

ARTÍCULO / ARTICLE

Estimación de tallas de anchoveta (*Engraulis ringens*) mediante ecosonda en áreas pesqueras de difícil acceso en la Región de Atacama, Chile

Length estimation of anchovy (*Engraulis ringens*) using echosounder in difficult to access fishing areas in the Atacama Region, Chile

Luis La Cruz^{1*}

0000-0002-2208-4538

luis.lacruz@ifop.cl

Javier Legua¹

0000-0001-6539-6745

javier.legua@ifop.cl

Adrián Ibieta¹

0000-0002-1220-5850

adrian.ibieta@ifop.cl

Cristián Henríquez-Pastene¹

0009-0005-1221-3817

cristian.henriquez@ifop.cl

Francisco Leiva-Dietz¹

0000-0003-4304-6247

francisco.leiva@ifop.cl

1. Instituto de Fomento Pesquero (IFOP), Valparaíso, Chile

* Autor de correspondencia/Corresponding Author:

Recibido / Received: 07/03/2024

Aceptado / Accepted: 21/04/2025

Citación / Citation: La Cruz, L.; Henríquez-Pastene, C.; Ibieta, A.; Leiva-Dietz, F. 2025. Estimación de tallas de anchoveta (*Engraulis ringens*) mediante ecosonda en áreas pesqueras de difícil acceso. Bol. Invest. Mar. Cost., 54(2): 70-89

RESUMEN

Este estudio explora el uso de métodos hidroacústicos para estimar la distribución de las longitudes de anchovetas, ofreciendo una alternativa a los métodos tradicionales de muestreo biológico. Se recolectaron datos acústicos utilizando dos algoritmos: Single Target y Tracked Target, junto con un modelo de conversión de TS a longitud específico para anchoveta. Los resultados mostraron que el algoritmo Single Target estimó tamaños de 8,5 a 16 cm, con una moda de 12,0 cm, mientras que el algoritmo Tracked Target identificó un rango de 9 a 14 cm, con una moda de 11,5 cm. Las anchovetas juveniles representaron el 45,8% y el 51,2% de la población en cada algoritmo. Además, la profundidad de los ecos osciló entre 3,92 y 43,95 m, lo que sugiere que las anchovetas de mayor longitud tienden a habitar zonas costeras más profundas, posiblemente como una adaptación fisiológica a estos ambientes. El estudio demuestra la efectividad de la hidroacústica para estimar las tallas de peces, especialmente en áreas donde el muestreo tradicional es inaccesible o difícil de llevar a cabo. Este enfoque contribuye a comprender la dinámica de las poblaciones de peces y abre la puerta a futuros estudios.

Palabras clave: Pelágico, anchoveta, pesquerías, monitoreo, ecosonda.

ABSTRACT

This study explores the use of hydroacoustic methods to estimate the size distribution of Peruvian anchoveta, offering an alternative to traditional biological sampling methods. Acoustic data were collected using two algorithms: Single Target and Tracked Target, along with a TS to length conversion model specific to Peruvian anchoveta. The results showed that the Single Target algorithm estimated sizes ranging from 8.5 to 16 cm, with a mode of 12.0 cm, while the Tracked Target algorithm identified a range of 9 to 14 cm, with a mode of 11.5 cm. Juvenile anchovies represented 45.8% and 51.2% of the population in each algorithm, respectively. Additionally, the depth of the echoes ranged from 3.92 to 43.95 m, suggesting that larger Peruvian anchoveta tend to inhabit deeper coastal zones, possibly as a physiological adaptation to these environments. The study demonstrates the effectiveness of hydroacoustics for estimating fish sizes, especially in areas where traditional sampling is inaccessible or difficult to carry out. This approach contributes to understanding fish population dynamics and opens the door to future studies.

Key words: Pelagic, Peruvian anchoveta, fisheries, monitoring, echo sounder

INTRODUCCIÓN

El Sistema de la Corriente de Humboldt (SCH), situado a lo largo de la costa occidental de Sudamérica, destaca como uno de los cuatro sistemas de afloramiento más significativos a lo largo de los bordes orientales de los grandes océanos (Chávez y Messié, 2009). Este sistema sufre variaciones climáticas multidecenales (El Viejo/La Vieja) e interanuales (El Niño/La Niña), que influyen en el afloramiento, la temperatura y la dinámica de producción (Harrison y Chiodi, 2015). Estas variaciones tienen efectos sobre la distribución y abundancia de las poblaciones de pequeños pelágicos (Alheit y Niquen, 2004; Bertrand *et al.*, 2004; Niquen y Bouchon, 2004; Canales *et al.*, 2018; Hernández-Santoro *et al.*, 2019; Ortiz, 2020; Castillo *et al.*, 2021). El SCH sustenta la mayor población mundial de anchoveta (*Engraulis ringens* Jenyns, 1842) (Gutiérrez *et al.*, 2017; Báez *et al.*, 2021), una de las especies de peces pelágicos pequeños más productivos, cuya distribución se extiende desde el norte de Perú hasta el sur de Chile (Alheit y Niquen, 2004). Administrativamente, a lo largo de las costas de Chile, existen tres unidades de pesquería de anchoveta: La Unidad de Pesquería Norte (Regiones de Arica y Parinacota - Antofagasta), la Unidad de Pesquería Centro Norte (Regiones de Atacama - Coquimbo), y la Unidad de Pesquería Centro Sur (Regiones de Valparaíso-Los Lagos) (Garcés *et al.*, 2019). La pesquería opera principalmente en la zona costera, con capturas significativas registradas entre 1997 y 2016 (Hernández-Santoro *et al.*, 2019).

Los estudios acústicos desempeñan un papel crucial en la gestión de los pequeños peces pelágicos, como la anchoveta en el SCH (Hilborn y Walters, 2013; Ganias, 2014). La evaluación del tamaño de los peces es un componente clave tanto en las evaluaciones acústicas como en las estrategias de gestión pesquera (Hilborn y Walters, 2013). Tradicionalmente, las longitudes se han medido visualmente utilizando métodos manuales y tablas métricas (Øvredal y Totland, 2002), así como mediante enfoques semimanuales y automáticos que utilizan equipos ópticos (Gibson *et al.*, 2016). Estos métodos son eficaces cuando los peces están cerca de dispositivos ópticos de medición o de buques pesqueros con artes asociados. Sin embargo, surgen desafíos en circunstancias específicas o desfavorables en las que el comportamiento de los peces se ve influido por las condiciones ambientales, lo que hace poco práctico llevar a cabo el lance de pesca (Øvredal y Totland,

INTRODUCTION

The Humboldt Current System (HCS), situated along the west coast of South America, stands out as one of the four most significant upwelling systems along the eastern edges of the major oceans (Chávez and Messié, 2009). This system undergoes both multi-decadal (El Viejo/La Vieja) and interannual (El Niño/La Niña) climatic variations, influencing upwelling, temperature, and production dynamics (Harrison and Chiodi, 2015). These variations have profound effects on the distribution and abundance of small pelagic populations (Alheit and Niquen, 2004; Bertrand *et al.*, 2004; Niquen and Bouchon, 2004; Canales *et al.*, 2018; Hernández-Santoro *et al.*, 2019; Ortiz, 2020; Castillo *et al.*, 2021). HCS supports the world's largest anchovy (Peruvian anchoveta, *Engraulis ringens* Jenyns, 1842) population (Gutiérrez *et al.*, 2017; Báez *et al.*, 2021), one of the most productive small pelagic fish species, distributed from northern Perú to southern Chile (Alheit and Niquen, 2004). Administratively, along the coasts of Chile, there are three Peruvian anchoveta fishery units: The North Fishery Unit (Arica and Parinacota - Antofagasta Regions), the North Central Fishery Unit (Atacama - Coquimbo Regions), and the South-Central Fishery Unit (Valparaíso-Los Lagos Regions) (Garcés *et al.*, 2019). The fishery operates primarily in the coastal zone, with significant catches recorded between 1997 and 2016 (Hernández-Santoro *et al.*, 2019).

Acoustic surveys play a crucial role in the management of small pelagic fish, such as anchovy in the HCS (Hilborn and Walters, 2013; Ganias, 2014). Assessing fish size is a key component in both acoustic evaluations and fisheries management strategies (Hilborn and Walters, 2013). Traditionally, lengths have been visually measured using manual methods and metric boards (Øvredal and Totland, 2002), as well as through semi-manual and automatic approaches utilizing optical equipment (Gibson *et al.*, 2016). These methods are effective when fish are close to optical measuring devices or fishing vessels with associated gear. However, challenges arise in specific or unfavorable circumstances where fish behavior is influenced by environmental conditions, making it impractical to conduct the fishing set (Øvredal and Totland, 2002; Kubilius *et al.*, 2023). The inaccessibility of fishing nets to anchovy shoals is a common occurrence during fishing seasons and in certain situations during acoustic surveys (such as when Peruvian anchoveta schools are very close to the coast or near the bottom) (Niquen and Bouchon, 2004; Yáñez *et*

2002; Kubilius *et al.*, 2023). La inaccesibilidad de las redes de pesca a los cardúmenes de anchoveta es un hecho habitual durante temporadas de pesca y en determinadas situaciones durante los estudios acústicos (como cuando los cardúmenes de anchoveta están muy cerca de la costa o cerca del fondo) (Ñiquen y Bouchon, 2004; Yáñez *et al.*, 2004; Gutiérrez *et al.*, 2007; Bertrand *et al.*, 2008; Hernández-Santoro *et al.*, 2019). La acústica pesquera se perfila como una valiosa herramienta para estimar el tamaño de los peces (Simmonds y MacLennan, 2005).

La conversión de las mediciones acústicas para estimar la longitud de los peces implica el análisis de objetivos individuales en ecogramas (Simmonds y MacLennan, 2005). Varias publicaciones ofrecen una visión completa de los principios fundamentales de esta metodología (Kubilius *et al.*, 2023; Palermino *et al.*, 2023) y demuestran una fuerte correlación entre el TS y la longitud de los peces. La relación entre el TS y la longitud (L, cm) puede estimarse como $TS = 20\log_{10}(L) - b_{20}$ (dB re 1 m²), donde b_{20} es un parámetro específico del género o la especie (Simmonds y MacLennan, 2005). Las investigaciones han demostrado que el TS puede utilizarse para estimar la longitud de los peces mediante ecuaciones de regresión. Uno de estos factores es la Fuerza de Blanco (TS) de *Engraulis mordax*, estimada en -45.3 dB (sd = 5.7) para una longitud media de 12.1 cm (sd = 1.1), lo que corresponde a un valor de b_{20} de 67.3 dB. (Zwolinski *et al.*, 2017). Estas ecuaciones permiten a los investigadores convertir las mediciones de TS en longitud de los peces. La Fuerza de Blanco (TS por sus siglas en inglés, dB re 1 m²) (MacLennan *et al.*, 2002) sirve como indicador fiable del tamaño de los peces en acústica submarina, siempre que se tengan en cuenta cuidadosamente las relaciones específicas de cada especie y los factores que influyen. Las mediciones precisas del TS permiten estimar con eficacia el tamaño de los peces, calcular la biomasa y discriminar las especies, lo que resulta esencial para la gestión sostenible de la pesca y los estudios ecológicos (Hinchliffe *et al.*, 2025).

