



FACULTAD DE CIENCIAS

CARACTERIZACIÓN DEL RUIDO SUBMARINO DE UNA SALMONERA EN OPERACIÓN Y SU POTENCIAL

EFFECTO SOBRE LA TASA METABÓLICA DEL CANGREJO ERMITAÑO (*PAGURUS EDWARDSI*)

Por

ELBA ESTELA AVILÉS SANHUEZA

TESIS PARA OPTAR AL
GRADO DE MAGÍSTER EN ECOLOGÍA MARINA

Director de Tesis: Dr. IVÁN ANDRÉS HINOJOSA TOLEDO

Co-Director de Tesis: Dr. MAURICIO URBINA FONERON

Concepción, Chile

2024



FACULTAD DE CIENCIAS

CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA DEL RUIDO ANTROPOGÉNICO SUBMARINO PRODUCIDO POR LA INDUSTRIA SALMONERA Y SU EFECTO SOBRE TASA METABÓLICA DEL CANGREJO ERMITAÑO (*PAGURUS EDWARDSI*)

Por

ELBA ESTELA AVILÉS SANHUEZA

Tesis para optar al grado de Magister en Ecología Marina

La autora y el director de Tesis certifican que la investigación presentada es original y cumple con las normas establecidas para todo aspecto relativo a su ejecución.

Concepción, Chile

2024



Universidad Católica de la Santísima Concepción

ACTA DE EXAMEN DE GRADO

En Concepción de Chile, a 25 de SEPTIEMBRE de 2023 , vista y revisados los requisitos de Título/Grado presentados por:

Doña **ELBA ESTELA AVILÉS SANHUEZA**

RUT 17221329-4

Alumna de la Carrera de **MAGISTER EN ECOLOGIA MARINA**

Sede **CONCEPCIÓN** Jornada **DIURNO**

De la Universidad Católica de la Santísima Concepción, la Comisión Examinadora ha otorgado las siguientes calificaciones:

"CARACTERIZACIÓN DEL RUIDO SUBMARINO DE UNA SALMONERA EN OPERACIÓN Y SU POTENCIAL EFECTO SOBRE LA TASA METABÓLICA DEL CANGREJO ERMITAÑO (PAGURUS EDWARDSI)"

Nombre	Calificación
ÁNGEL URZÚA OSORIO MIEMBRO INTERNO COMISIÓN DE TESIS	7,00 (SIETE)
CRISTIAN GALLARDO ESCARATE MIEMBRO EXTERNO COMISIÓN DE TESIS	7,00 (SIETE)
IVAN HINOJOSA TOLEDO DIRECTOR DE TESIS	
MAURICIO URBINA FONERON CO-DIRECTOR DE TESIS	
CARLOS LARA PEÑA MINISTRO DE FE	
CALIFICACION FINAL DE EXAMEN	7,00 (SIETE)




SECRETARIO ACADÉMICO




DECANO

Lo que se dirige al alma se escapa a nuestras dimensiones

Alexander von Humboldt

*A Emilia Amancay, por acompañarme en todas sus formas durante el transcurso de esta tesis, por ser luz
y mi gran maestra.
Gracias por hacerme sentir que con tu nacimiento nació una mujer nueva, más fuerte, más silvestre, más
instintiva, gracias por despertar mi madre interior.
Eres mi mayor logro, mi más bella creación.*



AGRADECIMIENTOS

Todo este tiempo he estado rodeada de personas que son muy importantes para mí y gracias a esa red de acompañamiento pude sacar adelante este proceso. Quisiera agradecer en primera instancia a mi amado compañero Matías, quien se ha convertido en un pilar en mi vida, sobre todo en este tiempo al convertirnos en mapadres. Su contención durante estos nueve años ha sido fundamental, gracias por ser quien me alienta a conseguir mis metas y por ser el principal gestor de cuidar de mi para cuidar a otros, gracias por acompañarme en todos mis procesos y por ser siempre con quien puedo contar en todo momento y a quien puedo recurrir sin dudarlo. A mi hija, por volverme una mujer mucho más consciente de mis capacidades y por ser esa maestra que desde su primer día de existencia me enseña a mejorar en todo aspecto.

A mi tribu de mujeres hermosas, no bastan estas palabras para agradecerles, a mi mamá por ser quién me acompañó en el puerperio. Su entrega en el cuidado de mi hija me dio el valioso tiempo y la tranquilidad para poder trabajar de noche y en algunos momentos del día en esta investigación. A mi hermanita por arrancarse los fines de semana para acompañarme, su presencia siempre es algo que disfruto enormemente. A mi amiga del alma por permanecer, aunque con tu visita fui académicamente improductiva pude disfrutar de lo necesario que son días con rica comida, risas y conversaciones. A mi hermano por su coincidente compañía en momentos de mucho cansancio, gracias por tenerme comida, fueguito y conversación a la hora del té. A mi papá por preocuparse constantemente por nosotras y por su importante apoyo en la distancia.

A Iván Hinojosa, por ser mi tutor durante todos estos años, siempre estaré agradecida de coincidir cuando me encontraba desorientada buscando tema de investigación. Gracias por darme la oportunidad de conocer lo que se transformó en mi línea de investigación y por mostrarme el lenguaje del océano que revivió el sentido de la elección de mi profesión. Gracias por confiar y apostar por mí en talleres, congreso, y por esa hermosa expedición a Huinay, me enriquecí mucho de todas esas experiencias y conocí gente maravillosa. Gracias por ser mi guía en este camino y por estar siempre para conversar sobre la tesis, aventuras, trivialidades y por apoyarme siempre en cada necesidad que se presentó a lo largo de estos años. A Mauricio Urbina por su orientación en la logística de la metodología del análisis de tasa metabólica, área nueva para mí, también por confiar y facilitar equipos de medición y por sus revisiones express . A Érika Jorquera por su buena disposición para explicarme y entregarme sus conocimientos y tips de

medición de oxígeno. A Rigoberto Moreno por su cooperación en la recolección de cangrejos ermitaño por buceo. A Isidora Ávila por ayudarme con mis problemas en R, sin dudas la ciencia se nutre del trabajo interdisciplinario.

Agradezco a Don Moroco por siempre estar dispuesto a ayudarme y estar pendiente en todo momento del correcto funcionamiento de maquinarias para mantener a mis cangrejos. Por doblar sus esfuerzos al saber de mi embarazo apoyándose en las tareas que requerían mayor esfuerzo físico. A Don Bernardo por ofrecer su ayuda y estar en cada momento que requerí transporte y mover materiales pesados. Gracias a todos los funcionarios de la Estación de Lengua por esas agradables conversaciones que se dan entre personas de mar junto a un café. A Cristian Gallardo y Álvaro Gallardo de la Universidad de Concepción por apostar en esta investigación y apoyarme en la logística y aporte de muestras para una etapa que no logró ser llevada a cabo. Espero que en otro momento las instalaciones y condiciones sean favorables para lograr el objetivo que sin dudas debe ser impulsado por algún otro estudiante.

Finalmente, agradezco cada una de las situaciones tal cual se presentaron, sin dudas he obtenido un gran aprendizaje durante estos años más allá de lo académico, he crecido como profesional y como ser humano. Somos seres interdependientes, necesitamos del otro para construir, esta característica ha sido clave en el éxito de muchas especies, incluyéndonos. Esta red entramada llena de conexiones (como bien describía Humboldt), nutre y beneficia a sus protagonistas, la materialización de este párrafo es esta tesis, gracias a cada una/o de ustedes, la culminación de este programa no hubiese sido posible sin su valiosa ayuda.

TABLA DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTOS.....	vii
RESUMEN GENERAL	xv
ABSTRACT	xvii
INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
HIPÓTESIS	3
Hipótesis General	3
Hipótesis Especificas	3
OBJETIVOS	4
Objetivo General	4
Objetivos Específicos.....	4
CAPÍTULO I: PAISAJE SONORO SUBMARINO BAJO UN CENTRO DE CULTIVO DE SALMONES EN EL FIORDO	
COMAU.....	5
RESUMEN	6
INTRODUCCIÓN	7
HIPÓTESIS	9
OBJETIVOS	10
MÉTODOS.....	11
Monitoreo acústico pasivo (PAM).....	11
<i>Registro de antropofonía</i>	<i>11</i>
<i>Análisis visual de datos acústicos</i>	<i>12</i>
RESULTADOS	13
Caracterización de ruido antropogénico presente en salmonera	13
<i>Análisis visual de señales acústicas antropogénicas en espectrograma</i>	<i>13</i>
DISCUSIÓN.....	21
CONCLUSIONES	24
ANEXO: Figuras complementarias de tipos de ruidos antropogénicos.....	25

CAPÍTULO II: EVALUACIÓN DE TASA DE CONSUMO DE OXÍGENO EN CANGREJOS ERMITAÑO (<i>PAGURUS EDWARDSI</i>) EXPUESTOS A DISTINTOS TRATAMIENTOS ACÚSTICOS (RUIDO ANTROPOGÉNICO DE FUENTE SALMONERA- SONIDO NATURAL- SILENCIO)	32
RESUMEN	33
INTRODUCCIÓN	34
HIPÓTESIS	37
OBJETIVO	38
MÉTODOS	39
Sistema de cangrejo ermitaño	39
<i>Obtención de cangrejos ermitaño y aclimatación</i>	39
Tratamiento de ruido	39
<i>Registro sonoro</i>	39
<i>Segmentación de antropofonía, biofonía y geofonía para tratamientos acústicos</i>	39
Análisis de tasa metabólica de cangrejos ermitaño (<i>Pagurus edwardsi</i>)	41
<i>Calibración de sistema de transmisión para tratamiento acústico</i>	41
<i>Aclimatación</i>	42
<i>Exposición a tratamiento acústico y medición de tasa de consumo de oxígeno</i>	42
<i>Análisis de medidas repetidas en el tiempo en tasa de consumo de oxígeno de cangrejo ermitaño</i>	43
RESULTADOS	46
Consumo de oxígeno en <i>Pagurus edwardsi</i> expuestos a distintos tratamientos acústicos	46
DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	53
DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES GENERALES	55
REFERENCIAS	57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Esfuerzo de muestreo acústico.....	12
Tabla 2. Selección de tipos de ruido antropogénico	13

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Fiordo Comau (42° 30'S) Provincia de Palena, X Región de los Lagos, Chile. Zona de recopilación de registro sonoro.....	11
Figura 2. Espectrograma de largo plazo, Nivel de Presión Sonora (SPL) en el tiempo	14
Figura 3. Porcentaje de ocurrencia de los diferentes tipos de ruido antropogénico.....	14
Figura 4. Función de distribución acumulada (CDF) de Nivel de Presión Sonora (SPL) de banda ancha, Estadísticas de nivel de ruido, Nivel de Presión Sonora (SPL) de banda ancha y Espectrograma de ruido de tipo 2.....	15
Figura 5. Función de distribución acumulada (CDF) de Nivel de Presión Sonora (SPL) de banda ancha, Estadísticas de nivel de ruido, Nivel de Presión Sonora (SPL) de banda ancha y Espectrograma de ruido de tipo 1.....	16
Figura 6. Función de distribución acumulada (CDF) de Nivel de Presión Sonora (SPL) de banda ancha, Estadísticas de nivel de ruido, Nivel de Presión Sonora (SPL) de banda ancha y Espectrograma de ruido de tipo 4.....	17
Figura 7. Función de distribución acumulada (CDF) de Nivel de Presión Sonora (SPL) de banda ancha, Estadísticas de nivel de ruido, Nivel de Presión Sonora (SPL) de banda ancha y Espectrograma de ruido de tipo 6.....	18
Figura 8. Función de distribución acumulada (CDF) de Nivel de Presión Sonora (SPL) de banda ancha, Estadísticas de nivel de ruido, Nivel de Presión Sonora (SPL) de banda ancha y Espectrograma de ruido de tipo 9.....	19
Figura 9. Función de distribución acumulada (CDF) de Nivel de Presión Sonora (SPL) de banda ancha, Estadísticas de nivel de ruido, Nivel de Presión Sonora (SPL) de banda ancha y Espectrograma de ruido de tipo de momento libre de ruido.	20
Figura 10.CDF de SPL de banda ancha, estadísticas de nivel de ruido, SPL de banda ancha y espectrograma de ruido de tipo 3.....	25
Figura 11.CDF de SPL de banda ancha, estadísticas de nivel de ruido, SPL de banda ancha y espectrograma de ruido de tipo 6.....	26
Figura 12.CDF de SPL de banda ancha, estadísticas de nivel de ruido, SPL de banda ancha y espectrograma de ruido de tipo 8.....	27

Figura 13.CDF de SPL de banda ancha, estadísticas de nivel de ruido, SPL de banda ancha y espectrograma de ruido de tipo 10.....	28
Figura 14.CDF de SPL de banda ancha, estadísticas de nivel de ruido, SPL de banda ancha y espectrograma de ruido de tipo 11.....	29
Figura 15.CDF de SPL de banda ancha, estadísticas de nivel de ruido, SPL de banda ancha y espectrograma de ruido de tipo 12.....	30
Figura 16.CDF de SPL de banda ancha, estadísticas de nivel de ruido, SPL de banda ancha y espectrograma de ruido de tipo 13.....	31
Figura 17. Microscopía electrónica de barrido de células sensoriales epidérmicas en invertebrados.....	34
Figura 18. Efectos físicos, fisiológicos y comportamiento en funciones claves de individuos y poblaciones de peces y posiblemente invertebrados. (Traducido de Hawkins y Popper, 2017)	35
Figura 19. Sistema de mitigación de sonidos externos en acuarios contenedores de cangrejos.....	40
Figura 20. Sistema de calibración de tratamientos acústicos preparatorios. (A) Hidrófono SoundTrap 300 STD sumergido en acuario de 50 L grabando la reproducción de bucles con parlante sumergible UW30 Lubell Labs Inc. (B) Amplificador. (C) Sistema de equipos acústicos, acuarios y software Raven Pro en laboratorio. que son al A, B y C.....	41
Figura 21. Disposición de ejemplares para aclimatación. (A) Paguros separados de manera individual en cada frasco de 100 mL cubiertos con malla que permite intercambio de oxígeno. (B) Sistema de aclimatación previo al experimento acústico.	42
Figura 22. Medición de consumo de oxígeno en tratamientos acústicos. (A) Frascos herméticos con sensores de medición. (B) Parlante sumergido en acuario para reproducción de bucles de ruido salmonero y sonido natural.	43
Figura 23. Secuencia (orden) de tratamientos acústicos divididas por rango de disponibilidad de oxígeno (niveles de normoxia).	45
Figura 24. Promedio de tasa de consumo de oxígeno por minuto en cuatro individuos de <i>Pagurus edwardsi</i> expuestos al orden de tratamientos: silencio - sonidos naturales - ruido antropogénico (Sec. A)	47
Figura 25. Promedio de tasa de consumo de oxígeno por minuto en cuatro individuos de <i>Pagurus edwardsi</i> expuestos al orden de tratamientos: ruido antropogénico - silencio - sonidos naturales (Sec. B)	48

Figura 26. Promedio de tasa de consumo de oxígeno por minuto en cuatro individuos <i>de Pagurus edwardsi</i> expuestos al orden de tratamientos: sonidos naturales - ruido antropogénico - silencio (Sec. C)	49
Figura 27. Variación de promedios de tasa de consumo de oxígeno de cangrejos expuestos a tratamiento de sonido natural en secuencias A, B y C.....	50
Figura 28. Variación de promedios de tasa de consumo de oxígeno de cangrejos expuestos a tratamiento de ruido antropogénico en secuencias A, B y C.....	51
Figura 29. Variación de promedios de tasa de consumo de oxígeno de cangrejos en ausencia de sonidos en secuencias A, B y C.....	52

RESUMEN GENERAL

La contaminación acústica producida por el humano está interfiriendo en el normal desarrollo de distintas especies del ecosistema marino. Existe evidencia de que el ruido antropogénico crónico afecta la tasa metabólica de una gran variedad de especies de manera transitoria y permanente. El crecimiento económico a escala global y la permanente utilización de áreas marinas asociadas a diferentes actividades antropogénicas están elevando los niveles de ruido submarino desde la era industrial. En Chile, el crecimiento exponencial de la industria de cultivo de salmones durante las últimas décadas ha generado una actividad intensiva con amplia distribución geográfica en los fiordos y canales patagónicos, con claras tendencias a continuar en expansión hacia zonas aún más australes. A pesar de que los centros de cultivo generan diversas fuentes de contaminación acústica marina, aún no se estudian estas emisiones, ni sus efectos sobre organismos marinos de ecosistemas circundantes.

El primer capítulo de esta tesis describe el paisaje sonoro de un área marina cercana a un centro de cultivo de salmones, ubicada en un fiordo de la Patagonia norte de Chile. Se usó un hidrófono SoundTrap 300 STD, con rango de frecuencia de trabajo 0.02 – 60 kHz. Se puso especial énfasis en describir las características de frecuencia asociadas al ruido antropogénico producido por la planta de cultivo en funcionamiento normal. Se describen los diferentes tipos de ruidos, su duración, el pico de frecuencia y el Nivel de Presión Sonora (SPL). Por último, se analiza el periodo total de tiempo con interferencia antropogénica versus el tiempo en que se puede detectar el paisaje sonoro natural. Se realizó un registro continuo de ~45 horas utilizando un hidrófono calibrado (0,02–60 kHz) anclado a 20 m de profundidad (2 m desde el fondo) y a 250 m de un centro de cultivo. El análisis de tipo visual detectó trece tipos de ruidos. El ruido dominante presentó una frecuencia máxima de ~80 Hz, probablemente debido a los generadores eléctricos ($SPL_{RMS} \sim 120$ dB re $1\mu Pa$). El segundo ruido dominante fue de ~2500 Hz, probablemente de sistemas de alimentación automáticos o buques de transporte de salmones ($SPL_{RMS} \sim 142$ dB re $1\mu Pa$). El paisaje sonoro estuvo intensamente compuesto de ruidos de motores fuera de borda ($SPL_{RMS} \sim 130$ dB re $1\mu Pa$). Durante solo una hora, los ruidos antropogénicos estuvieron ausentes ($SPL_{RMS} \sim 100$ dB re $1\mu Pa$), pudiendo encontrar sonidos biológicos como chasquidos de camarones y vocalizaciones de peces. El 97% del tiempo total de grabación está compuesto por ruido antropogénico, ~40 dB re $1\mu Pa$ más que los sonidos en un ambiente natural.

El Segundo capítulo lleva esta información al laboratorio con la finalidad de evaluar un potencial efecto de la antropofonía de fuente salmonera sobre la fauna marina circundante. De esta forma, se expone la selección de ruidos detectados a distintos individuos de cangrejos ermitaños *Pagurus edwardsi*, especie de amplia distribución latitudinal que habita los fiordos en la Patagonia Norte. Los sonidos se reproducen en forma de bucle para comparar la tasa de consumo de oxígeno en tratamientos de sonido natural del fiordo, ruido antropogénico y ausencia de sonidos. Los resultados no arrojaron diferencias significativas entre tratamientos acústicos ($p > 0.05$). Por lo tanto, en este estudio no se encontró una variación del consumo de oxígeno cuando los cangrejos fueron expuestos a ruido antropogénico en relación a su ambiente natural y el tratamiento control (ausencia de ruidos). No hubo diferencias significativas en el consumo de O₂ entre secuencias en individuos expuestos a sonido natural ($p = 0.07$). Se encontraron diferencias significativas entre secuencias en tratamientos antropogénico ($p = 0.02$) entre secuencia A - C (0.01) y silencio (0.00) entre secuencias A - B (0.02) y A - C (0.02).

No obstante, debido a la detección en este estudio de ruidos crónicos, se sugiere continuar con la evaluación de los daños potenciales de las emisiones de ruidos de centros salmoneros sobre peces e invertebrados. Así mismo, se sugiere cambiar el tipo de medición de nivel de presión sonora (SPL) por el movimiento de partículas, ya que peces e invertebrados son sensibles a este estímulo.

Palabras claves: Cangrejo ermitaño, Consumo de oxígeno, Estrés, Fiordo, Nivel de presión sonora (SPL), *Pagurus edwardsi*, Ruido antropogénico submarino, Salmonicultura, Tasa metabólica.

ABSTRACT

Human-produced noise pollution is interfering with the correct development of different species of the marine ecosystem. There is evidence that chronic anthropogenic noise affects the metabolic rate of a wide variety of species in a transient and permanent way. Economic growth on a global scale and the permanent use of marine areas associated with different anthropogenic activities are raising the levels of underwater noise since the industrial era. In Chile, the exponential growth of the salmon farming industry during the last decades has generated an intensive activity with wide geographical distribution in the Patagonian fjords and channels, with clear tendencies to continue expanding towards even more southern areas. Despite the fact that farms generate various sources of marine noise pollution, these emissions have not yet been studied, nor their effects on marine organisms in surrounding ecosystems.

The first chapter of this thesis describes the soundscape of a marine area near a salmon farming center, located in a fjord in northern Chilean Patagonia. A SoundTrap 300 STD hydrophone was used, with a working frequency range of 0.02 – 60 kHz. Special emphasis was placed on describing the frequency characteristics associated with anthropogenic noise produced by the crop plant in normal operation. The different types of noises, their duration, the frequency peak and the Sound Pressure Level (SPL) are described. Finally, the total period of time with anthropogenic interference is analyzed versus the time in which the natural soundscape can be detected. A continuous recording of ~45 hours was made using a calibrated hydrophone (0.02–60 kHz) anchored at a depth of 20 m (2 m from the bottom) and 250 m from a culture center. The visual type analysis detected thirteen types of noise. The dominant noise presented a maximum frequency of ~80 Hz, probably due to electrical generators ($SPL_{RMS} \sim 120$ dB re $1\mu Pa$). The second dominant noise was ~2500 Hz, probably from automatic feeding systems or salmon carriers ($SPL_{RMS} \sim 142$ dB re $1\mu Pa$). The soundscape was heavily composed of outboard motor noises ($SPL_{RMS} \sim 130$ dB re $1\mu Pa$). For only one hour, anthropogenic noises were absent ($SPL_{RMS} \sim 100$ dB re $1\mu Pa$), being able to find biological sounds such as shrimp clicks and fish vocalizations. 97% of the total recording time is made up of anthropogenic noise, ~40 dB re $1\mu Pa$ more than sounds in a natural environment.

The second chapter takes this information to the laboratory where the selection of noises detected from different individuals of a species of hermit crab *Pagurus edwardsi* are exposed. Sounds are played in a loop to compare the rate of oxygen consumption in natural fjord sound treatments, anthropogenic noise, and no sound. The results did not show significant differences between acoustic treatments ($p > 0.05$).

Therefore, in this study, no variation in oxygen consumption was found when crabs were exposed to anthropogenic noise in relation to their natural environment and the control treatment (absence of noise). There were no significant differences in O₂ consumption between sequences in individuals exposed to natural sound ($p=0.07$). Significant differences were found between sequences in anthropogenic treatments ($p=0.02$) between sequence A - C (0.01) and silence (0.00) between sequences A - B (0.02) and A - C (0.02).

However, due to the detection in this study of chronic noise, it is suggested to continue with the evaluation of the potential damages of noise emissions from salmon farms on fish and invertebrates. Likewise, it is suggested to change the type of sound pressure level (SPL) measurement for the movement of particles, since fish and invertebrates are sensitive to this stimulus.

Key words: Anthropogenic underwater noise, Fjord, Hermit crab, Metabolic rate, Oxygen consumption, *Pagurus edwardsi*, Salmon farm, Sound pressure level (SPL), Stress.

