustics*, 71(11), 1099-1106.
- Santos-Carvallo, M., Barilari, F., Pérez-Alvarez, M., Gutiérrez, L., Pavez, G., Araya, H., ... & Sepúlveda, M. (2021). Impacts of Whale-Watching on the Short-Term Behavior of Fin Whales (*Balaenoptera physalus*) in a Marine Protected Area in the Southeastern Pacific. *Frontiers in Marine Science*, 8, 623954.
- Sepúlveda, M., Pérez-Álvarez, M., Santos-Carvallo, M., Pavez, G., Olavarría, C., Moraga, R., & Zerbini, A. (2018). From whaling to whale watching: Identifying fin whale critical foraging habitats off the Chilean coast. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 28(4), 821-829.
- Schevill, W. E., & Watkins, W. A. (1962). *Whale and porpoise voices - A phonograph record* (Contribution 1320). Woods Hole Oceanographic Institution.
- Širović, A., Williams, L., Kerosky, S., Wiggins, S., & Hildebrand, J. (2013). Temporal separation of two fin whale call types across the eastern North Pacific. *Marine Biology*, 160(1), 47-57.
- Širović, A., Oleson, E. M., Buccowich, J., Rice, A., & Bayless, A. R. (2017). Fin whale song variability in southern California and the Gulf of California. *Scientific reports*, 7(1), 10126.
- Southall, B., Hatch, L., Scholik-Schlomer, A., Bergmann, T., Jasny, M., Metcalf, K., . . . Perera, M. (2018). Reducing Noise from Large Commercial Ships. *Journal of Safety and Security at Sea*, 1, 58-65.
- Sprogis, K., Videsen, S., & Madsen, P. (2020). Vessel noise levels drive behavioural responses of humpback whales with implications for whale-watching. *Elife*, 9, e56760.

- Stafford , K., Fox, C., & Clark, D. (1998). Long-range acoustic detection and localization of blue whale calls in the northeast Pacific Ocean. *The Journal of the Acoustical Society of America* , 104(6), 3616-3625.
- Stafford, K., Mellinger, D., Moore, S., & Fox, C. (2007). Seasonal variability and detection range modeling of baleen whale calls in the Gulf of Alaska, 1999–2002. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 122(6), 3378-3390.
- Stimpert, A., DeRuiter, S., Falcone, E., Joseph, J., Douglas , A., Moretti, D., ... & Goldbogen, J. (2015). Sound production and associated behavior of tagged fin whales (*Balaenoptera physalus*) in the Southern California Bight. *Animal Biotelemetry*, 3(1), 1-12.
- Toro, F., Gutiérrez, J., Henríquez, A., Leichtle, J., Follador, N., Abarca, P., . . . Pincheira, B. (2020). Report of two fin whale (*Balaenoptera physalus*) strandings associated with ship strikes in central-south coast of Chile. *Latin American Journal of Aquatic Mammals*, 15(1), 8-14.
- Toro, F., Vilina, Y., Capella, J., & Gibbons, J. (2016). Novel Coastal Feeding Area for Eastern South Pacific Fin Whales. *Aquatic Mammals*, 42(1), 47-55.
- Urick, R. (1975). *Principles of underwater sound-2*. New York, N.Y, USA: McGraw-Hill Book.
- Vega, M., Buchan, S., Olavarria, C., Ramos, M., & Valladares, M. (2023). Preliminary characterization and diel variation of fin whale (*Balaenoptera physalus*) downsweep calls off Isla Chañaral, northern Chile. *Marine Mammal Science*, 39(4), 1313-1323.
- Watkins, W. (1981). Activities and underwater sounds of fin whales. *The Scientific Reports of the Whales Research Institute*, 33, 83-117.
- Watkins, W., Tyack, P., & Moore, K. (1987). The 20-Hz signals of finback whales (*Balaenoptera physalus*). *The Journal of the Acoustical Society of America*, 82(6), 1901-1912.
- Wiggins, S. M., Oleson, E. M., McDonald, M. A., & Hildebrand, J. A. (2005). Blue whale (*Balaenoptera musculus*) diel call patterns offshore of Southern California. *Aquatic Mammals*, 31(2), 161–168

- Winkler, C., Panigada, S., Murphy, S., & Ritter, F. (2020). Global numbers of ship strikes: an assessment of collisions between vessels and cetaceans using available data in the IWC ship strike database. *Report to the International Whaling Commission SC/68B/HIM/09*: Disponible en: <https://archive.iwc.int/pages/view.php?ref=17562&k=c9f67e8c17>
- Yang, K.L., Center for Conservation Bioacoustics at the Cornell Lab of Ornithology. (2019). Raven Pro: Interactive Sound Analysis Software (Version 1.6.1) [Computer software]. Ithaca, NY: The Cornell Lab of Ornithology. Available from <https://ravensoundsoftware.com/>.

ANEXO 1: POTENCIA ACÚSTICA PROMEDIO POR DESPLIEGUE CON PRESENCIA DE VOCALIZACIONES.

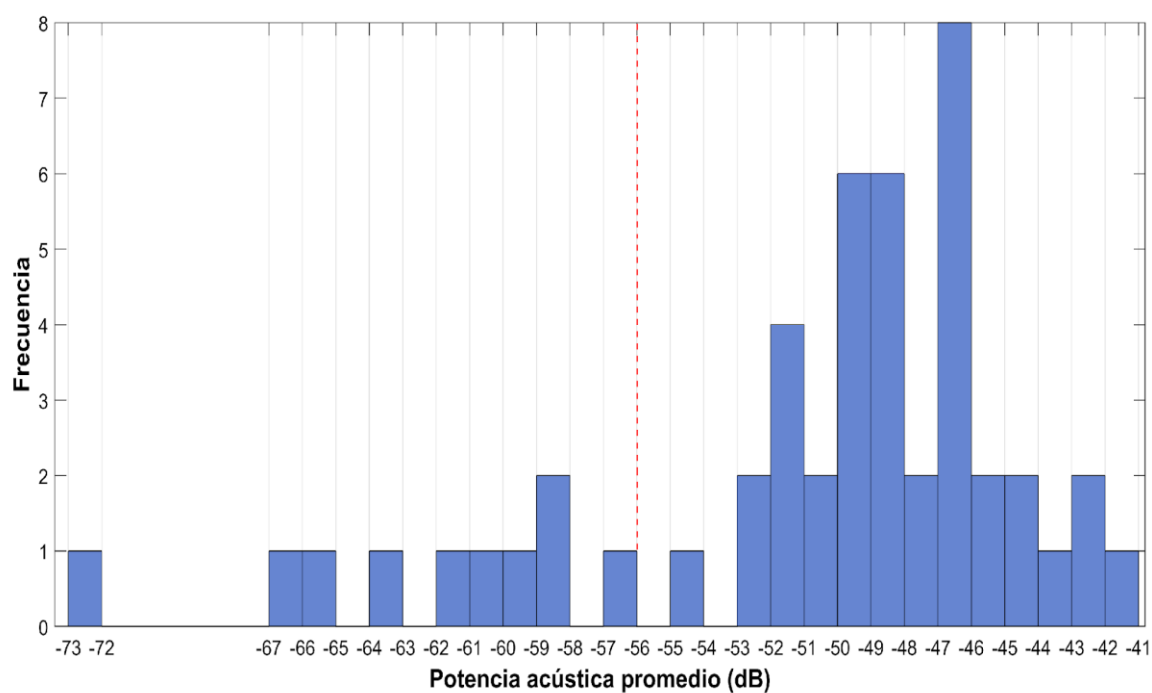


Figura A1: Potencia acústica promedio (dB) para los *downsweep* detectados en despliegue 1 del año 2021.

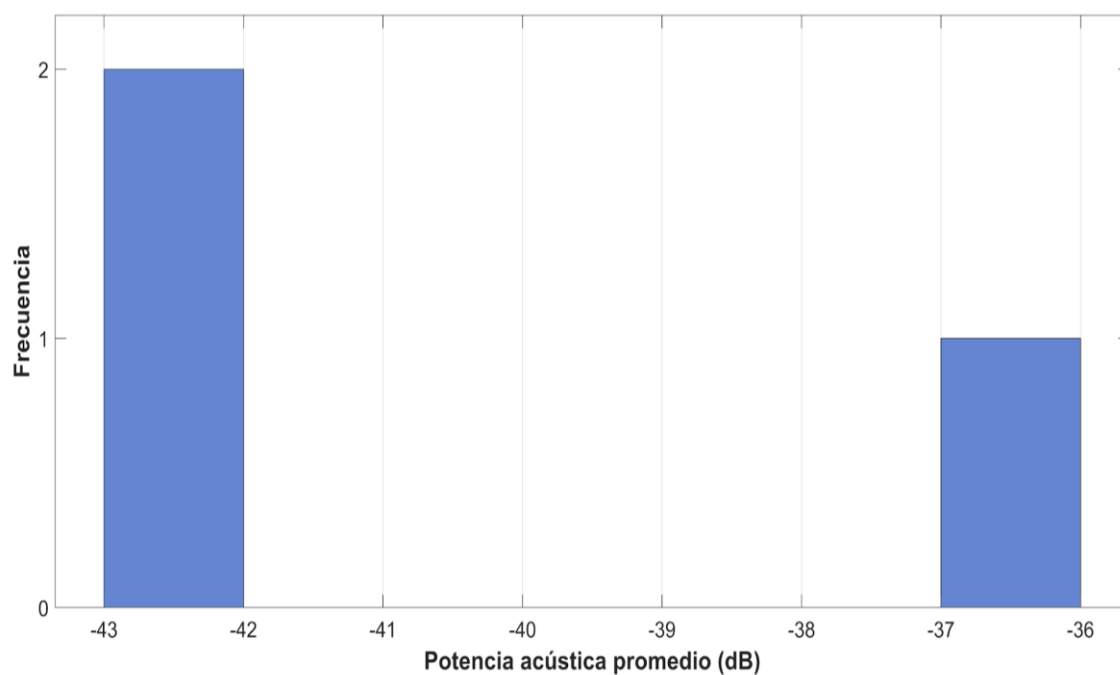


Figura A2: Potencia acústica promedio (dB) para los *downsweep* detectados en despliegue 2 del año 2021.

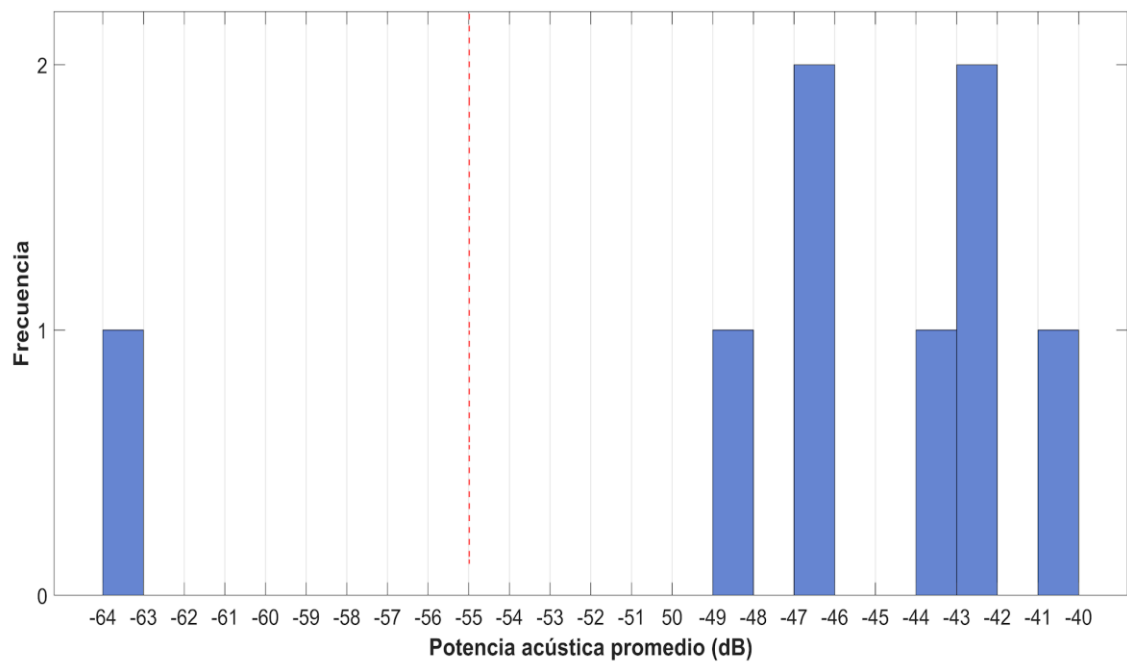


Figura A3: Potencia acústica promedio (dB) para los *downsweep* detectados en despliegue 3 del año 2021.