La pesquería de anchoveta en la región chilena de Atacama es un sistema complejo en el que influyen factores medioambientales, económicos y sociales. Una gestión eficaz requiere una comprensión exhaustiva de esta dinámica y la aplicación de prácticas sostenibles para mitigar los efectos del cambio climático y la sobreexplotación. El estado de la anchoveta a lo largo de las aguas de la Región de Atacama se evalúa mediante modelos,

al., 2004; Gutiérrez *et al.*, 2007; Bertrand *et al.*, 2008; Hernández-Santoro *et al.*, 2019). Fishery acoustics emerge as a valuable tool for estimating fish size (Simmonds and MacLennan, 2005).

The conversion of acoustic measurements to estimate fish length involves analyzing individual targets on echograms (Simmonds and MacLennan, 2005). Several publications provide comprehensive insights into the fundamental principles of this methodology (Kubilius *et al.*, 2023; Palermino *et al.*, 2023) and demonstrate a strong correlation between TS and fish length. The relationship between TS and length (L; cm) can be estimated as $TS = 20\log_{10}(L) - b_{20}$ (dB re 1 m²), where b_{20} is a genus or species-specific parameter (Simmonds and MacLennan, 2005). Research has shown that the TS can be used to estimate fish length through regression equations. One of these factors is the target strength (TS) of *Engraulis mordax*, estimated at -45.3 dB (sd = 5.7) for a mean length of 12.1 cm (sd = 1.1), which corresponds to a b_{20} value of 67.3 dB (Zwolinski *et al.*, 2017). These equations allow researchers to convert TS measurements into estimates of fish length. Target strength (TS, dB re 1 m²) (MacLennan *et al.*, 2002) serves as a reliable proxy for fish size in underwater acoustics, provided that species-specific relationships and influencing factors are carefully considered. Accurate TS measurements enable effective fish size estimation, biomass calculation, and species discrimination, which are essential for sustainable fisheries management and ecological studies (Hinchliffe *et al.*, 2025).

The Peruvian anchoveta fishery in the Atacama Region of Chile is a complex system influenced by environmental, economic, and social factors. Effective management requires a comprehensive understanding of these dynamics and the implementation of sustainable practices to mitigate the impacts of climate change and overexploitation. The status of Peruvian anchoveta along the Atacama Region waters be assessed using models, which need an index of abundance and catch time series data to estimate stock and related fisheries references points. In recent years, no Peruvian anchoveta landings have been reported in the Region, creating a significant gap in both biological and fisheries data (IFOP, 2025). This lack of information hinders reliable estimates of fish stock size, productivity, and sustainable catch levels, which are crucial for effective fishery management. Additionally, the inaccessibility of Peruvian anchoveta shoals to fishing nets is a common issue in the coastal zone during acoustic surveys.

que necesitan un índice de abundancia y datos de series temporales de capturas para estimar los puntos de referencia de la población y de las pesquerías relacionadas. En los últimos años, no se han registrado desembarques de anchoveta en la Región, lo que ha creado una importante laguna en los datos biológicos y pesqueros (IFOP, 2025). Esta falta de información dificulta las estimaciones fiables del tamaño de las poblaciones de peces, la productividad y los niveles sostenibles de capturas, que son cruciales para una gestión eficaz de la pesca. Además, la inaccesibilidad de los cardúmenes de anchoveta a las redes de pesca es un problema común en la zona costera durante los estudios acústicos. Esto se debe en gran medida a las condiciones oceanográficas que hacen que las anchovetas se replieguen más cerca de la costa, dificultando su alcance con las redes de pesca habituales. Esta dificultad reduce la precisión de las mediciones de abundancia, lo que complica aún más la evaluación de la dinámica de la población de la especie y socava la calidad de los datos necesarios para la toma de decisiones informadas en la gestión de la pesca. Asimismo, la estimación del tamaño de los peces sin necesidad de muestreo biológico resulta crucial para la evaluación de las poblaciones y la investigación, especialmente cuando se emplean plataformas de sondeo acústico que no pueden muestrear las especies estudiadas (Kubilius *et al.*, 2023). En el presente estudio, nos propusimos estimar la distribución de tallas de anchoveta en la Región de Atacama, Chile utilizando métodos acústicos y algoritmos en el marco del proyecto “Incorporación del monitoreo de anchoveta asociado a la flota pesquera artesanal de la Región de Atacama, Chile, año 2023”.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio y diseño del muestreo

El estudio acústico se realizó durante los días 12 al 27 de julio de 2023, utilizando la embarcación artesanal “Don Pancracio” para obtener la distribución de los cardúmenes de anchoveta que habitan en las aguas costeras de la región de Atacama, Chile. Los transectos del estudio totalizaron aproximadamente 2780 km (1501 mn), incluyendo 19 transectos oeste-este y 16 norte-sur que abarcaban un área desde el extremo norte de Carrizalillo (26°S) hasta el sur de Punta Pájaros (29°S), incluyendo muestreos aleatorios en zonas costeras. Los transectos tuvieron una longitud aproximada de 13 a 18,5 km (7-10 mn) y estaban

This is largely due to oceanographic conditions that cause the anchovies to retreat closer to the coast, making harder to reach them with standard fishing nets. This difficulty reduces the accuracy of abundance measurements, further complicating the assessment of the species' population dynamics and undermining the quality of the data necessary for informed decision-making in fisheries management. Likewise, estimating fish size without the need for biological sampling proves crucial for stock assessment and research, particularly when employing acoustic surveying platforms that cannot sample the surveyed species (Kubilius *et al.*, 2023). In the present study, we aimed to estimate Peruvian anchoveta length distribution in Atacama Region, Chile using acoustic methods and algorithms within the framework of the “Incorporation of Peruvian anchoveta monitoring associated with the artisanal fishing fleet of the Atacama Region, Chile, year 2023” project.

MATERIALS AND METHODS

Study area and sampling design

The acoustic survey was conducted during July 12 to 27, 2023, using the artisanal vessel “Don Pancracio” to obtain the distribution of Peruvian anchoveta schools living in the coastal waters of Atacama Region, Chile. The survey transects totaled approximately 2780 km (1501 nmi), including 19 west-east and 16 north-south transects spanning an area from the northern tip of Carrizalillo (26°S) to southern Punta Pájaros (29°S), including random sampling in coastal areas. The transects were approximately 13 to 18.5 km (7-10 nmi) long and were 18.5 km apart (Figure 1). The combination of random and systematic acoustic sampling in coastal areas enhanced the spatial and temporal resolution of the acoustic Peruvian anchoveta survey.

separados por 18,5 km (**Figura 1**). La combinación de muestreos acústicos aleatorios y sistemáticos en las zonas costeras mejoró la resolución espacial y temporal del estudio acústico de la anchoveta.

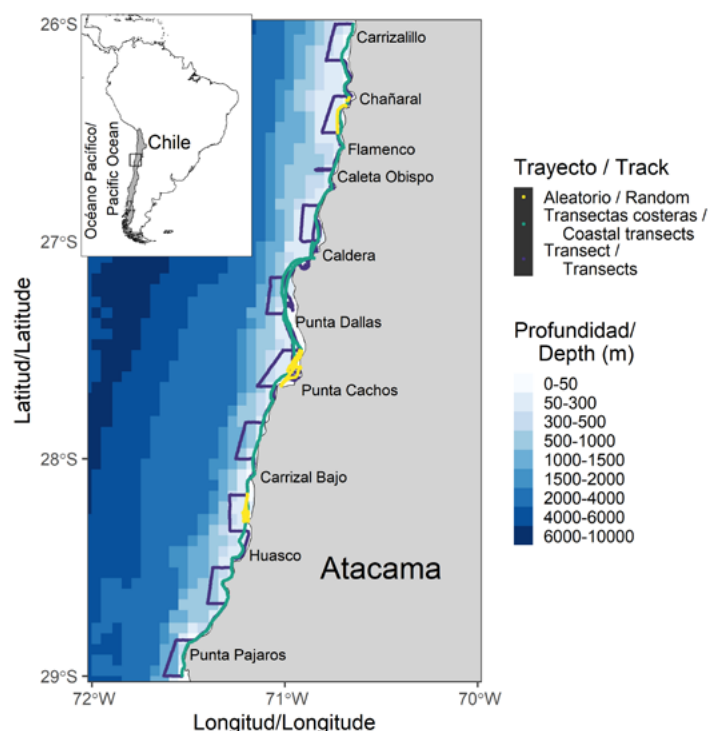


Figura 1. Mapa de la zona de estudio en la Región de Atacama, Chile, que muestra el diseño de muestreo acústico. Las líneas continuas representan los distintos tipos de trayectos: transectos paralelos (en azul), transectas costeras (en verde) y recorridos aleatorios (en color amarillo).

Datos acústicos

Los datos acústicos de banda estrecha (S_v , dB re 1 m^{-1}) a 38 kHz se registraron continuamente con una ecosonda calibrada (Foote, 1987; Demer *et al.*, 2015) montada en un poste de soporte EK80 (SIMRAD Kongsberg Maritime AS, Horten, Noruega) sobre la banda de estribor del buque de prospección y colocada para proyectarse verticalmente a una profundidad de ~1 m por debajo de la superficie del agua. La calibración de la ecosonda de 38 kHz se realizó antes del crucero en Caldera, Atacama, utilizando una esfera de carburo de tungsteno de 38,1 mm y siguiendo los procedimientos descritos por Foote (1987). El volumen medio de retrodispersión acústica (S_v , dB re

Figure 1. Map of the study area in the Atacama Region, Chile, showing the acoustic survey design. Continuous lines indicate the different types of transects: parallel transects (blue), coastal transects (green), and random paths (yellow).