INTRODUCCIÓN GENERAL

El océano transmite señales acústicas de manera muy eficiente ya que estas señales viajan 4,3 veces más rápido que en el aire debido a su alta densidad molecular (Stojanovic & Preisig, 2009). Existe una amplia gama de fuentes de señales acústicas en el océano que se pueden definir por su intensidad acústica o nivel de presión (dB re $1\mu\text{Pa}$), su frecuencia (Hz) y movimiento de partículas (dB re 1nm s). Varias especies marinas, desde invertebrados hasta grandes mamíferos, utilizan señales acústicas para diferentes procesos ecológicos tales como comunicación (Whitehead & Weilgart, 1991; McCauley & Cato, 2000; Wysocki & Ladich, 2001), reproducción (Lobel, 2002), defensa (Verslius et al., 2000; Patek & Caldwell, 2006; Buscaino et al., 2011), y algunas larvas de peces e invertebrados utilizan señales acústicas durante los procesos de asentamiento (Mann et al., 2007; Lillis et al., 2013; Hinojosa et al., 2016).

El ruido antropogénico en el océano lo generan el intenso transporte marítimo, estudios geofísicos, perforación de petróleo, dragado y sistemas de sonar (Frisk, 2012) lo que ha convertido al medio marino en una cacofonía antropogénica (Firestone & Jarvis, 2007). El monitoreo continuo del paisaje sonoro marino ha demostrado que el aumento de la actividad naviera tiene una relación directa con el incremento de ruido antropogénico, llegando a duplicar su intensidad en sólo cuatro décadas dentro de una bahía (por ejemplo, McDonald et al., 2006; 2008). Se sugiere que el incremento sustancial de la contaminación acústica marina tiene una relación directa con el crecimiento de la economía global y se estima que el ruido antropogénico está aumentando 3 dB por década (Frisk, 2012).

Chile es uno de los principales productores de peces en cautiverio. Las especies más cultivadas son *Salmo salar* y *Oncorhynchus mykiss* con 122.1 mil t y 61.5 mil t de cosecha respectivamente, siendo las X Región de Los Lagos y XI Región de Aysén donde se concentra la mayor actividad acuícola de estos recursos (Subpesca, 2023). La intensiva productividad de esta industria, ha generado diversos impactos en el ecosistema marino, como la alteración de la dieta en un pez nativo que circunda jaulas de cultivo (Skog et al., 2003), aumento de materia orgánica sedimentada (Carroll et al., 2033) o la invasión de salmones en áreas fuera de su rango de distribución natural (Correa & Bruto, 2008), pero el impacto del ruido generado por esta industria en el entorno sigue siendo desconocido.

Cómo repercute la contaminación acústica en los organismos marinos lleva años de estudio (e.g. Myrberg, 1990) y se ha considerado una fuente de estrés que afecta el correcto desarrollo de diferentes taxones en distintos estadios (Southall et al., 2007; Clark et al., 2009; Hildebrand, 2009; Ellison et al., 2012; Moore et

al., 2012; Hawkins et al., 2015; Williams et al., 2015; Southall et al., 2019; Di Franco et al., 2020; Staaterman et al., 2020; Wale et al., 2021). La exposición al ruido puede generar daños auditivos que pueden ser de carácter temporal o permanente (Wysocky & Ladich, 2005) que están condicionadas por la intensidad del ruido y el tiempo de exposición. Los impactos de la contaminación acústica están ampliamente documentados para mamíferos marinos (Weilgart, 2007; Wright et al., 2007; Nabi et al., 2018), indistintamente, los invertebrados son el grupo menos estudiado en esta área (Solé et al., 2023). *Pagurus edwardsi* presenta una alta distribución latitudinal, desde Callao Perú, hasta la Patagonia Norte chilena (Retamal, 1994; Retamal & Gorni, 2001) y se encuentran en fondos rocosos y arenosos ocupando distintas conchas de gasterópodos a diferentes profundidades (Retamal 2007). Se ha determinado que la especie *Pagurus bernhardus* es sensible a las vibraciones y al ruido antropogénico al modificar su comportamiento (Roberts et al., 2016), mientras que *P. edwardsi* no ha sido analizado en este tipo de estudios. Diferentes estudios demuestran que tanto peces como invertebrados son susceptibles al ruido antropogénico alterando el comportamiento en procesos de vital importancia (Slabbekoorn et al., 2010; Edmonds et al., 2016; Nedelec et al., 2016; Olivier et al., 2023). El ruido antropogénico genera impactos negativos en la fisiología (Wright et al., 2007) que tienen relación con aumento en cortisol, alteración en la tasa metabólica (Wysocky et al., 2006; Sierra-Flores et al., 2015; Ruiz-Ruiz et al., 2019; Mills et al., 2020) y daños corporales que pueden resultar en la muerte de algunos animales (Hawkins, 2023).

En conjunto, esta evidencia genera preocupación en el impacto temporal y permanente que tendrá el ruido antropogénico en los animales marinos si no se generan normativas que regulen los niveles de ruido en un ecosistema donde el sonido es un componente ecológico fundamental. Para desarrollar políticas públicas que aborden el ruido submarino, es imperativo comprender la gama completa de impactos fisiológicos y de comportamiento que el ruido genera en la vida marina, pero también, como primer paso, es clave identificar las fuentes de ruido antropogénico en un área en particular. En esta investigación se realizan los primeros estudios de identificación y caracterización manual en tiempo y frecuencia (Hz) de ruidos emitidos por una salmonera y se evalúa la afectación de este contaminante en el consumo de oxígeno de una especie de cangrejo ermitaño (*Pagurus edwardsi*) que cohabita con estos centros.

HIPÓTESIS

Hipótesis General

Los centros de cultivo de salmones generan ruidos antropogénicos debido a sus múltiples actividades durante su funcionamiento, como consecuencia, elevan la presión sonora del ambiente natural y afectan la tasa metabólica de una especie de cangrejo ermitaño (*Pagurus edwardsi*) que cohabita con la industria salmonera.

Hipótesis Especificas

1. El funcionamiento normal de un centro de cultivo de salmones emite ruidos que dominan el paisaje sonoro de un fiordo de la Patagonia Norte.
2. La tasa de consumo de oxígeno de cangrejos ermitaños aumenta al estar expuestos a distintos tratamientos de sonido

OBJETIVOS

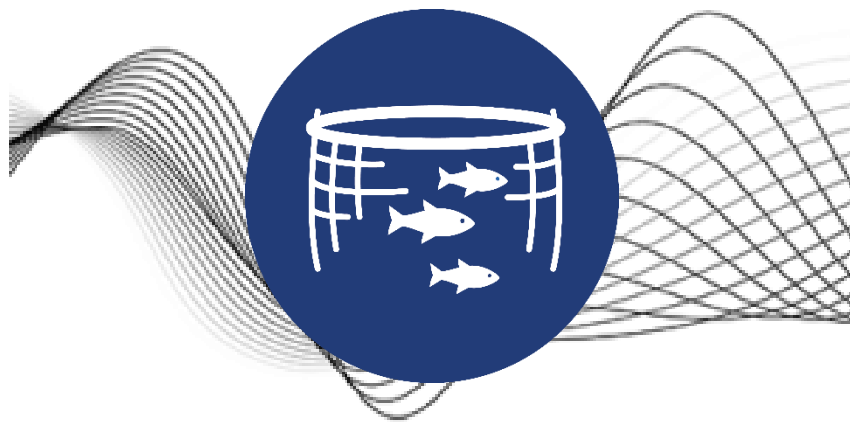
Objetivo General

- Describir los ruidos generados por un centro de cultivo de salmónes junto con el impacto en la tasa metabólica de una especie de cangrejo ermitaño (*Pagurus edwardsi*).

Objetivos Específicos

- Obtener grabaciones de un centro de cultivo de *Salmo salar* en funcionamiento normal en Fiordo Comau, X Región de los Lagos
- Caracterizar visualmente tipos de ruidos del centro de cultivo.
- Comparar la tasa de consumo de oxígeno entre grupos de cangrejos sometidos a diferentes tratamientos acústicos.

CAPÍTULO I: PAISAJE SONORO SUBMARINO BAJO UN CENTRO DE CULTIVO DE SALMONES EN EL FIORDO COMAU



RESUMEN

En los Fiordos Patagónicos (Chile) se ha producido un desarrollo explosivo de la acuicultura del salmón, convirtiendo a Chile en el segundo mayor productor de salmón del mundo. Se han identificado varios impactos ambientales de esta industria en los ecosistemas marinos. Sin embargo, las descripciones del paisaje sonoro submarino cerca de las instalaciones de salmón en el mar son escasas. Se realizó un registro continuo de ~45 horas utilizando un hidrófono calibrado (0,02–60 kHz) anclado a 20 m de profundidad (2 m desde el fondo) y a 250 m de un centro de cultivo. Se identificaron trece ruidos. El ruido dominante presentó una frecuencia máxima de ~80 Hz, probablemente debido a los generadores eléctricos ($SPL_{RMS} \sim 120$ dB re $1\mu Pa$). El segundo ruido dominante fue de ~2500 Hz, probablemente de sistemas de alimentación automáticos o buques de transporte de salmones ($SPL_{RMS} \sim 142$ dB re $1\mu Pa$). También hubo ruidos de motores fuera de borda ($SPL_{RMS} \sim 130$ dB re $1\mu Pa$). Durante solo una hora, los ruidos antropogénicos estuvieron ausentes ($SPL_{RMS} \sim 100$ dB re $1\mu Pa$), donde se encontraron camarones alpheidos chasqueando y sonidos de peces. Por lo tanto, el paisaje sonoro estuvo fuertemente dominado por la antropofonía de fuente salmonera con el 97% del tiempo total y ~40 dB re $1\mu Pa$ más que los sonidos naturales. Además, el ruido más alto se estimó en ~180 dB re $1\mu Pa$ a 1 m del centro de cultivo. Por lo tanto, se plantea la necesidad de evaluar los efectos de estos ruidos sobre la fauna marina.

Palabras claves: Fiordo, Monitoreo acústico pasivo (PAM), Nivel de presión sonora (SPL), Paisaje sonoro submarino, Ruido antropogénico submarino, Salmonicultura.

INTRODUCCIÓN

El creciente ruido emitido por las actividades humanas en el medio marino está generando preocupación científica sobre los impactos del ruido en este ecosistema (Ellison et al., 2012). Frente a este problema, el uso de sensores acústicos pasivos proporciona información útil sobre la composición del paisaje sonoro. El paisaje sonoro es la combinación de sonidos en un lugar y tiempo determinado, y puede descomponerse en biofonía, geofonía y antropofonía en cuanto a su fuente de origen (Farina, 2014). Para controlar, o reducir, los impactos de la antropofonía sobre el ecosistema marino, es necesario identificar y caracterizar las fuentes de ruido y sus métricas (niveles de presión sonora y frecuencia), junto con la identificación de sus efectos ecológicos sobre diferentes especies marinas (Wale et al., 2021). En este estudio se describe el paisaje sonoro de un fiordo de la Patagonia Norte chilena, lugares actualmente intensamente intervenidos por la industria acuícola (Molinet et al. 2018) y de gran importancia ecosistémica (Hucke-Gaete et al. 2004, Hucke-Gaete et al. 2013).

Los fiordos patagónicos norte de Chile han experimentado un desarrollo explosivo de la acuicultura del salmón (salmón del Atlántico - *Salmo salar*, salmón del Pacífico - *Oncorhynchus* spp. y trucha arcoíris- *Oncorhynchus mykiss*) en los últimos 30 años (Tecklin, 2016, FAO, 2018). En consecuencia, la preocupación científica por el impacto que genera esta industria en los ecosistemas marinos ha recibido especial atención (Poblete et al., 2019). Por ejemplo, se ha descrito un aumento de los nutrientes en el fondo marino cercano a las jaulas de los peces (Carroll et al., 2003), así como la introducción de sustancias químicas en la columna de agua (Miranda y Zemelman, 2002). También hay evidencia que demuestra la introducción de estas especies exóticas cultivadas en el medio ambiente natural (Correa y Gross, 2008; Figueroa-Muñoz, 2022), y la introducción de grandes cantidades de plásticos flotantes en esta área poco poblada por humanos (Hinojosa y Thiel, 2009; Ahrendt et al., 2021).

Sin embargo, la descripción del paisaje sonoro submarino cerca de las instalaciones de cultivo de salmones es escasa. La operación de la industria salmonera en el mar tiene el potencial de introducir señales sonoras de baja a alta frecuencia como resultado de sus múltiples funciones diarias, como el transporte, la producción de electricidad y los procesos de alimentación. Descripciones recientes de otras partes del mundo han demostrado que los centros de cultivo de salmón emiten ruidos de una intensidad considerable ($SPL_{RMS} \sim 110$ dB re 1 μ Pa) (Radford y Slater, 2019). Además, estos autores sugieren que el ruido de frecuencias más altas (1-2 kHz) proviene de motores, sopladores y bombas, mientras que los

ruidos de frecuencias más bajas (< 1 kHz) provienen de flujos de agua y vibraciones. En los fiordos patagónicos del norte de Chile no hay información disponible con respecto a los ruidos de los centros de cultivo de salmones, aparte de Vester y Timme (2010) quienes detectaron accidentalmente el ruido de sus operaciones en esta área mientras registraban las señales de sonido de los cetáceos. Por lo tanto, el objetivo de este capítulo es describir el paisaje sonoro submarino de una salmonera en funcionamiento en un fiordo patagónico norte de Chile.

HIPÓTESIS

El funcionamiento normal de un centro de cultivo de salmones emite ruidos que dominan el paisaje sonoro de un fiordo de la Patagonia Norte.

OBJETIVOS

- Obtener grabaciones de un centro de cultivo de *Salmo salar* en funcionamiento normal en Fiordo Comau, X Región de los Lagos
- Caracterizar visualmente espectrogramas de tipos de ruidos del centro de cultivo.

MÉTODOS

Monitoreo acústico pasivo (PAM)

Para la obtención de grabaciones de sonidos subacuáticos se utilizó un hidrófono SoundTrap 300 STD, con un rango de frecuencia de trabajo 0.02 – 60 kHz. Se realizaron grabaciones de ciclo continuo con una frecuencia de muestreo de 144 kHz.

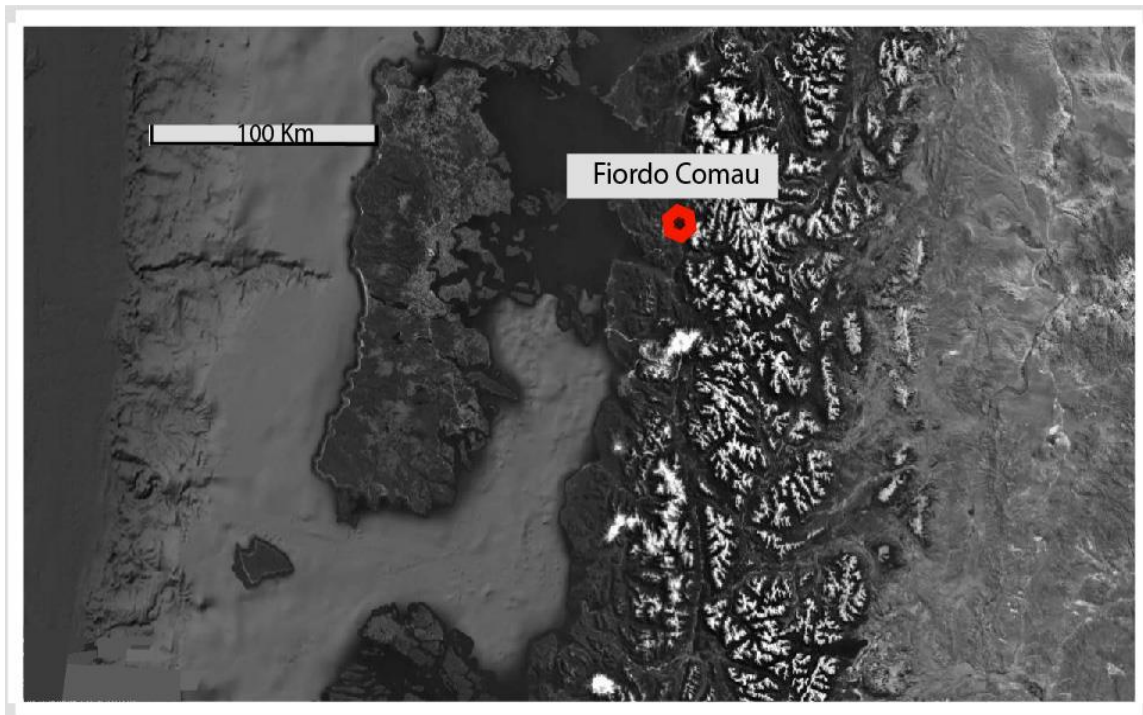


Figura 1. Fiordo Comau (42° 30'S) Provincia de Palena, X Región de los Lagos, Chile. Zona de recopilación de registro sonoro

Registro de antropofonía

En el Fiordo Comau, X Región de Los Lagos, Chile (Figura 1) se realizaron grabaciones submarinas continuas durante tres días (Tabla 1). La recolección de la data acústica se realizó con un hidrófono anclado a 20 metros de profundidad, a 2 m del fondo, y a 250 m de distancia a un centro de cultivo de salmónidos con la finalidad de registrar señales acústicas antropogénicas durante su funcionamiento normal.

Tabla 1. Esfuerzo de muestreo acústico
Grabaciones submarinas en Huinay, X Región de Los Lagos, Chile.

Localidad	Fecha de inicio	Fecha de término	Tiempo de inicio (h)	Tiempo de término (h)	Duración total (h)
Bajo salmonera	18/11/2019	20/11/2019	18:35:16	16:41:36	44:57:13

Análisis visual de datos acústicos

El análisis de datos acústicos se realizó en el programa RavenPro (V1.5) con ventana tipo Hamming, 8192 muestras, sobreposición de 90% y frecuencia de muestreo de 4096 Hz. El análisis de tipo visual consiste en la observación del espectrograma simultáneo a la detección de sonidos mediante audífonos. Para esta investigación se seleccionaron todos los ruidos de fuente antropogénica asociados al centro de cultivo que fueron caracterizados en pico de frecuencia (Hz) y duración (h). Para esta investigación se definió como ruido antropogénico a toda señal acústica no asociada a sonidos biológicos ni geofísicos. Este procedimiento se extiende para el total de la grabación.

RESULTADOS

Caracterización de ruido antropogénico presente en salmonera

Análisis visual de señales acústicas antropogénicas en espectrograma

Se detectaron trece tipos de ruidos antropogénicos de fuentes variables e intervalos de silencio en un período de grabación de ~45 horas (Tabla 2. Selección de tipos de ruido antropogénico). Para este estudio se consideró silencio como la ausencia de ruido antropogénico. Además, en ausencia de ruido antropogénico, se identificaron sonidos biológicos esporádicos como vocalizaciones de peces y chasquidos de camarones Alpheidae.

Tabla 2. Selección de tipos de ruido antropogénico

Los diferentes tipos de ruidos registrados en el Fiordo Comau, Región de Los Lagos, Chile.

Ruido tipo	Duración total (h)	Peak de frecuencia (Hz)
1	12:15:25	2718.8
2	23:38:19	82.0
3	0:03:40	70.3
4	1:09:01	97.7
5	0:02:20	140.6
6	1:19:07	269.3
7	0:34:35	82.0
8	2:11:12	1066.4
9	0:02:53	152.3
10	0:58:20	175.8
11	0:03:46	2953.1
12	0:51:34	2308.6
13	0:14:44	316.4
Silencio	1:22:02	NA

El pico mínimo de frecuencia detectado fue de 70,3 Hz, correspondiente al ruido tipo 3 asociado a una embarcación con motor fuera de borda, mientras que el pico máximo de frecuencia se registró por el ruido tipo 11 a 2953 Hz de fuente desconocida. Sin embargo, todos los ruidos detectados durante las ~45 h de registro presentaron una duración desigual (Figura 2. Espectrograma de largo plazo, Nivel de Presión Sonora (SPL) en el tiempo Se detectaron algunos tipos de sonidos que eran más frecuentes que otros (ver Figura 3).

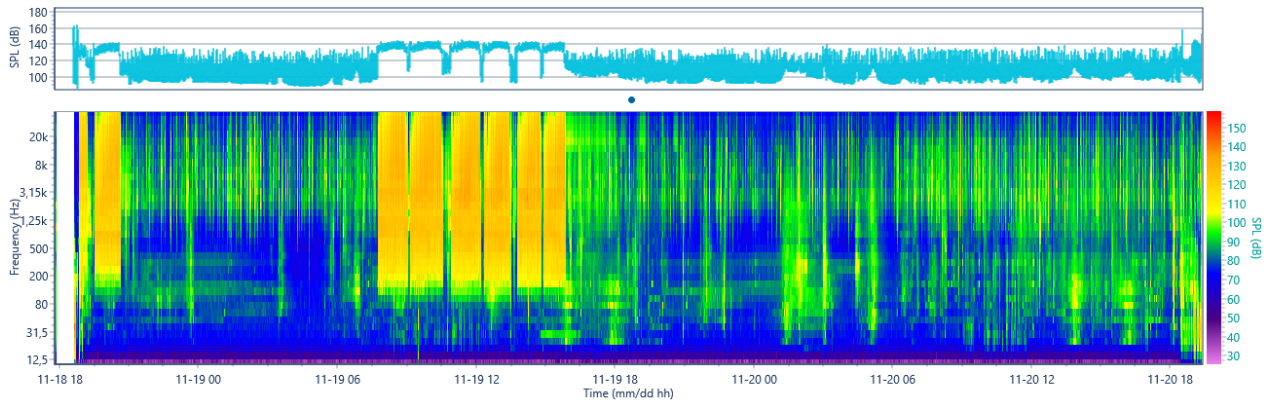


Figura 2. Espectrograma de largo plazo, Nivel de Presión Sonora (SPL) en el tiempo

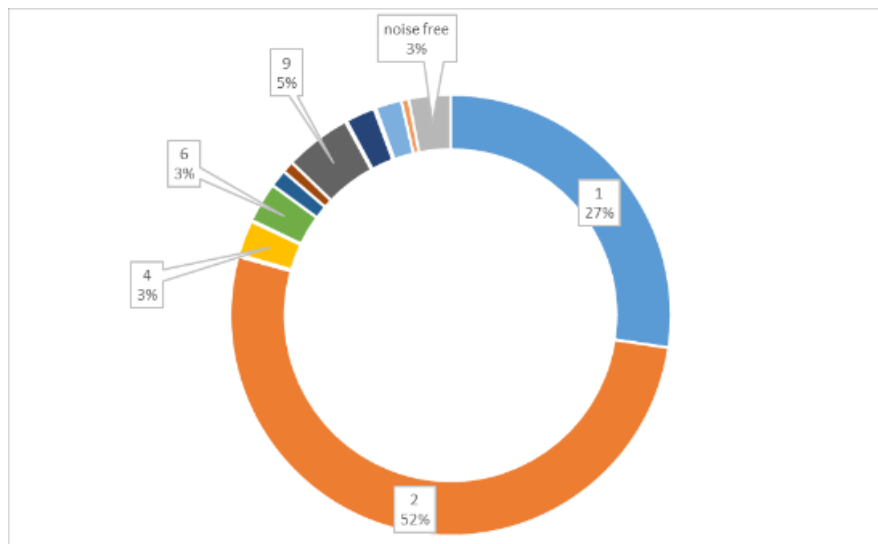


Figura 3. Porcentaje de ocurrencia de los diferentes tipos de ruido antropogénico

El ruido más dominante en el tiempo fue el tipo 2 (Figura 4), caracterizado por una frecuencia baja (80 Hz, $SPL_{RMS} \sim 120$ dB re $1\mu Pa$), con una duración total de 23 horas y probablemente asociado al ruido de un generador eléctrico. El segundo ruido más destacado corresponde al tipo 1 (Figura 5). Esta es una frecuencia muy alta (2500 Hz, $SPL_{RMS} \sim 142$ dB re $1\mu Pa$) y muy probablemente asociada con el sistema de alimentación automática o la operación de un well-boat, que corresponde a buques de gran envergadura que transportan los peces desde y hacia los centros de cultivo. Durante la mayor parte de la grabación se detectó el paso de diferentes embarcaciones, que corresponden a ruidos de tipo 4, 6 y 9 (Figura 6Figura 8), en un rango de frecuencia de 70 Hz-269 Hz ($SPL_{RMS} \sim 110$ a 140 dB re $1\mu Pa$), con un total de 3,5 h de presencia. Los momentos libres de ruido antropogénico ($SPL_{RMS} < 100$ dB re $1\mu Pa$, Figura 9) generalmente

ocurrieron cuando los ruidos más dominantes (tipo 1 y tipo 2) desaparecieron y, coincidentemente, no pasó ninguna embarcación. En estos períodos, es posible identificar los clics de camarones alfeidos y las vocalizaciones esporádicas de los peces. De los dos días de grabación (~45h) hubo períodos libres de ruido antropogénico solo por aproximadamente 1.5h.