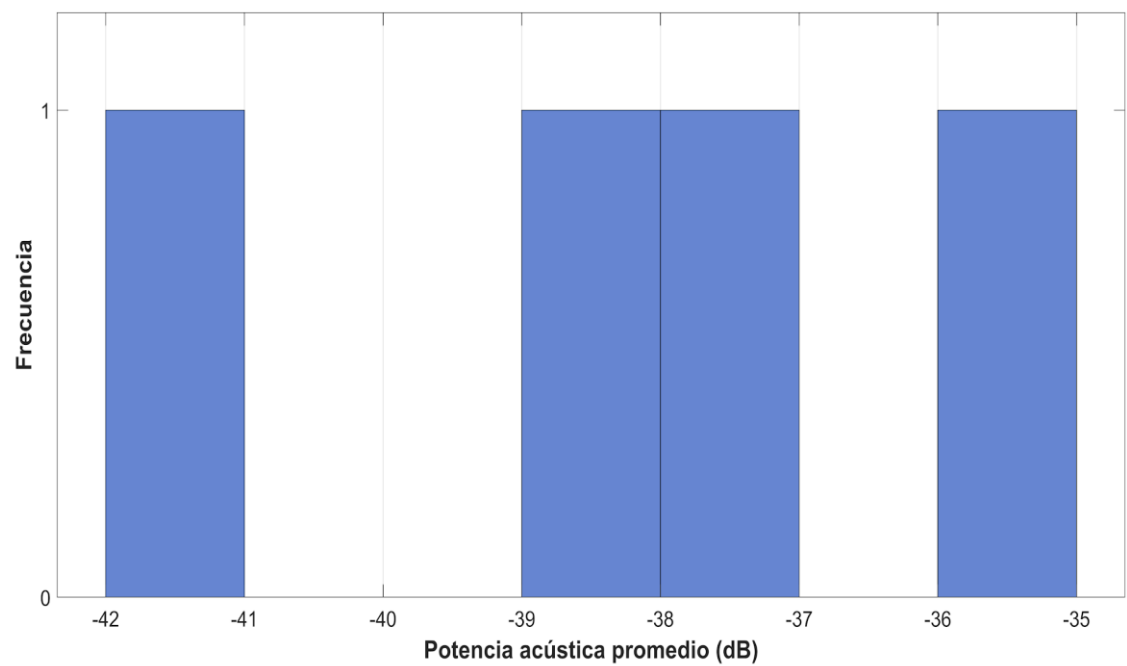


Figura A4: Potencia acústica promedio (dB) para los *downsweep* detectados en despliegue 6 del año 2021.

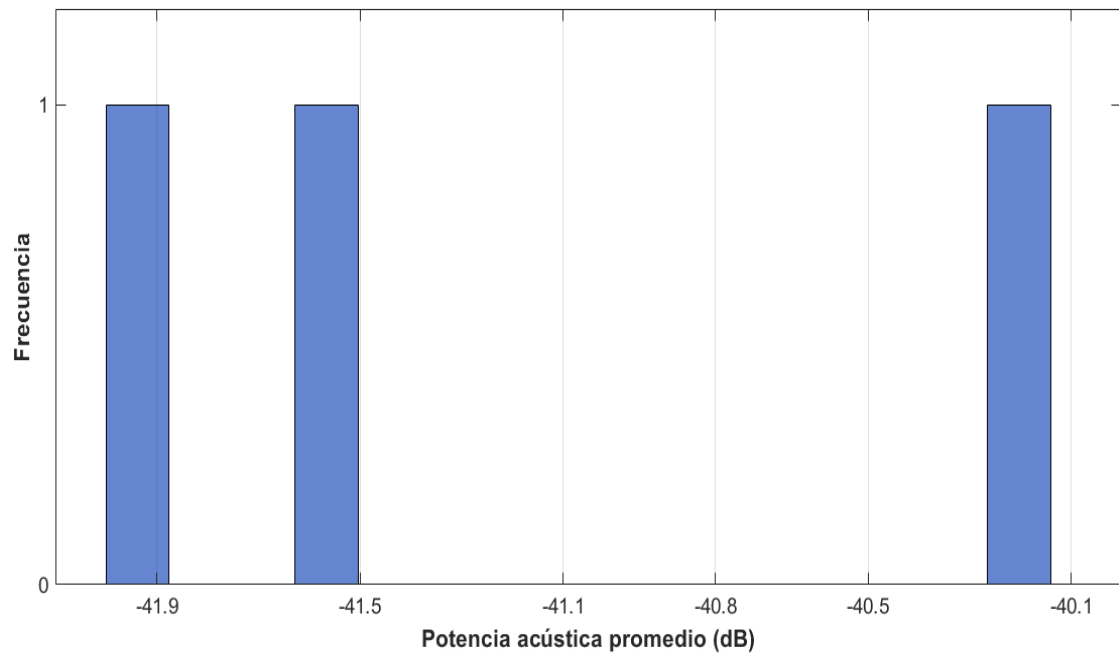


Figura A5: Potencia acústica promedio (dB) para los *downsweep* detectados en despliegue 8 del año 2021.

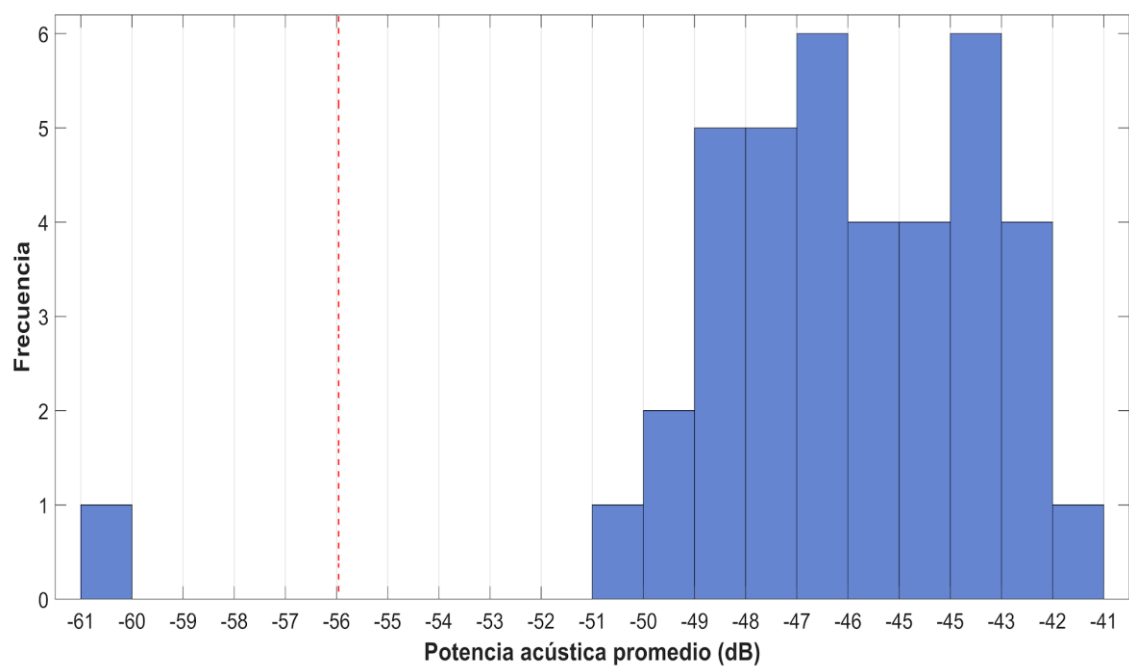


Figura A6: Potencia acústica promedio (dB) para los *downsweep* detectados en despliegue 11 del año 2021.

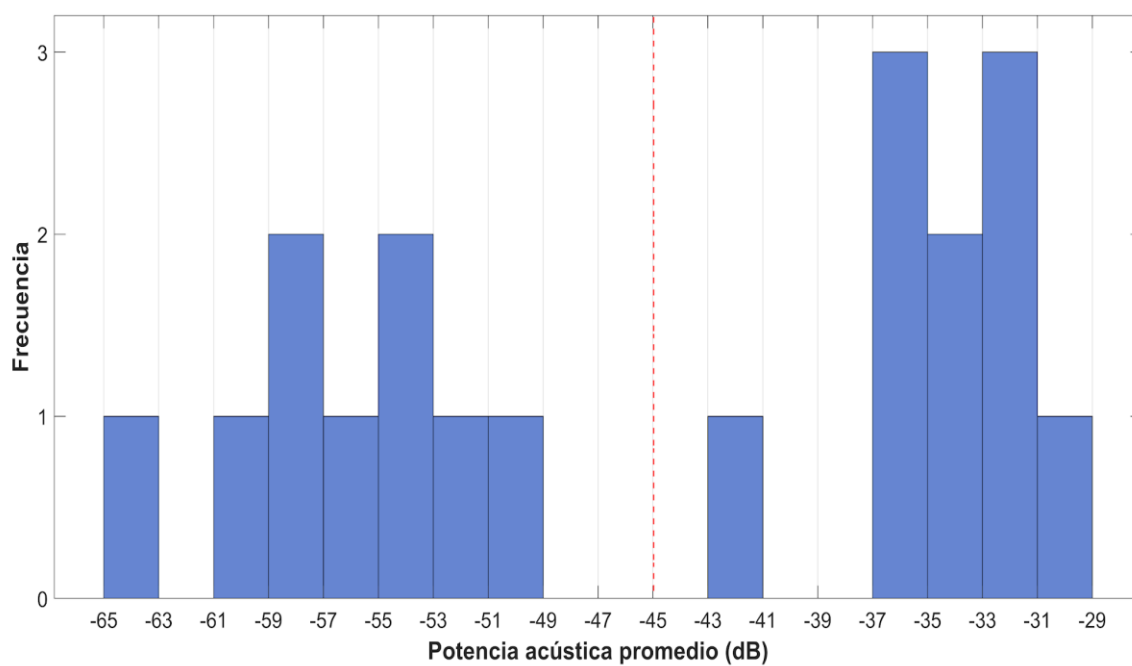


Figura A7: Potencia acústica promedio (dB) para los *downsweep* detectados en despliegue 13 del año 2021.

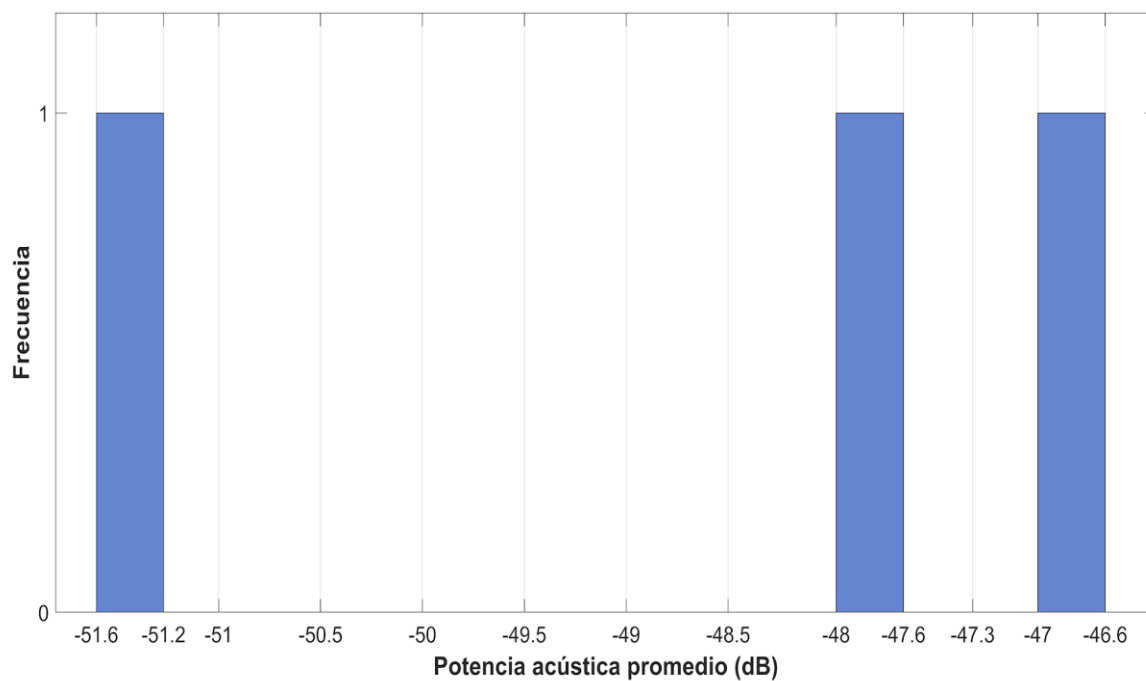


Figura A8: Potencia acústica promedio (dB) para los *downsweep* detectados en despliegue 2 del año 2020.

ANEXO 2: CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA, AÑO 2020 Y 2021.

Tabla A1: Características acústicas de los *downsweep* y el tiempo de duración de las marcas acústicas sobre ballenas fin (*Balaenoptera physalus*) alrededor de la Reserva Marina Isla Chañaral para el año 2020. Se reporta el promedio $\pm$ desviación estándar de cada variable por despliegue.

Despliegue	1	1	2	3	4	5	6
Nº downsweep	0	0	3	0	0	0	0
Hora inicio (h, min)	9:46	10:18	12:21	9:42	11:13	8:53	9:10
Hora final (h, min)	10:03	11:24	15:05	09:48	12:05	10:28	9:33
Duración despliegue (h, min, s)	00:16:16	1:06	2:44	00:05:26	00:51:30	1:35	0:23:30
Frecuencia peak (Hz)	0	0	68,3 $\pm$ 10,1	0	0	0	0
Duración downsweep (s)	0	0	0,7 $\pm$ 0,1	0	0	0	0
Máxima frecuencia (Hz)	0	0	84,5 $\pm$ 14,8	0	0	0	0
Mínima frecuencia (Hz)	0	0	45,4 $\pm$ 5,4	0	0	0	0
Potencia promedio (dB)	0	0	-48,7 $\pm$ 2,5	0	0	0	0
Taza vocalización (vocalización /hora)	0	0	1,1	0	0	0	0

Tabla A2: Características acústicas de los *downsweep* y el tiempo de duración de las marcas acústicas sobre ballenas fin (*Balaenoptera physalus*) alrededor de la Reserva Marina Isla Chañaral para el año 2021. Se reporta el promedio $\pm$ desviación estándar de cada variable por despliegue.