Acoustic data

Acoustic narrowband data (S_v , dB re 1 m^{-1}) at 38 kHz were recorded continuously with a calibrated (Foote, 1987; Demer *et al.*, 2015) mounted on a support pole EK80 echosounder (SIMRAD Kongsberg Maritime AS, Horten, Norway) over the starboard side of the survey vessel and positioned to project vertically at a depth of ~1 m below the water surface. The 38 kHz echosounder calibration was performed before the survey in Caldera, Atacama, using a 38.1 mm tungsten carbide sphere and following the procedures described by Foote (1987). The acoustic mean volume backscattering strength S_v (in dB re 1 m^{-1}) was calculated as $S_v = 10 \log(s_v)$, with s_v the volume

1 m⁻¹) se calculó como $S_v = 10 \log(s_v)$, siendo s_v el coeficiente del volumen de retrodispersión en m⁻¹ (MacLennan *et al.*, 2002). Con el fin de medir la Fuerza de Blanco (TS, dB re 1 m²) y realizar un seguimiento de las detecciones individuales, la frecuencia de ping se ajustó al “máximo” para un alcance de adquisición máxima de 150 m. La velocidad del buque fue de 13 km/h durante la generación de los datos acústicos. La configuración del sistema acústico se detalla en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Principales características del buque pesquero artesanal cerquero Don Pancracio y especificaciones de la configuración de la ecosonda científica EK80 (38 kHz) durante el estudio acústico de la anchoveta en el 2023. El texto resaltado en negrita corresponde a los resultados obtenidos durante la calibración de la ecosonda

backscattering coefficient in m⁻¹ (MacLennan *et al.*, 2002). With the aim of measuring Target Strength (TS, dB re 1 m²) and tracking individual detections, the ping rate was set to ‘maximum’ for a maximum acquisition range of 150 m. Vessel speed was 13 km/hr during acquisition of acoustic data. The acoustic system configuration is detailed in **Table 1**.

Table 1. Main characteristics of the Don Pancracio artisanal purse seiner vessel and specifications of the EK80 (38 kHz) scientific echo sounder configuration during the Peruvian anchoveta acoustic survey in 2023. The highlighted text in bold corresponds to the results obtained during the calibration of the echosounder.

Parámetro / Parameter	Valor / Value
Frecuencia nominal / Nominal frequency (kHz)	38
Nombre del buque / Vessel name	Don Pancracio
Longitud total / Length overall (m)	14.95
Calado máximo / Maximum draft (m)	1.5
Tipo de ingeniería / Engineering type	Diesel
Modelo de transductor / Transducer model	ES38-7 (Serie: 135)
Modo de transmisión / Transmission mode	Onda continua / Continuous wave
Profundidad del transductor / Transducer depth (m)	2.5
Tipo de transductor / Transducer type	Haz dividido / Split-beam
Número de serie del transceptor / Transceiver serial number	582177-1
Versión del programa EK80 / EK80 program version	2.0.1
Duración del impulso / Pulse length (ms)	1.024
Potencia de transmisión / Transmission power (W)	2000
Ganancia / Gain (dB re 1)	26.66
Ancho del haz a 3 dB en dirección proa-popa / 3 dB Beam-width alongship (°)	6.55
Ancho del haz a 3 dB en dirección babor-estribor / 3 dB Beamwidth Athwartship (°)	6.58
Desviación angular en dirección proa-popa/ Angle offset alongship (°)	-0.01
Desviación angular en dirección babor-estribor / Angle offset athwartship (°)	0.07
Corrección del Sa / Sa correction (dB re 1 m ¹)	0.00
Ángulo del haz bidireccional / Two-way beam angle (dB re 1 sr)	-20.7
Coefficiente de absorción / Absorption coefficient (dB/km)	9.0
Velocidad del sonido / Speed of sound (m/s)	1501.3
Tasa de emisión de ping / Ping emission rate	Máximo / Maximum
RMS (dB)	< 0.2

Los datos acústicos brutos se preprocesaron utilizando el software de código abierto Echo Sounder Package (ESP3) versión 1.46.0 (<https://sourceforge.net/p/esp3/wiki/ESP3/ESP3> Wiki en SourceForge) desarrollado por el NIWA (National Institute of Water and Atmospheric Research, Wellington, Nueva Zelanda) (Ladroit *et al.*, 2020). Los pasos de procesamiento incluyeron la detección del fondo con corrección manual, la eliminación de la señal transitoria o atenuada (causada principalmente por el bloqueo de la señal debido a las duras condiciones meteorológicas o al movimiento del buque), el ruido impulsivo (señales instantáneas y agudas causadas principalmente por la interferencia de otros sistemas acústicos o eléctricos) y el ruido de fondo (De Robertis y Higginbottom, 2007; Ryan *et al.*, 2015) antes de la detección de los peces individuales (Soule *et al.*, 1997).

Tratamiento y análisis de datos

Los cardúmenes de anchoveta fueron identificados y clasificados mediante un meticuloso examen manual realizado por analistas expertos, teniendo en cuenta la morfología, la densidad y su comportamiento (Robotham *et al.*, 2010; Korneliussen, 2018, Castillo *et al.*, 2022). Se emplearon dos algoritmos para la identificación de la anchoveta: algoritmo de detección de blancos individuales (ST, Single Target) (Ona, 1999; Balk y Lindem, 2000) y el algoritmo de detección de blancos rastreados (Tracked Target, TT o Fish Tracking, FT) (Reid, 2000) (Tabla 2). Las ecuaciones utilizadas están alineadas con los estándares documentadas por Echoview (Echoview Software Pty Ltd., Hobart, Australia). El TS puede filtrarse en función de valores umbral mínimos o máximos para cualquier propiedad del blanco individual (peces). El ecograma de TS fue reimportado y analizado mediante técnicas de rastreo de peces para discernir su comportamiento, incluidos los cambios de velocidad y profundidad.

The raw acoustic data were pre-processed using open-source software Echo Sounder Package (ESP3) version 1.46.0 (<https://sourceforge.net/p/esp3/wiki/ESP3/ESP3> Wiki on SourceForge) developed by NIWA (National Institute of Water and Atmospheric Research, Wellington, New Zealand) (Ladroit *et al.*, 2020). Processing steps included a bottom detection with manual correction, removal of transient or attenuated signal (mostly caused by signal blocking due to harsh weather conditions or vessel movement), impulsive noise (instantaneous and sharp signals mainly caused by interference from other acoustic or electrical systems) and background noise (De Robertis and Higginbottom, 2007; Ryan *et al.*, 2015) before the detection of individual fish traces (Soule *et al.*, 1997).

Data processing and analysis

Peruvian anchoveta schools underwent identification and classification through meticulous manual examination by expert analysts, considering morphology, density, and behavior (Robotham *et al.*, 2010; Korneliussen, 2018, Castillo *et al.*, 2022). Two algorithms were employed for Peruvian anchoveta identification: Single Target (ST) (Ona, 1999; Balk and Lindem, 2000) and Tracked Target (TT) or Fish Tracking (FT) (Reid, 2000) (Table 2). The equations used align with documented standards for Echoview (Echoview Software Pty Ltd., Hobart, Australia). TS could be filtered based on minimum or maximum threshold values for any target property. TS echogram underwent reimportation and analysis using fish tracking techniques to discern fish behavior, including speed and depth changes.

Tabla 2. Configuración de los algoritmos de detección de cardúmenes, detección de blancos individuales y blancos rastreados del software acústico ESP3.

Table 2. Settings for school detection, Single Target detections and Target Tracking algorithms in ESP3 acoustic software.

Parámetros del algoritmo de detección / Detection algorithm parameters	Valor / Value
<i>Detección de cardúmenes / School detection</i>	
Longitud mínima del cardumen / Minimum school length (m)	0.8
Altura mínima del cardumen / Minimum school height (m)	0.8
Longitud mínima del candidato / Minimum candidate length (m)	0.8
Distancia máxima de enlace vertical / Maximum vertical linking distance (m)	5
Distancia máxima de enlace horizontal / Maximum horizontal linking distance (m)	10
<i>Algoritmo de detección de blancos individuales / Single Target algorithm</i>	
Profundidad máxima del eco / Maximum echo depth (m)	50
Umbral mínimo del blanco individual / Minimum thresholding on target strength (dB re 1 m ²)	-55
Umbral máximo del blanco individual / Maximum thresholding on target strength (dB re 1 m ²)	-49
Corrección máxima del patrón del haz (dB) / Maximum beam pattern correction (dB)	12
Longitud mínima del pulso normalizada / Minimum normalized pulse length	0.8
Longitud máxima del pulso normalizada / Maximum normalized pulse length	1.2
Desviación estándar máxima de la posición transversal / Maximum standard deviation of across position (°)	0.8
Desviación estándar máxima de la posición longitudinal / Maximum standard deviation of along position (°)	0.8
<i>Algoritmo de detección de blancos rastreados / Tracked Target algorithm</i>	
Número mínimo de blancos individuales en seguimiento / Minimum number of single targets in track	4
Número mínimo de pings (emisiones de sonido) en seguimiento / Minimum number of pings in track (ping)	4
Número máximo de intervalos sin detección en una trayectoria / Maximum number of gaps in track (ping)	2

El TS es una función logarítmica de la sección transversal de retrodispersión (m^2) que depende principalmente de la fisiología interna (principalmente la presencia y la forma de la vejiga natatoria) y de la orientación del cuerpo del pez con respecto al haz de sonido transmitido (Hazen y Horne, 2003; Simmonds y MacLennan, 2005). Las mediciones de TS requieren la extracción de blancos acústicos individuales (trazas de ecos individuales resueltos mediante el algoritmo ST). Y para aumentar la solidez de los resultados, se rastrearon ecos sucesivos individuales de cada pez para determinar el TS medio en un intervalo de pings (algoritmo TT o FT) (Figura 2).

TS is a logarithmic function of the backscattering cross-section (m^2) that depends primarily on the internal physiology (mostly the presence and the shape of the swim bladder) and body orientation of the fish with regard to the transmitted sound beam (Hazen and Horne, 2003; Simmonds and MacLennan, 2005). TS measurements require the extraction of acoustic single targets (resolvable single echo traces using ST algorithm). And to increase the robustness of the results, single successive echoes of each individual fish were tracked to determine the mean fish TS over a range of pings (TT or FT algorithm) (Figure 2).