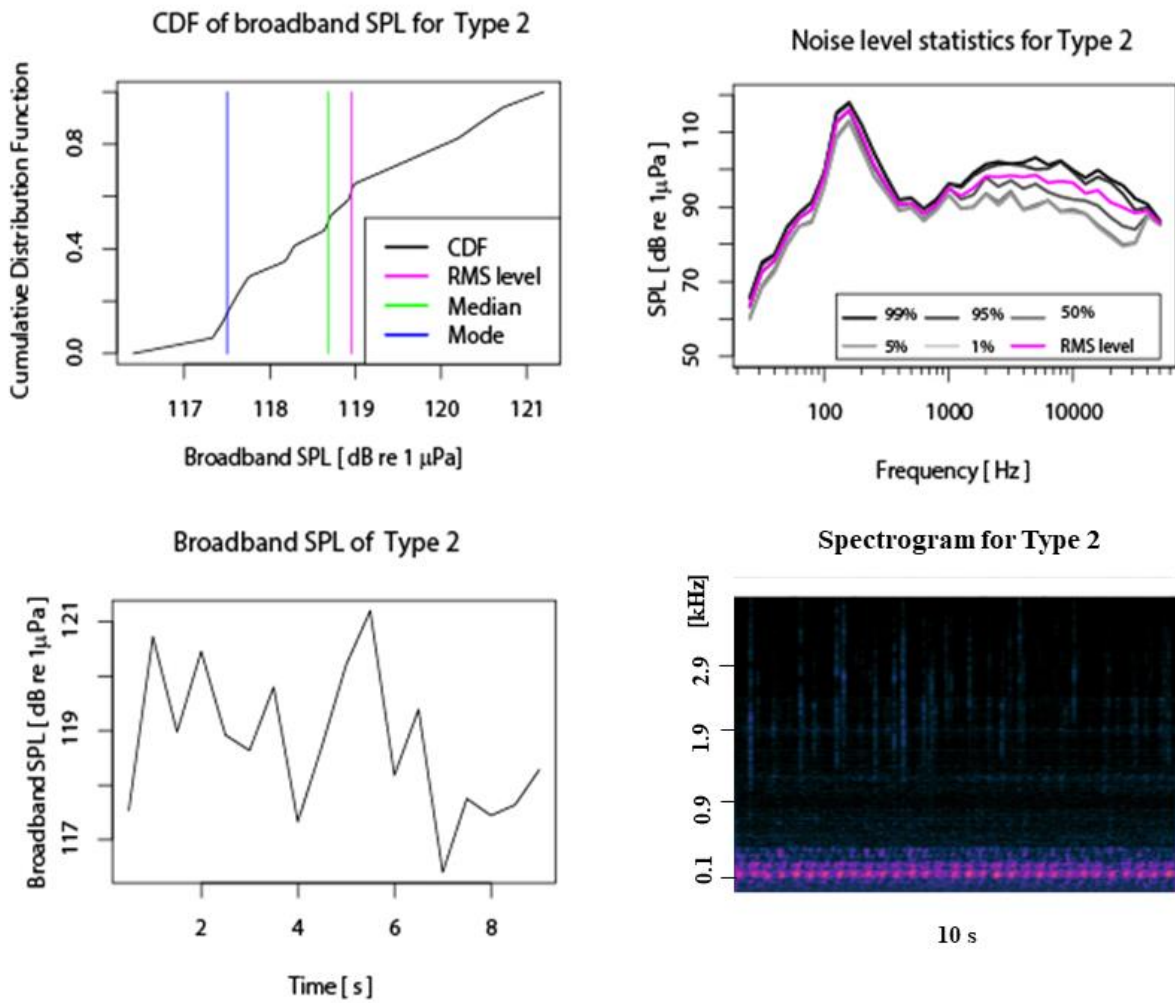


Figura 4. Función de distribución acumulada (CDF) de Nivel de Presión Sonora (SPL) de banda ancha, Estadísticas de nivel de ruido, Nivel de Presión Sonora (SPL) de banda ancha y Espectrograma de ruido de tipo 2.

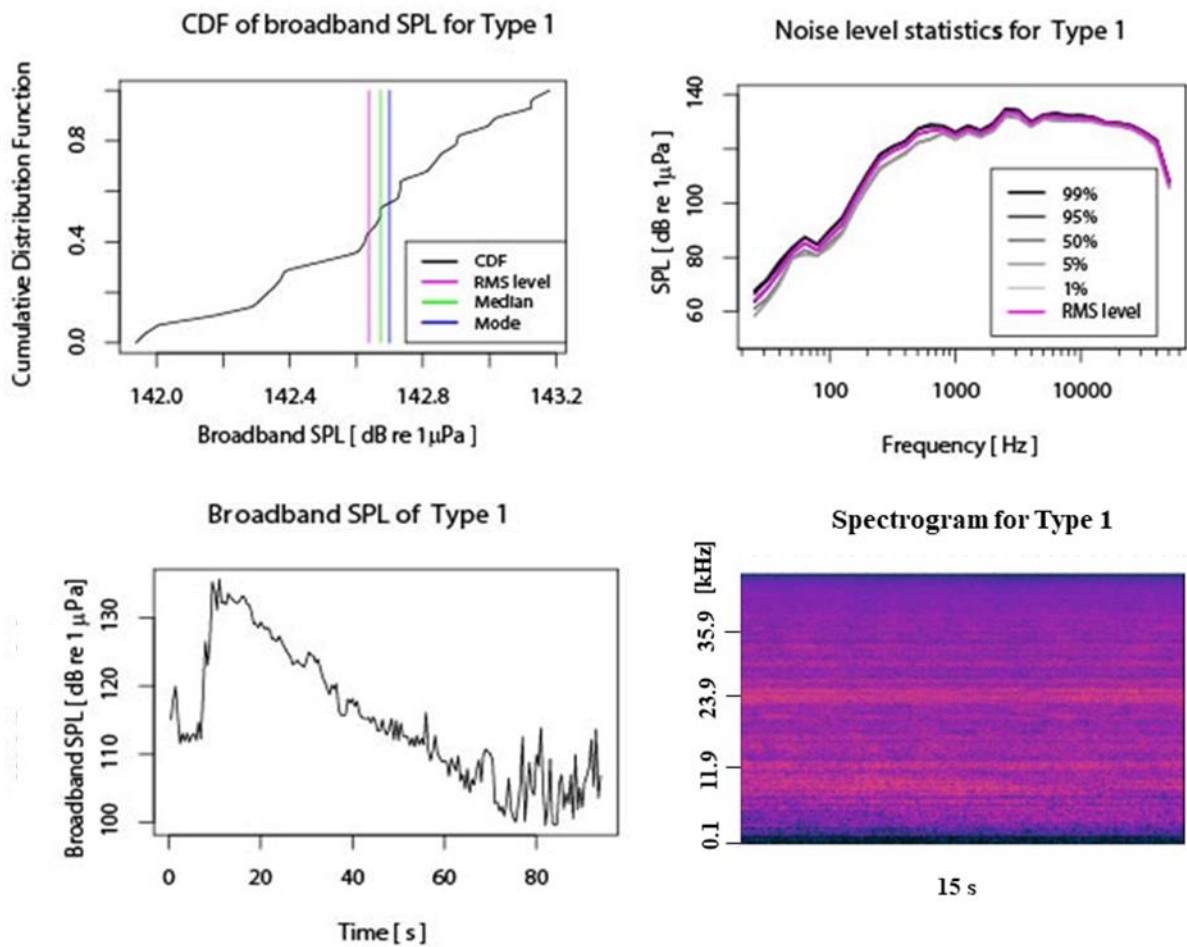


Figura 5. Función de distribución acumulada (CDF) de Nivel de Presión Sonora (SPL) de banda ancha, Estadísticas de nivel de ruido, Nivel de Presión Sonora (SPL) de banda ancha y Espectrograma de ruido de tipo 1.

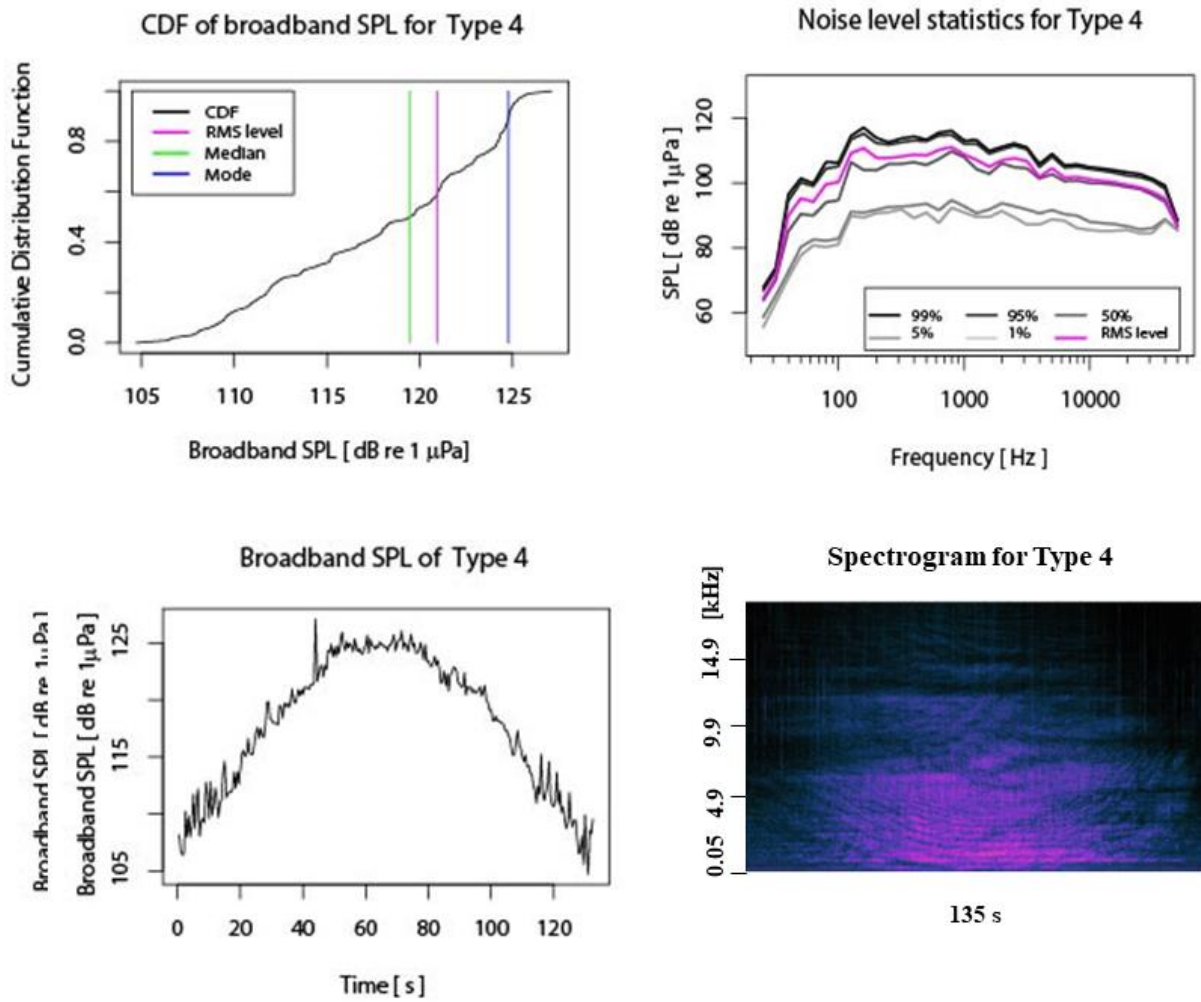


Figura 6. Función de distribución acumulada (CDF) de Nivel de Presión Sonora (SPL) de banda ancha, Estadísticas de nivel de ruido, Nivel de Presión Sonora (SPL) de banda ancha y Espectrograma de ruido de tipo 4.

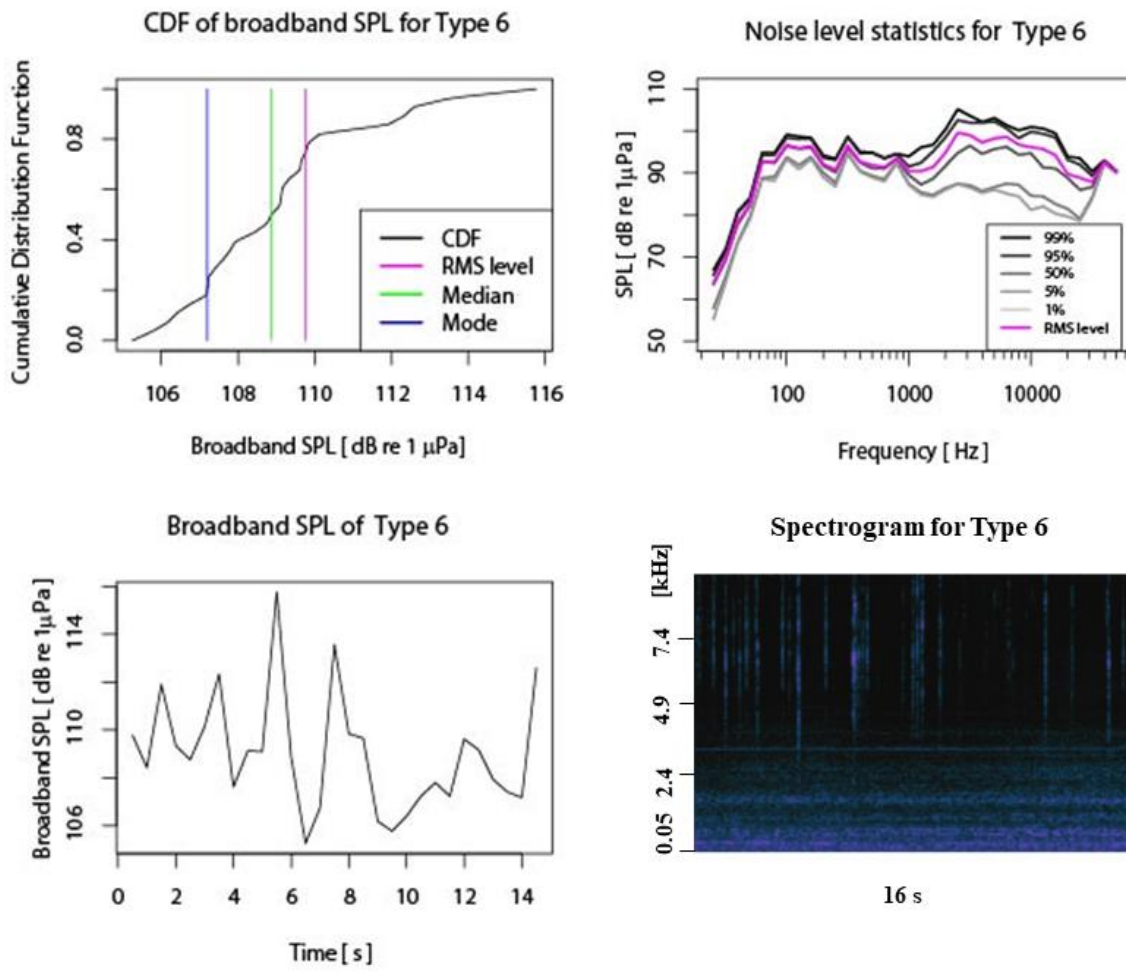


Figura 7. Función de distribución acumulada (CDF) de Nivel de Presión Sonora (SPL) de banda ancha, Estadísticas de nivel de ruido, Nivel de Presión Sonora (SPL) de banda ancha y Espectrograma de ruido de tipo 6.

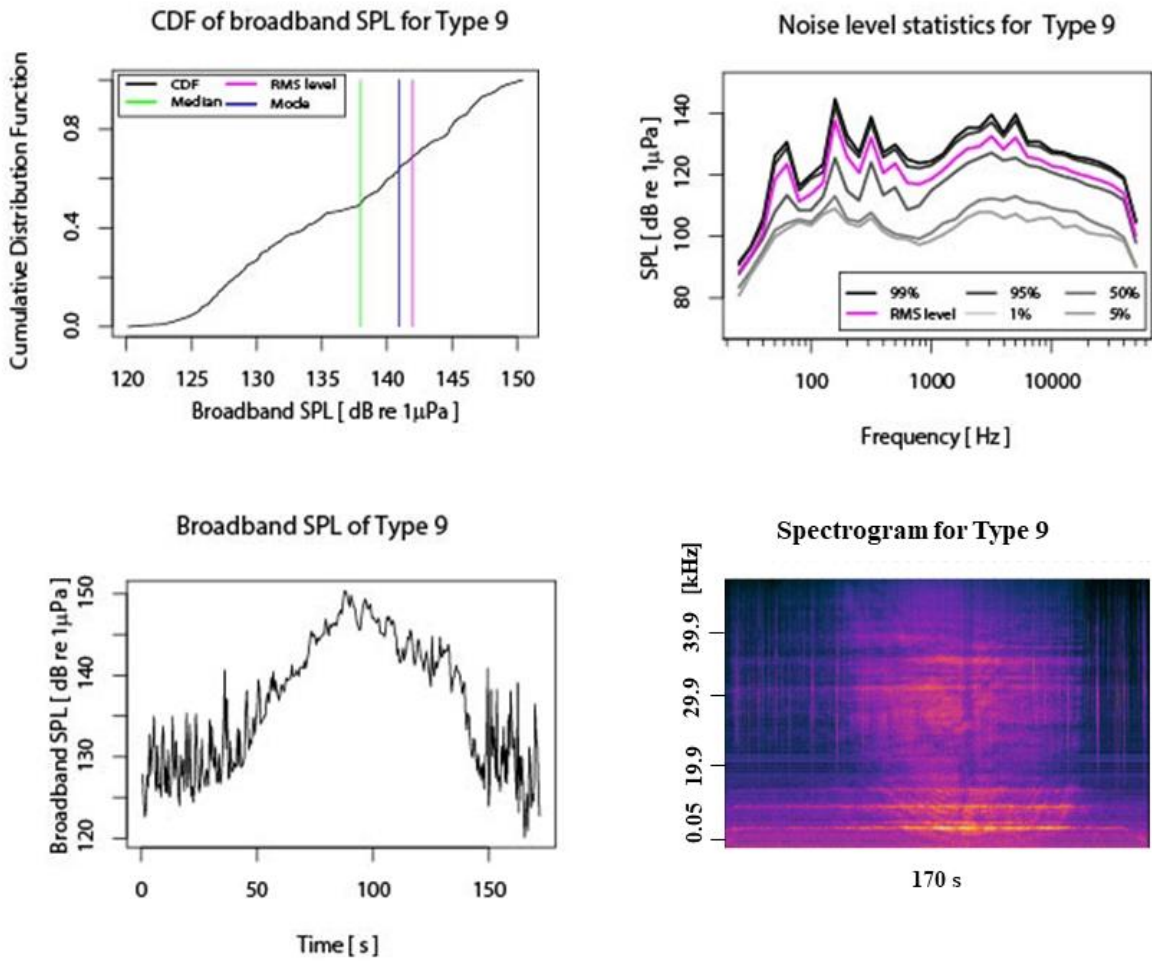


Figura 8. Función de distribución acumulada (CDF) de Nivel de Presión Sonora (SPL) de banda ancha, Estadísticas de nivel de ruido, Nivel de Presión Sonora (SPL) de banda ancha y Espectrograma de ruido de tipo 9.

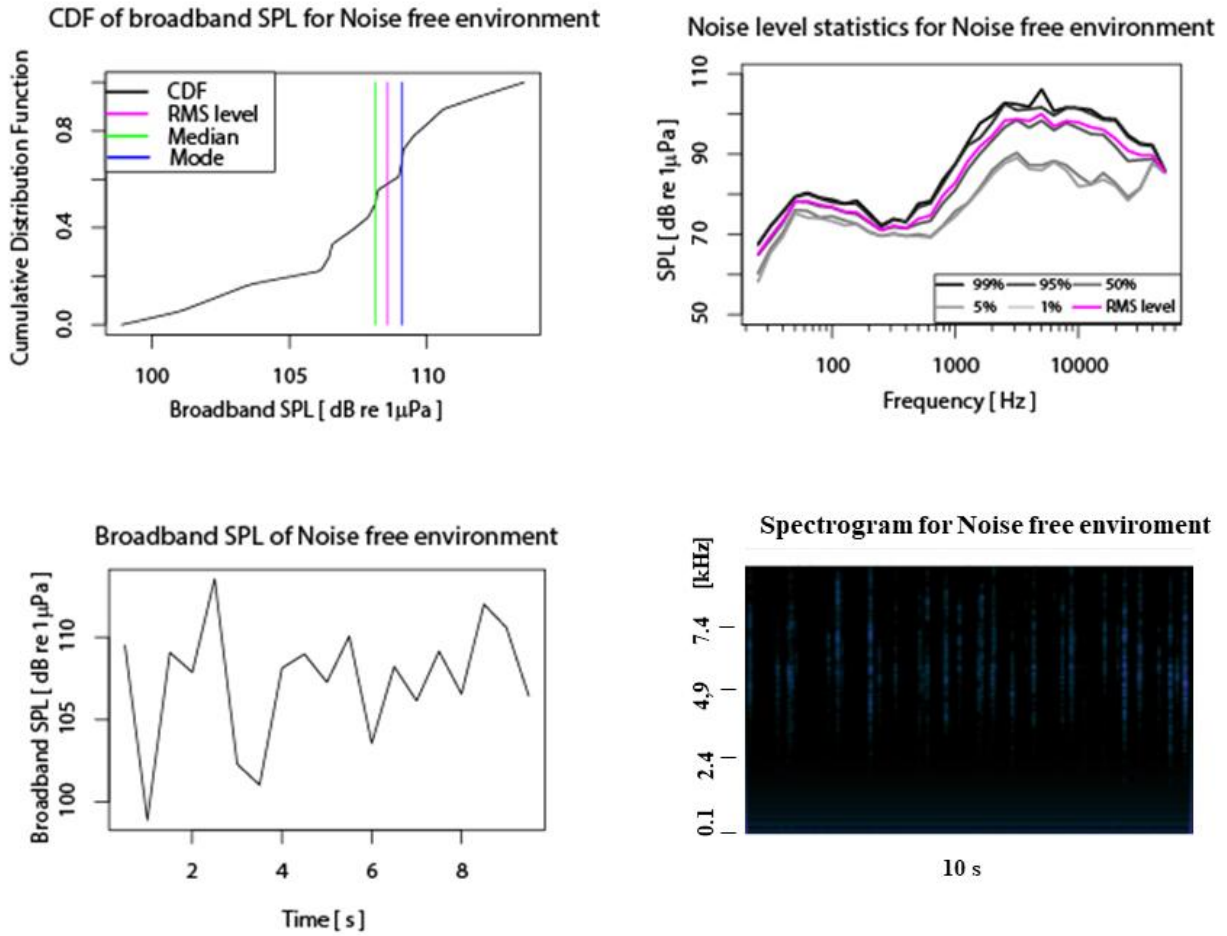


Figura 9. Función de distribución acumulada (CDF) de Nivel de Presión Sonora (SPL) de banda ancha, Estadísticas de nivel de ruido, Nivel de Presión Sonora (SPL) de banda ancha y Espectrograma de ruido de tipo de momento libre de ruido.