Despliegue	1	2	3	4	5	6	8	9	10	11	12	13	15
nº downsweep	38	3	8	0	0	4	3	0	0	38	0	10	0
Hora inicio (h, min)	8:46	11:33	14:27	14:00	12:09	13:52	10:43	8:28	13:25	10:09	9:15	16:09	8:23
Hora final (h, min)	18:06	17:32	20:37	14:02	12:52	16:31	14:15	11:27	19:47	24:07	15:03	2:38	12:19
Duración despliegue (h, min, s)	9:20	5:59	6:10	00:02:27	00:42:32	2:38	3:32	2:58	6:22	13:57	5:47	10:48	3:56
Frecuencia peak (Hz)	63,6 $\pm$ 7,6	69,3 $\pm$ 5,5	67,0 $\pm$ 8,4	0	0	73,3 $\pm$ 5,4	49,4 $\pm$ 4,8	0	0	63,4 $\pm$ 7,6	0	57,3 $\pm$ 4,1	0
Duración downsweep (s)	0,8 $\pm$ 0,1	0,4 $\pm$ 0,1	0,5 $\pm$ 0,1	0	0	0,6 $\pm$ 0,1	0,6 $\pm$ 0,1	0	0	0,7 $\pm$ 0,1	0	0,7 $\pm$ 0,1	0
Máxima frecuencia (Hz)	84,0 $\pm$ 5,1	85,0 $\pm$ 3,0	85,6 $\pm$ 7,0	0	0	95,6 $\pm$ 8,6	70,2 $\pm$ 4,5	0	0	84,6 $\pm$ 8,2	0	89,9 $\pm$ 7,3	0
Mínima frecuencia (Hz)	48,4 $\pm$ 4,6	51,2 $\pm$ 7,9	51,3 $\pm$ 5,7	0	0	52,9 $\pm$ 5,9	34,9 $\pm$ 2,0	0	0	49,7 $\pm$ 8,2	0	42,2 $\pm$ 3,7	0
Potencia promedio (dB)	-47,9 $\pm$ 3,0	-40,6 $\pm$ 3,6	-43,5 $\pm$ 3,3	0	0	-38,2 $\pm$ 2,5	-41,2 $\pm$ 0,9	0	0	-45,7 $\pm$ 2,4	0	-34,4 $\pm$ 3,8	0
Taza vocalización (vocalización/hora)	4,1	0,5	1,2	0	0	1,5	0,8	0	0	2,7	0	0,9	0

ANEXO 3: PERFILES DE BUCEO

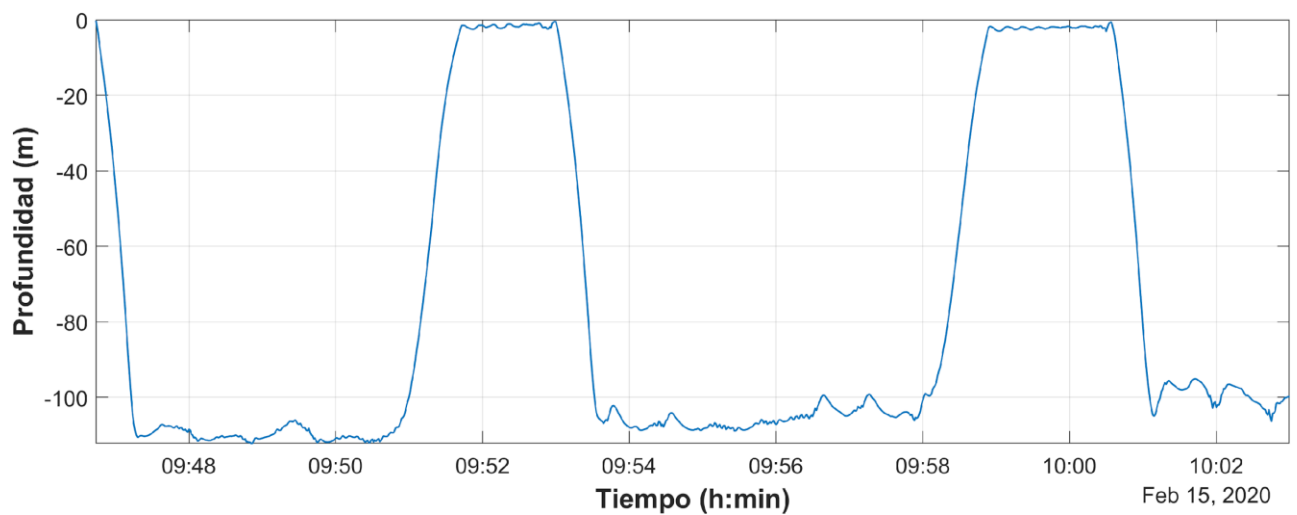


Figura A9: Perfil de buceo (azul) de ballena fin correspondiente al despliegue 1 del año 2020.

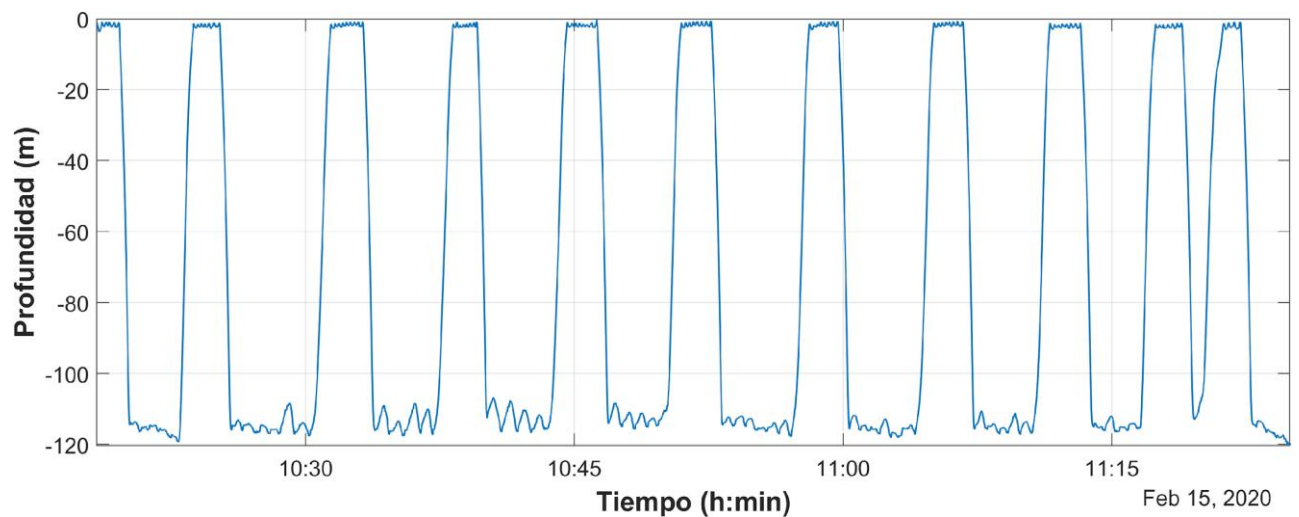


Figura A10: Perfil de buceo (azul) de ballena fin correspondiente al despliegue 1(II) del año 2020.

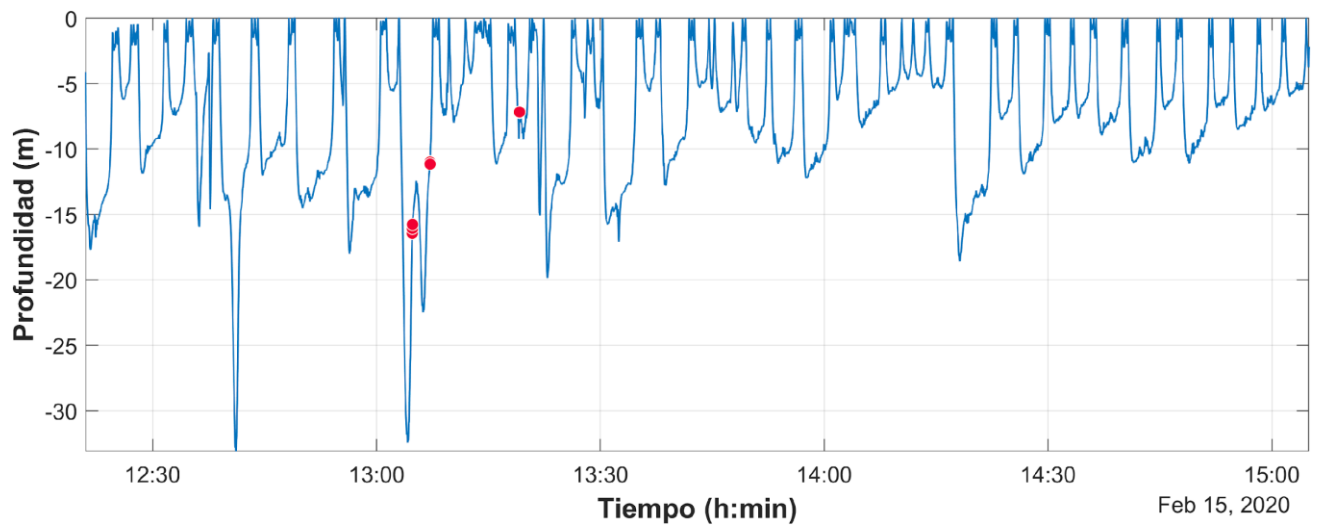


Figura A11: Perfil de buceo (azul) y *downsweep* (rojo) de ballena fin correspondiente al despliegue 2 del año 2020.

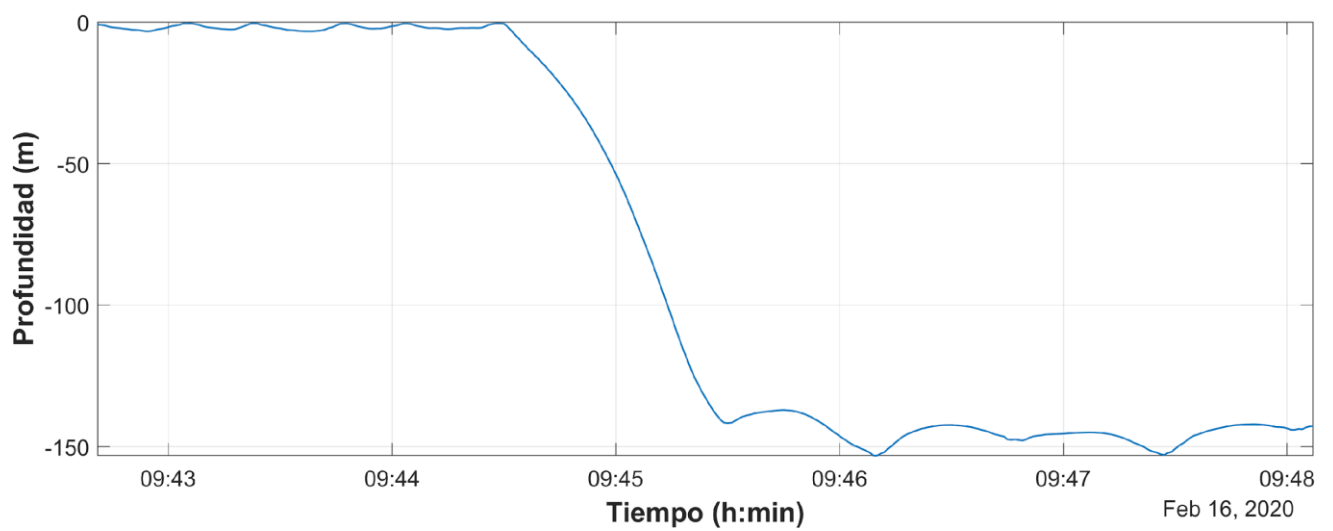


Figura A13: Perfil de buceo (azul) de ballena fin correspondiente al despliegue 3 del año 2020.