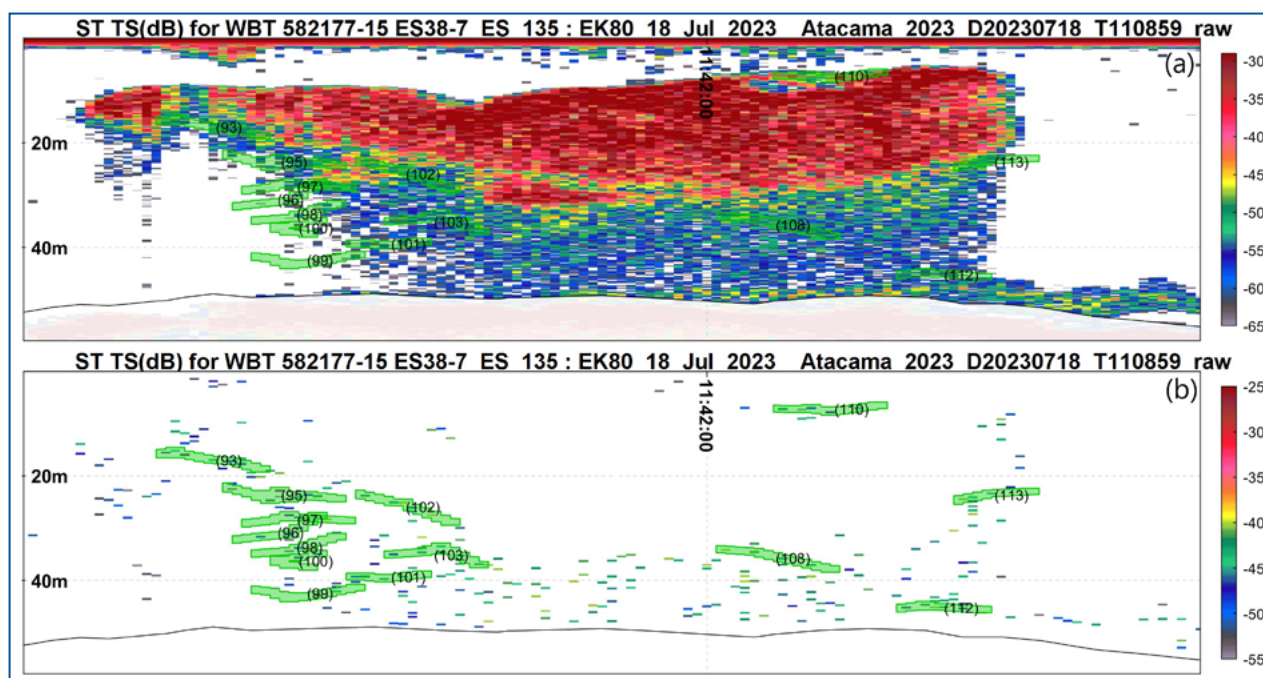


Figura 2. (a) El ecograma (Sv) muestra la presencia de un cardumen de anchoveta. La línea negra continua marca la zona de exclusión (fondo marino). (b) El algoritmo Single Target detecta peces individuales en el ecograma, representado en dB. Además, el algoritmo Target Tracked del programa ESP3 permite el seguimiento continuo y la identificación de los peces insonificados, indicado por las regiones verdes.

Todas las mediciones de TS se compensaron en función de la posición del objetivo detectado en el haz. Sólo se conservaron las trayectorias que abarcaban un mínimo de cuatro pings. La cohesión de los peces seleccionados se inspeccionó visualmente con una herramienta de comprobación de trayectos desarrollada en el ESP3. El TS medio de cada pez rastreado se calculó en el dominio lineal (Ecuación 1).

$$TS_f = 10 \cdot \log_{10}(\overline{\sigma_{bs}}) \quad (1)$$

La estimación del tamaño de los peces mediante métodos acústicos está bien establecida en la ciencia pesquera (Love, 1971; Simmonds y MacLennan, 2005). El TS es un indicador del tamaño de los peces (Simmonds y MacLennan, 2005), pero también está influenciado por las especies, debido a las diferencias en la relación entre el tamaño del cuerpo y el tamaño de la vejiga (Simmonds y MacLennan, 2005), y el comportamiento natatorio (por ejemplo, el ángulo de inclinación) de la especie o del individuo (Nielsen *et al.*, 1999). Para traducir el TS en medidas de longitud (cm) más intuitivas que el decibelio (Boswell *et al.*, 2007) se convierte utilizando relaciones empíricas TS-longitud,

Figure 2. (a) The echogram (Sv) shows the presence of an Peruvian anchoveta school. The continuous black line indicates the exclusion zone (seafloor). (b) The Single Target algorithm detects individual fish in the echogram, represented in dB. Additionally, the Target Tracked algorithm of the ESP3 program allows for continuous tracking and identification of insonified fish, indicated by the green regions.

All TS measurements were compensated for the position of the detected target in the beam. Only tracks encompassing a minimum of four pings were retained. The cohesiveness of the selected tracks was inspected visually within a checking tracks tool developed in ESP3. The mean TS of each fish track was calculated in the linear domain (Equation 1).

Fish size estimation through acoustic approaches is well established in fisheries science (Love, 1971; Simmonds and MacLennan, 2005). TS is an indicator of fish size (Simmonds and MacLennan, 2005) but is also influenced by species, due to differences in ratios of body size to bladder size (Simmonds and MacLennan, 2005), and swimming behavior (e.g. tilt angle) of the species or individual (Nielsen *et al.*, 1999). To translate TS into more intuitive length measurements (cm) than the decibel (Boswell *et al.*, 2007) it is converted using empirical TS-length relationships, which often exist for specific species (Simmonds and MacLennan, 2005; Castillo *et al.*, 2022). The calculation is

que a menudo existen para especies específicas (Simmonds y MacLennan, 2005; Castillo *et al.*, 2022). El cálculo se basa en la inversa de las siguientes ecuaciones:

$$TS_f = m \cdot \log_{10}(L, cm) + b \quad (2)$$

Aquí, L representa la longitud total del pez (cm), TS es el blanco individual y f es la frecuencia de transmisión del sonido (38 kHz). Los valores b (71.352) y m (18.134) son parámetros específicos de la anchoveta (Castillo *et al.*, 2022). Por lo tanto, la reformulación de la ecuación (2) para obtener longitudes desconocidas a partir de TS conocidas se convierte en:

$$L, cm = 10^{\left(\frac{TS_{38} + 71.52}{18.134}\right)} \quad (3)$$

Las distribuciones de frecuencia de las longitudes de los blancos se exportaron (Excel) desde el ecograma y se categorizaron en longitudes (clases de tallas de 0,5 cm). Para garantizar estimaciones precisas, se empleó el método de remuestreo bootstrap con 1000 repeticiones (Hesterberg, 2011). El lenguaje de programación R facilitó el análisis bootstrap, lo que implicó la creación de una función para calcular la estadística de interés y el uso de la función *boot()* de la librería *boot* (Witten y James, 2013). A partir de los datos del estudio se calculó un resumen de la distribución por longitudes de la anchoveta basado en los distintos métodos algorítmicos utilizados. Para comparar los datos de longitud entre los distintos algoritmos (algoritmos ST y TT), se utilizó la prueba de Kruskal-Wallis. Todos los análisis estadísticos se realizaron con RStudio (RStudio *et al.*, 2020).

RESULTADOS

Distribución espacial y estimación del tamaño de la anchoveta

Espacialmente, la anchoveta se observó formando cardúmenes desde Chañaral hasta la zona norte del puerto de Huasco. Los ecogramas evidenciaron principalmente agregaciones de baja densidad, con una notable concentración de señales de alta energía entre Carrizal Bajo y Huasco, así como densas agregaciones cerca del fondo marino. Se extrajeron un total

based on the inverse of the following equations:

Here, L represents the total length of the fish (cm), TS is the Target Strength, and f is the sound transmission frequency (38 kHz). The values b (71.352) and m (18.134) are specific parameters for Peruvian anchoveta (Castillo *et al.*, 2022). Reformulation of equation (2) to gain unknown lengths from known TS therefore

becomes:

Frequency distributions of target lengths were exported (Excel) from the echogram and categorized into length (0.5 cm size classes). To ensure accurate estimates, the bootstrap re-sampling method with 1000 repetitions was employed (Hesterberg, 2011). The R programming language facilitated the bootstrap analysis, involving the creation of a function for computing the statistic of interest and using the *boot()* function from the *boot* library (Witten and James, 2013). A summary of the Peruvian anchoveta size distribution was calculated from the survey data based on the different algorithmic methods used. To compare length data between the different algorithms (ST and TT algorithms), Kruskal-Wallis test were used. All statistical analyses were conducted using RStudio (RStudio *et al.*, 2020).

RESULTS

Spatial distribution and size estimation of Peruvian anchoveta

Spatially, the Peruvian anchoveta was observed shoaling from Chañaral to the area north of the port of Huasco. Echograms primarily revealed low-density aggregations, with a notable concentration of high-energy signals between Carrizal Bajo and Huasco, as well as dense aggregations near the seabed. A total

de 318 puntos de datos de TS-Longitud, 294 del algoritmo de recuento de ecos de blancos individuales y 24 del algoritmo de blancos rastreados. A continuación, estos valores de TS se transformaron mediante la ecuación TS-Longitud, lo que permitió calcular las longitudes de anchoveta correspondientes (Figura 3).

of 318 TS-Length data points were extracted, 294 from the Single Target echo-counting algorithm and 24 from the Tracked Target algorithm. These TS values were then transformed using the TS-Length equation, allowing for the calculation of the corresponding Peruvian anchoveta lengths (Figure 3).

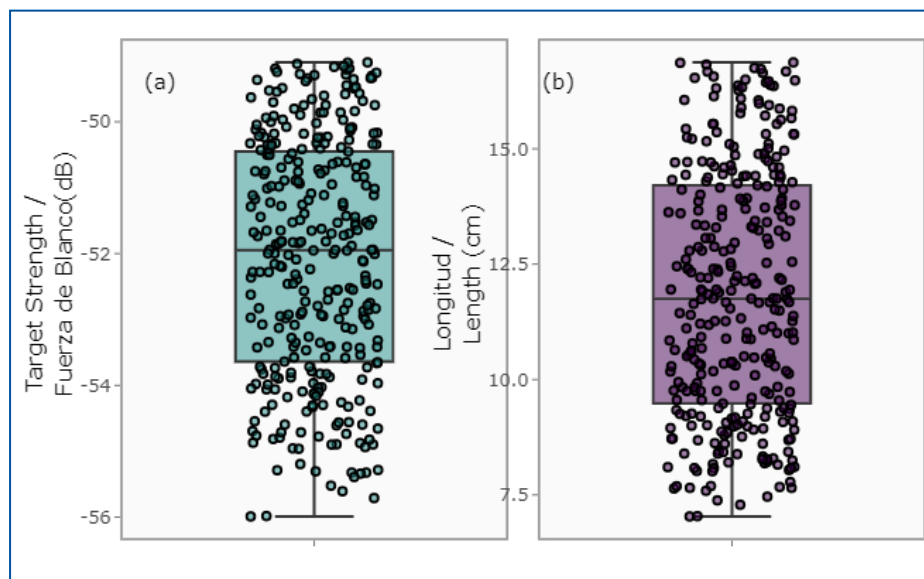


Figura 3. (a) Diagrama de cajas que muestra la distribución de los valores de la Fuerza de Blanco (TS, dB) de la anchoveta, destacando el rango, la mediana y la variabilidad de los valores de TS en toda la zona de estudio. (b) Diagrama de cajas que muestra la distribución de las longitudes (cm) de anchoveta obtenidos mediante los algoritmos acústicos.