DISCUSIÓN

En este estudio se detectaron 13 tipos de ruidos antropogénicos de distinta fuente, de los cuales el ruido de mayor continuidad fue de ~ 80 Hz ($SPL_{RMS} \sim 120$ dB re $1\mu Pa$) y correspondería a un generador de electricidad. El segundo ruido dominante fue de ~ 2500 Hz ($SPL_{RMS} \sim 1420$ dB re $1\mu Pa$). Los ruidos esporádicos de mayor presencia corresponden a motores fuera de borda ($SPL_{RMS} \sim 130$ dB re $1\mu Pa$). Los ruidos antropogénicos estuvieron ausentes aproximadamente una hora del total de la grabación ($SPL_{RMS} \sim 100$ dB re $1\mu Pa$). En general el paisaje sonoro analizado en las cercanías de un centro de cultivo de salmones tiene una prevalencia porcentual del 97% de ruido antropogénico frente a un 3% de presencia de sonido natural.

Si bien el ruido submarino antropogénico se ha convertido en un problema global (Williams et al., 2015), en Chile aún se considera un problema emergente y más aún, considerando que es mayormente desconocido para los Fiordos Patagónicos. En general, la variedad e intensidad de los ruidos antropogénicos en el océano están relacionados al uso de ciertas áreas marinas, como sitios de tráfico marítimo, zonas de entrenamiento militar, actividades pesqueras e industriales, etc. (Hildebrand, 2009). Debido a la industrialización expansiva en el océano, el ruido antropogénico es cada vez más frecuente y el paisaje sonoro natural se ve cada vez más interrumpido. Aquí, en ~ 45 horas de grabación, se detectaron trece tipos de ruido de fuentes antropogénicas en una operación normal de una salmonera en el norte de la Patagonia. Estos ruidos están relacionados con sistemas automáticos de alimentación, generadores de electricidad y tráfico de embarcaciones de diferentes tipos, siendo los ruidos de embarcaciones los más diversos en frecuencia y duración, y contribuyen notoriamente a la composición del paisaje sonoro antropogénico de una salmonera.

Hay diferentes formas en cómo el ruido afecta el desarrollo de distintas especies marinas (Popper & Hastings, 2009; de Soto, 2016; Erbe et al., 2019) que puede tener un impacto temporal o permanente (Gullet, 2022). Los impactos del ruido incluyen cambios conductuales (Marley et al., 2017), daño en canales auditivos (Scholik & Yan, 2001), enmascaramiento de señales (Southall et al., 2000), disminución del crecimiento corporal (Kusku et al., 2020), cambios en la respuesta fisiológica (Rako-Gospić & Picciulin, 2019; Guh et al., 2021) y la muerte (Masud et al., 2020).

El efecto de enmascaramiento del ruido antropogénico en la comunicación biológica por medio de sonidos ha sido ampliamente investigado en cetáceos (Erbe et al., 2016; 2018; Williams et al., 2020;

Branstether and Sills, 2022) y es probable que las vocalizaciones de estas especies en la Patagonia norte puede estar enmascarada por los ruidos antropogénicos de la industria acuícola del salmón (Liu et al., 2013). Nuestro análisis de los archivos grabados reveló la presencia de sonidos biológicos como algunas vocalizaciones de peces y chasquidos de camarones, por lo que los efectos de enmascaramiento generados por estos ruidos también pueden estar ocurriendo en estas especies. Además, la visualización del espectro a veces se vuelve confusa a bajas frecuencias porque el ruido antropogénico enmascara todas las posibles señales de sonido biológico. La presencia de embarcaciones agrava el enmascaramiento de señales biológicas, disminuyendo el espacio de escucha en algunos peces (Wilson et al. 2023). El ruido de tipo 2 estuvo visible en el espectro durante largos periodos de tiempo, pero está enmascarado por otros ruidos de mayor frecuencia, por lo que es posible que estuviera presente en gran parte de la grabación excepto en los raros periodos de silencio (ausencia de ruido). El ruido tipo 1 fue el segundo de mayor intensidad ($SPL_{RMS} \sim 142$ re $1 \mu Pa$; $SLP_{Peak} \sim 170$ re $1 \mu Pa$; $SEL \sim 173$ dB re $1 \mu Pa^2s$). Considerando un modelo de pérdida de transmisión esférico simple, el ruido de tipo 1 se generó a alrededor de 180 dB re $1 \mu Pa$ a 1 metro de la fuente. Este ruido, es posible que, por su ciclicidad, puedan ser los periodos de alimentación u otro proceso como succión de peces (uso de buques de transporte de salmones) que ocurre regularmente y durante la luz del día, generando inminentemente algunos impactos sobre los peces de cultivo y también sobre el ecosistema circundante. Sin embargo, Solé et al. (2021) determinaron que el ruido a frecuencias relativamente más bajas (350 Hz y 500 Hz) y SEL alrededor de 190 dB re $1 \mu Pa^2s$, que se utiliza como tratamiento acústico contra la infestación de piojos, no presentó ningún riesgo para la audición de los salmones de cultivo. Sin embargo, considerando los niveles crónicos de ruido antropogénico detectados en este estudio, vuelve necesario evaluar potenciales cambios de comportamiento y afectaciones fisiológicas a peces en cultivo y especies que circundan estos centros. Los resultados de esta investigación indican que el ecosistema marino que rodea el centro de cultivo en el Fiordo Comau está expuesto a ruido antropogénico por alrededor del 97% del tiempo examinado, donde solo el 3% de este tiempo estuvo sin presencia de ruido antropogénico, dejando solo unos pocos momentos para señales acústicas biológicas que pueden ser importantes para los procesos ecológicos de un gran número de especies (Lillis et al., 2013; Hinojosa et al., 2016; Gordon et al., 2019). Si bien los ruidos tipo 1 y 2 dominan el paisaje sonoro estudiado, son las embarcaciones de distinto tipo quienes componen la mayor diversidad de sonidos de fuente antropogénica. Considerando el amplio rango de frecuencias de origen antropogénico encontradas en este estudio se vuelve evidente la sobreposición espectral a la que están afectos distintas especies de peces, quienes tienen un umbral auditivo entre 20-1000 Hz (Kasumyan 2005).

Los fiordos, canales y estuarios son ecosistemas de gran productividad biológica y juegan un papel muy importante en el ciclo del carbono (Liu et al., 2010). Los fiordos de la Patagonia Norte también se consideran importante zona de alimentación para las ballenas jorobadas, y zona de alimentación y crianza de las ballenas azules (Hucke-Gaete et al., 2013; Buchan y Quiñones, 2016). El fiordo Comau se considera de gran importancia para las formaciones coralinas de aguas frías poco profundas (Häussermann y Försterra, 2007). Esta zona es uno de los tres fiordos del mundo que forman grandes bancos de la especie coralina *Desmophyllum dianthus* a poca profundidad. En esta zona se han presentado eventos de mortalidad masiva de este coral por efectos colaterales de la proliferación de microalgas potenciada por la eutrofización que generan las salmoneras (Försterra et al., 2014). La creciente incorporación de nuevos centros de cultivo puede afectar en gran medida a la columna de agua (Poblete et al., 2019) y, además, como muestra este estudio, introducirá diferentes tipos de ruidos con mayor intensidad que pueden afectar aún más a las especies que la habitan. Por lo tanto, los esfuerzos deben centrarse en más estudios que aborden los efectos de estos ruidos de la industria acuícola en los fiordos chilenos. Eventualmente, tener esta información ayudará a reformular la normativa ambiental que actualmente permite la instalación de centros de cultivo en lugares de importancia ecosistémica.

CONCLUSIONES

Este estudio revela el primer acercamiento a comprender cómo es el paisaje sonoro submarino bajo un centro de cultivo en funcionamiento en Chile. El análisis acústico permitió detectar distintos tipos de ruidos que abarca un amplio rango de frecuencia (70.3 Hz – 2953 Hz). La mayor diversidad de ruidos está relacionada a embarcaciones, sin embargo, el tipo de ruido de mayor predominancia y de mayor intensidad proviene de operaciones propias del centro salmonero. Este tipo de estudios permiten comprender de mejor manera cómo puede estar interfiriendo la presencia de este tipo de industria en un lugar de gran importancia ecosistémica cómo lo es un Fiordo. Durante los escasos periodos de ausencia de ruido aparecen sonidos biológicos que son invisibilizadas por la presencia de ruido antropogénico que termina por enmascarar estas señales, lo que se transforma en una problemática evidente. Por otro lado, debido a la sobreposición de ruidos antropogénicos de distinto origen e intensidad, resulta muy difícil poder identificar la fuente de algunos ruidos de la grabación. Por lo tanto, en vista de la peligrosa intensidad de uno de los ruidos detectados (~ 142 dB re $1\mu\text{Pa}$), no es sino imperativo acceder a las instalaciones para medir en detalle los niveles de ruido que se generan en las faenas diarias de esta industria. De esta forma, al identificar las actividades que generan la mayor intensidad de ruido podría ayudar a realizar acciones para mitigar estas emisiones y abordar de mejor manera esta problemática.

ANEXO: FIGURAS COMPLEMENTARIAS DE TIPOS DE RUIDOS ANTROPOGÉNICOS

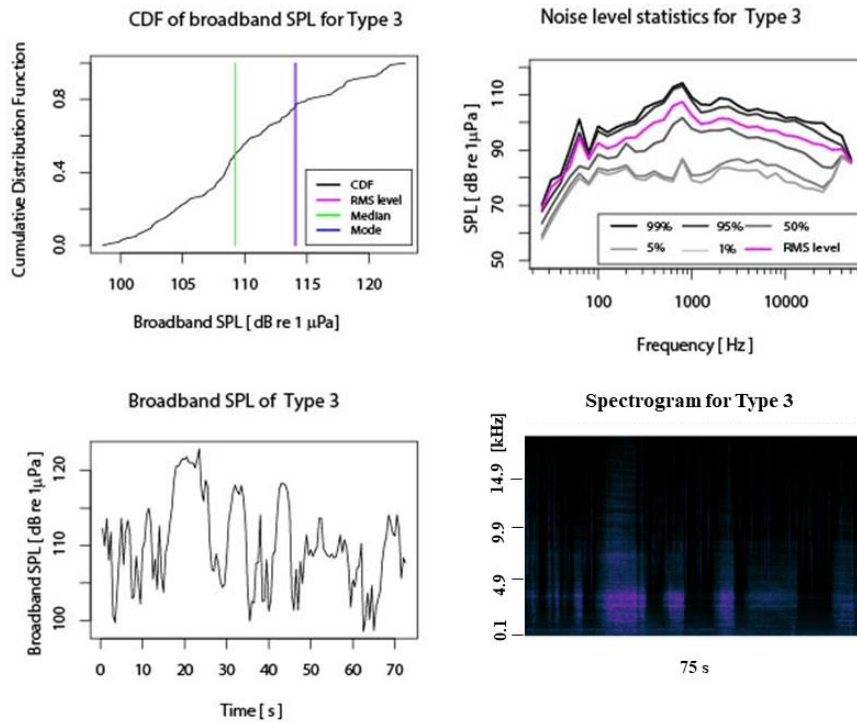


Figura 10. CDF de SPL de banda ancha, estadísticas de nivel de ruido, SPL de banda ancha y espectrograma de ruido de tipo 3.

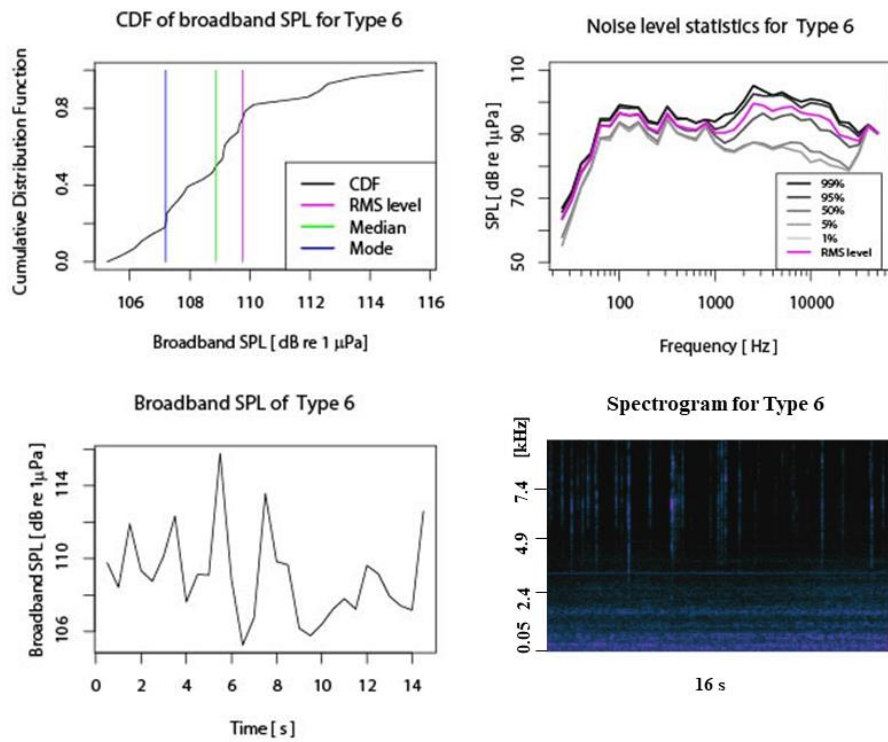


Figura 11. CDF de SPL de banda ancha, estadísticas de nivel de ruido, SPL de banda ancha y espectrograma de ruido de tipo 6.

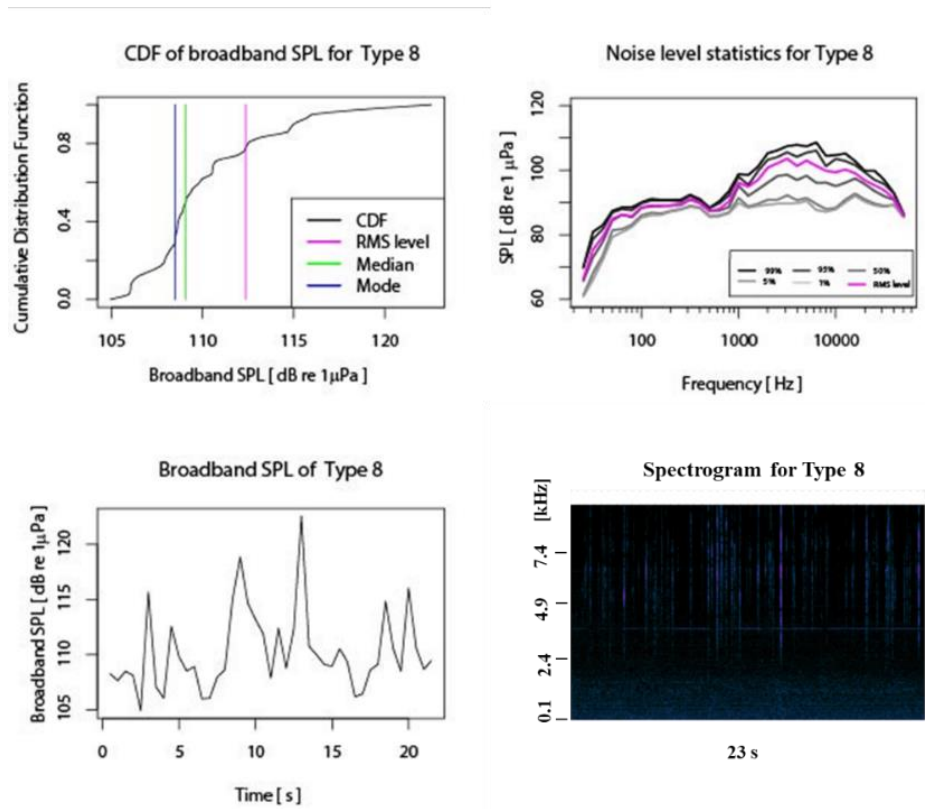


Figura 12. CDF de SPL de banda ancha, estadísticas de nivel de ruido, SPL de banda ancha y espectrograma de ruido de tipo 8.

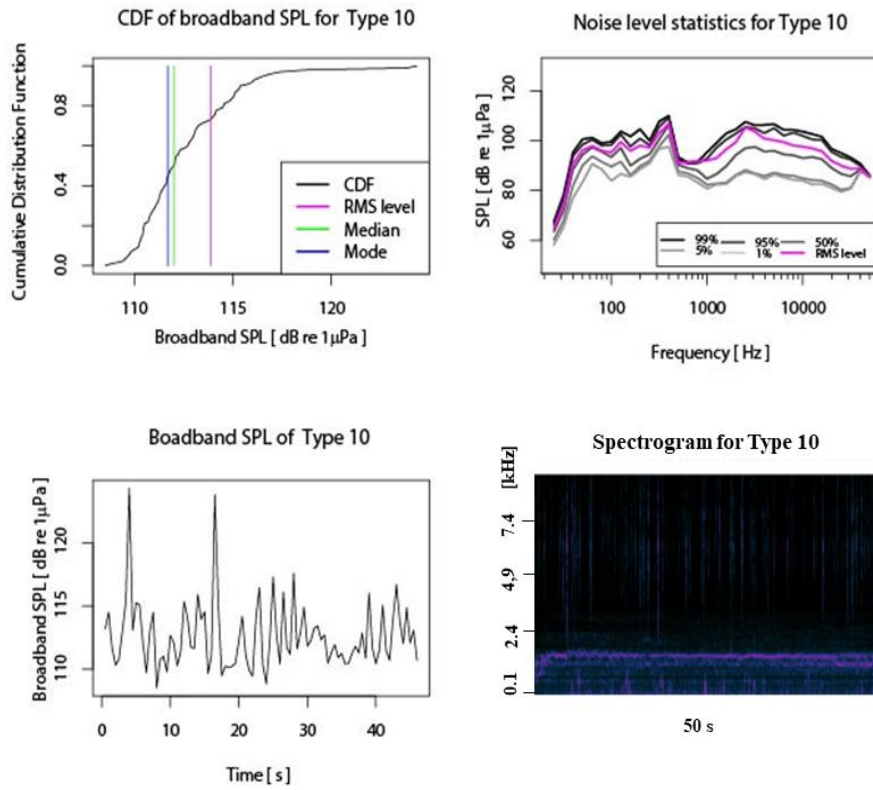


Figura 13.CDF de SPL de banda ancha, estadísticas de nivel de ruido, SPL de banda ancha y espectrograma de ruido de tipo 10.

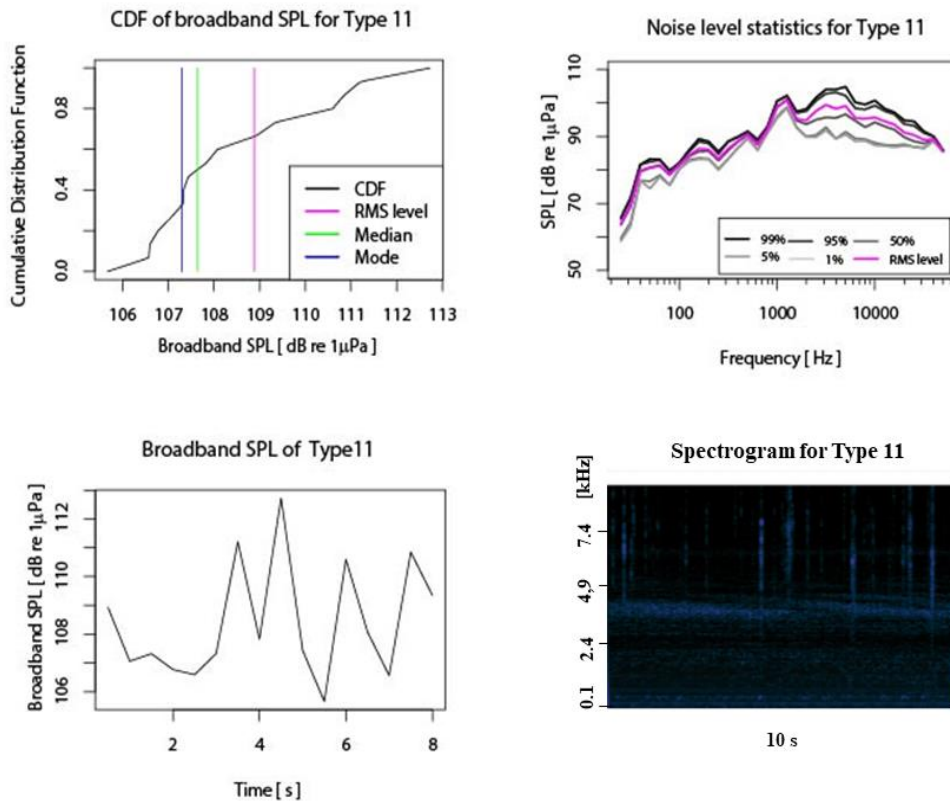


Figura 14. CDF de SPL de banda ancha, estadísticas de nivel de ruido, SPL de banda ancha y espectrograma de ruido de tipo 11.

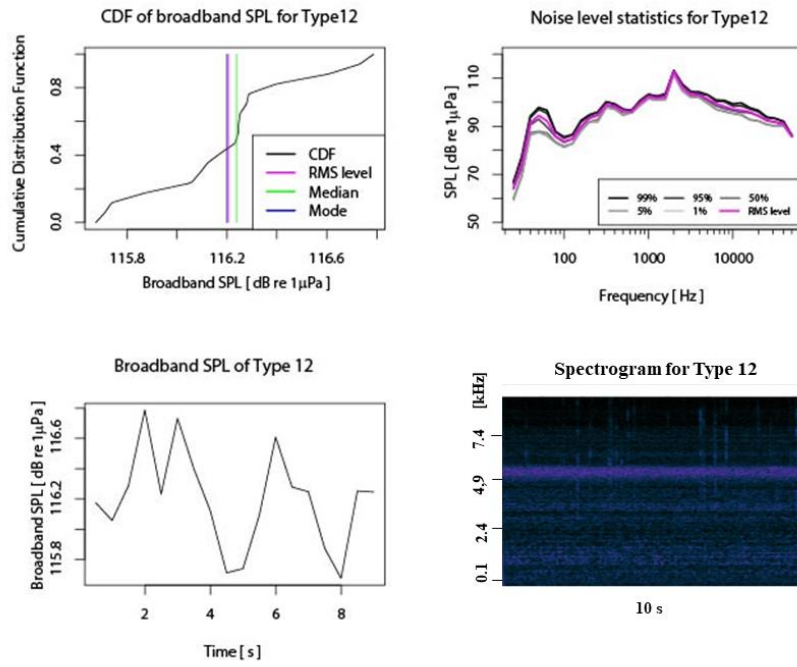


Figura 15. CDF de SPL de banda ancha, estadísticas de nivel de ruido, SPL de banda ancha y espectrograma de ruido de tipo 12.