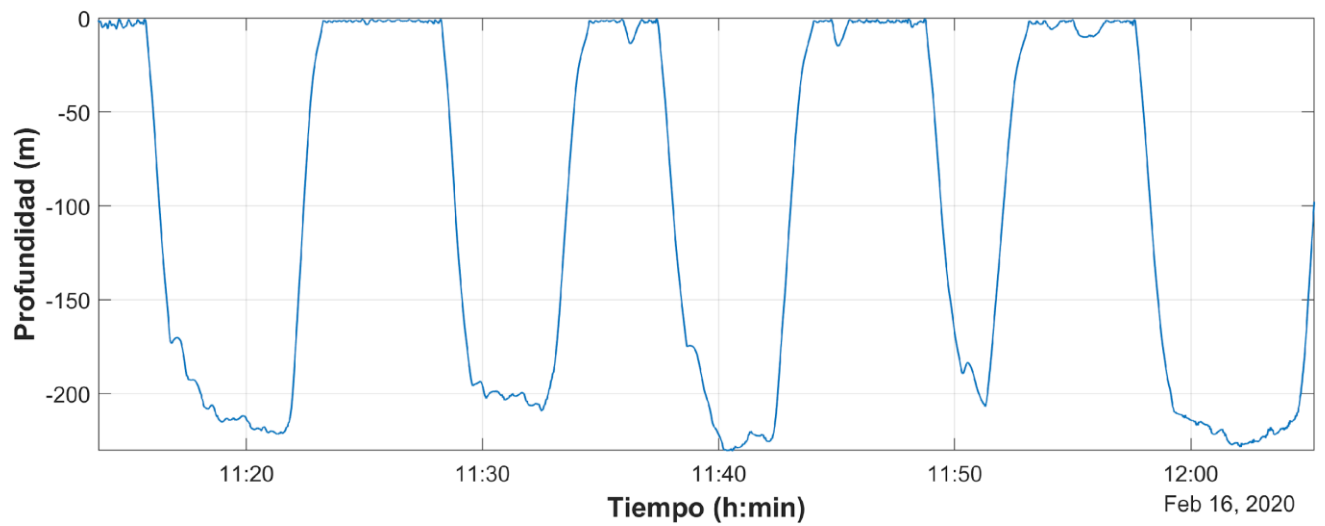


Figura A14: Perfil de buceo (azul) de ballena fin correspondiente al despliegue 4 del año 2020.

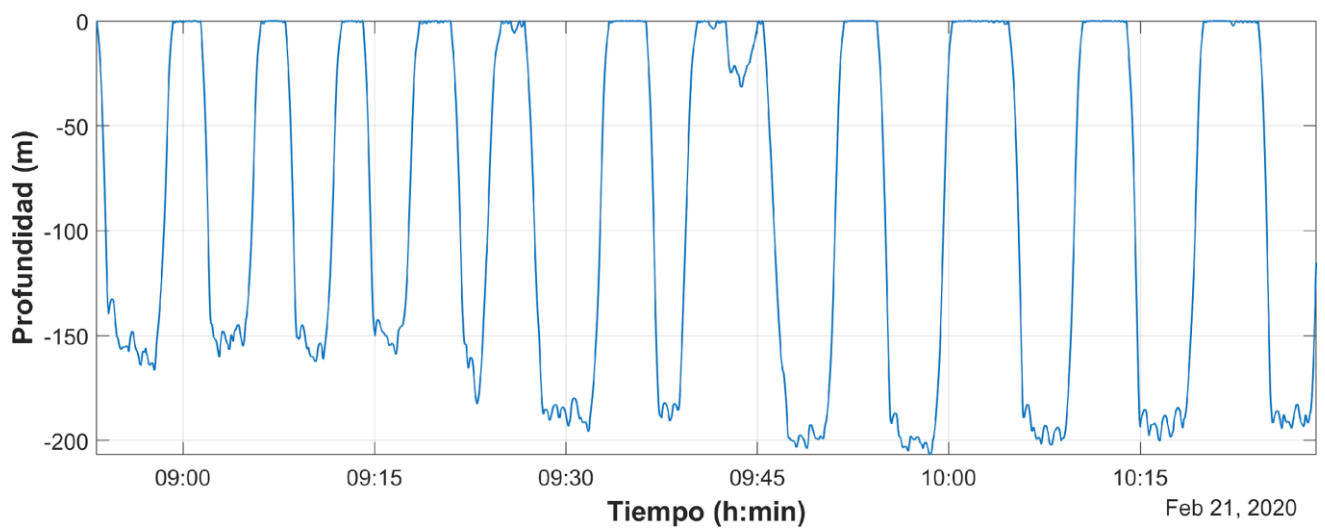


Figura A15: Perfil de buceo (azul) de ballena fin correspondiente al despliegue 5 del año 2020.

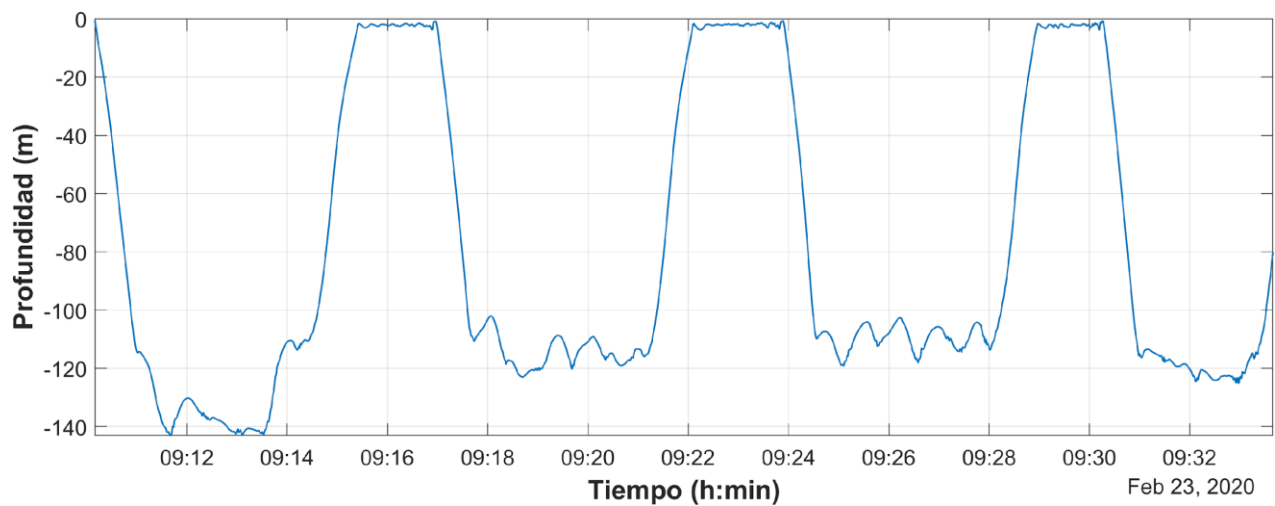


Figura A16: Perfil de buceo (azul) de ballena fin correspondiente al despliegue 6 del año 2020.

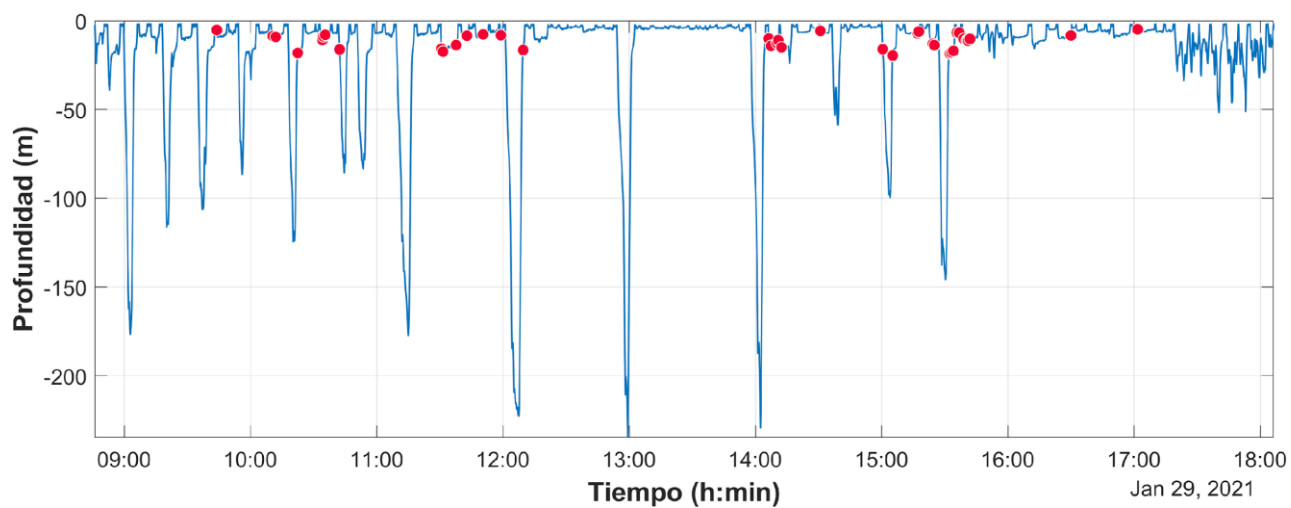


Figura A17: Perfil de buceo (azul) y *downsweep* (rojo) de ballena fin correspondiente al despliegue 1 del año 2021.

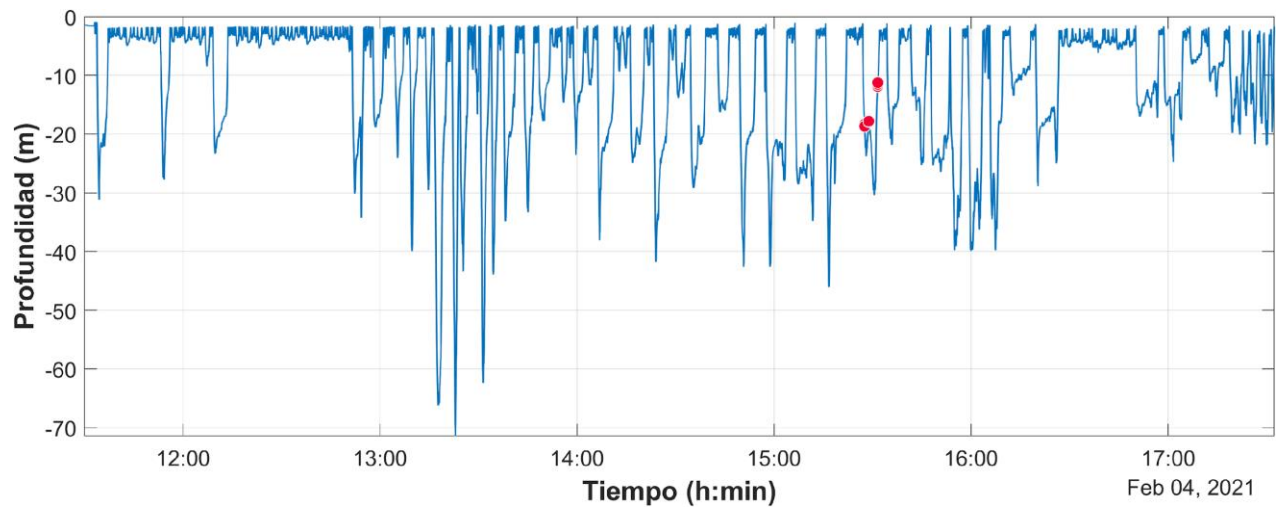


Figura A18: Perfil de buceo (azul) y *downsweep* (rojo) de ballena fin correspondiente al despliegue 2 del año 2021.

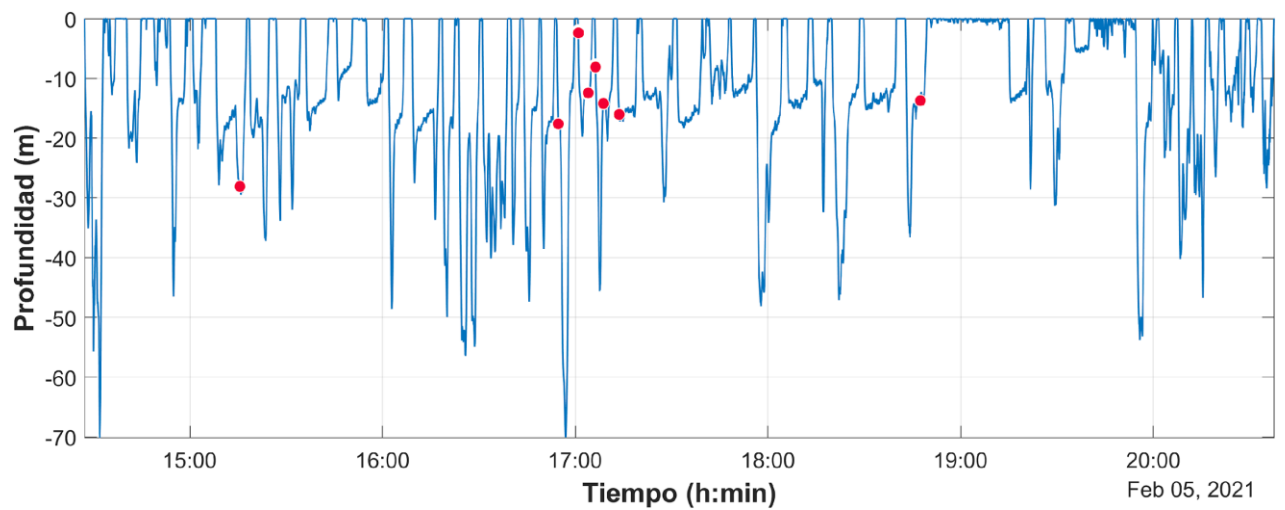


Figura A19: Perfil de buceo (azul) y *downsweep* (rojo) de ballena fin correspondiente al despliegue 3 del año 2021.