Figure 3. (a) Boxplot showing the distribution of Target Strength (TS, dB) values for Peruvian anchoveta, highlighting the range, median, and variability of TS values across the entire study area. (b) Boxplot showing the distribution of Peruvian anchoveta lengths (cm) obtained using the acoustic algorithms

La Fuerza de Blanco (TS) osciló entre un valor mínimo de -55.99 dB y un máximo de -49.1 dB, con una mediana de -51.95 dB. Esto indica una distribución relativamente simétrica, con valores concentrados cerca del extremo inferior del intervalo. La desviación típica de 1.81 indica una variabilidad moderada de los datos. En cuanto a la longitud, el valor mínimo fue de 7.03 cm, el máximo de 16.87 cm y la mediana de 9.5 cm, con una media de 11.75 cm. La distribución de la longitud de la anchoveta muestra una dispersión más pronunciada, con la mayoría de los valores en el rango inferior y medio, aunque algunos valores mayores contribuyen a la media superior. La desviación típica de 2.67 refleja una mayor variabilidad en los datos de longitud en comparación con el TS, lo que indica una mayor dispersión.

Profundidad y distribución por tallas de anchovetas

La profundidad de los ecos de las anchovetas se localizó entre 3.92 y 43.95 m. Esta variabilidad en la profundidad, combinada con la transformación de los ecos acústicos en datos de tamaño, revela que las anchovetas de mayor longitud son capaces de

The Target Strength (TS) ranged from a minimum value of -55.99 dB to a maximum of -49.1 dB, with a median of -51.95 dB. This indicates a relatively symmetric distribution, with values concentrated near the lower end of the range. The standard deviation of 1.81 suggests moderate variability in the data. For length, the minimum value was 7.03 cm, the maximum was 16.87 cm, and the median was 9.5 cm, with a mean of 11.75 cm. The distribution of Peruvian anchoveta length shows a more pronounced spread, with most values falling in the lower to middle range, although some larger values contribute to the higher mean. The standard deviation of 2.67 reflects greater variability in the length data compared to TS, indicating a wider spread.

Depth and size distribution of anchovies

The depth of the echoes ranged from 3.92 to 43.95 m. This variability in depth, combined with the transformation of acoustic echoes into size data, reveals that longer Peruvian anchoveta are capable of inhabiting deeper coastal regions, highlighting a

habitar regiones costeras más profundas, lo que pone de relieve una posible adaptación fisiológica a estos ambientes (Figura 4).

potential physiological adaptation to these environments (Figure 4).

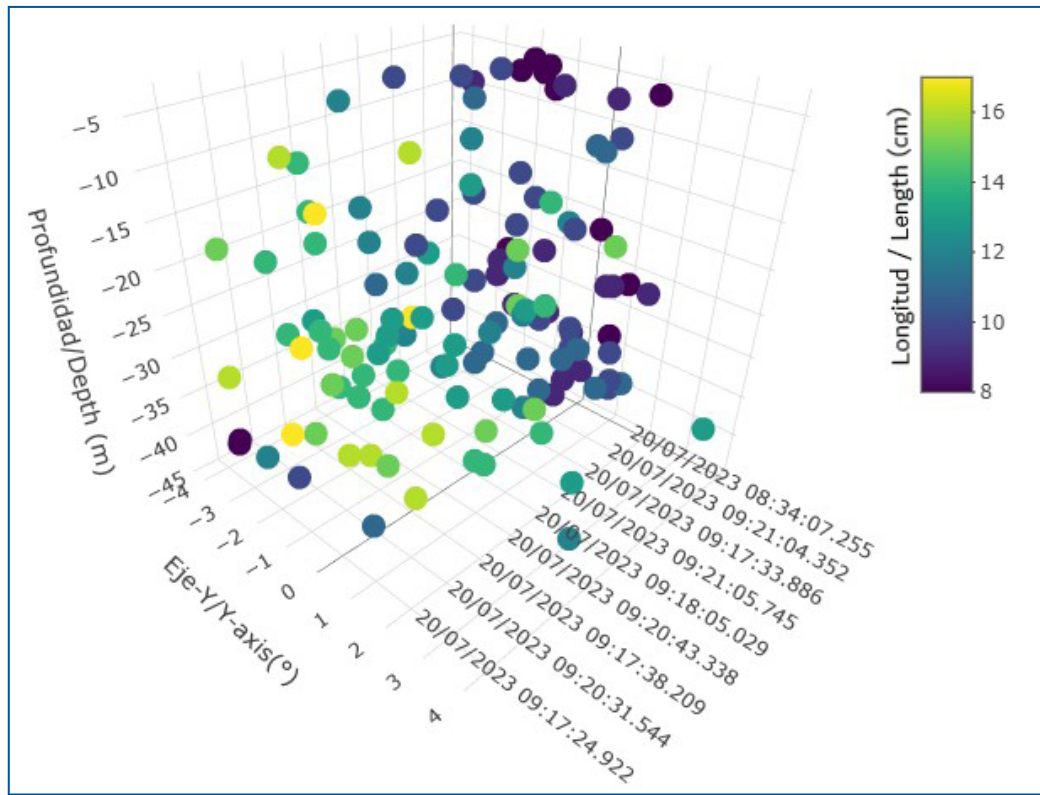


Figura 4. Longitud (cm) de anchoveta mediante el uso de algoritmos acústicos. El eje x representa la fecha-hora, indicando la dirección del buque, el eje y indica estribor (+) y babor (-), y el eje z representa la profundidad (m). No se observó ninguna tendencia significativa de las longitudes en función de la profundidad ($r^2=0.02$).

Figure 4. Acoustic Peruvian anchoveta fish size (cm). The x-axis represents date-time indicates the direction of the vessel, the y-axis indicates starboard (+) and port (-) and the z-axis represents depth (m). No significant trend in TS according to depth was observed ($r^2=0.02$).

Distribución del tamaño de la anchoveta y comparación de algoritmos

La estructura de longitudes de las anchovetas, estimada mediante acústica utilizando el algoritmo Single Target, mostró una distribución unimodal, con peces de entre 8.5 y 16 cm y una talla media de 11.89 ± 1.18 cm (CV: 4.0%) (Figura 5). En cambio, el algoritmo Tracked Target identificó anchovetas dentro de un rango más estrecho de 9 a 14 cm, con un tamaño medio de 11.72 ± 0.94 cm (CV: 3.0%). En particular, más del 70% de los ecos acústicos correspondían a peces de tamaños comprendidos entre 8.5 y 14.5 cm. El análisis estadístico no evidenció diferencias significativas en las estimaciones de las longitudes promedio entre los dos algoritmos (prueba de Kruskal-Wallis, valor $p > 0.05$).

Peruvian anchoveta size distribution and algorithm comparison

The size structure of anchovies, estimated through acoustics using the Single Target algorithm, exhibited a unimodal distribution, with fish ranging from 8.5 to 16 cm and a mean size of 11.89 ± 1.18 cm (CV: 4.0%) (Figure 5). In contrast, the Tracked Target algorithm identified anchovies within a narrower range of 9 to 14 cm, with a mean size of 11.72 ± 0.94 cm (CV: 3.0%). Notably, more than 70% of the acoustic echoes corresponded to fish sizes between 8.5 and 14.5 cm. Statistical analysis revealed no significant difference in the mean size estimates between the two algorithms (Kruskal-Wallis Test, $p\text{-value} > 0.05$).

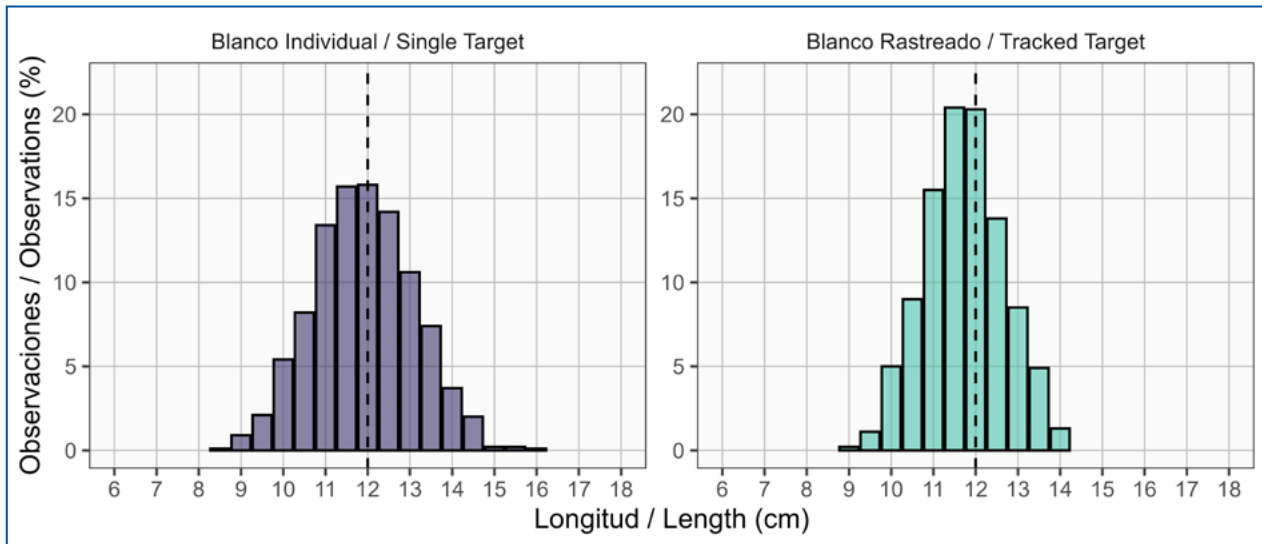


Figura 5. Histogramas que ilustran la longitud de los ecos de anchoveta utilizando los algoritmos de blancos individuales (ST) y blancos rastreados de peces (TT). Las líneas discontinuas representan la longitud media de madurez (juvenil) (< 12 cm de longitud total). Los datos se sometieron a bootstrapping con 1000 simulaciones.