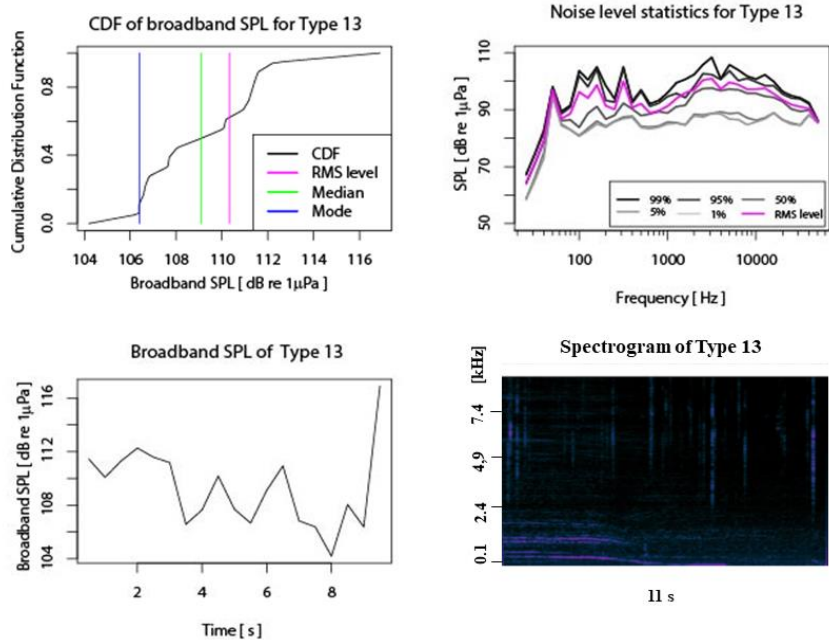
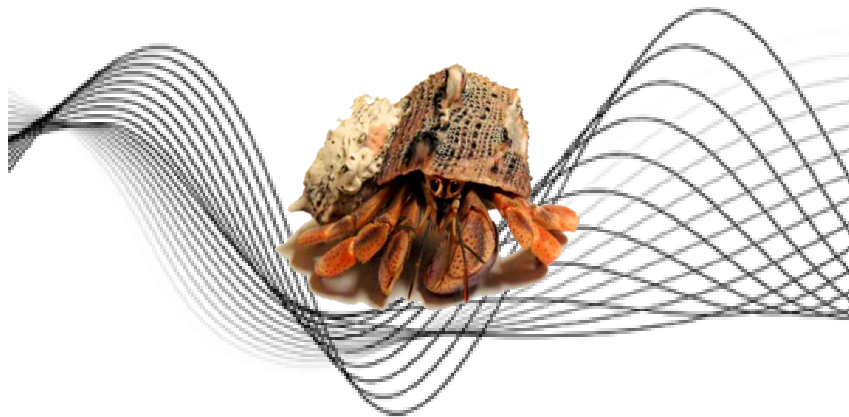


Figura 16. CDF de SPL de banda ancha, estadísticas de nivel de ruido, SPL de banda ancha y espectrograma de ruido de tipo 13.

CAPÍTULO II: EVALUACIÓN DE TASA DE CONSUMO DE OXÍGENO EN
CANGREJOS ERMITAÑO (*PAGURUS EDWARDSI*) EXPUESTOS A DISTINTOS
TRATAMIENTOS ACÚSTICOS (RUIDO ANTROPOGÉNICO DE FUENTE
SALMONERA- SONIDO NATURAL- SILENCIO)



RESUMEN

Cómo se ve afectada la fisiología de invertebrados marinos a la exposición de ruido antropogénico es hoy una de las aristas menos exploradas en el monitoreo acústico submarino. Sabemos que los mamíferos marinos acaparan la mayor atención sobre esta problemática, seguido por peces y finalmente invertebrados. La necesidad de favorecer el crecimiento económico y requerimientos alimenticios de la población a nivel mundial ha hecho que con nuevas tecnologías el océano se vuelva cada vez más explorado y explotado. Con la idea de aportar a este escaso nivel de información se comparó la tasa de consumo de oxígeno en cangrejos ermitaño (*Pagurus edwardsi*) expuestos a ruido antropogénico, a sonidos del ambiente natural y a silencio. Los resultados no arrojaron diferencias significativas entre tratamientos acústicos ($p > 0.05$). Por lo tanto, en este estudio no se encontró una variación del consumo de oxígeno cuando los cangrejos fueron expuestos a ruido antropogénico en relación a su ambiente natural y el tratamiento control. Sin embargo, hubo diferencias en cuanto a la respuesta de los cangrejos al orden de los tratamientos; tratamiento antropogénico ($p = 0.02$) entre secuencia A - C (0.01) y silencio (0.00) entre secuencias A - B (0.02) y A - C (0.02). Si bien en este estudio el ruido no se puede considerar como un factor estresor para la especie, se sugiere realizar un estudio similar evaluando el movimiento de partículas y a otras especies de invertebrados y peces habitantes de los fiordos patagónicos que pudieran estar siendo afectadas por la exposición crónica al ruido antropogénico.

Palabras claves: Cangrejo ermitaño, Consumo de oxígeno, Estrés, Fiordo, Fisiología, *Pagurus edwardsi*, Ruido antropogénico submarino, Salmonicultura, Tasa metabólica

INTRODUCCIÓN

Los invertebrados tienen la capacidad de detectar sonidos y/o vibraciones que les permite reaccionar a estímulos acústicos (Simpson et al. 2004). El estrés de manera natural permite que las especies logren completar estadios de desarrollo que resultan ser beneficiosas y determinantes (Atkinson et al. 2015). Por el contrario, factores estresantes crónicos como el ruido antropogénico, produce como respuesta un mayor consumo de oxígeno y mayores niveles de estrés (e.g. Regnault y Lagardere 1983).

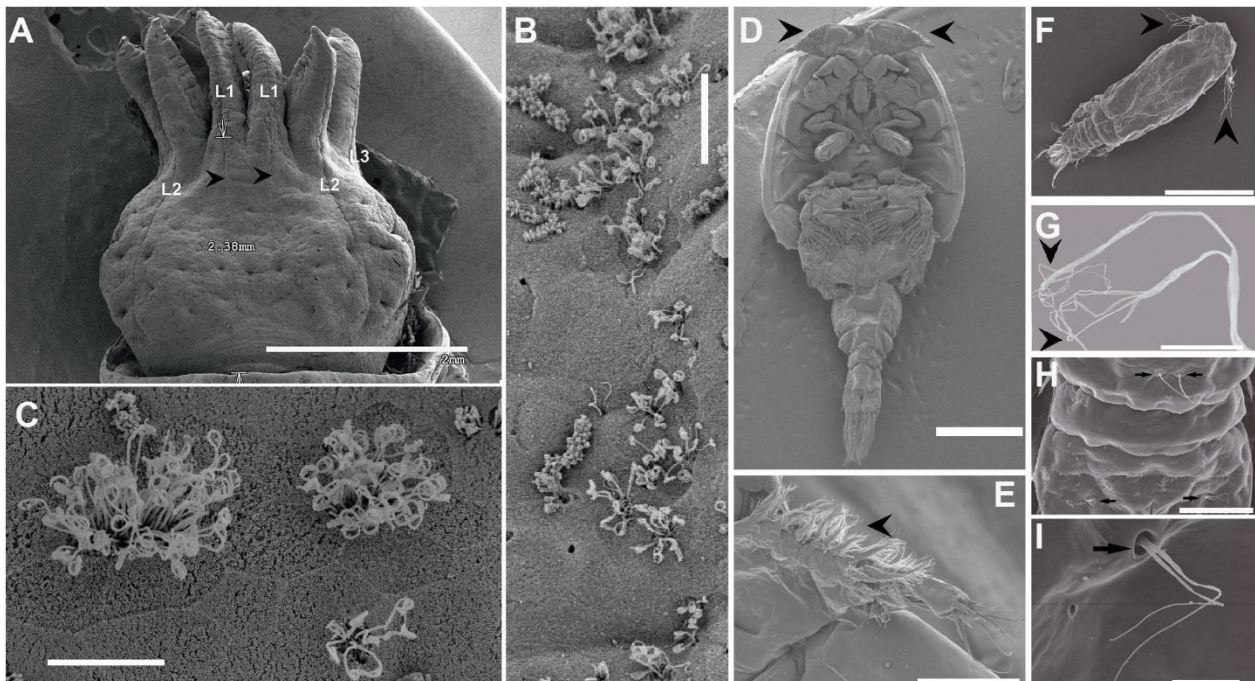


Figura 17. Microscopía electrónica de barrido de células sensoriales epidérmicas en invertebrados. A-C: Estructuras sensoriales de cefalópodos, D-I: Estructuras sensoriales de crustáceos (Tomado de Solé et al. 2023)

El metabolismo está relacionado con el presupuesto energético disponible para realizar distintos procesos fisiológicos fundamentales en la historia de vida de cualquier animal, mientras que la tasa metabólica indica la velocidad en que se consume esa energía disponible (Wallace & Jonesb, 2008). Distintos factores como cambios en la temperatura (Ikeda, 1985), disponibilidad de alimento (Brockington & Clarke, 2001), hipoxia (Hu et al., 2022), alta concentración de sustancias químicas contaminantes (Liu et

al., 2018) o ruido antropogénico (Zhang et al., 2022) afectan la respuesta metabólica que aumenta considerablemente el estrés en estas especies (Chahouri et al., 2022).

Los crustáceos decápodos producen señales acústicas (Winn & Hazlett 1962), siendo los receptores sensoriales externos e internos los que responden al sonido y a vibraciones (Popper et al. 2001). En general los encargados de recibir estas señales corresponden a distintas estructuras ciliadas que reaccionan de manera mecánica al movimiento del agua (Figura 17), donde la disposición de estas células va a depender de la especie (Budelmann 1992). El efecto del ruido sobre distintas especies varía según la fuente del sonido, la intensidad y el tiempo de exposición (McGregor et al. 2013). Estos impactos pueden ser de tipo conductual (Zhou et al. 2016), comunicacional (Jensen et al. 2009) y fisiológico (Cox et al. 2018).

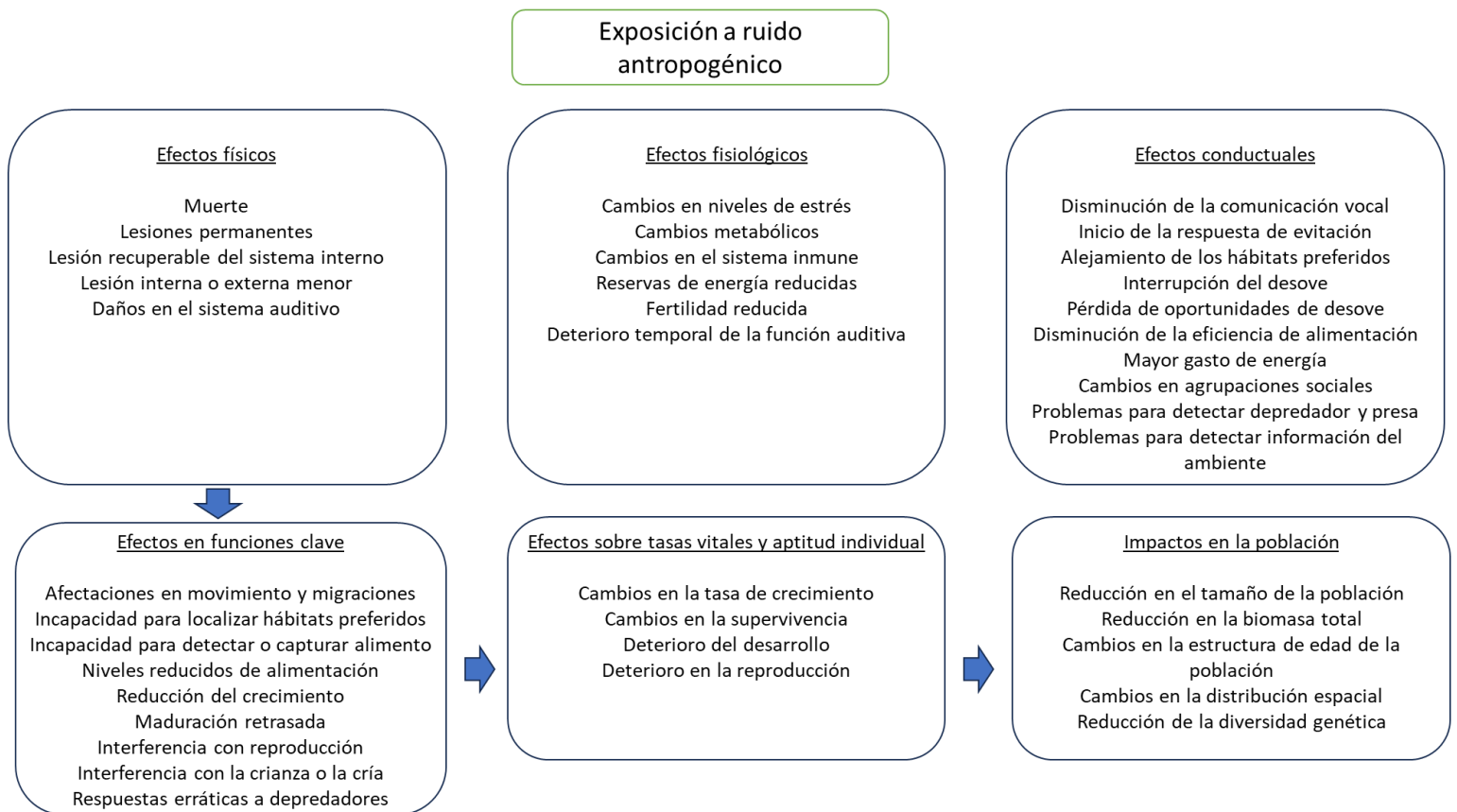


Figura 18. Efectos físicos, fisiológicos y comportamiento en funciones claves de individuos y poblaciones de peces y posiblemente invertebrados. (Traducido de Hawkins y Popper, 2017)

El impacto físico a diversas especies de invertebrados producido por ruidos antropogénicos puede resultar en daño temporal o permanente (Götz & Janik, 2013). Aimon et al. (2021) comprobaron que las vibraciones submarinas de fuente antropogénica aumentan los movimientos y la actividad en las antenas de una especie de cangrejo resultando en un aumento del estrés. Por otro lado, Ruiz-Ruiz et al. (2019) determinaron que, en el camarón de roca, *Rhynchocinetes typus*, los machos subordinados, al ser expuestos al ruido de motor fuera de borda, ejecutan comportamientos reproductivos oportunistas, aprovechando la baja actividad del macho dominante. Distintas especies sometidas a ruido antropogénico prolongado también se ven afectadas al presentar un mayor estrés, disminución de la tasa de crecimiento, reducción de la eficiencia de conversión alimenticia, supervivencia (Davidson et al. 2009), alteraciones conductuales y finalmente compromisos en el fitness de los individuos (Ruiz-Ruiz et al. 2019). Algunos órganos sensoriales que se ven afectados por el ruido antropogénico, que contienen los estatocistos, son de vital importancia en el comportamiento del individuo (André et al. 2016). El ruido a gran intensidad y por periodos prolongados también afecta en tempranas etapas de desarrollo (Nedelec et al. 2014). Por lo tanto, un lugar saturado de ruido de manera permanente puede estar condicionando negativamente el desarrollo de un ecosistema entero (Kunc et al. 2016). Si bien existe evidencia de que el ruido antropogénico afecta la fisiología de invertebrados, aún no está documentado en como pudiese estar afectando los ruidos de fuente salmonera a la biodiversidad marina en Chile.

En esta investigación se evalúa la respuesta fisiológica midiendo la tasa metabólica de una especie de cangrejo ermitaño (*Pagurus edwardsi*) expuesto a tratamientos de ruidos de una salmonera (antropofonía), sonido natural (biofonía y geofonía) y silencio.

HIPÓTESIS

La tasa metabólica de cangrejos ermitaños incrementa al ser expuestos a ruido antropogénico de fuente salmonera.

OBJETIVO

Comparar la tasa metabólica entre grupos de cangrejos ermitaños expuestos a tratamientos de sonido natural, antropogénico y silencio.

MÉTODOS

Sistema de cangrejo ermitaño

La metodología experimental fue expuesta en el Comité de Ética, Bioética y Bioseguridad de la Universidad Católica de la Santísima Concepción para la evaluación del cumplimiento de principios éticos, bioéticos y de bioseguridad establecidos por la Institución.

Obtención de cangrejos ermitaño y aclimatación

Todos los ejemplares de cangrejo ermitaño fueron colectados mediante inmersiones de buceo frente a la Estación de Biología Marina de la UCSC en Lengua. Se obtuvieron 41 ejemplares de tamaño similar, los que fueron llevados al laboratorio costero de la UCSC y posteriormente puestos en estanques de 50 L con aireación constante y temperatura de 15-17° C. Para evitar sesgos acústicos por ruidos de uso normal del laboratorio, cada acuario fue cubierto con plumavit de 15 mm más una tapa del mismo material con orificios para facilitar el flujo de agua constante (Figura 19).

Tratamiento de ruido

Registro sonoro

En el Fiordo Comau, X Región de Los Lagos, Chile se realizaron grabaciones submarinas continuas durante tres días. La recolección de la data acústica se realizó con un hidrófono SoundTrap 300 STD anclado a 20 metros de profundidad, a 2 m del fondo, y a 250 m de distancia a un centro de cultivo de salmónidos con la finalidad de registrar señales acústicas antropogénicas durante su funcionamiento normal.

Segmentación de antropofonía, biofonía y geofonía para tratamientos acústicos

Se seleccionaron todos los ruidos antropogénicos detectados en los archivos de sonido. A través del programa de Audacity Cross-Platform Sound Editor, se seleccionaron 100 segmentos de 30 s de duración, con la finalidad de simular los ruidos de un paisaje sonoro de un centro de cultivo, los que fueron agrupados de manera aleatoria para formar un bucle constante de ruido, utilizando diferentes períodos de tiempo de grabación para evitar pseudoreplicación. Mientras que el sonido natural se obtuvo de los períodos de ausencia de ruido antropogénico tomados de los mismos archivos de sonido. Se seleccionaron 100 segmentos de 30 s de duración con el programa Audacity Cross-Platform Sound Editor con la finalidad

de simular un paisaje sonoro de origen natural. Se agruparon aleatoriamente formando un bucle de sonido continuo utilizando diferentes períodos de tiempo de la grabación para evitar pseudoreplicación.

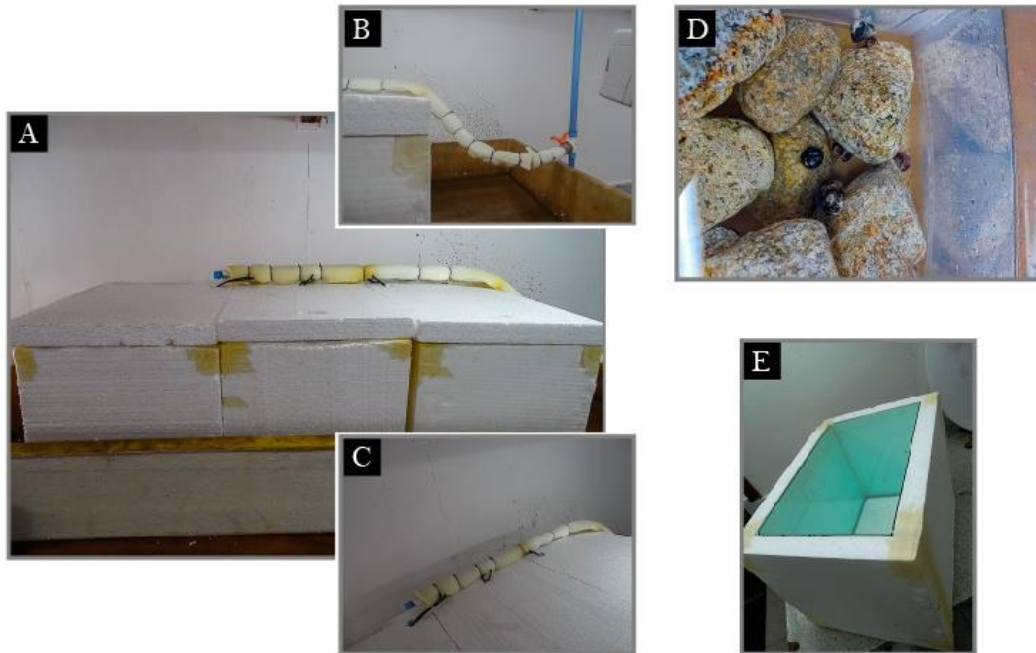


Figura 19. Sistema de mitigación de sonidos externos en acuarios contenedores de cangrejos
(A) Vista frontal de tres acuarios de 50 L cada uno forrados de plumavit de 5 cm de espesor. (B) Manguera de entrada de agua de mar hacia acuarios forrada con espuma para embalaje de 3". (C) Vista superior de acuarios y sistema de ingreso de agua. (D) Ejemplares de *Pagurus edwardsi* dentro de un acuario. (E) Detalle de acuario forrado con plumavit.

Análisis de tasa metabólica de cangrejos ermitaño (*Pagurus edwardsi*)

Calibración de sistema de transmisión para tratamiento acústico

Se realizó una prueba de sonidos en el acuario experimental para verificar similitud de sonidos proyectados en acuario frente a una proyección en mar abierto (Figura 20). En el acuario experimental, de 50 L de capacidad, se incorporó un parlante sumergible UW30, Lubell Labs Inc. (Figura 20A) operado por un proyector de sonidos digital (MP3) y un amplificador (Figura 22B). Posteriormente, en el programa RavenPro 1.6 se comparó el espectro de proyección en laboratorio versus la proyección en el mar (Figura 20C). El sistema de sonido (parlante y amplificador) fue apagado para el tratamiento de silencio.



Figura 20. Sistema de calibración de tratamientos acústicos preparatorios. (A) Hidrófono SoundTrap 300 STD sumergido en acuario de 50 L grabando la reproducción de bucles con parlante sumergible UW30 Lubell Labs Inc. (B) Amplificador. (C) Sistema de equipos acústicos, acuarios y software Raven Pro en laboratorio. que son al A, B y C

Aclimatación

Con 12 horas de antelación a la exposición de ruido se seleccionaron aleatoriamente 4 ejemplares de los acuarios de aclimatación para ser trasladados a los acuarios experimentales. Se introdujo cada cangrejo en un frasco de vidrio de 100 mL, cubierto por una malla rachel que permite el intercambio de agua y oxígeno dentro del acuario (Figura 21A). Posteriormente los 4 ejemplares se dejaron aclimatar en este sistema hasta el día siguiente con flujo abierto y saturación de aire (Figura 21B). Se utilizó diferentes ejemplares por día.

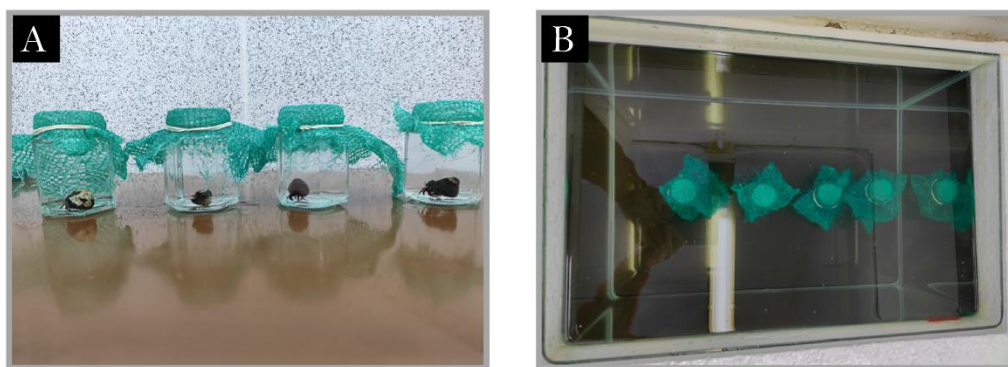


Figura 21. Disposición de ejemplares para aclimatación. (A) Paguros separados de manera individual en cada frasco de 100 mL cubiertos con malla que permite intercambio de oxígeno. (B) Sistema de aclimatación previo al experimento acústico.