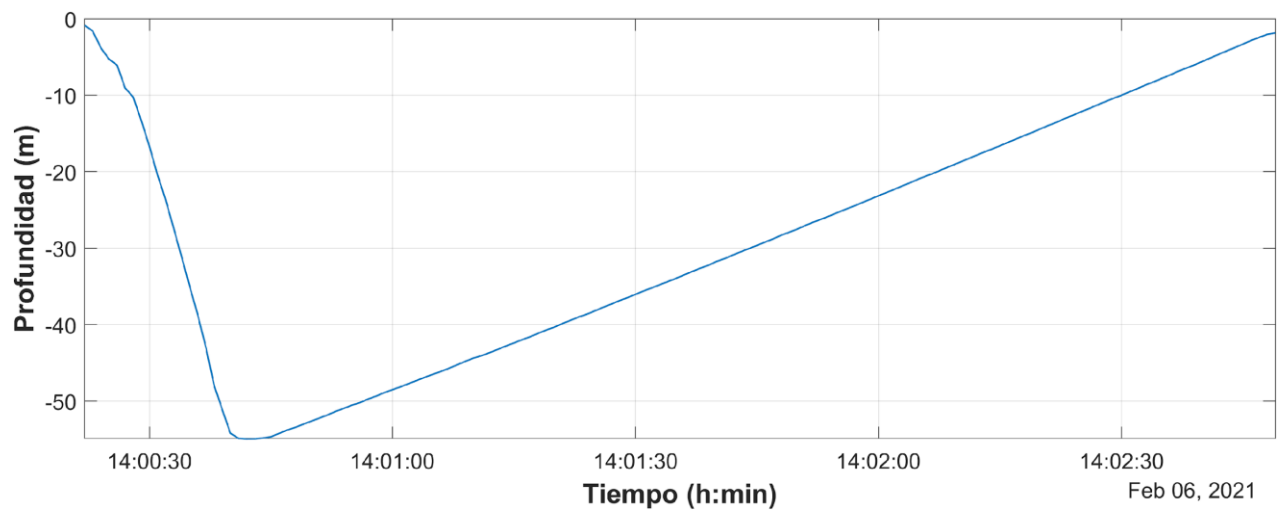


Figura A20: Perfil de buceo (azul) de ballena fin correspondiente al despliegue 4 del año 2021.

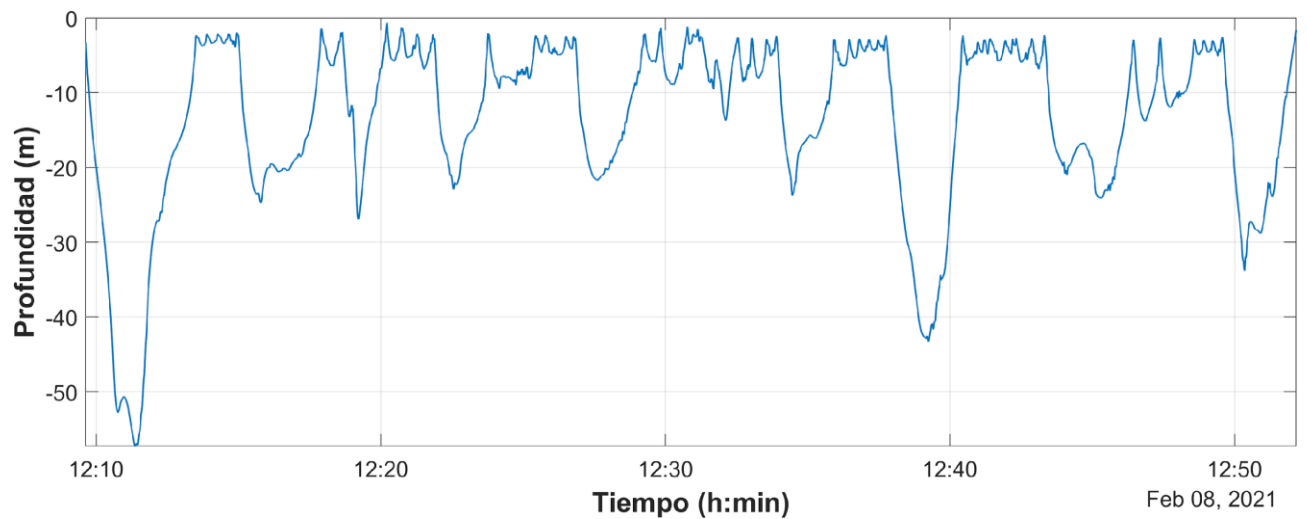


Figura A21: Perfil de buceo (azul) de ballena fin correspondiente al despliegue 5 del año 2021.

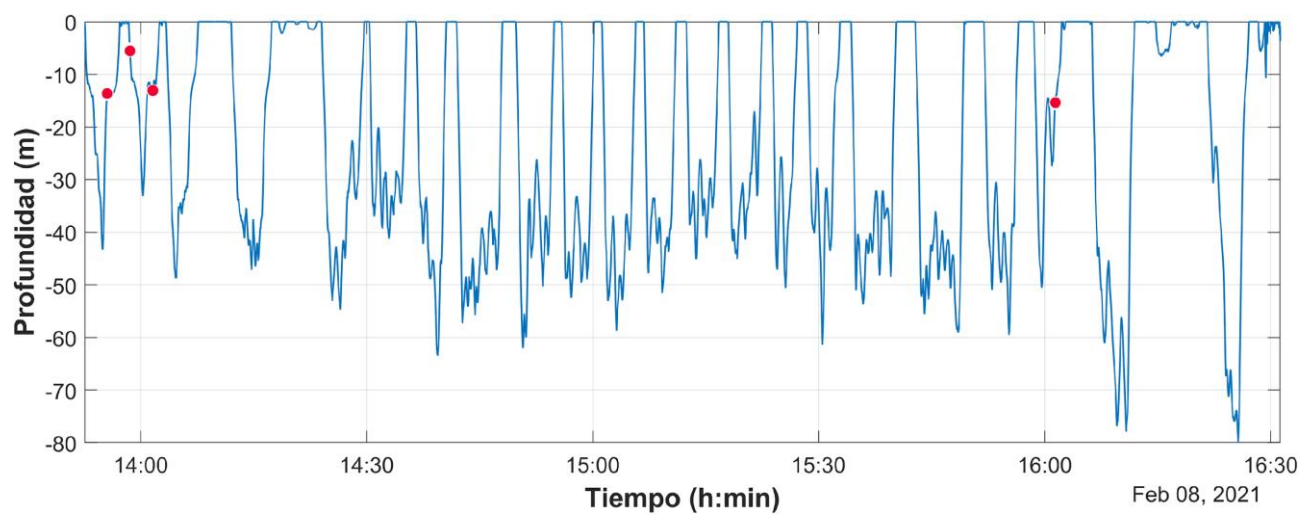


Figura A22: Perfil de buceo (azul) y *downsweep* (rojo) de ballena fin correspondiente al despliegue 6 del año 2021.

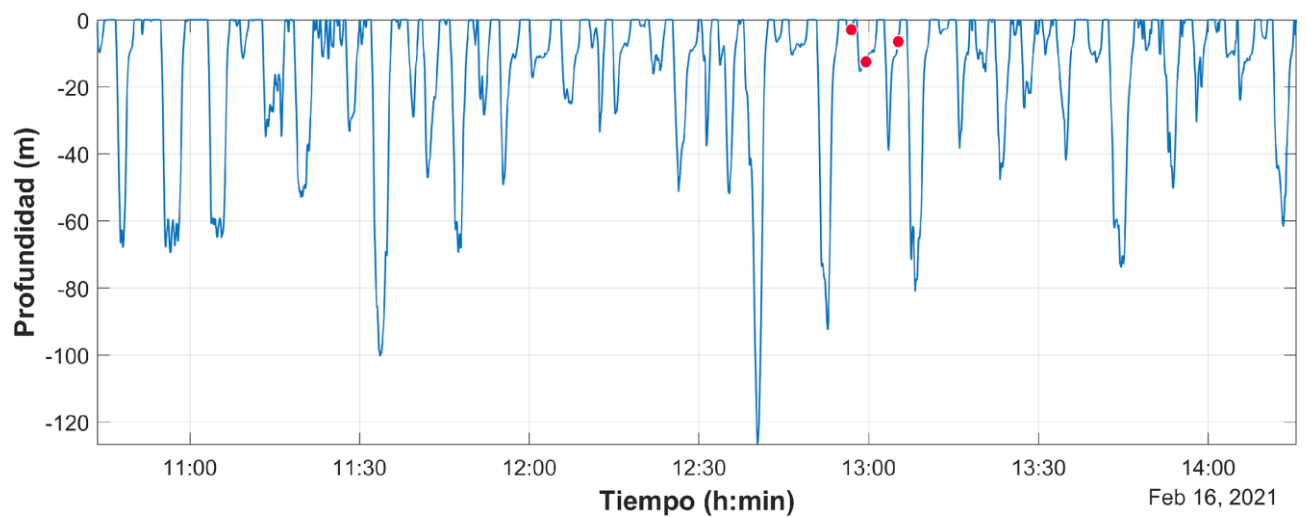


Figura A23: Perfil de buceo (azul) y *downsweep* (rojo) de ballena fin correspondiente al despliegue 8 del año 2021.

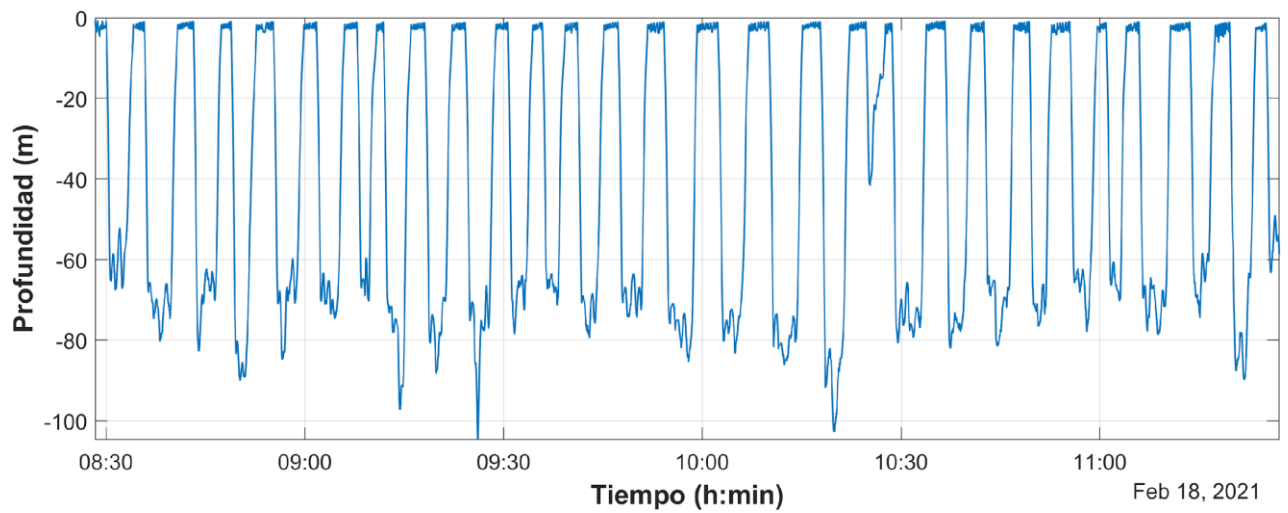


Figura A24: Perfil de buceo (azul) y *downsweep* (rojo) de ballena fin correspondiente al despliegue 9 del año 2021.

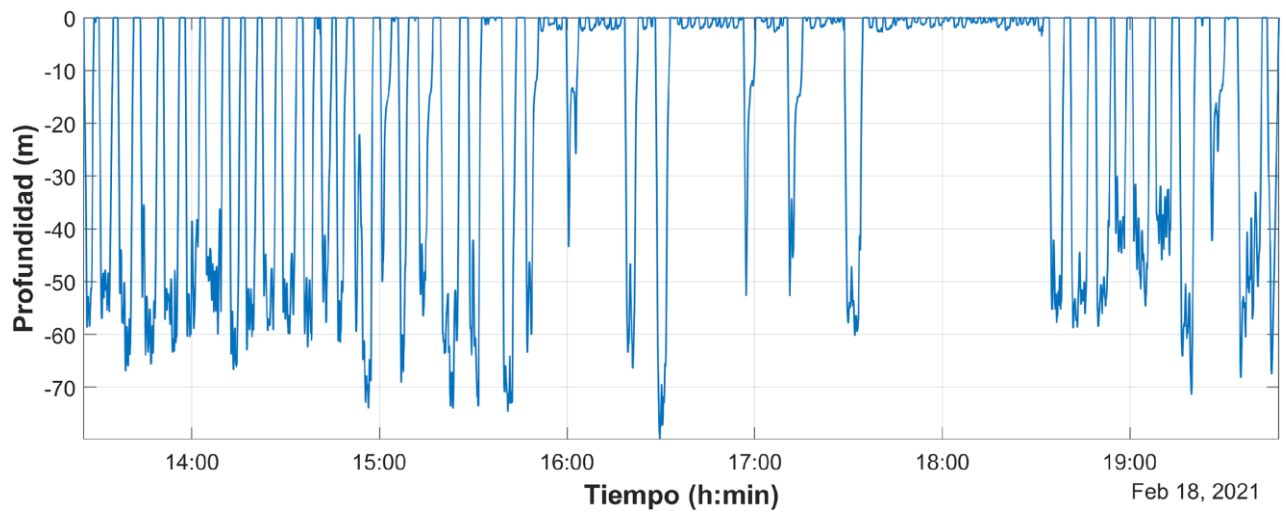


Figura A25: Perfil de buceo (azul) de ballena fin correspondiente al despliegue 10 del año 2021.