Figure 5. Histograms showing the echo length of Peruvian anchoveta derived from the single target (ST) and tracked target (TT) algorithms. Dashed lines represent the mean maturity size (juvenile) (< 12 cm total length). The data were bootstrapped with 1000 simulations.

La **Tabla 3** muestra un resumen de la distribución de longitudes de la anchoveta estimada mediante métodos acústicos. Los datos, obtenidos a partir de 1000 simulaciones bootstrap por algoritmo, permiten comparar los resultados entre dos enfoques distintos: el algoritmo de blancos individuales y el algoritmo de objetivos o blancos rastreados.

Table 3 presents a summary of the length distribution of Peruvian anchoveta estimated using acoustic methods. The data, obtained from 1,000 bootstrap simulations per algorithm, allow for a comparison between two different approaches: the single target algorithm and the tracked target algorithm.

Tabla 3. Resumen de la distribución de tallas de anchoveta obtenida mediante 1000 simulaciones bootstrap, según el algoritmo empleado.

Table 3. Summary of Peruvian anchoveta size distribution obtained from 1,000 bootstrap simulations, according to the algorithm used.

Estadísticas-Algoritmo / Statistics/Algorithm	Blancos Individuales / Single Target	Blancos Rastreados / Tracked Target
Frecuencia / Frequency (kHz)	38	38
Media± d.e. / Mean± s.d (cm)	11.89±1.18	11.72±0.94
Rango / Range (cm)	8.5-16.0	9.0-14.0
Moda / Mode (cm)	12.0	11.5
Juveniles / Juveniles (%)	45.8	51.2
Coefficiente de variación / Coefficient variation (%)	4.0	3.0

DISCUSIÓN

Se encontró un gran cardumen de anchovetas durante el muestreo acústico aleatorio, este evento estocástico generó un valor atípico significativo en los datos (aumento de la densidad acústica media). Asimismo, existen muchas dificultades para calcular las estimaciones de TS de los cardúmenes densos

DISCUSSION

A large school of Peruvian anchoveta was encountered during the random sampling acoustic, this stochastic event created a significant outlier in the data (increasing mean acoustic density). Likewise, there are many difficulties in calculating TS estimates for dense schools due to sound attenuation (Simmonds and

debido a la atenuación del sonido (Simmonds y MacLennan, 2005). Por lo tanto, se excluyó este evento de todos los análisis posteriores, para evitar sesgos en nuestras estimaciones de densidad de peces (Sawada *et al.*, 1993; Gauthier y Rose, 2001). El modelo de dispersión más simple para un grupo de peces (o cualquier grupo de dispersores idénticos) asume que los peces están suficientemente espaciados para que la dispersión múltiple y la atenuación no sean factores que causen respuestas incoherentes (Love *et al.*, 2016).

TS como indicador del tamaño de los peces

La Fuerza de Blanco (TS) es un parámetro crítico en la acústica pesquera, utilizado a menudo para estimar la longitud, la densidad, la abundancia y la biomasa de los peces. El TS refleja las propiedades acústicas de un pez, que varían en función de factores como su tamaño, la orientación, la especie y las condiciones ambientales (Simmonds y MacLennan, 2005). La relación entre el TS y la longitud (L) de los peces suele modelarse mediante la ecuación $TS = m \log_{10}(L) + b$, donde m y b son constantes específicas de cada especie que ayudan a establecer la relación entre ambas variables. Este método de modelización permite estimar el tamaño de los peces a partir de mediciones acústicas. En el presente estudio, los parámetros específicos de la anchoveta $b = -71.52$ y $m = 18.134$ desempeñan un papel fundamental en la precisión del modelo utilizado para estimar la longitud (L) de los peces. Estas constantes, derivadas específicamente para *Engraulis ringens* a partir de datos empíricos (Castillo *et al.*, 2022), son cruciales para garantizar la fiabilidad de las estimaciones de longitud de los peces basados en mediciones acústicas a 38 kHz. Sin embargo, es importante señalar que este modelo es específico para cada especie y debe recalibrarse para otras especies a fin de garantizar estimaciones de tamaño precisas.

Aunque el TS es un valioso indicador del tamaño de los peces pelágicos, su precisión depende de varios factores específicos de cada especie, de las técnicas de medición y de las condiciones ambientales. Comprender y abordar estas variables es esencial para obtener datos fiables de los estudios acústicos y tomar decisiones eficaces de gestión pesquera. Por otra parte, el TS presenta varias limitaciones que pueden introducir variabilidad y posibles sesgos en las mediciones. Por ejemplo, factores como los atributos de los peces (orientación, madurez, estado fisiológico, presencia de vejiga natatoria), las diferencias específicas

MacLennan, 2005). Therefore, we excluded this event from all subsequent analyses to avoid bias in our estimates of fish density (Sawada *et al.*, 1993; Gauthier and Rose, 2001). The simplest dispersion model for a group of fish (or any group of identical dispersers) assumes that the fish are sufficiently spaced so that multiple scattering and attenuation are not factors causing incoherent responses (Love *et al.*, 2016).

TS as proxy for fish size

Target Strength (TS) is a critical parameter in fisheries acoustics, often used to estimate fish size, density, abundance, and biomass. TS reflects the acoustic properties of a fish, which vary with factors such as fish size, orientation, species, and environmental conditions (Simmonds and MacLennan, 2005). The relationship between TS and fish length (L) is commonly modeled using the equation $TS = m \log_{10}(L) + b$, where m and b are species-specific constants that help establish the relationship between the two variables. This modeling approach allows for the estimation of fish size from acoustic measurements. In the present study, the Peruvian anchoveta-specific parameters $b = -71.52$ and $m = 18.134$ play a fundamental role in the accuracy of the model used to estimate fish length (L) from TS. These constants, derived specifically for *Engraulis ringens* from empirical data (Castillo *et al.*, 2022), are crucial in ensuring the reliability of fish size estimates based on acoustic measurements at 38 kHz. However, it is important to note that this model is species-specific and must be recalibrated for other species to ensure accurate size estimations.

While TS is a valuable proxy for fish size in pelagic species, its accuracy is influenced by various species-specific factors, measurement techniques, and environmental conditions. Understanding and addressing these variables is essential for obtaining reliable acoustic survey data and making effective fisheries management decisions. On the other hand, TS comes with several limitations that can introduce variability and potential bias in the measurements. For instance, factors such as fish attributes (orientation, maturity, physiological condition, swim bladder presence), species-specific differences (unique TS-length relationships), environmental conditions (depth, pressure, mixed species assemblages), measurement techniques (echo overlap, type of acoustic equipment), and behavioral factors (swimming patterns, schooling behavior) all play a role in TS accuracy (Simmonds and MacLennan, 2005; Doray *et al.*, 2016;

de cada especie (relaciones únicas entre TS y longitud), las condiciones ambientales (profundidad, presión, conjuntos de especies mixtas), las técnicas de medición (superposición de ecos, tipo de equipo acústico) y los factores de comportamiento (patrones de natación, comportamiento de cardumen) influyen en la precisión del TS (Simmonds y MacLennan, 2005; Doray *et al.*, 2016; Castillo *et al.*, 2022). Sin embargo, es importante señalar que estos factores no se analizaron en el presente estudio, lo que puede haber introducido un sesgo en los resultados.

Estas limitaciones ponen de manifiesto la complejidad de utilizar el TS como indicador del tamaño de los peces. Para garantizar unas estimaciones más precisas, es necesario tener muy en cuenta estos factores y recalibrar a menudo el modelo para especies y ambientes específicos. Además, la incorporación de variables adicionales como las relaciones talla-peso, la profundidad y otras condiciones ambientales puede mejorar la precisión de las estimaciones de biomasa y distribución, contribuyendo en última instancia a unas prácticas de gestión pesquera más sostenibles.

Retos y avances en la estimación acústica del tamaño de los peces

La estimación del tamaño de los peces mediante métodos acústicos presenta varios retos importantes, que pueden clasificarse en factores técnicos, biológicos y medioambientales: (i) La precisión de la estimación del tamaño de los peces depende en gran medida de la Fuerza de Blanco (TS), que está influida por la fisiología, la orientación y la profundidad de los peces. Las variaciones del TS debidos a estos factores pueden dar lugar a importantes sesgos en la estimación del tamaño. Es fundamental calibrar correctamente los instrumentos acústicos. Los métodos de calibración, como el uso de esferas de metal e hidrófonos, han mostrado variabilidad en los resultados debido a las condiciones ambientales y las propiedades de los materiales de las esferas (Knudsen, 2006). (ii) La elevada diversidad de especies, especialmente en las regiones tropicales, complica la conversión de las intensidades de los ecos en densidad de biomasa. Las distintas especies y tamaños reflejan el sonido de manera diferente, y los conjuntos de especies mixtas requieren una cuidadosa consideración de las relaciones TS-Longitud específicas de cada especie. La orientación de los peces y sus patrones de natación pueden afectar significativamente a la precisión de las mediciones acústicas. Por ejemplo,

Castillo *et al.*, 2022). However, it is important to note that these factors were not analyzed in the present study, which may have introduced a bias in the results.

These limitations underscore the complexity involved in using TS as a proxy for fish size. To ensure more accurate estimates, it is necessary to carefully consider these factors and often recalibrate the model for specific species and environments. Furthermore, incorporating additional variables such as length-weight relationships, depth, and other environmental conditions into management strategies can enhance the precision of biomass and distribution estimates, ultimately contributing to more sustainable fisheries management practices.

Challenges and advancements in acoustic fish size estimation

Estimating fish size using acoustic methods presents several significant challenges, which can be categorized into technical, biological, and environmental factors: (i) The accuracy of fish size estimation heavily relies on the Target Strength (TS), which is influenced by fish physiology, orientation, and depth. Variations in TS due to these factors can lead to significant biases in size estimation. It is essential to correctly calibrate the acoustic instruments. Calibration methods, such as the use of metal spheres and hydrophones, have shown variability in results due to environmental conditions and the properties of the sphere materials (Knudsen, 2006). (ii) High species diversity, especially in tropical regions, complicates the conversion of echo intensities to biomass density. Different species and sizes reflect sound differently, and mixed species assemblages require careful consideration of species-specific TS-Length relationships. Fish orientation and swimming patterns can significantly impact the accuracy of acoustic measurements. For instance, fish swimming close to nets in circular motions can lead to underestimation of their length (Letessier *et al.*, 2022). (iii) Variations in water temperature, salinity, and other hydrographic conditions can affect the acoustic properties of the medium, influencing the accuracy of size estimates (Knudsen, 2006).