Exposición a tratamiento acústico y medición de tasa de consumo de oxígeno

Al momento de realizar la medición se cambió la malla de rachel por una tapa de metal con un agujero en el centro del diámetro del sensor de oxígeno, para evitar fugas los bordes del agujero fueron reforzados con Parafilm. Se utilizaron cuatro sensores de oxígeno calibrados Firesting modelo FSO2-4, uno para cada individuo. Luego se evaluó el consumo de oxígeno de los cuatro individuos simultáneamente (Figura 22) utilizando el programa Pyro Oxygen Logger software, el cual arrojó datos de la tasa de consumo de oxígeno en el tiempo en cada cámara respirométrica. Los tratamientos acústicos se reprodujeron en

distinto orden, lo que en este estudio se menciona como secuencia, para cada una de ellas se utilizó 4 individuos obtenidos aleatoriamente de los acuarios de aclimatación. Se implementó la secuencia A (silencio- natural- antropogénico) para los días uno y dos, considerando el día uno como prueba; secuencia B (antropogénico- silencio- natural) para el día tres; secuencia C (natural- antropogénico- silencio) para el día cuatro. Para el cambio de tratamiento acústico dentro de cada secuencia, se respetó un rango de normoxia de 145 mmHg- 130 mmHg; 130 mmHg-115 mmHg; 115 mmHg-100 mmHg según indicaba el software en tiempo real (Figura 23).

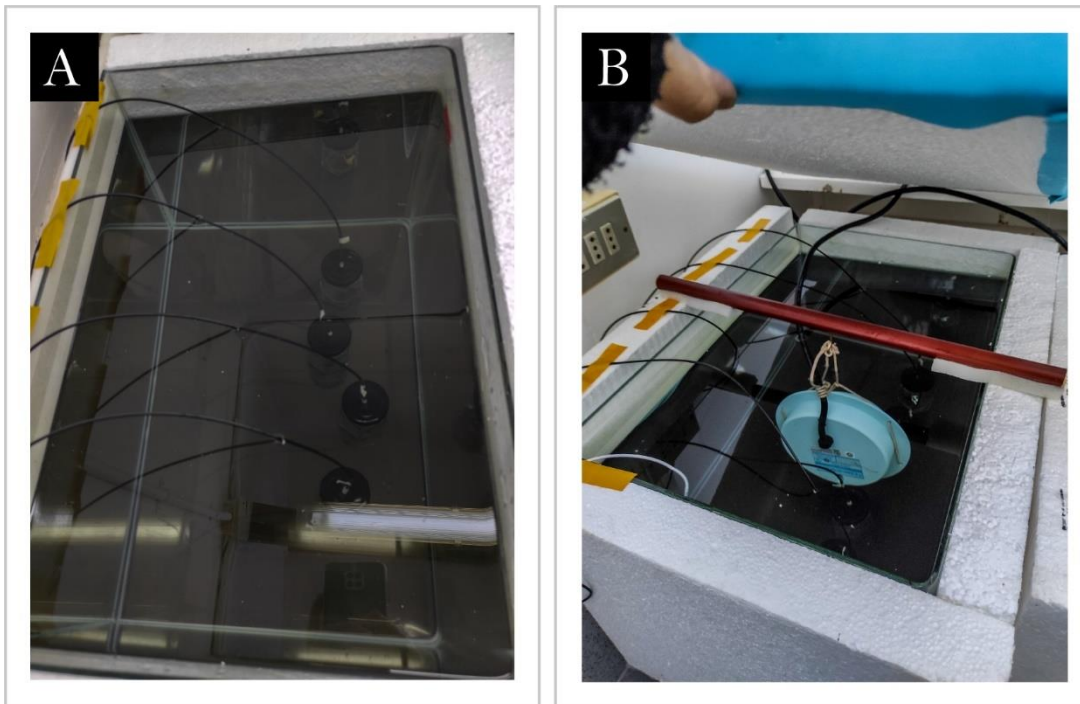


Figura 22. Medición de consumo de oxígeno en tratamientos acústicos. (A) Frascos herméticos con sensores de medición. (B) Parlante sumergido en acuario para reproducción de bucles de ruido salmonero y sonido natural.

Análisis de medidas repetidas en el tiempo en tasa de consumo de oxígeno de cangrejo ermitaño

Se realizó un análisis de medidas repetidas de una vía en RStudio (V2022.02.0) para comparar la variación de la tasa de consumo de oxígeno promedio en ejemplares sometidos a ruido antropogénico, sonidos naturales o silencio. La ejecución del análisis se realizó por cada secuencia de manera independiente para respetar los supuestos correspondientes. Se analizó el supuesto de normalidad con el test de Shapiro-Wilk más una corrección de Greenhouse-Geisser para el supuesto de esfericidad. Además,

se ejecutó una comparación de muestras pareadas entre tratamientos con Pairwise T y un método de ajuste de p con Bonferroni.

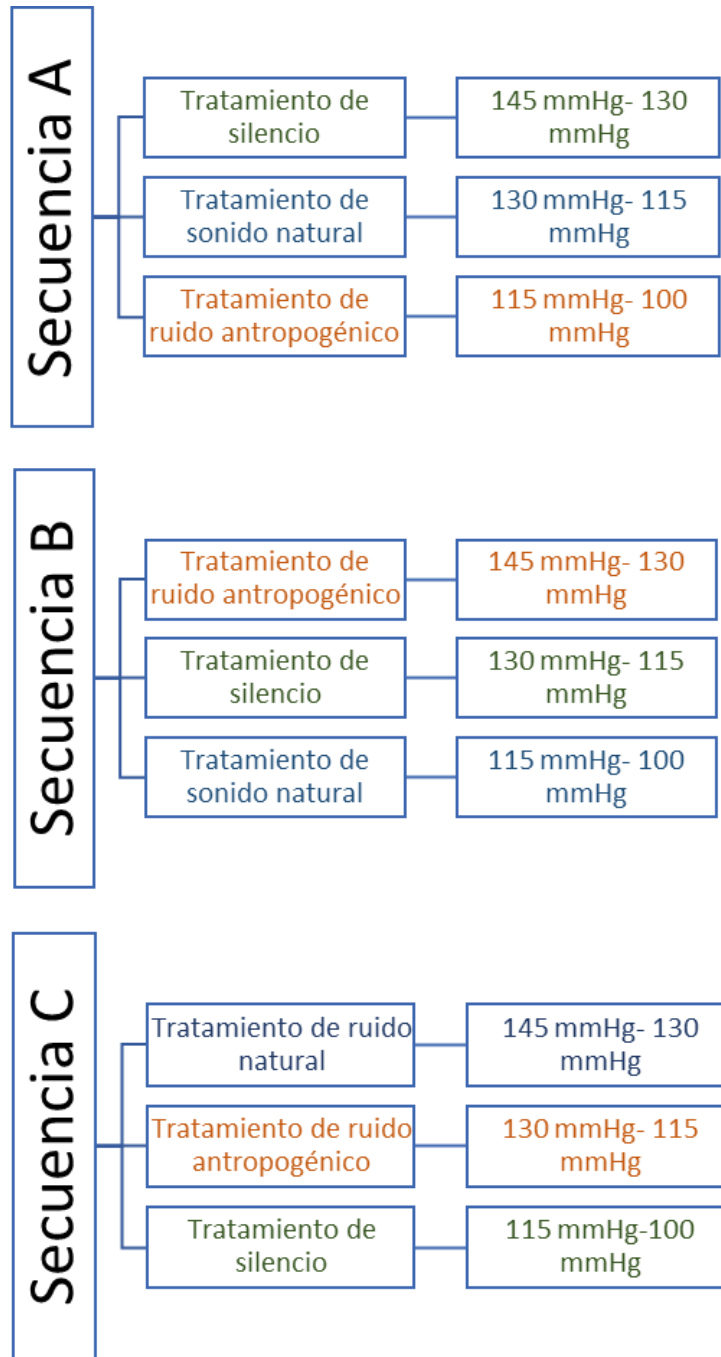


Figura 23. Secuencia (orden) de tratamientos acústicos divididas por rango de disponibilidad de oxígeno (niveles de normoxia).

RESULTADOS

Consumo de oxígeno en *Pagurus edwardsi* expuestos a distintos tratamientos acústicos

Los individuos expuestos a tratamientos acústicos antropogénico, natural y ausencia de ruidos (silencio) no obtuvieron diferencias significativas en el consumo de oxígeno en el tiempo dentro de parámetros de normoxia. En el análisis de la secuencia A (

Figura 24), se aprecia que, aunque se observan tendencias de diferencias en el consumo de oxígeno, el ruido antropogénico no influye significativamente en la variable de respuesta ($p > 0.05$), mientras que el tamaño del efecto indica que el tratamiento no representa una explicación a la variable de respuesta ($\eta^2_g = 0.25$). El análisis de la secuencia B (Figura 25) no se observa diferencia significativa en el consumo de oxígeno promedio de los ejemplares expuestos a tratamientos acústicos ($p = 0.46$), y un valor del tamaño del efecto de 0.23. En la secuencia C (Figura 26) se observa una influencia de valor significativo por parte de los tratamientos sobre el consumo de oxígeno promedio ($p = 0.01$). La comparación pareada indica diferencias significativas entre el tratamiento de sonidos naturales y silencio ($p = 0.02$), sin embargo, el ajuste de Bonferroni cambia el valor de p a 0.07.

Se realizó un ANOVA para detectar diferencias significativas en el orden de los tratamientos, al no cumplir los supuestos de normalidad y homocedasticidad se utilizó un análisis no paramétrico Kruskal-Wallis. No hubo diferencias significativas en el consumo de O₂ entre secuencias en individuos expuestos a sonido natural ($p = 0.07$). Se encontraron diferencias significativas entre secuencias en tratamientos antropogénico ($p = 0.02$) entre secuencia A - C (0.01) y silencio (0.00) entre secuencias A - B (0.02) y A - C (0.02). Ver Figuras Figura 27, Figura 28 y Figura 29.

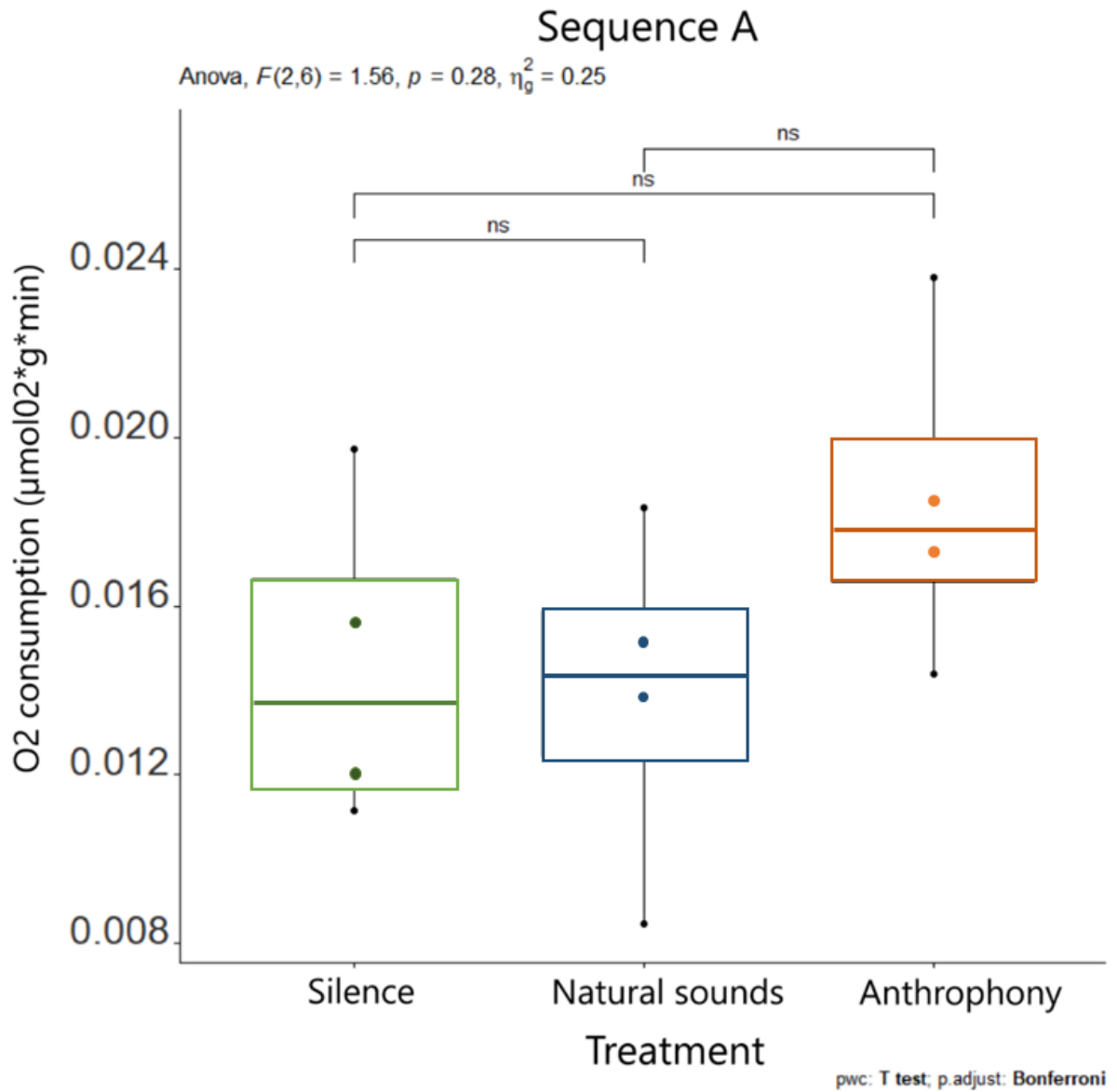


Figura 24. Promedio de tasa de consumo de oxígeno por minuto en cuatro individuos de *Pagurus edwardsi* expuestos al orden de tratamientos: silencio - sonidos naturales - ruido antropogénico (Sec. A)

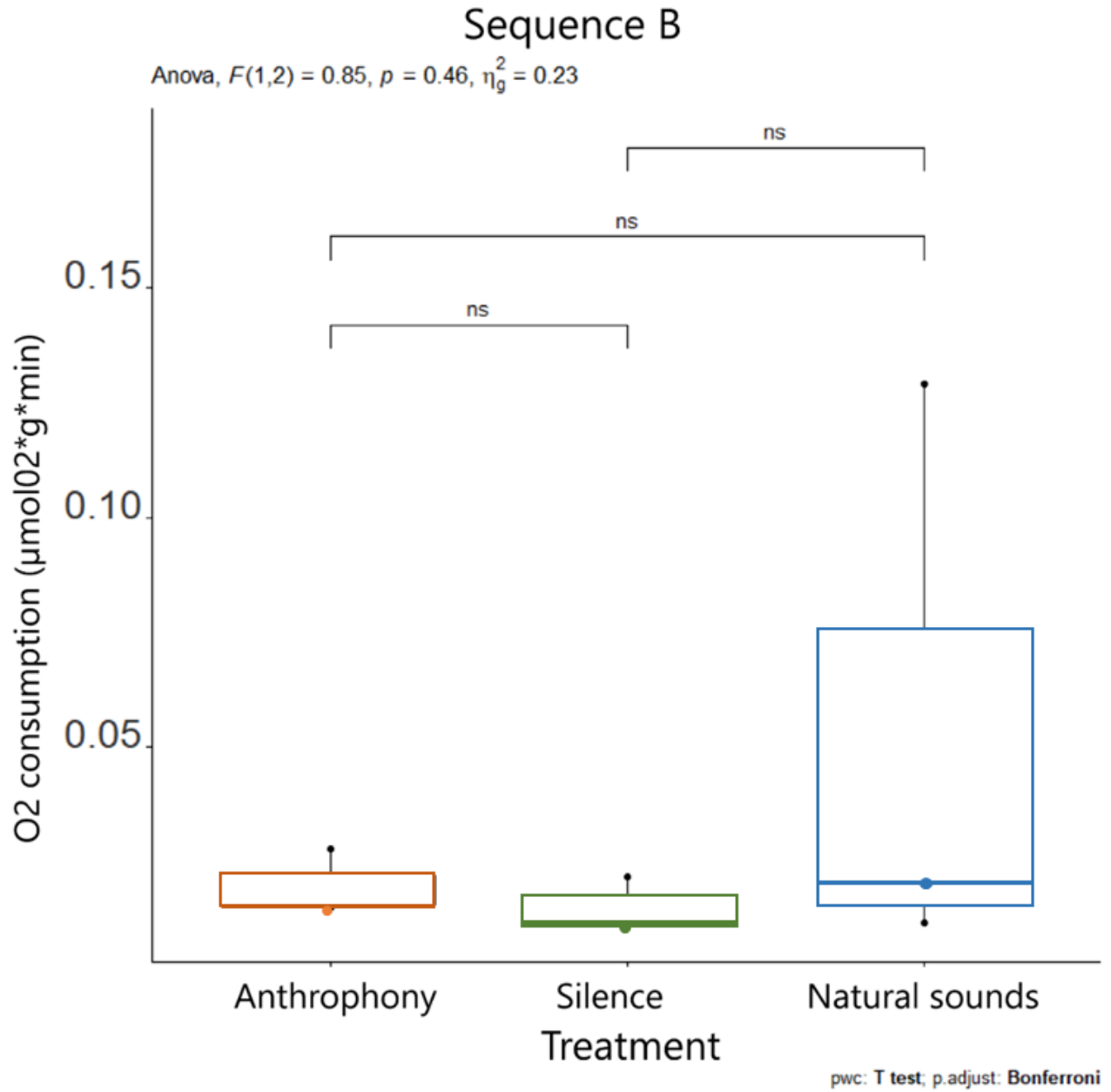


Figura 25. Promedio de tasa de consumo de oxígeno por minuto en cuatro individuos de *Pagurus edwardsi* expuestos al orden de tratamientos: ruido antropogénico - silencio - sonidos naturales (Sec. B)

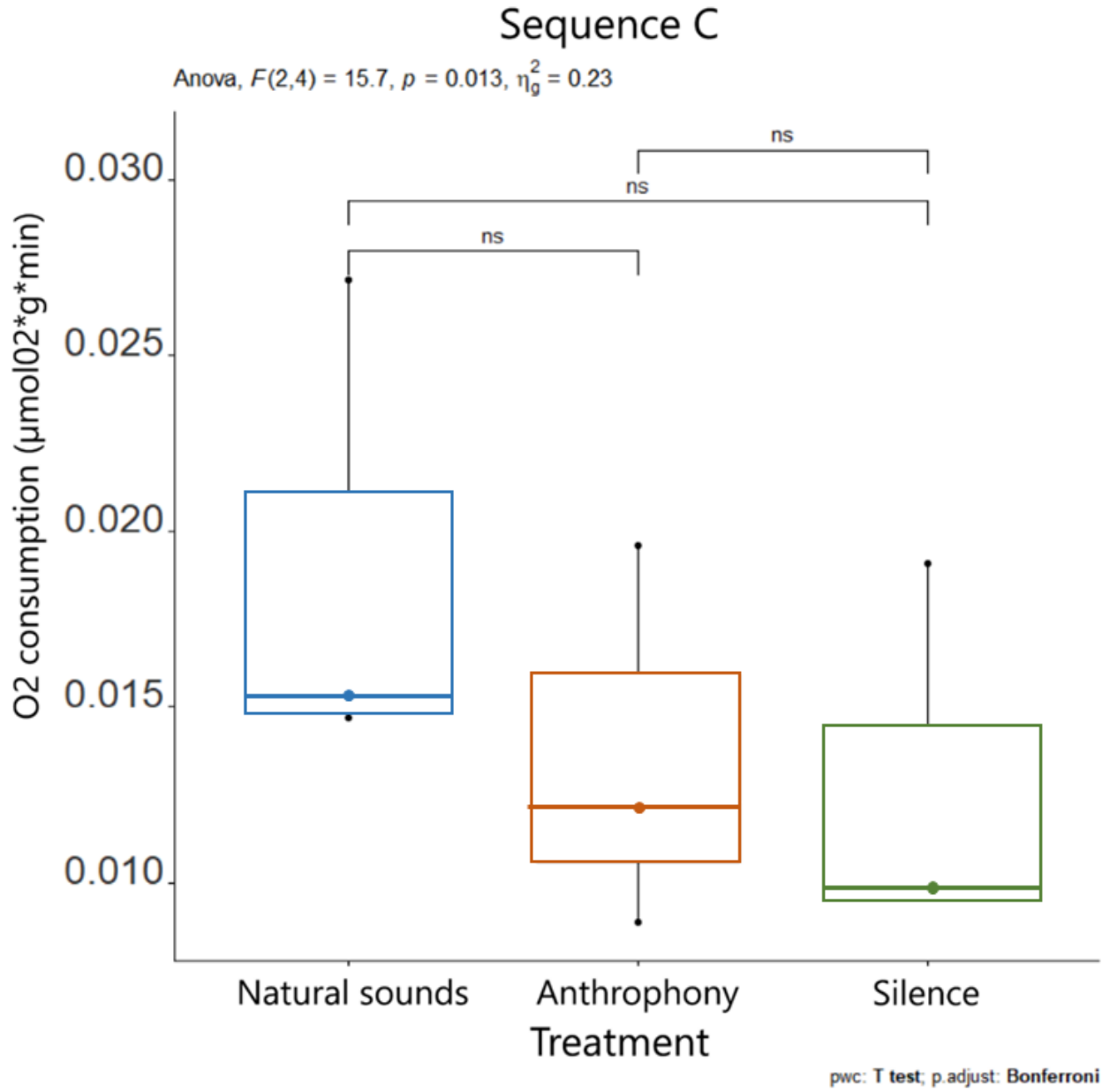


Figura 26. Promedio de tasa de consumo de oxígeno por minuto en cuatro individuos *Pagurus edwardsi* expuestos al orden de tratamientos: sonidos naturales - ruido antropogénico - silencio (Sec. C)

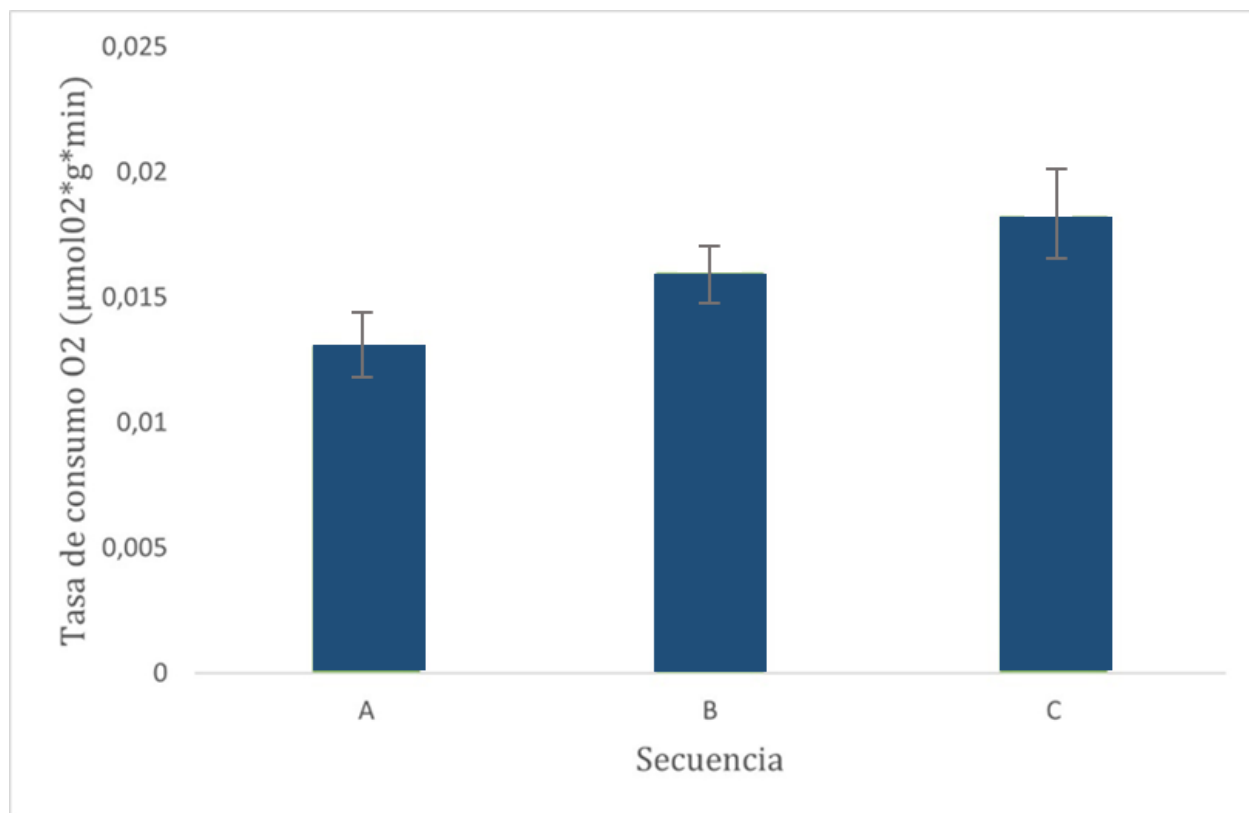


Figura 27. Variación de promedios de tasa de consumo de oxígeno de cangrejos expuestos a tratamiento de sonido natural en secuencias A, B y C.