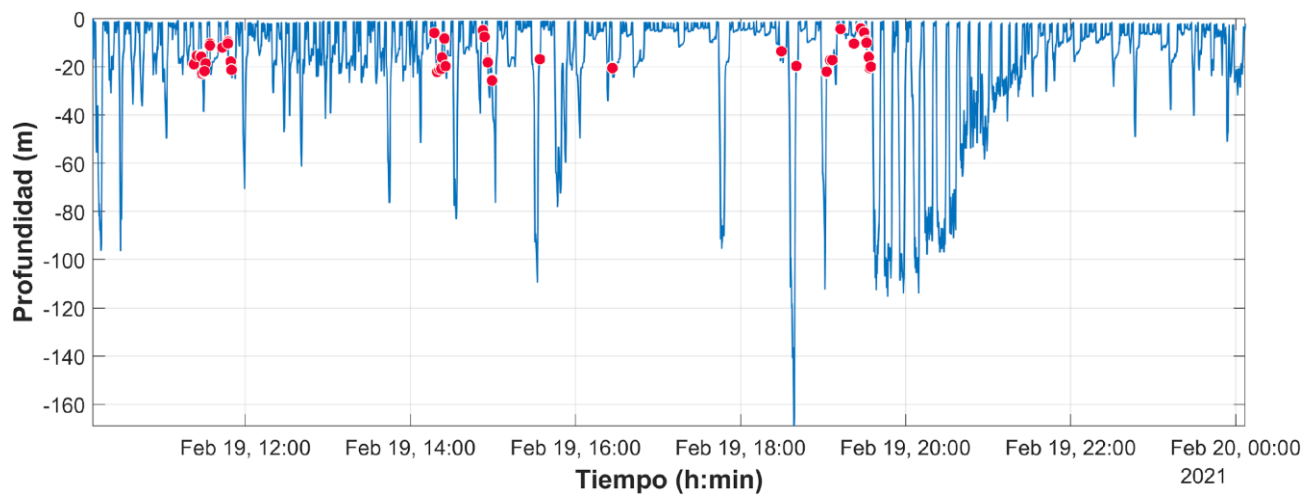


Figura A26: Perfil de buceo (azul) y *downsweep* (rojo) de ballena fin correspondiente al despliegue 11 del año 2021.

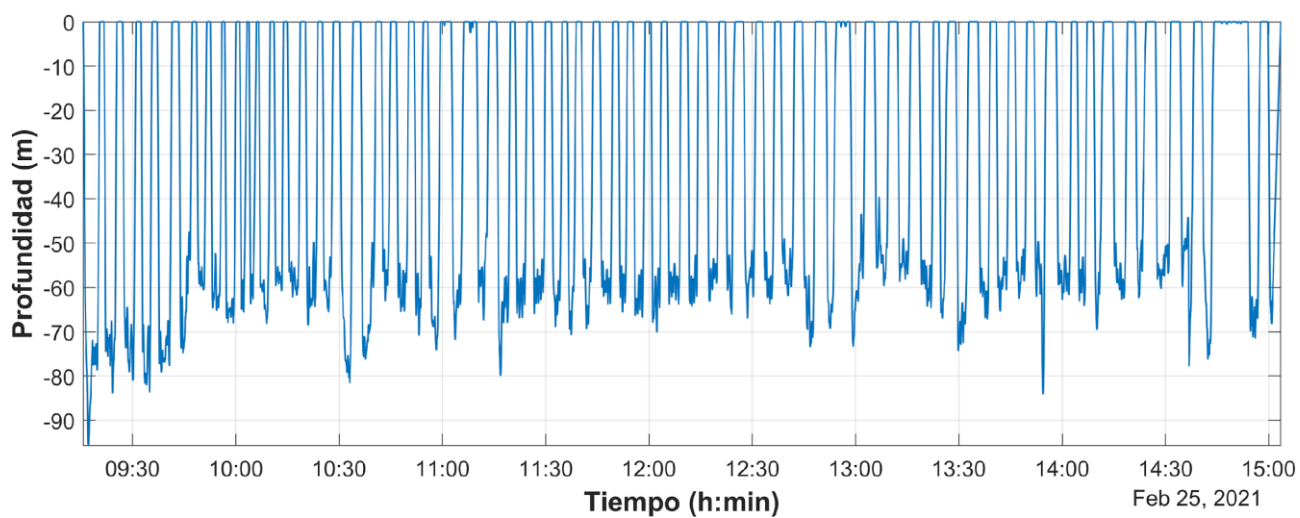


Figura A27: Perfil de buceo (azul) de ballena fin correspondiente al despliegue 12 del año 2021.

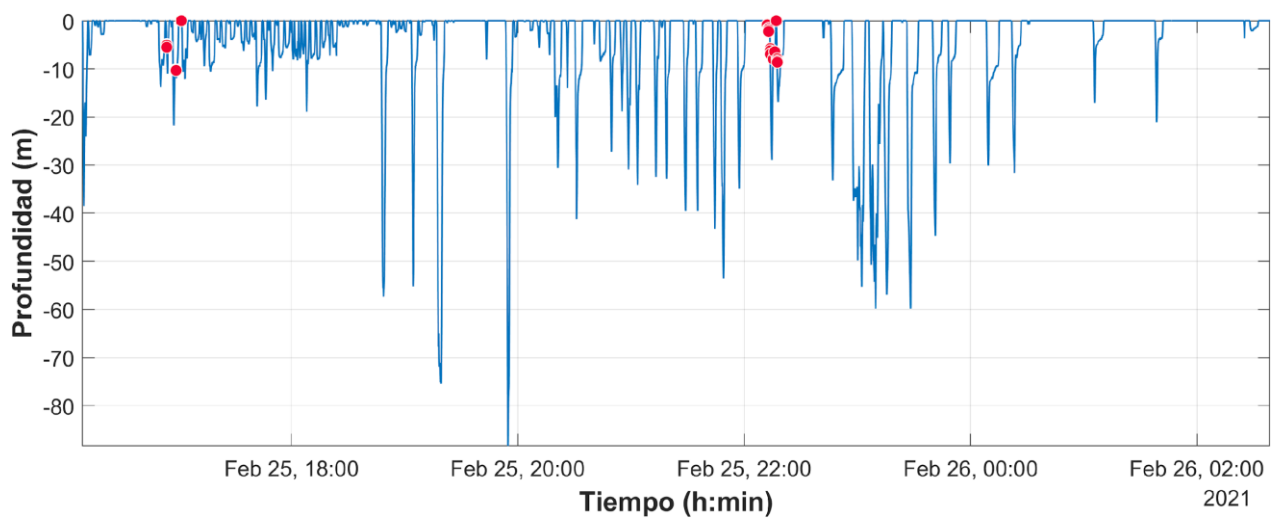


Figura A28: Perfil de buceo (azul) y *downsweep* (rojo) de ballena fin correspondiente al despliegue 13 del año 2021.

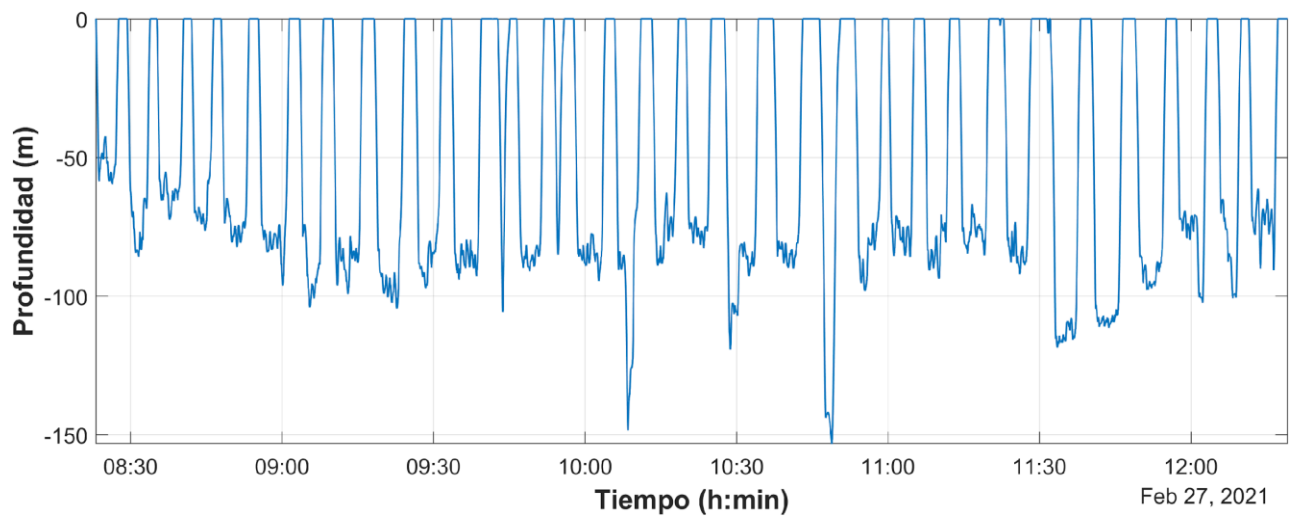


Figura A29: Perfil de buceo (azul) de ballena fin correspondiente al despliegue 15 del año 2021.

ANEXO 4: PÉRDIDA DE TRANSMISIÓN DE *DOWNSWEEP*.

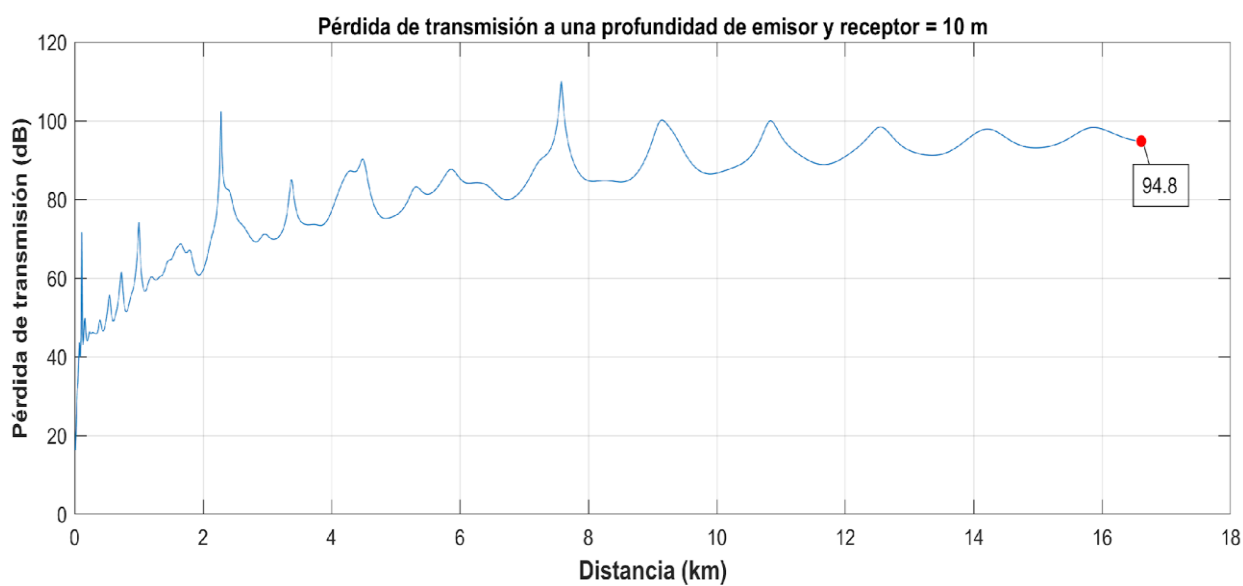


Figura A30: Pérdida de transmisión de vocalizaciones 63 Hz a 10 m de profundidad del emisor y receptor sobre un rango de 16,6 km.

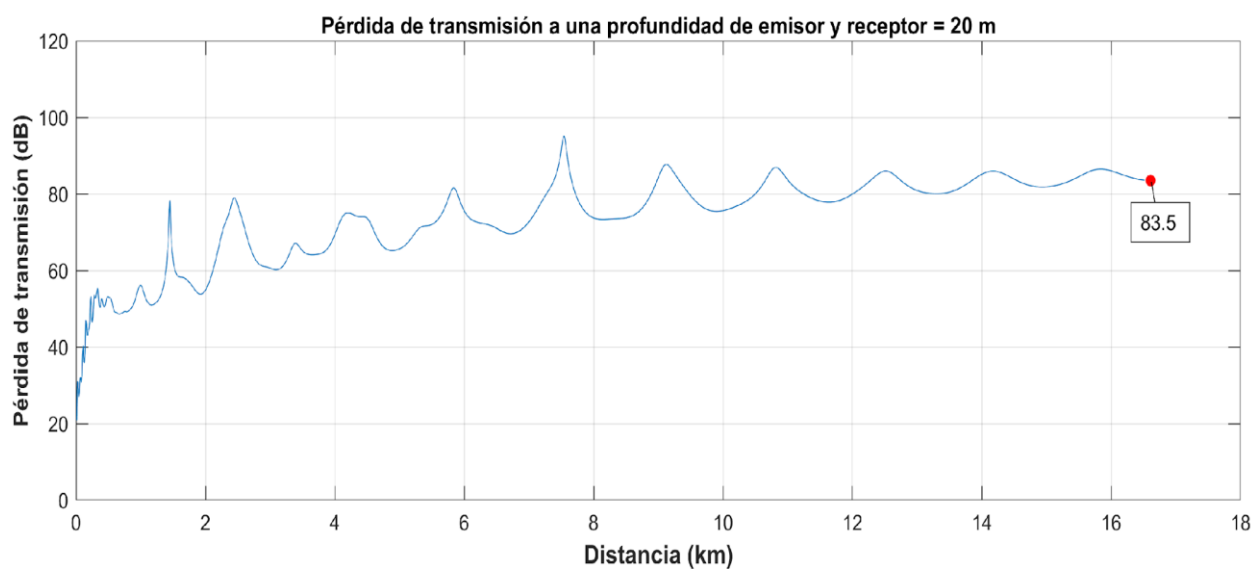


Figura A31: Pérdida de transmisión de vocalizaciones 63 Hz a 20 m de profundidad del emisor y receptor sobre un rango de 16,6 km.