However, advancements in fisheries acoustics are continuously addressing these challenges, with evolving technologies that offer significant improvements in species identification and size classification (Chu, 2011). The introduction of multiple frequencies represented a qualitative step in marine community studies,

los peces que nadan cerca de las redes con movimientos circulares pueden llevar a subestimar su longitud (Letessier *et al.*, 2022). (iii) Las variaciones en la temperatura del agua, la salinidad y otras condiciones hidrográficas pueden afectar a las propiedades acústicas del medio, influyendo en la precisión de las estimaciones de tamaño (Knudsen, 2006).

Sin embargo, los avances en la acústica pesquera están abordando continuamente estos retos, con tecnologías en evolución que ofrecen mejoras significativas en la identificación de especies y la clasificación por tallas (Chu, 2011). La introducción de frecuencias múltiples representó un paso cualitativo en los estudios de comunidades marinas, facilitando la diferenciación de objetivos acústicos en categorías basadas en respuestas de frecuencia relativa (Korneliussen, 2018). Estos avances, incluido el uso de tecnología de banda ancha (Demer *et al.*, 2017), son especialmente prometedores para potenciar la discriminación de especies y mejorar la clasificación de las clases de tamaño de los peces (Simmonds y MacLennan, 2005; Benoit-Bird y Waluk, 2020). Las tecnologías de banda ancha, con su amplio espectro de frecuencias, han demostrado su eficacia para distinguir entre especies y clasificar con precisión el tamaño de los peces (Stanton *et al.*, 2012; Bassett *et al.*, 2018; Kubilius *et al.*, 2020, 2023; Hasegawa *et al.*, 2021; Loranger *et al.*, 2022). Estas mejoras tecnológicas ofrecen un valioso potencial para superar algunas de las limitaciones de la estimación del tamaño de los peces y contribuir a la realización de estudios acústicos más precisos y fiables.

Este estudio proporcionó información valiosa sobre la distribución del tamaño de los peces en los distintos lugares de la zona estudiada. La utilización de datos acústicos de banda estrecha nos permitió estimar con precisión el tamaño de los peces y arrojar luz sobre su densidad y variabilidad. Este estudio pone de relieve el papel fundamental de la tecnología acústica en la obtención de datos esenciales sobre las poblaciones de peces, especialmente en situaciones en las que el muestreo biológico resulta difícil o poco práctico. Como método no invasivo y eficaz, la hidroacústica ofrece una alternativa oportuna y confiable para la evaluación de poblaciones de peces en la investigación contemporánea, contribuyendo a subsanar las limitaciones de los métodos de muestreo tradicionales.

facilitating the differentiation of acoustic targets into categories based on relative frequency responses (Korneliussen, 2018). These advancements, including the use of broadband technology (Demer *et al.*, 2017), are particularly promising for enhancing species discrimination and improving the classification of fish size classes (Simmonds and MacLennan, 2005; Benoit-Bird and Waluk, 2020). Broadband technologies, with their wide frequency spectrum, have proven effective in distinguishing between species and accurately classifying fish sizes (Stanton *et al.*, 2012; Bassett *et al.*, 2018; Kubilius *et al.*, 2020, 2023; Hasegawa *et al.*, 2021; Loranger *et al.*, 2022). These technological improvements offer valuable potential to overcome some of the limitations in fish size estimation and contribute to more precise and reliable acoustic surveys.

Our study provided valuable insights into the fish size distribution across different sites within the study area. By utilizing acoustic narrowband data, we were able to estimate fish sizes with accuracy, shedding light on fish density and size variability. This study highlights the critical role of acoustic technology in obtaining essential fish population data, especially in situations where biological sampling is difficult or impractical. As a non-invasive and effective method, hydroacoustics offers a timely and reliable alternative for fish population assessment in contemporary research, helping to address the limitations of traditional sampling methods.

CONCLUSIONS

This study demonstrates the viability of directly converting acoustic signals into fish length estimates. By employing fish identification algorithms alongside an acoustic energy-to-length conversion model, we successfully estimated the length distribution of anchovies. The data derived from the Single Target algorithm revealed a distribution of anchovies ranging from 8.5 to 16 cm, with a mode of 12.0 cm, while the Tracked Target algorithm identified a length range of 9 to 14 cm, with a mode of 11.5 cm. These findings highlight the effectiveness of hydroacoustic methods in estimating fish size distribution, particularly in areas where traditional biological sampling with fishing nets is not feasible. Moreover, this study provides valuable insights into the distribution patterns of Peruvian anchoveta sizes, laying the groundwork for future surveys and enhancing our understanding of fish population dynamics in environments

CONCLUSIONES

Este estudio demuestra la viabilidad de convertir directamente las señales acústicas en estimaciones de la longitud de los peces. Empleando algoritmos de identificación de peces junto con un modelo de conversión de energía acústica en longitud, se estimó con éxito la distribución de la longitud de las anchovetas. Los datos derivados del algoritmo de blancos individuales revelaron una distribución de anchovetas que oscilaba entre 8.5 y 16 cm, con una moda de 12.0 cm, mientras que el algoritmo de blancos rastreados identificó un rango de longitudes de 9 a 14 cm, con una moda de 11.5 cm. Estos resultados ponen de relieve la eficacia de los métodos hidro acústicos para estimar la distribución del tamaño de los peces, sobre todo en áreas donde no es factible el muestreo biológico tradicional con redes de pesca. Además, este estudio aporta valiosos datos sobre los patrones de distribución de las tallas de anchoveta, sentando las bases para futuros estudios y mejorando la comprensión de la dinámica de las poblaciones de peces en ambientes donde el muestreo directo presenta dificultades.

AGRADECIMIENTOS

Extendemos el más sincero agradecimiento al Departamento de Evaluaciones Directas (DED) del Instituto de Fomento Pesquero (IFOP) por su invaluable apoyo y sus comentarios motivadores, que nos impulsaron al inicio de este proyecto. Nuestro agradecimiento especial a Sergio Lillo, exjefe del Departamento de Evaluaciones Directas, por su destacada labor de liderazgo y orientación. Asimismo, se expresa profunda gratitud al Gobierno Regional de Atacama, Chile, por su constante colaboración y asistencia a lo largo de esta iniciativa. Un agradecimiento muy especial también a la dedicada tripulación de la embarcación pesquera Don Pancracio por sus contribuciones indispensables.

where direct sampling is challenging.

ACKNOWLEDGEMENTS

We extend our sincerest gratitude to the Direct Evaluations Department (DED) of the Fisheries Development Institute (IFOP) for their invaluable support and motivating feedback, which inspired us at the beginning of this project. Our special thanks to Sergio Lillo, former head of the Direct Assessments Department, for his outstanding leadership and guidance. We also wish to express our deep gratitude to the Regional Government of Atacama, Chile, for their continuous collaboration and assistance throughout this initiative. A very special thank you as well to the dedicated crew of the fishing vessel Don Pancracio for their indispensable contributions.

BIBLIOGRAFÍA/LITERATURE CITED

- Alheit, J. and Niquen, M. (2004). Regime shifts in the Humboldt Current ecosystem. *Progress in Oceanography*, 60(2-4), pp.201–222. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2004.02.006>
- Báez, J.C., Gimeno, L. and Real, R. (2021). North Atlantic Oscillation and Fisheries Management during Global Climate Change. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 31, pp. 319–336. <https://doi.org/10.1007/s11160-021-09645-z>
- Balk, H. and Lindem, T. (2000). Amélioration des détections de poissons à partir des données de sonar à double faisceau. *Aquatic Living Resources*, 13(5), pp. 297–303. [https://doi.org/10.1016/S0990-7440\(00\)01079-2](https://doi.org/10.1016/S0990-7440(00)01079-2)
- Bassett, C., De Robertis, A. and Wilson, C.D. (2018). Broad-band echosounder measurements of the frequency response of fishes and euphausiids in the Gulf of Alaska. *ICES Journal of Marine Science*, 75(3), pp. 1131–1142. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsx204>
- Benoit-Bird, K.J. and Waluk, C.M. (2020). Exploring the promise of broadband fisheries echosounders for species discrimination with quantitative assessment of data processing effects. *Journal of the Acoustical Society of America*, 147(1), pp. 411–427. <https://doi.org/10.1121/10.0000594>
- Bertrand, A., Gerlotto, F., Bertrand, S., Gutiérrez, M., Alza, L., Chipollini, A., Díaz, E., Espinoza, P., Ledesma, J., Quesquén, R., Peraltilla, S. and Chavez, F. (2008). Schooling behaviour and environmental forcing in relation to anchoveta distribution: An analysis across multiple spatial scales. *Progress in Oceanography*, 79(2), pp. 264–277. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2008.10.018>
- Bertrand, A., Segura, M., Gutierrez, M. and Vasquez, L. (2004). From small-scale habitat loopholes to decadal cycles: a habitat-based hypothesis explaining fluctuation in pelagic fish populations off Peru. *Fish and Fisheries*, 5(4), pp. 296–316. <https://doi.org/10.1111/j.1467-2679.2004.00165.x>
- Boswell, K.M., Wilson, M.P. and Wilson, C.A. (2007). Hydroacoustics as a tool for assessing fish biomass and size distribution associated with discrete shallow water estuarine habitats in Louisiana. *Estuaries and Coasts*, 30(4), pp. 607–617. <https://doi.org/10.1007/BF02841958>
- Canales, C.M., Adasme, N.A., Cubillos, L.A., Cuevas, M.J. and Nazareth Sánchez (2018). Long-time spatio-temporal variations in anchovy (*Engraulis ringens*) biological traits off northern Chile: an adaptive response to long-term environmental change? *ICES Journal of Marine Science*, 75(6), pp.1908–1923. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsy082>
- Castillo, J., Saavedra, A., Leiva, F., Legua, J., La Cruz, L., Alegría, N., Núñez, S., Silva, J. and Sepulveda, A. (2022). *Estimación de la fuerza de blanco (TS) para las unidades demográficas de anchoveta a nivel nacional 2020-2019*. Chile: Instituto de Fomento Pesquero, p.170.
- Castillo, P.R., Niquen, M., Cruz, L.L., Guevara-Carrasco, R. and Cuadros, G. (2021). Migration behavior of anchoveta (*Engraulis ringens*) in the Northern Humboldt Current System between September 2019 and September 2020. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 49(5), pp.702–716. <http://dx.doi.org/10.3856/vol49-issue5-fulltext-2669>
- Chavez, F.P. and Messié, M. (2009). A comparison of Eastern Boundary Upwelling Ecosystems. *Progress in Oceanography*, 83(1-4), pp.80–96. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2009.07.032>
- Chu, D. (2011). Technology evolution and advances in fisheries acoustics. *Journal of Marine Science and Technology*, 19(3). <https://doi.org/10.51400/2709-6998.2188>
- De Robertis, A. and Higginbottom, I. (2007). A post-processing technique to estimate the signal-to-noise ratio and remove echosounder background noise. *ICES Journal of Marine Science*, 64(6), pp.1282–1291. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsm112>
- Demer, D.A., Berger, L., Bernasconi, M., Bethke, E., Boswell, K., Chu, D., Domokos, R., Dunford, A., Fassler, S., Gauthier, S., Hufnagle, L.T., Jech, J.M., Bouffant, N., Lebourges-Dhaussy, A., Lurton, X., Macaulay, G.J., Perrot, Y., Ryan, T., Parker-Stetter, S. and Stienessen, S. (2015). *Calibration of acoustic instruments. International Council for the Exploration of the Sea (ICES) Copenhagen, Denmark, Copenhagen, Denmark: International Council for the Exploration of the Sea (ICES) C, p.133*. <http://dx.doi.org/10.25607/OBP-185>
- Doray, M., Berger, L., Le Bouffant, N., Yves Coail, J., Vacherot, J.-P., De La Bernardie, X., Morinière, P., Lys, E., Schwab, R. and Petitgas, P. (2016). A method for controlled target strength measurements of pelagic fish, with application to European anchovy (*Engraulis encrasicolus*). *Ices Journal of Marine Science*, 73(8), pp.1987–1997. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsw084>
- Foote, K.G. (1987). Fish target strengths for use in echo integrator surveys. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 82(3), pp. 981–987. <https://doi.org/10.1121/1.395298>
- Ganais, K. (2014). *Biology and ecology of sardines and anchovies*. CRC Press, p. 394
- Garcés, C., Niklitschek, E.J., Plaza, G., Cerna, F., Leisen, M., Toledo, P. and Barra, F. (2019). Anchoveta *Engraulis ringens* along the Chilean coast: Management units, demographic units and water masses: Insights from multiple otolith-based approaches. *Fisheries Oceanography*, 28(6), pp.735–750. <https://doi.org/10.1111/fog.12455>
- Gibson, R.N., Atkinson, A. and Gordon (2016). *Oceanography and Marine Biology*. 1st ed. [online] CRC Press. Available at: <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781420094220-9/review-underwater-stereo-image-measurement-marine-biology-ecology-applications-mark-shortis-euan-harvey-dave-abdo>
- Gutiérrez, M., Swartzman, G., Bertrand, A. and Bertrand, S. (2007). Anchovy (*Engraulis ringens*) and sardine (*Sardinops sagax*) spatial dynamics and aggregation patterns in the Humboldt Current ecosystem, Peru, from 1983?2003. *Fisheries Oceanography*, 16(2), pp. 155–168. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2419.2006.00422.x>