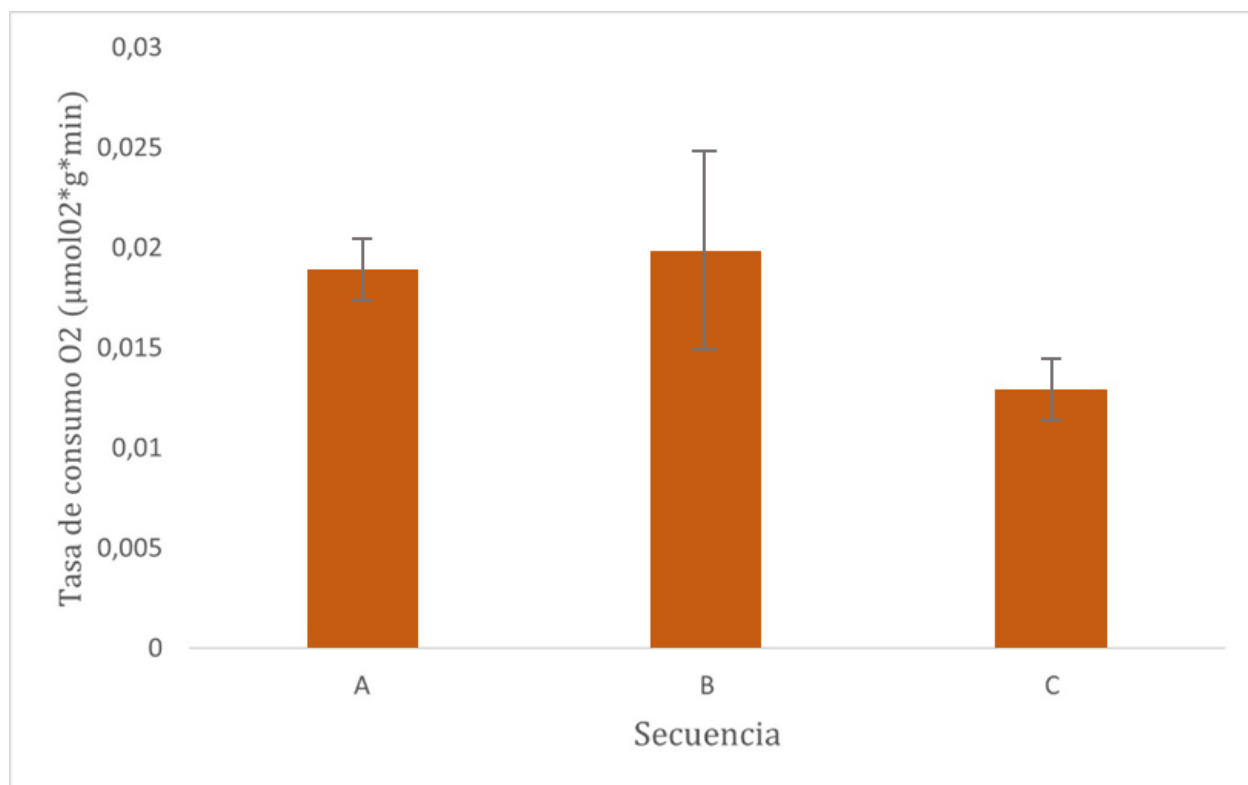


Figura 28. Variación de promedios de tasa de consumo de oxígeno de cangrejos expuestos a tratamiento de ruido antropogénico en secuencias A, B y C.

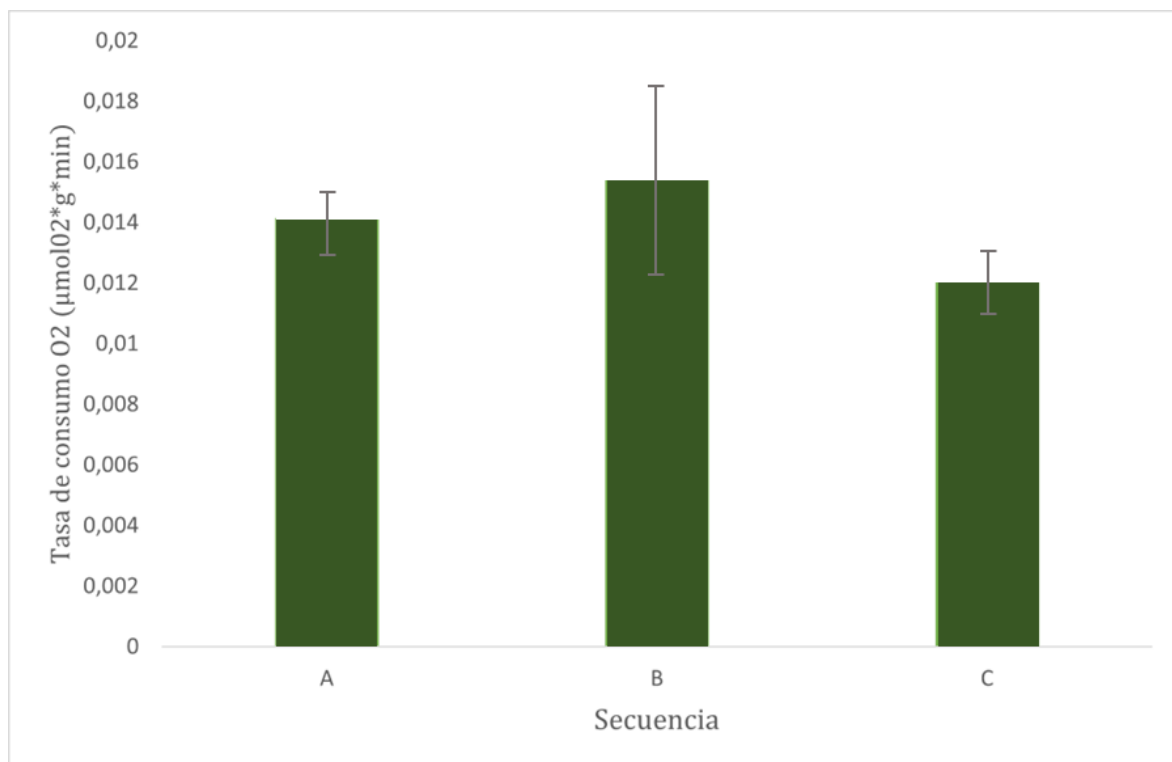


Figura 29. Variación de promedios de tasa de consumo de oxígeno de cangrejos en ausencia de sonidos en secuencias A, B y C.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los cangrejos (*Pagurus edwardsi*) no presentaron diferencias significativas en el consumo de oxígeno durante la exposición a sonido ambiental, ruido de salmoneras y silencio. A pesar de que las investigaciones de respuestas fisiológicas en especies marinas frente al ruido antropogénico mayoritariamente se concentran en mamíferos marinos (Wale 2022), se ha demostrado que este tipo de contaminación también afecta a invertebrados (e.g. Wale 2013, Ruiz-Ruiz et al. 2019). Si bien en esta investigación existe una tendencia al mayor consumo de oxígeno en presencia de ruido antropogénico en Secuencia A, en las demás no se presentó el mismo resultado. El único acercamiento a diferencias significativas entre tratamientos se da en la secuencia C, en donde se presenta un mayor consumo de oxígeno en ejemplares expuestos a sonido ambiente.

La presencia de implosiones de burbujas de cavitación de camarones pistoleros, familia que se encuentra en gran abundancia en costas chilenas (Carrasco et al. 2020) generan sonidos de muy alta frecuencia (Au & Banks 1997) y elevaron la intensidad del sonido en tratamiento de sonido natural. Al analizar una potencial influencia del orden de tratamientos en la tasa metabólica, lo que en este trabajo llamamos secuencia, se pudo determinar que el consumo de oxígeno en presencia de ruido antropogénico presenta diferencias en las secuencias A y C. Por otro lado, el consumo de oxígeno en presencia de silencio también se comporta de manera similar entre secuencias A-C y A-B. Los individuos parecen presentar cambios en la tasa de consumo cuando luego de ser expuestos a sonidos ambientales y silencio son expuestos a ruido antropogénico. Mientras que la tasa metabólica de cangrejos expuestos a una secuencia de inicio con silencio presenta diferencias con las demás en donde se comienza con sonido natural y ruido antropogénico.

En general, los resultados obtenidos pueden estar relacionados a ciertos factores, como pueden ser además, el tiempo de exposición al tratamiento, el número de réplicas que explica la alta variabilidad en los datos y la utilización de la presión sonora como parámetro acústico. Otras investigaciones han demostrado que los ejemplares expuestos a sonidos crónicos por extensos períodos de tiempo pueden resultar en alteraciones fisiológicas temporales e incluso permanentes (e. g. Payne et al. 2007). Sin embargo, resulta interesante esta variación de la tasa metabólica cuando los individuos pasan de un tratamiento de menor frecuencia a uno de mayor frecuencia. Los crustáceos marinos perciben el sonido mediante órganos sensoriales superficiales, cordotonaes internos y corporales como articulaciones que

reaccionan al movimiento del oleaje y de las partículas (Budelman 1992). Si bien en esta investigación se utilizó como parámetro acústico el nivel de presión sonora, se debe considerar la medición del movimiento de partículas al evaluar efectos del sonido en peces e invertebrados quienes responden en mayoría a este estímulo (Fay & Popper 2000). Esta aseveración tendría mucha implicancia en distintos estudios que llegan a resultados no significativos si se habla de la respuesta fisiológica de invertebrados y peces frente al ruido antropogénico (Popper & Hawkins 2018).

Una particularidad en el cangrejo ermitaño es que es huésped de conchas de gasterópodos, la cual es cambiada constantemente mientras va aumentando de tamaño. Por lo tanto, sería interesante investigar en un futuro si la exposición al ruido antropogénico impide encontrar la concha adecuada, debido a que la especie al estar sin concha ve afectada la supervivencia (Angel 2000).

Estos resultados nos acercan a comprender cómo reacciona la tasa metabólica de una especie de cangrejo ermitaño (*Pagurus edwardsi*) expuesto a ruido antropogénico de un centro salmonero en funcionamiento. Los resultados del primer capítulo arrojan sonidos persistentes y algunos crónicos que pueden ser potencialmente perjudiciales para cualquier especie que se encuentre alrededor. Las distintas metodologías para comprender la respuesta de los invertebrados frente a la exposición de ruido antropogénico han sufrido variaciones desde sus inicios, actualmente el 29% de estos estudios incluyen el movimiento de partículas debido a que todos los invertebrados y la mayoría de los peces responden a este estímulo más que al nivel de presión sonora (SPL) (Wale et al., 2021). Tomando en cuenta los resultados de este capítulo se sugiere la continuación de estas investigaciones y variar metodologías en tiempo de exposición al ruido incorporando el movimiento de partículas. Es de suma importancia generar más conocimiento sobre cómo los invertebrados marinos están siendo afectados por el ruido, pues son de gran importancia ecosistémica, ya que su gran biomasa es base alimenticia de muchas otras especies. Así mismo, incorporar al estudio peces nativos y salmones que están expuestos a este ruido crónico constante cercanos a las plataformas de cultivo.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES GENERALES

Los resultados de esta tesis detectan que un centro de cultivo de salmones en la Patagonia Norte de Chile genera diversos ruidos producto de sus múltiples funciones diarias, alcanzando hasta ~142 dB re 1 μ Pa, ~40 dB re 1 μ Pa más que el sonido natural. Por lo tanto, el paisaje sonoro estuvo intensamente dominado por la antropofonía con el 97% del tiempo total registrado. Sin embargo, estos ruidos no generaron cambios significativos en el consumo de oxígeno del cangrejo ermitaño examinado en laboratorio ($p > 0.05$). Estos resultados sugieren que la intensidad del ruido al que fueron expuestos los cangrejos no afectó la tasa metabólica a los ejemplares, a diferencia de lo que otros autores han podido encontrar (Peng et al. 2015, Kunc et al. 2016, Sabet et al. 2016, Simpson et al. 2015, James et al. 2017).

En esta investigación se detectó una gran variabilidad de tipos de ruidos, siendo las embarcaciones quienes contribuyen en gran medida al paisaje sonoro del lugar (~150Hz) tal como otros estudios también lo constatan (Bittencourt et al., 2020; Ferrier-Pages et al., 2021). Las zonas de alto tráfico marino influyen notoriamente en el aumento de los niveles de ruido (Bittencourt et al., 2014), por lo tanto, es necesario generar políticas para mitigar la contaminación acústica naviera (Vakili et al., 2021). El uso de generadores de electricidad contribuye a las emisiones de baja frecuencia (82 Hz) y se expresa como un ruido continuo, estando presente un 57% del total de la grabación y se puede sobreponer al rango de comunicación de algunos mamíferos marinos (Simard et al., 2010). Mientras que el sonido crónico de mayor presencia (2718 Hz) se estima puede corresponder a períodos de alimentación o buques de transporte de peces por su ciclicidad en el tiempo. Estos ruidos son audibles para distintas especies de mamíferos marinos (Erbe et al. 2016) y peces (Kenyon et al. 2008). Mientras que los ruidos considerados de baja frecuencia (<500 Hz) pueden enmascarar la comunicación de mamíferos marinos (Erbe et al. 2018) y algunos peces (Ladich 2013), los de alta frecuencia (>500 Hz) pueden generar afectaciones en la fisiología y el comportamiento de la fauna marina (McCauley et al. 2003, Hildebrand 2005, De Soto et al. 2013).

La afectación de la fauna marina expuesta a ruido antropogénico está bien documentada (Simpson et al. 2015, De soto 2016, Williams et al. 2022). Estas afectaciones están condicionadas por la intensidad y el tiempo de exposición a estos ruidos (McGregor et al. 2013), las cuales pueden resultar en daños temporales o permanentes (Götz & Janik, 2013). En este estudio la evaluación de la tasa metabólica no expresa diferencias significativas en el consumo de oxígeno de los individuos frente a la exposición de sonido natural, ruido antropogénico y silencio ($p > 0.05$). Mas bien se presentan diferencias relacionadas a

las secuencias, es decir, los individuos varían el consumo de oxígeno al pasar de un tratamiento a otro condicionados por el orden de los mismos. Se encontraron diferencias significativas del consumo de oxígeno frente al ruido antropogénico entre secuencias A - C (0.012) y silencio entre secuencias A – B (0.025) y A – C (0.025). Existen cambios en la tasa de consumo de oxígeno cuando luego de ser expuestos a sonidos ambientales y silencio son expuestos a ruido antropogénico, así como cuando la exposición inicial es silencio versus inicios de tratamientos con sonido natural y ruido antropogénico. En otras partes del mundo el criterio de ruido submarino indica que sonidos antropogénicos como las pistolas de aire no deben exceder los 180 dB re 1 μ Pa debido a los efectos adversos que produce en algunos mamíferos marinos como ballenas y odontocetos (Hastings, 2008). Dado que se detectó que al rededor del 30% de la muestra de grabación obtenida del fiordo presenta un paisaje sonoro de intensidad crónica ($SPL_{RMS} \sim 180$ dB re 1 μ Pa a 1 m del centro salmonero), se sugiere continuar con el estudio de las potenciales consecuencias tanto conductuales, fisiológicas y físicas que pueda generar la exposición constante de esta intensidad de ruido en distintos taxones.

Recientemente el MMA implementó el primer criterio de evaluación de ruido submarino en Chile, esta acción permite implementar requisitos y lineamientos de ruido para evaluar potenciales efectos del ruido submarino y zonas de afectación en proyectos nuevos. Sin embargo, es de suma importancia evaluar centros que ya se encuentran operando y quedaron fuera de esta normativa actual. Si bien esta iniciativa se considera un gran avance en la regulación del ruido antropogénico en el océano, al utilizar el nivel de presión sonora (SPL) rige con eficacia las potenciales afectaciones a mamíferos marinos. Para incluir a peces e invertebrados es necesario incorporar la medición del movimiento de partículas debido a que estas especies son sensibles a este estímulo y no al SPL (Popper y Hawkins 2018).

REFERENCIAS

- Ahrendt C, DeCoite M, Pulgar J et al (2021) A decade later, reviewing floating marine debris in Northern Chilean Patagonia. *Mar Pollut Bull* 168:112372
- Aimon, C. Simpson, S. D. Hazelwood, R. A. Bruintjes, R. & Urbina, M. A. (2021). Anthropogenic underwater vibrations are sensed and stressful for the shore crab *Carcinus maenas*. *Environmental Pollution*, 117148. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117148>
- André, M. et al. (2016). Contribution to the Understanding of Particle Motion Perception in Marine Invertebrates. In: Popper, A., Hawkins, A. (eds) *The Effects of Noise on Aquatic Life II. Advances in Experimental Medicine and Biology*, vol 875. Springer, New York, NY. https://doi-org.dti.sibucsc.cl/10.1007/978-1-4939-2981-8_6
- Angel, J. (2000). Effects of shell fit on the biology of the hermit crab *Pagurus longicarpus* (Say). *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*
- Atkinson S, Crocker D, Houser D, Mashburn K. Stress physiology in marine mammals: how well do they fit the terrestrial model? (2015). *J. Comp. Physiol. B*, 185, pp. 463-486
- Au W L & Hastings M C. (2008). *Principles of Marine Bioacoustics*; Springer: New York, NY, USA
- Bittencourt, L., Carvalho, R. R., Lailson-Brito, J., & Azevedo, A. F. (2014). Underwater noise pollution in a coastal tropical environment. *Marine Pollution Bulletin*, 83(1), 331-336.
- Bittencourt, L., Barbosa, M., Bisi, T. L., Lailson-Brito Jr, J., & Azevedo, A. F. (2020). Anthropogenic noise influences on marine soundscape variability across coastal areas. *Marine Pollution Bulletin*, 160, 111648.
- Branstetter BK, Sills JM (2022) Mechanisms of auditory masking in marine mammals. *Anim Cogn.* <https://doi.org/10.1007/s10071-022-01671-z>
- Brockington, S., & Clarke, A. (2001). The relative influence of temperature and food on the metabolism of a marine invertebrate. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 258(1), 87-99.
- Buchan SJ, Quiñones RA (2016) First insights into the oceanographic characteristics of a blue whale feeding ground in northern Patagonia, Chile. *Mar Ecol Prog Ser* 554, 183-199
- Budelmann, B. U. (1992). Hearing in Crustacea. In *Evolutionary Biology of Hearing* (D. B. Webster, R. R. Fay, and A. N. Popper, eds.), pp. 131–139. Heidelberg: Springer-Verlag
- Budelmann B. U. (1992b). "Hearing in n onarthropod invertebrates," in *The evolutionary biology of hearing*. Eds. Popper A. N., Webster D. B., Fay R. R. (New York: Springer-Verlag), 141–155.
- Buscaino G, Filiciotto F, Gristina et al (2011) Acoustic behaviour of the European spiny lobster *Palinurus elephas*. *Mar Ecol Prog Ser* 441:177-184.
- Carrasco, S. A., Bravo, M., Avilés, E., Ruiz, P., Yori, A., & Hinojosa, I. A. (2020). Exploring overlooked components of remote Southeast Pacific oceanic islands: larval and macrobenthic assemblages in reef habitats with distinct underwater soundscapes. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, Paper in this Special Issue please add details when known, <https://doi.org/10.1002/aqc.3359>
- Carroll ML, Cochrane S, Fieler R et al (2003) Organic enrichment of sediments from salmon farming in Norway: Environmental factors, management practices, and monitoring techniques. *Aquac* 226(1-4):165-180. <https://doi.org/10/cppnx4>
- Chahouri, A., Elouahmani, N., & Ouchene, H. (2022). Recent progress in marine noise pollution: A thorough review. *Chemosphere*, 291, 132983.
- Clark CW, Ellison WT, Southall B et al (2009) Acoustic masking in marine ecosystems: Intuitions, analysis, and implication. *Mar Ecol Prog Ser* 395:201–222. <https://doi.org/10.3354/meps08402>
- Correa C, Gross MR (2008). Chinook salmon invade southern South America. *Biol Invasions* 10(5):615-639. <https://doi.org/10/cgxpj>
- Cox, K. Brennan, L. P. Gerwing, T. G. Dudas, S. E. & Juanes, F. (2018). Sound the alarm: A meta-analysis on the effect of aquatic noise on fish behavior and physiology. *Global Change Biology*, 24(7), 3105-3116. <https://doi.org/10.1111/gcb.14106>
- Davidson, J. Bebak, J. & Mazik, P. (2009). The effects of aquaculture production noise on the growth, condition factor, feed conversion, and survival of rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*. *Aquaculture*, 288(3-4), 337-343. <https://doi.org/10/bfmw7j>

- De Soto, N., Delorme, N., Atkins, J. et al. (2013). Anthropogenic noise causes body malformations and delays development in marine larvae. *Sci Rep* 3, 2831. <https://doi.org/10.1038/srep02831>
- De Soto, N. A. (2016). Peer-reviewed studies on the effects of anthropogenic noise on marine invertebrates: from scallop larvae to giant squid. *The Effects of Noise on Aquatic Life II*, 17-26. Di Franco E, Pierson P, Di Iorio L, Calò A, Cottalorda JM, Derijard B et al (2020) Effects of marine noise pollution on Mediterranean fishes and invertebrates: a review. *Mar Pollut Bull* 159:111450. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111450>.
- Edmonds, N. J., Firmin, C. J., Goldsmith, D., Faulkner, R. C., & Wood, D. T. (2016). A review of crustacean sensitivity to high amplitude underwater noise: data needs for effective risk assessment in relation to UK commercial species. *Marine Pollution Bulletin*, 108(1-2), 5-11.
- Ellison WT, Southall BL, Clark C et al (2012) A new context-based approach to assess marine mammal behavioral responses to anthropogenic sounds: marine mammal behavioral responses to sound. *Conserv. Biol.* 26(1):21-28. <https://doi.org/10/czmxh8>
- Erbe C, Reichmuth C, Cunningham K et al (2016) Communication masking in marine mammals: A review and research strategy. *Mar Pollut Bull* 103:15–38.
- Erbe C, Williams R, Parsons M, et al (2018) Underwater noise from airplanes: An overlooked source of ocean noise. *Mar Pollut Bull* 137:656–661.
- Erbe, C., Dähne, M., Gordon, J., Herata, H., Houser, D. S., Koschinski, S., ... & Janik, V. M. (2019). Managing the effects of noise from ship traffic, seismic surveying and construction on marine mammals in Antarctica. *Frontiers in Marine Science*, 6, 647.
- Farina A, (2014) *Soundscape Ecology*. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7374-5>
- Figueroa-Muñoz G, Correa-Araneda F, Cid-Aguayo B et al (2022) Co-management of Chile's escaped farmed salmon. *Science*, 378(6624):1060-1061.
- FAO (2018) *El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2018 (SOFIA): Cumplir los objetivos de Desarrollo sostenible*. Food & Agriculture Org.
- Fay, R. R., and Popper, A. N. (2000). Evolution of hearing in vertebrates: The inner ears and processing, *Hear. Res.* 149, 1–10. [https://doi.org/10.1016/S0378-5955\(00\)00168-4](https://doi.org/10.1016/S0378-5955(00)00168-4)
- Ferrier-Pagès, C., Leal, M. C., Calado, R., Schmid, D. W., Bertucci, F., Lecchini, D., & Allemand, D. (2021). Noise pollution on coral reefs? A yet underestimated threat to coral reef communities. *Marine Pollution Bulletin*, 165, 112129.
- Försterra G, Häussermann V, Laudien J et al (2014) Mass die-off of the cold-water coral *Desmophyllum dianthus* in the Chilean Patagonian fjord region. *Bull Mar Sci* 90 (3):895-899
- Frisk, G. V. (2012). Noiseconomics: The relationship between ambient noise levels in the sea and global economic trends. *Scientific reports*, 2(1), 437.
- Gordon TA, Radford AN, Davidson IK et al (2019) Acoustic enrichment can enhance fish community development on degraded coral reef habitat. *Nat. Commun*, 10(1):5414.
- Götz, T. & Janik, V. (2013). Acoustic deterrent devices to prevent pinniped depredation: Efficiency, conservation concerns and possible solutions. *Marine Ecology Progress Series*, 492, 285-302. <https://doi.org/10/f5gbn3>
- Guh, Y. J., Tseng, Y. C., & Shao, Y. T. (2021). To cope with a changing aquatic soundscape: Neuroendocrine and antioxidant responses to chronic noise stress in fish. *General and Comparative Endocrinology*, 314, 113918.
- Gullett, W. (2022). Tackling anthropogenic underwater noise through the Convention on Biological Diversity: Progress and future development. *Marine Policy*, 146, 105293.
- Hastings, M. C. (2008). Coming to terms with the effects of ocean noise on marine animals. *Acoustics today*, 4(2), 22-34.
- Hildebrand, J. (2005). Impacts of Anthropogenic. *Marine mammal research: conservation beyond crisis*, 101.
- Häussermann V, Försterra G (2007) Large assemblages of cold-water corals in Chile: a summary of recent findings and potential impacts. *Bull Mar Sci* 81:195e208.
- Hawkins, A.D., Pembroke, A.E. & Popper, A.N. Information gaps in understanding the effects of noise on fishes and invertebrates. *Rev Fish Biol Fisheries* 25, 39–64 (2015). <https://doi.org/10.1007/s11160-014-9369-3>.
- Hawkins, A. D. (2023). The Adverse Effects of Underwater Sound upon Fishes and Invertebrates. *International Marine Science Journal*, 1(3), 1-16.
- Hildebrand JA (2009) Anthropogenic and natural sources of ambient noise in the ocean. *Mar Ecol Prog Ser* 395:5–20.