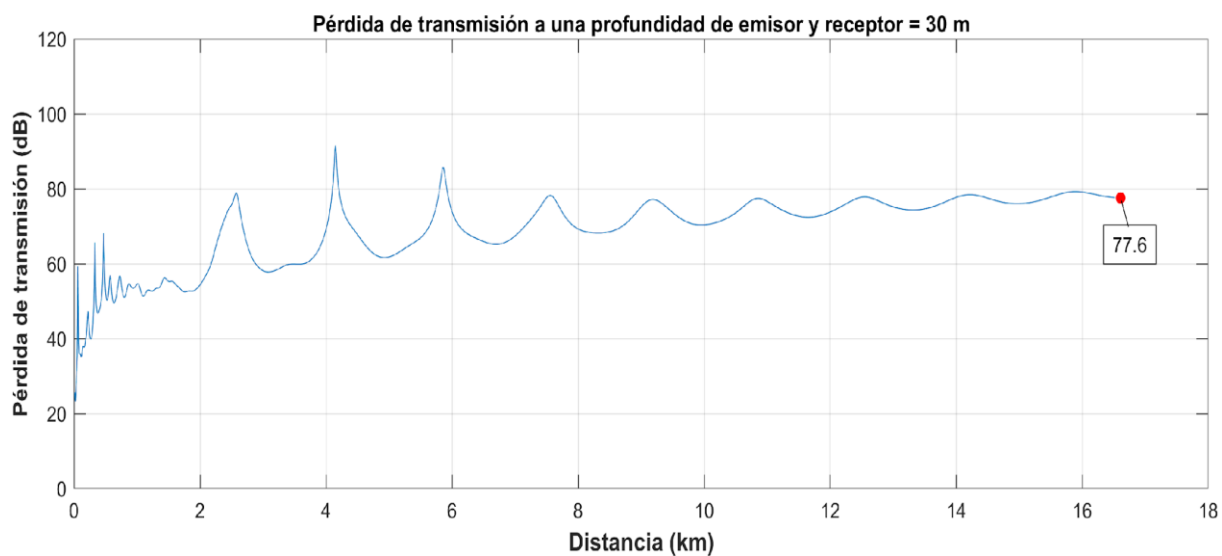


Figura A32: Pérdida de transmisión de vocalizaciones 63 Hz a 30 m de profundidad del emisor y receptor sobre un rango de 16,6 km.

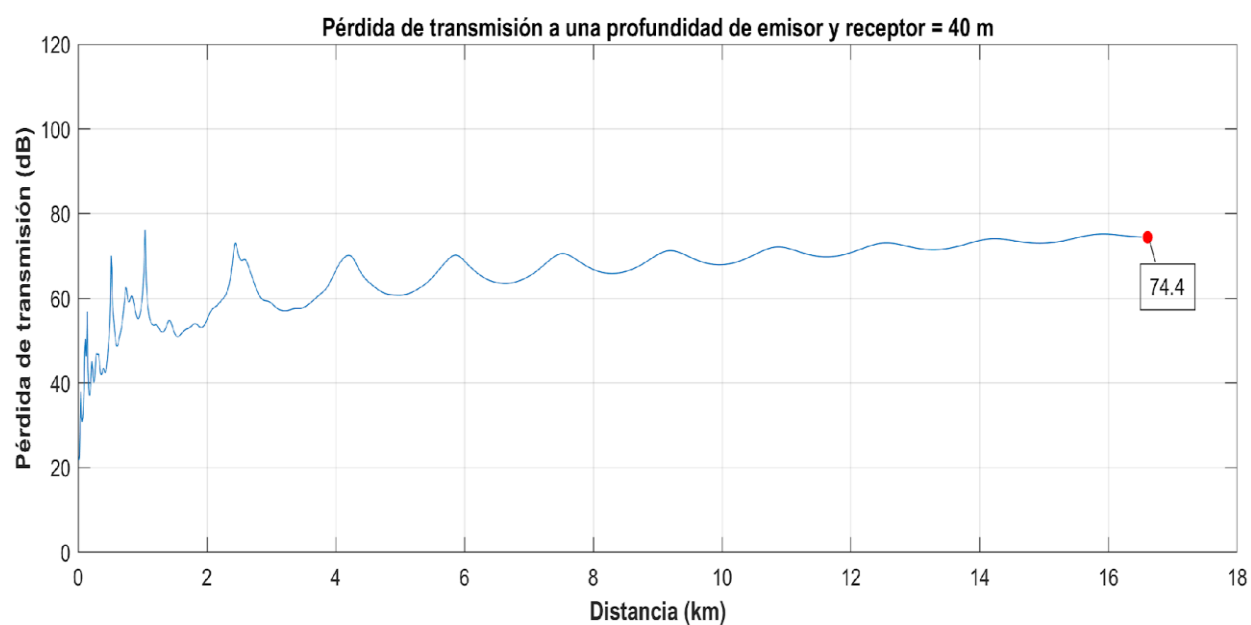


Figura A33: Pérdida de transmisión de vocalizaciones 63 Hz a 40 m de profundidad del emisor y receptor sobre un rango de 16,6 km.

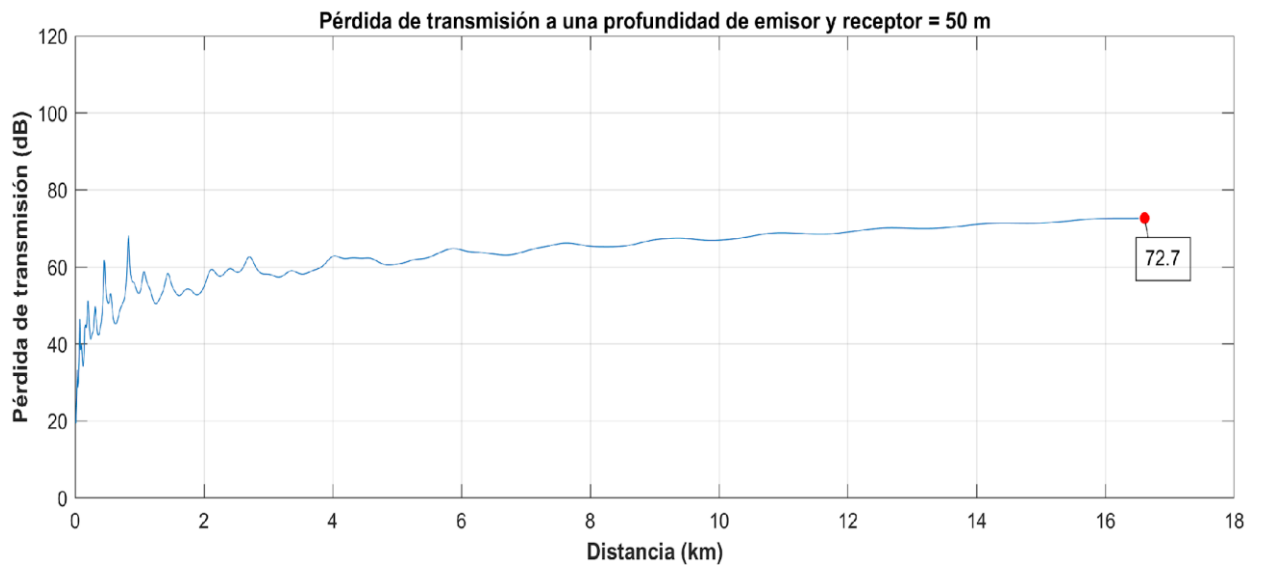


Figura A34: Pérdida de transmisión de vocalizaciones 63 Hz a 50 m de profundidad del emisor y receptor sobre un rango de 16,6 km.

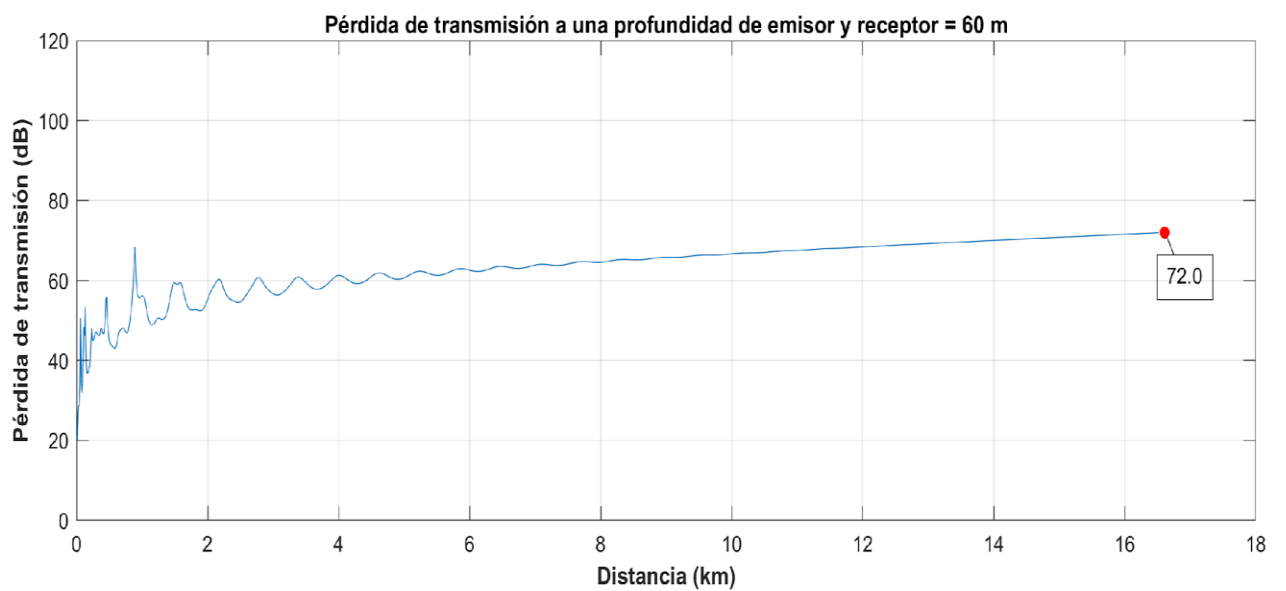


Figura A35: Pérdida de transmisión de vocalizaciones 63 Hz a 60 m de profundidad del emisor y receptor sobre un rango de 16,6 km.

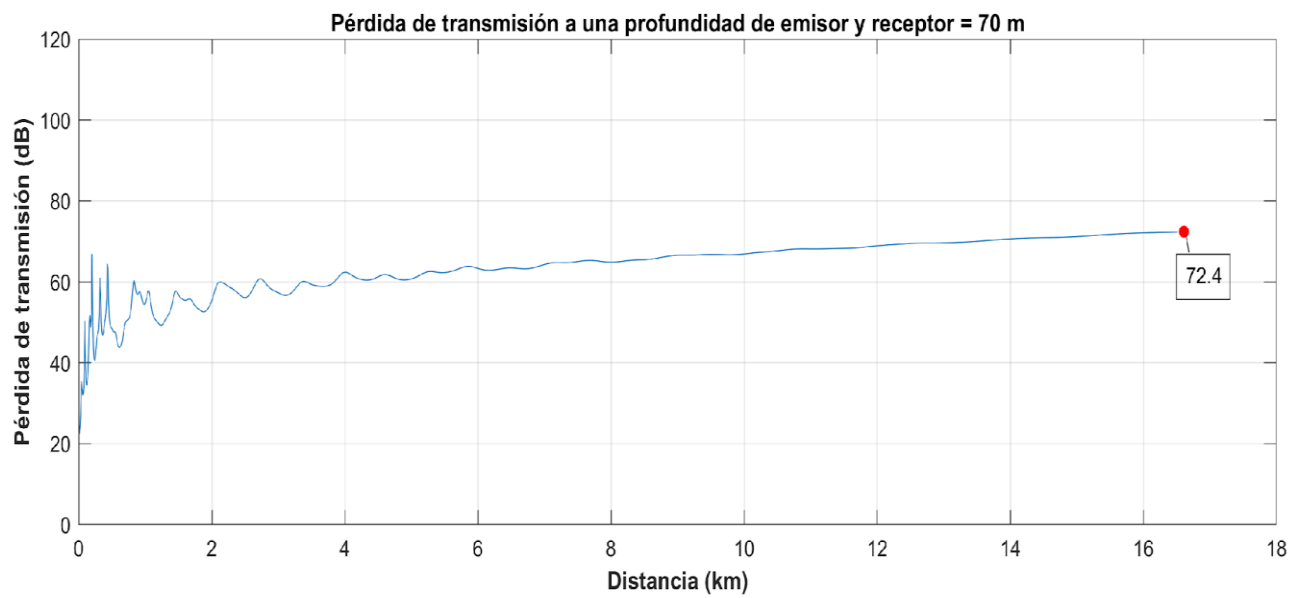


Figura A36: Pérdida de transmisión de vocalizaciones 63 Hz a 70 m de profundidad del emisor y receptor sobre un rango de 16,6 km.