- Gutiérrez, T.M., Castillo, P.J., Naranjo, B.L. and Akester, M.J. (2017). Current state of goods, services and governance of the Humboldt Current Large Marine Ecosystem in the context of climate change. *Environmental Development*, 22, pp. 175–190. <https://doi.org/10.1016/j.en-dev.2017.02.006>
- Harrison, D.E. and Chiodi, A.M. (2015). Multi-decadal variability and trends in the El Niño–Southern Oscillation and tropical Pacific fisheries implications. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 113, pp. 9–21. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2013.12.020>
- Hasegawa, K., Yan, N. and Mukai, T. (2021). In situ broadband acoustic measurements of age-0 walleye pollock and pothead flounder in Funka Bay, Hokkaido, Japan. *Journal of marine science and technology*, 29(2). <https://doi.org/10.51400/2709-6998.1076>
- Hazen, E.L. and Horne, J.K. (2003). A method for evaluating the effects of biological factors on fish target strength. *ICES Journal of Marine Science*, 60(3), pp. 555–562. [https://doi.org/10.1016/S1054-3139\(03\)00053-5](https://doi.org/10.1016/S1054-3139(03)00053-5)
- Hernández-Santoro, C., Landaeta, M.F. and Jorge Castillo Pizarro (2018). Effect of ENSO on the distribution and concentration of catches and reproductive activity of anchovy *Engraulis ringens* in northern Chile. *Fisheries Oceanography*, 28(3), pp. 241–255. [https://doi.org/10.1016/S1054-3139\(03\)00053-5](https://doi.org/10.1016/S1054-3139(03)00053-5)
- Hesterberg, T. (2011). Bootstrap. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 3(6), pp. 497–526. <https://doi.org/10.1002/wics.182>
- Hilborn, R. and Walters, C.J. (2013). Quantitative Fisheries Stock Assessment. *Springer eBooks*, 3(6), p. 570. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-3598-0>
- Hinchliffe, C., Kuriyama, P.T., Punt, A.E., Field, J.C., Thompson, A.R., Santora, J.A., Muhling, B.A., Koenigstein, S., Hervann, P.-Y. and Tommasi, D. (2025). Long-term population trend of northern anchovy (*Engraulis mordax*) in the California Current system. *ICES Journal of Marine Science*, 82(1). <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsae177>
- IFOP (2025). *Programa de seguimiento de las principales pesquerías pelágicas de la zona norte de Chile, entre la Región Arica–Parinacota y Coquimbo, año 2024. Subsecretaría de Economía y EMT / febrero 2025*. IFOP, p. 15.
- Knudsen, H.P. (2006). Gauging the Reliability of Acoustic Instruments for Fisheries Surveys. *Oceans*, 69, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/OCEANS.2006.307044>
- Korneliussen, R.K. (2018). Fifty years of marine tag recoveries from Atlantic salmon. *ICES Cooperative Research Report*, 343, p. 110. <https://doi.org/10.17895/ices.pub.4542>
- Kubilius, R., Bergès, B. and Macaulay, G.J. (2023). Remote acoustic sizing of tethered fish using broadband acoustics. *Fisheries Research*, 260, p.106585. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2022.106585>
- Kubilius, R., Macaulay, G.J. and Ona, E. (2020). Remote sizing of fish-like targets using broadband acoustics. *Fisheries Research*, 228, p.105568. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2020.105568>
- Ladroit, Y., Escobar-Flores, P.C., Schimel, A.C.G. and O'Driscoll, R.L. (2020). ESP3: An open-source software for the quantitative processing of hydro-acoustic data. *SoftwareX*, 12, p. 100581. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2020.100581>
- Letessier, T.B., Proud, R., Meeuwig, J.J., Cox, M.J., Hosegood, P.J. and Brierley, A.S. (2021). Estimating Pelagic Fish Biomass in a Tropical Seascape Using Echosounding and Baited Stereo-Videography. *Ecosystems*, 25(6), pp. 1400–1417. <https://doi.org/10.1007/s10021-021-00723-8>
- Loranger, S., Jech, M.J. and Lavery, A.C. (2022). Broadband acoustic quantification of mixed biological aggregations at the New England shelf break. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 152(4), pp. 2319–2335. <https://doi.org/10.1121/10.0014910>
- Love, R.H. (1971). Measurements of fish target strength: a review. *Fishery Bulletin*, 69(4), pp. 703–715.
- Love, R.H., Fialkowski, J.M. and Jagielo, T.H. (2016). Target strength distributions of Pacific sardine schools: Model results at 500 Hz to 10 kHz. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 140(6), pp. 4456–4471. <https://doi.org/10.1121/1.4966553>
- MacLennan, D., Fernandes, P. and Dalen, J. (2002). A consistent approach to definitions and symbols in fisheries acoustics. *ICES Journal of Marine Science*, 59(2), pp. 365–369. <https://doi.org/10.1006/jmsc.2001.1158>
- Nielsen, J. and Lundgren, B. (1999). Hydroacoustic *ex situ* target strength measurements on juvenile cod (*Gadus morhua* L.). *ICES Journal of Marine Science*, 56(5), pp. 627–639. <https://doi.org/10.1006/jmsc.1999.0515>
- Ñiquen, M. and Bouchon, M. (2004). Impact of El Niño events on pelagic fisheries in Peruvian waters. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 51(6-9), pp. 563–574. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2004.03.001>
- Ona, E. (1999). Methodology for Target Strength measurements (With special reference to in situ techniques for fish and mikro-nekton). *ICES Cooperative Research Report*, 235(65), p. 35. <https://doi.org/10.17895/ices.pub.5367>
- Ortiz, M. (2020). Pre-image population indices for anchovy and sardine species in the Humboldt Current System off Peru and Chile: Years decaying productivity. *Ecological Indicators*, 119, p. 106844. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106844>
- Øvredal, J.T. and Totland, B. (2002). The scantrol FishMeter for recording fish length, weight and biological data. *Fisheries Research*, 55(1-3), pp. 325–328. [https://doi.org/10.1016/S0165-7836\(01\)00274-0](https://doi.org/10.1016/S0165-7836(01)00274-0)
- Palermينو, A., De Felice, A., Canduci, G., Biagiotti, I., Costantini, I., Centurelli, M. and Leonori, I. (2023). Application of an analytical approach to characterize the target strength of ancillary pelagic fish species. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-42326-4>

- Reid, R.G. (2000). Report on echo trace classification. *ICES Cooperative Research Report*, 238, p. 155.
- Robotham, H., Bosch, P., Gutiérrez-Estrada, J.C., Castillo, J. and Inmaculada Pulido-Calvo (2009). Acoustic identification of small pelagic fish species in Chile using support vector machines and neural networks. *Fisheries Research*, 102(1-2), pp. 115–122. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2009.10.015>
- RStudio, T. (2020). *Rstudio: integrated development for r. Rstudio Team*. [online] rstudio.com. Available at: <http://www.rstudio.com>
- Ryan, T.E., Downie, R.A., Kloser, R.J. and Keith, G. (2015). Reducing bias due to noise and attenuation in open-ocean echo integration data. *ICES Journal of Marine Science*, 72(8), pp. 2482–2493. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsv121>
- Sawada, K., Furusawa, M. and Williamson, N.J. (1993). Conditions for the precise measurement of fish target strength in situ. *The Journal of The Marine Acoustics Society of Japan*, 20(2), pp. 73–79. <https://doi.org/10.3135/jmasj.20.73>
- Simmonds, J. and MacLennan, D. (2025). *Fisheries acoustics: Theory and practice. Fish and Aquatic Resources*. [online] <https://books.google.cl/books?id=1w5Lilr3NdoC>. Available at: <https://books.google.cl/books?id=1w5Lilr3NdoC>
- Soule, M., Barange, M., Haakon Solli and Hampton, I. (1997). Performance of a new phase algorithm for discriminating between single and overlapping echoes in a split-beam echosounder. *ICES Journal of Marine Science*, 54(5), pp. 934–938. <https://doi.org/10.1006/jmsc.1997.0270>