- Hinojosa IA, Thiel M (2009) Floating marine debris in fjords, gulfs and channels of southern Chile. *Mar Pollut Bull* 58(3):341-350. <https://doi.org/10/bcwdq4>
- Hinojosa IA, Green BS, Gardner C et al (2016) Reef sound as an orientation cue for shoreward migration by pueruli of the rock lobster, *Jasus edwardsii*. *PLoS one* 11(6):e0157862.
- Hu, Z., Feng, J., Song, H., Zhou, C., Yang, M. J., Shi, P., ... & Zhang, T. (2022). Metabolic response of *Mercenaria mercenaria* under heat and hypoxia stress by widely targeted metabolomic approach. *Science of The Total Environment*, 809, 151172.
- Hucke-Gaete R, Osman LP, Moreno CA et al (2004). Discovery of a blue whale feeding and nursing ground in southern Chile. *Proc Royal Soc B* 271:S170-S173
- Hucke-Gaete R, Haro D, Torres-Florez JP et al (2013) A historical feeding ground for humpback whales in the eastern South Pacific revisited: the case of northern Patagonia, Chile. *Aquat Conserv* 23:858– 867
- Ikeda, T. (1985). Metabolic rates of epipelagic marine zooplankton as a function of body mass and temperature. *Marine Biology*, 85(1), 1-11.
- Informe Sectorial de Pesca y Acuicultura 2023.
- Jensen, F. Bejder, L. Wahlberg, M. Aguilar de Soto, N. Johnson, M. & Madsen, P. (2009). Vessel noise effects on delphinid communication. *Marine Ecology Progress Series*, 395, 161-175. <https://doi.org/10.3354/meps08204>
- Kasumyan AO (2005) Structure and Function of the Auditory System in Fishes. *J Ichthyol* 45: S223–S270.
- Kenyon, T., Ladich, F. & Yan, H. A comparative study of hearing ability in fishes: the auditory brainstem response approach. *J Comp Physiol A* 182, 307–318 (1998). <https://doi.org/10.1007/s003590050181>
- Kunc Hansjoerg P., McLaughlin Kirsty Elizabeth and Schmidt Rouven (2016). Aquatic noise pollution: implications for individuals, populations, and ecosystems *Proc. R. Soc. B*.2832016083920160839
- Kusku, H., Yigit, Ü., Yilmaz, S., Yigit, M., & Ergün, S. (2020). Acoustic effects of underwater drilling and piling noise on growth and physiological response of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquaculture Research*, 51(8), 3166-3174.
- Ladich, F. (2013). Effects of Noise on Sound Detection and Acoustic Communication in Fishes. In: Brumm, H. (eds) *Animal Communication and Noise. Animal Signals and Communication*, vol 2. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-41494-7_4
- Ladich, F. (2013). Effects of Noise on Sound Detection and Acoustic Communication in Fishes. In: Brumm, H. (eds) *Animal Communication and Noise. Animal Signals and Communication*, vol 2. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-41494-7_4.
- Lillis A, Eggleston DB, Bohnenstiehl DR (2013) Oyster larvae settle in response to habitat-associated underwater sounds. *PLoS One* 8:e79337
- Liu KK, Atkinson L, Quiñones R et al (2010) Carbon and nutrient fluxes in continental margins: a global synthesis. Springer Science & Business Media.
- Liu S, Qiao G, Ismail A et al (2013) Covert underwater acoustic communication using whale noise masking on DSSS signal. In 2013 MTS/IEEE OCEANS-Bergen (pp. 1-6). IEEE. doi: 10.1109/OCEANS-Bergen.2013.6608007.
- Lobel PS (2002) Diversity of fish spawning sounds and the application of passive acoustic monitoring. *Bioacoustics* 12(2-3):286-289.
- Liu, Y., Wang, X., Li, Y., & Chen, X. (2018). Metabolomic analysis of short-term sulfamethazine exposure on marine medaka (*Oryzias melastigma*) by comprehensive two-dimensional gas chromatography-time-of-flight mass spectrometry. *Aquatic toxicology*, 198, 269-275.
- Mann DA, Casper BM, Boyle KS et al (2007) On the attraction of larval fishes to reef sounds. *Mar Ecol Prog Ser* 338:307-310.
- Marley, S. A., Salgado Kent, C. P., Erbe, C., & Parnum, I. M. (2017). Effects of vessel traffic and underwater noise on the movement, behaviour and vocalisations of bottlenose dolphins in an urbanised estuary. *Scientific Reports*, 7(1), 13437.
- Masud, N., Hayes, L., Crivelli, D., Grigg, S., & Cable, J. (2020). Noise pollution: acute noise exposure increases susceptibility to disease and chronic exposure reduces host survival. *Royal Society Open Science*, 7(9), 200172.
- McCauley RD, Cato DH (2000) Patterns of fish calling in a nearshore environment in the Great Barrier Reef. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci* 355(1401):1289-1293.

- McCauley, R. D., Fewtrell, J., & Popper, A. N. (2003). High intensity anthropogenic sound damages fish ears. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 113(1), 638-642.
- McDonald MA, Hildebrand JA, Wiggins SM (2006) Increases in deep ocean ambient noise in the Northeast Pacific west of San Nicolas Island, California. *J Acoust Soc Am* 120(2): 711–718. <https://doi.org/10.1121/1.2216565>
- McDonald MA, Hildebrand JA, Wiggins SM et al (2008) A 50 Year comparison of ambient ocean noise near San Clemente Island: A bathymetrically complex coastal region off Southern California. *J Acoust Soc Am* 124(4):1985–1992. <https://doi.org/10.1121/1.2967889>
- McGregor, P. K. Horn, A. G. Leonard, M. L. & Thomsen, F. (2013). *Anthropogenic Noise and Conservation*. En H. Brumm (Ed.), *Animal Communication and Noise* (Vol. 2, pp. 409-444). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-41494-7_14
- Miranda CD, Zemelman R (2002) Antimicrobial multiresistance in bacteria isolated from freshwater Chilean salmon farms. *Sci. Total Environ* 293(1-3):207-218. <https://doi.org/10/bgmf79>
- Molinet C, Solari ME, Díaz M et al (2018). Fragmentos de la historia ambiental del Sistema de Fiordos y Canales NorPatagónicos, Sur de Chile: dos siglos de explotación. *Magallania* 46:107–128.
- Moore SE, Reeves RR, Southall B et al (2012) A new framework for assessing the effects of anthropogenic sound on marine mammals in a rapidly changing Arctic. *BioScience*, 62(3):289–295 <https://doi.org/10.1525/bio.2012.62.3.10>
- Myrberg A (1990). The effects of man-made noise on the behavior of marine animals, *Environment International*, Vol 16 (4): 575-586 [https://doi.org/10.1016/0160-4120\(90\)90028-5](https://doi.org/10.1016/0160-4120(90)90028-5).
- Mills, S. C., Beldade, R., Henry, L., Laverty, D., Nedelec, S. L., Simpson, S. D., & Radford, A. N. (2020). Hormonal and behavioural effects of motorboat noise on wild coral reef fish. *Environmental Pollution*, 262, 114250.
- Nabi, G., McLaughlin, R. W., Hao, Y., Wang, K., Zeng, X., Khan, S., & Wang, D. (2018). The possible effects of anthropogenic acoustic pollution on marine mammals' reproduction: an emerging threat to animal extinction. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 19338-19345.
- Nedelec, S. L., Mills, S. C., Lecchini, D., Nedelec, B., Simpson, S. D., & Radford, A. N. (2016). Repeated exposure to noise increases tolerance in a coral reef fish. *Environmental pollution*, 216, 428-436.
- Nedelec S. L., Radford A. N., Simpson S. D., Nedelec B., Lecchini D., Mills S. C. (2014). Anthropogenic noise playback impairs embryonic development and increases mortality in a marine invertebrate. *Sci. Rep.* 4 (Figure 1), 13–16. doi: 10.1038/srep05891
- Olivier, F., Gigot, M., Mathias, D., Jezequel, Y., Meziane, T., l'Her, C., ... & Bonnel, J. (2023). Assessing the impacts of anthropogenic sounds on early stages of benthic invertebrates: The “Larvosonic system”. *Limnology and Oceanography: Methods*, 21(2), 53-68.
- Patek SN, Caldwell RL (2006) The stomatopod rumble: low frequency sound production in *Hemisquilla californiensis*. *Mar Freshw Behav Physiol* 39(2):99-111
- Payne, J. Andrews, C. Cook, A. and Christian, J. (2007) Pilot Study on the Effects of Seismic Air Gun. Noise on Lobster (*Homarus americanus*), *Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci.* 2712, pp. 1–46.
- Peng, C.; Zhao, X.; Liu, G. (2015). Noise in the Sea and Its Impacts on Marine Organisms. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 12, 12304-12323. <https://doi.org/10.3390/ijerph121012304>
- Poblete EG, Drakeford BM, Ferreira FH et al (2019) The impact of trade and markets on Chilean Atlantic salmon farming. *Aquac Int* 27(5):1465-1483 <https://doi.org/10/gg2625>
- Popper, A. N., & Hawkins, A. D. (2018). The importance of particle motion to fishes and invertebrates. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 143(1), 470-488.
- Popper, A. N. Salmon, M. & Horch, K. W. (2001). Acoustic detection and communication by decapod crustaceans. *Journal of Comparative Physiology A: Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*, 187(2), 83-89. <https://doi.org/10.1007/s003590100184>
- Popper, A. N. Hawkins A. D. The importance of particle motion to fishes and invertebrates. (2018). *J Acoust Soc Am* 1 January; 143 (1): 470–488. <https://doi.org/10.1121/1.5021594>
- Popper AN, Salmon M, Horch KW (2001) Acoustic detection and communication by decapod crustaceans. *J Comp Physiol A Neuroethol Sens Neural Behav Physiol* 187(2):83-89 <https://doi.org/10.1007/s003590100184>
- Popper, A. N., & Hastings, M. C. (2009). The effects of anthropogenic sources of sound on fishes. *Journal of fish biology*, 75(3), 455-489.
- Popper, A. N., & Hawkins, A. D. (2018). The importance of particle motion to fishes and invertebrates. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 143(1), 470-488.

- Radford C, Slater M (2019) Soundscapes in aquaculture systems. *Aquac Environ Interact* 11, 53-62
<https://doi.org/10.3354/aei00293>
- Rako-Gospić, N., & Picciulin, M. (2019). Underwater noise: Sources and effects on marine life. In *World Seas: an environmental evaluation* (pp. 367-389). Academic Press.
- Regnault, M. and Lagardere, J. Effects of ambient noise on the metabolic level of Crangon crangon (Decapoda, Natantia). (1983) vol. 11, pp. 71–78.
- Retamal, M. (1994). Los decápodos de Chile. Universidad de Concepción, Concepción, Chile. 256 pág.
- Retamal, M. & Gorny, M. (2001). Decápodos de los fiordos de Chile (CIMAR 3 Fiordos). Decapods collected into the fjords of Southern Chile. *Cienc. Tecnol. Mar.* 24: 91-97.
- Retamal, M. A. (2007). Nota sobre la biodiversidad carcinologica (Stomatopoda y Decapoda) en los fiordos occidentales entre el Guafo y estero Elefantes. *Ciencia y Tecnología del Mar*, 30(1).
- Roberts, L., Cheesman, S., Elliott, M., & Breithaupt, T. (2016). Sensitivity of Pagurus bernhardus (L.) to substrate-borne vibration and anthropogenic noise. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 474, 185-194.
- Romano TA, Keogh MJ, Kelly C, Feng P and others. (2004). Anthropogenic sound and marine mammal health: measures of the nervous and immune systems before and after intense sound exposure. *Can J Fish Aquat Sci* 61: 1124–1134
- Ruiz-Ruiz, P. A. Hinojosa, I. A. Urzua, A. & Urbina, M. A. (2019). Anthropogenic noise disrupts mating behavior and metabolic rate in a marine invertebrate. 040006. <https://doi.org/10.1121/2.0001302>.
- Sabet, S. S., Van Dooren, D., & Slabbekoorn, H. (2016). Son et lumière: Sound and light effects on spatial distribution and swimming behavior in captive zebrafish. *Environmental pollution*, 212, 480-488.
- Sabet, S.S., Neo, Y.Y., Slabbekoorn, H. (2016). Impact of Anthropogenic Noise on Aquatic Animals: From Single Species to Community-Level Effects. In: Popper, A., Hawkins, A. (eds) *The Effects of Noise on Aquatic Life II. Advances in Experimental Medicine and Biology*, vol 875. Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2981-8_118
- Scholik, A. R., & Yan, H. Y. (2001). Effects of underwater noise on auditory sensitivity of a cyprinid fish. *Hearing research*, 152(1-2), 17-24.
- Sierra-Flores, R., Atack, T., Migaud, H., & Davie, A. (2015). Stress response to anthropogenic noise in Atlantic cod *Gadus morhua* L. *Aquacultural engineering*, 67, 67-76.
- Simard, Y., Lepage, R., & Gervaise, C. (2010). Anthropogenic sound exposure of marine mammals from seaways: Estimates for Lower St. Lawrence Seaway, eastern Canada. *Applied Acoustics*, 71(11), 1093-1098.
- Simpson, S. D., Purser, J., and Radford, A. N. (2015). Anthropogenic noise compromises antipredator behaviour in European eels. *Glob. Chang. Biol.* 21, 586–593. doi: 10.1111/gcb.12685
- Skog, T. E., Hylland, K., Torstensen, B. E., & Berntssen, M. H. (2003). Salmon farming affects the fatty acid composition and taste of wild saithe *Pollachius virens* L. *Aquaculture Research*, 34(12), 999-1007.
- Slater, M., Fricke, E., Weiss, M., Rebelein, A., Bögner, M., Preece, M., & Radford, C. (2020). The impact of aquaculture soundscapes on whiteleg shrimp *Litopenaeus vannamei* and Atlantic salmon *Salmo salar*. *Aquaculture Environment Interactions*, 12, 167-177.
- Solé M, Constenla M, Padrós F, et al (2021) Farmed salmon show no pathological alterations when exposed to acoustic treatment for sea lice infestation. *J Mar Sci Eng* 9(10):1114.
- Solé Marta, Kaifu Kenzo, Mooney T. Aran, Nedelec Sophie L., Olivier Frédéric, Radford Andrew N., Vazzana Mirella, Wale Matthew A., Semmens Jayson M., Simpson Stephen D., Buscaino Giuseppa, Hawkins Anthony, Aguilar de Soto Natacha, Akamatsu Tomoari, Chauvaud Laurent, Day Ryan D., Fitzgibbon Quinn, McCauley Robert D., André Michel. (2023). Marine invertebrates and noise. *Frontiers in Marine Science* 10: 2296-7745
- Southall, B. L., Schusterman, R. J., & Kastak, D. (2000). Masking in three pinnipeds: Underwater, low-frequency critical ratios. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 108(3), 1322-1326.
- Southall BL, Bowles AE, Ellison WT et al (2007) Marine mammal noise exposure criteria. *Aquat Mamm* 33(4):411–521
- Southall BL, Finneran JJ, Reichmuth C, et al (2019) Marine mammal noise exposure criteria: updated scientific recommendations for residual hearing effects. *Aquat Mamm* 45(5): 569–572.
<https://doi.org/10.1578/am.45.5.2019.569>
- Staaterman, E., Gallagher, A. J., Holder, P. E., Reid, C. H., Altieri, A. H., Ogburn, M. B., ... & Cooke, S. J. (2020). Exposure to boat noise in the field yields minimal stress response in wild reef fish. *Aquatic Biology*, 29, 93-103.

- Stojanovic M, Preisig J (2009) Underwater acoustic communication channels: Propagation models and statistical characterization. *IEEE Commun Mag* 47(1):84-89 <https://doi.org/10/b9w6ng>.
- Tecklin D (2016) Sensing the limits of fixed marine property rights in changing coastal ecosystems: salmon aquaculture concessions, crises, and governance challenges in southern Chile. *J Int Wildl Law Policy* 19(4):284-300.
- Vakili, S., Ölçer, A. I., & Ballini, F. (2021). The development of a transdisciplinary policy framework for shipping companies to mitigate underwater noise pollution from commercial vessels. *Marine Pollution Bulletin*, 171, 112687.
- Versluis M, Schmitz B, Von der Heydt A et al (2000) How snapping shrimp snap: through cavitating bubbles. *Science*, 289(5487):2114-2117
- Vester H, Timme M (2010) Call for cooperation to contain damage by Chile's salmon farms. *Nature*, 465(7300):869-869.
- Wysocki LE, Ladich F (2001) The ontogenetic development of auditory sensitivity, vocalization and acoustic communication in the labyrinth fish *Trichopsis vittata*. *J Comp Physiol A Neuroethol Sens Neural Behav Physiol* 187(3):177-187. <https://doi.org/10/cx8vws>.
- Wale MA, Simpson SD, Radford AN. (2013). Size-dependent physiological responses of shore crabs to single and repeated playback of ship noise. *Biol Lett* 9: 20121194. <http://dx.doi.org/10.1098/rsbl.2012.1194>
- Wale, M. A., Briers, R. A., & Diele, K. (2021). Marine invertebrate anthropogenic noise research—Trends in methods and future directions. *Marine Pollution Bulletin*, 173, 112958.
- Wallace, B. P., & Jones, T. T. (2008). What makes marine turtles go: a review of metabolic rates and their consequences. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 356(1-2), 8-24.
- Whitehead H, Weilgart L (1991) Patterns of visually observable behaviour and vocalizations in groups of female sperm whales. *Behaviour* 118(3-4):275-296 <https://doi.org/10/d3px6v>
- Wilson L, Constantine R, Pine MK, Farcas A, Radford CA. Impact of small boat sound on the listening space of *Pempheris adspersa*, *Forsterygion lapillum*, *Alpheus richardsoni* and *Ovalipes catharus*. *Sci Rep*. 2023 Apr 28;13(1):7007. doi: 10.1038/s41598-023-33684-0. PMID: 37117196; PMCID: PMC10147705.
- Williams R, Wright AJ, Ashe E et al (2015) Impacts of anthropogenic noise on marine life: Publication patterns, new discoveries, and future directions in research and management. *Ocean Coast Manag* 115:17-24.
- Williams R, Cholewiak D, Clark CW et al (2020). Chronic ocean noise and cetacean population models. *J Cetacean Res Manag* 21:85–94.
- Williams, T., Blackwell, S., Tervo, O., Garde, E., Sinding, M., Richter, B., Heide-Jørgensen, M (2022). Racing time: Physiological rates and metabolic scaling in marine mammals. *Integrative and Comparative Biology*, icac054.
- Winn, H. E. & Hazlett, B. A. (1962). Sound Production and Associated Behavior of Bermuda Crustaceans (*Panulirus*, *Gonodactylus*, *Alpheus*, and *Synalpheus*). *Crustaceana*, 4(1), 25-38. <https://doi.org/10.1163/156854062X00030>
- Wright, A. J., Soto, N. A., Baldwin, A. L., Bateson, M., Beale, C. M., Clark, C., ... & Martin, V. (2007). Anthropogenic noise as a stressor in animals: a multidisciplinary perspective. *International Journal of Comparative Psychology*, 20(2).
- Wright, A. J., Soto, N. A., Baldwin, A. L., Bateson, M., Beale, C. M., Clark, C., ... & Martin, V. (2007). Do marine mammals experience stress related to anthropogenic noise?. *International Journal of Comparative Psychology*, 20(2).
- Wysocki, L. E., & Ladich, F. (2005). Effects of noise exposure on click detection and the temporal resolution ability of the goldfish auditory system. *Hearing research*, 201(1-2), 27-36.
- Wysocki, L. E., Dittami, J. P., & Ladich, F. (2006). Ship noise and cortisol secretion in European freshwater fishes. *Biological conservation*, 128(4), 501-508.
- Zhang, Y., Liu, C., Liu, J., Liu, X., Tu, Z., Zheng, Y., ... & Hu, M. (2022). Multi-omics reveals response mechanism of liver metabolism of hybrid sturgeon under ship noise stress. *Science of The Total Environment*, 851, 158348.
- Zhou, W. Xu, X. Tu, X. & Chen, Y. (2016). Preliminary exploration for effects of sound stimulus on the movement behavior of *Litopenaeus vannamei*. 2016 IEEE/OES China Ocean Acoustics (COA), 1-6. <https://doi.org/10.1109/COA.2016.7535775>.