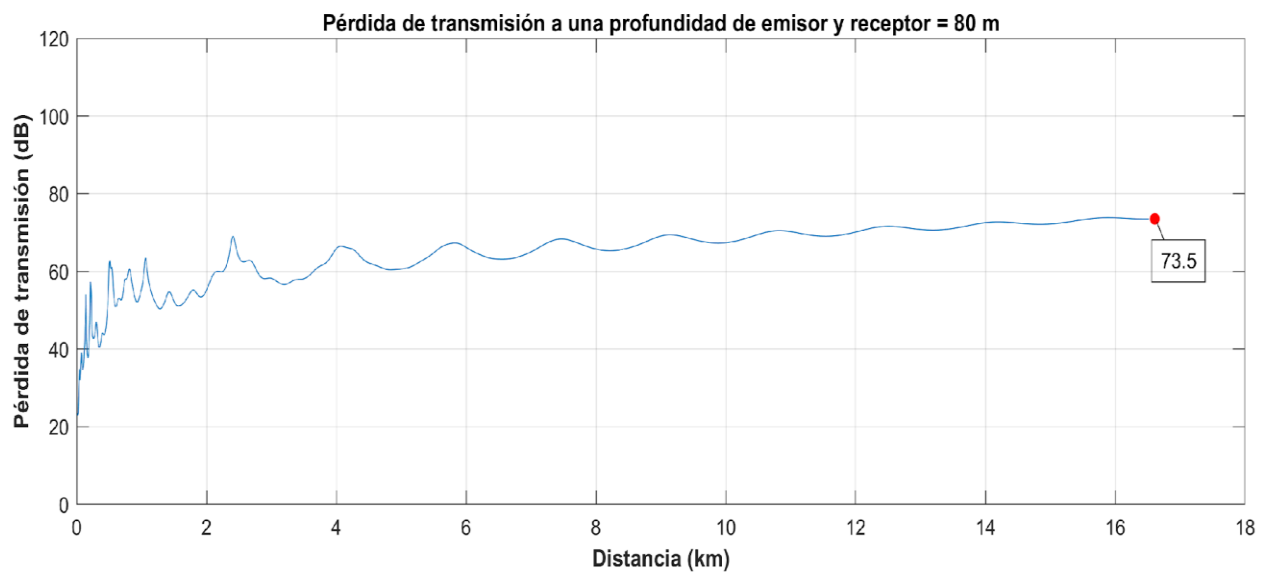


Figura A37: Pérdida de transmisión de vocalizaciones 63 Hz a 80 m de profundidad del emisor y receptor sobre un rango de 16,6 km.

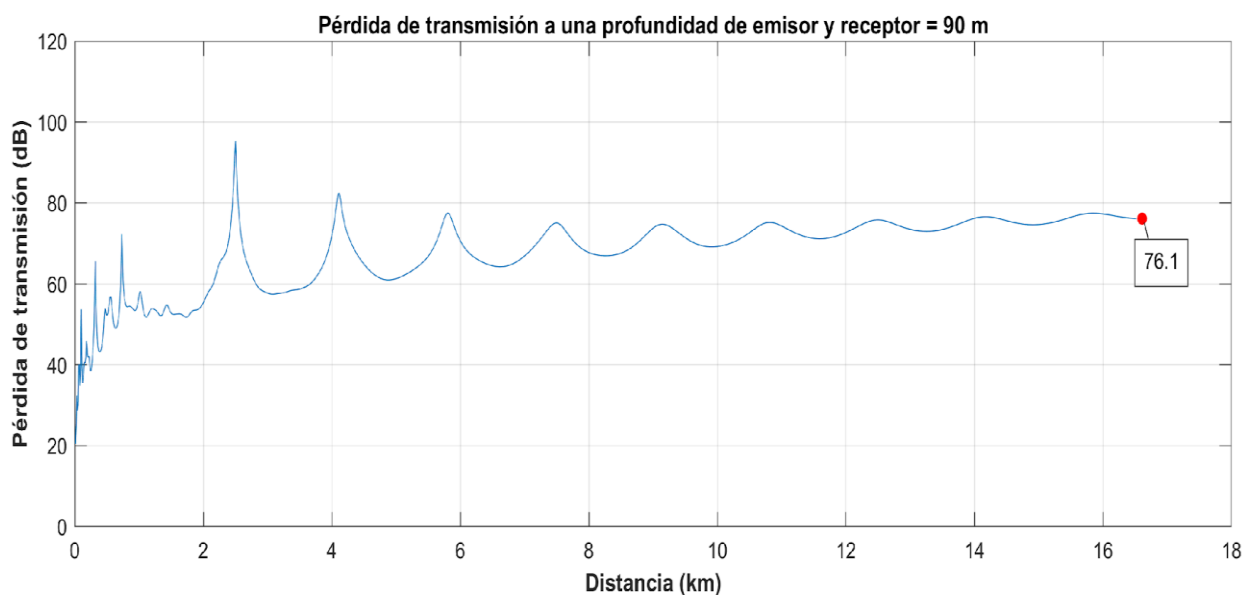


Figura A38: Pérdida de transmisión de vocalizaciones 63 Hz a 90 m de profundidad del emisor y receptor sobre un rango de 16,6 km.

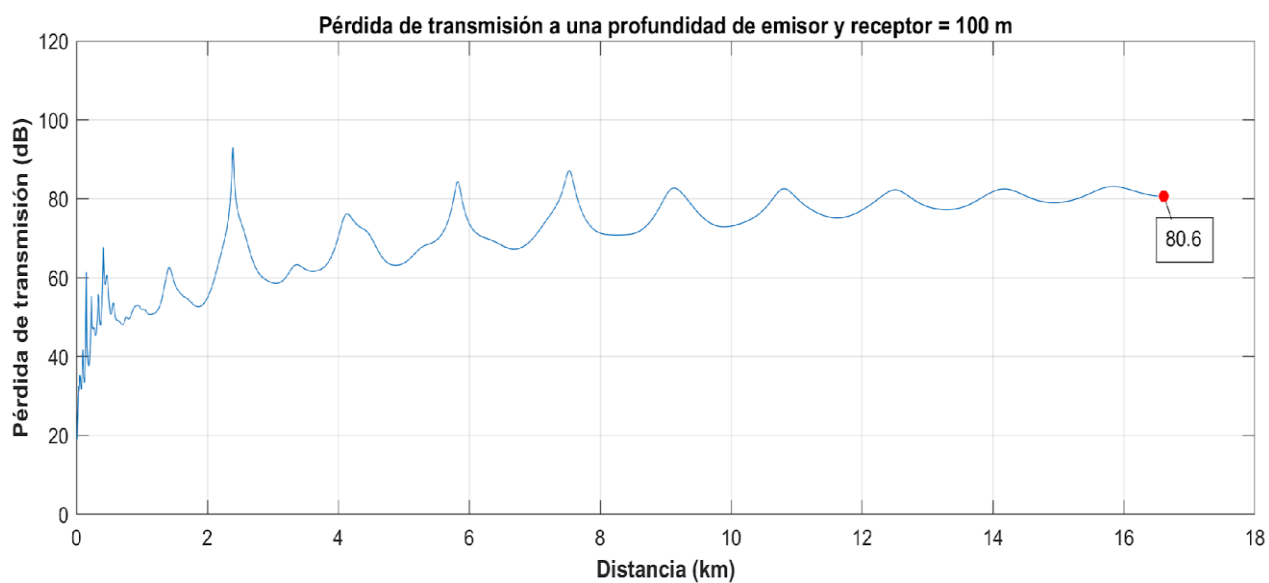


Figura A39: Pérdida de transmisión de vocalizaciones 63 Hz a 100 m de profundidad del emisor y receptor sobre un rango de 16,6 km.

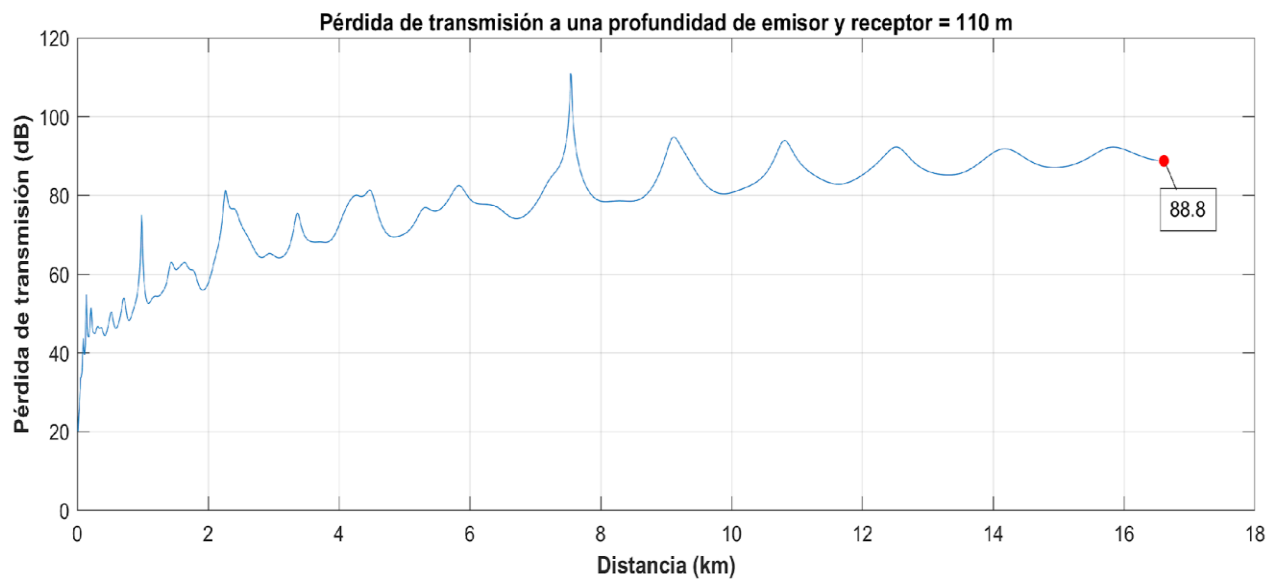


Figura A40: Pérdida de transmisión de vocalizaciones 63 Hz a 110 m de profundidad del emisor y receptor sobre un rango de 16,6 km.

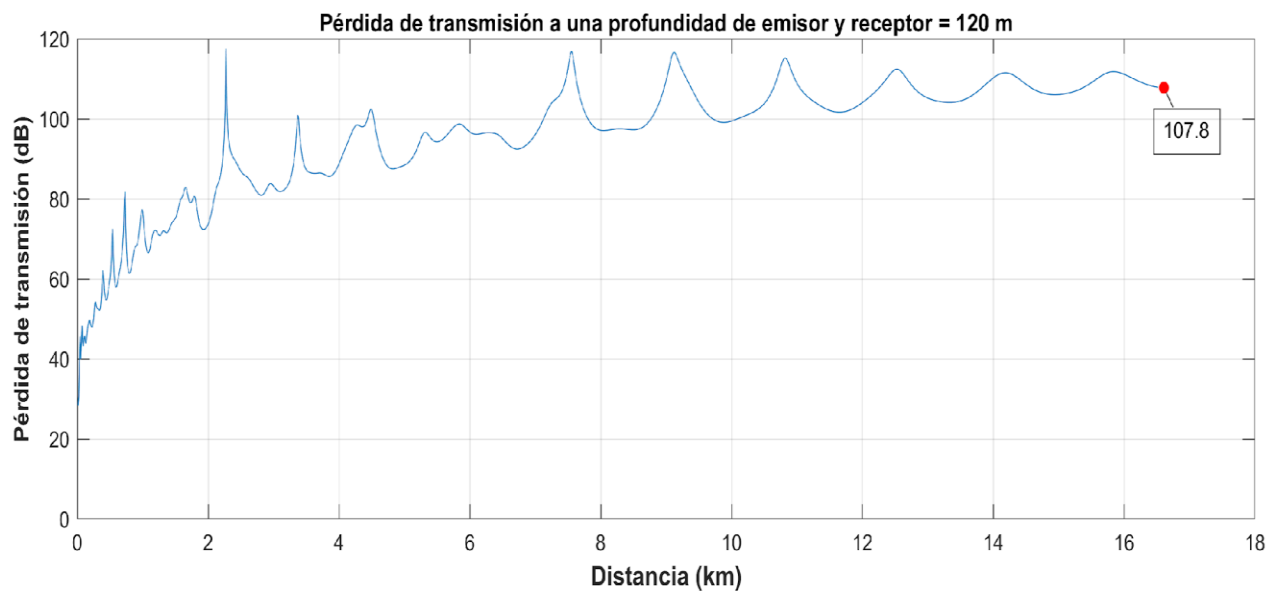


Figura A41: Pérdida de transmisión de vocalizaciones 63 Hz a 120 m de profundidad del emisor y receptor sobre un rango de 16,6 km.

