



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Politécnica Superior de Gandia

Monitorización del paisaje sonoro en ecosistemas
bentónicos de profundidad mediante sistemas de acústica
pasiva en plataformas (landers) multiparamétricos

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Acústica

AUTOR/A: Romero García, Sara

Tutor/a: Espinosa Roselló, Víctor

Cotutor/a externo: BOU CABO, MANUEL

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCOLA POLITÈCNICA SUPERIOR DE GANDIA

Master en Ingeniería Acústica



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCOLA POLITÈCNICA
SUPERIOR DE GANDIA

**“MONITORIZACIÓN DEL PAISAJE SONORO EN
ECOSISTEMAS BENTÓNICOS DE PROFUNDIDAD
MEDIANTE SISTEMAS DE ACÚSTICA PASIVA EN
PLATAFORMAS (LANDERS) MULTIPARAMÉTRICOS”**

TRABAJO FINAL DE MASTER

Autor/a:

Romero García, Sara

Tutor/a:

Espinosa Roselló, Víctor

Cotutores:

Bou Cabo, Manuel

Lara Martínez, Guillermo

GANDIA, 2023

Resumen

Los requerimientos tecnológicos de una plataforma diseñada para una observación a largo plazo en el fondo marino (Lander, en la denominación inglesa) son muy exigentes en diferentes aspectos como la alimentación de sistemas, su resistencia al entorno o el almacenamiento o transmisión de datos, junto a la necesidad de permanecer durante meses sumergida adquiriendo datos de forma continua.

En el proyecto LIFE Intemares se desarrolla un proyecto piloto de monitorización de áreas marinas protegidas (AMP) mediante una red de landers que permita la descripción espacial del ecosistema mediante diferentes sensores, con capacidad de monitorizar aspectos tales como presencia de especies protegidas, corrientes en profundidad, dinámica del fondo, etc.

Las funcionalidades programadas son las siguientes:

- Registro del paisaje sonoro mediante sistemas de acústica pasiva para la obtención de indicadores de actividad biológica.
- Desarrollo de un sistema de adquisición de vídeo con detección de presencia de fauna marina mediante una ecosonda de haz simple.
- Registro de variables físicas y de corrientes en profundidad para el estudio de la dinámica del fondo marino (materia en suspensión).

Incluye la instalación de sensores comerciales con una adecuada relación entre su coste y la adecuación al objetivo de monitorización, así como el desarrollo y validación de nuevos sensores de bajo coste (corriente, turbidez, etc).

El objetivo principal del proyecto es la adaptación del sistema pasivo SAMARUC desarrollado por la UPV para misiones de 6 meses de duración. Y el estudio de la compatibilidad del mismo con la presencia de otros sensores electrónicos y acústicos (ecosonda, perfiladores acústicos de corrientes por efecto Doppler o ADCPs etc).

Se analizarán los datos de un fondeo de al menos un mes de duración en la AMP de El Cachucho (mar Cantábrico) a 700 m de profundidad, para la caracterización del ruido submarino de origen antropogénico y las fuentes naturales, ambientales y biológicas (con especial atención a especies de cetáceos), y se propondrán las mejoras oportunas en el diseño del sistema o la planificación de las futuras misiones.

Resum

Els requeriments tecnològics d'una plataforma dissenyada per a una observació a llarg termini en el fons marí (Lander, en la denominació anglesa) són molt exigents en diferents aspectes com l'alimentació de sistemes, la seua resistència a l'entorn o l'emmagatzematge o transmissió de dades, al costat de la necessitat de romandre durant mesos submergida adquirint dades de manera contínua.

En el projecte LIFE Intemares es desenvolupa un projecte pilot de monitoratge d'àrees marines protegides (AMP) mitjançant una xarxa de landers que permeta la descripció espacial de l'ecosistema mitjançant diferents sensors, amb capacitat de monitorar aspectes com ara presència d'espècies protegides, corrents en profunditat, dinàmica del fons, etc.

Les funcionalitats programades són les següents:

- Registre del paisatge sonor mitjançant sistemes d'acústica passiva per a l'obtenció d'indicadors d'activitat biològica.
- Desenvolupament d'un sistema d'adquisició de vídeo amb detecció de presència de fauna marina mitjançant una ecosonda de feix simple.
- Registre de variables físiques i de corrents en profunditat per a l'estudi de la dinàmica del fons marí (matèria en suspensió).

Inclou la instal·lació de sensors comercials amb una adequada relació entre el seu cost i l'adequació a l'objectiu de monitoratge, així com el desenvolupament i validació de nous sensors de baix cost (corrent, terbolesa, etc).

L'objectiu principal del projecte és l'adaptació del sistema passiu SAMARUC desenvolupat per la UPV per a missions de 6 mesos de duració. I l'estudi de la compatibilitat del mateix amb la presència d'altres sensors electrònics i acústics (ecosonda, perfiladors acústics de corrents per efecte Doppler o ADCPs etc).

S'analitzaran les dades d'un fondege d'almenys un mes de duració en la AMP del Cachucho (mar Cantàbrica) a 700 m de profunditat, per a la caracterització del soroll submarí d'origen antropogènic i les fonts naturals, ambientals i biològiques (amb especial atenció a espècies de cetacis), i es proposaran les millores oportunes en el disseny del sistema o la planificació de les futures missions.

Abstract

The technological requirements of a platform designed for long-term observation of the seabed (Lander) are very demanding in different aspects such as powering the systems, their resistance to the environment or the storage or transmission of data, alongside the need to remain submerged for months, continuously acquiring data.

In the LIFE Intemares project, a pilot project for monitoring marine protected areas (MPAs) is developed through a network of landers that allows the spatial description of the ecosystem through different sensors, with the capacity to monitor aspects such as the presence of protected species, currents in depth, background dynamics, etc.

The programmed functionalities are the following ones:

- Recording of the soundscape using passive acoustic systems to obtain indicators of biological activity.
- Development of a video acquisition system with detection of the presence of marine fauna using a simple beam echo sounder.
- Registration of physical variables and currents in depth for the study of the dynamics of the seabed (suspended matter).

It includes the installation of commercial sensors with an adequate relationship between their cost and the adaptation to the monitoring objective, as well as the development and validation of new low-cost sensors (current, turbidity, etc).

The main goal of the project is the adaptation of the SAMARUC passive system developed by the UPV for 6-month missions. And the study of its compatibility with the presence of other electronic and acoustic sensors (echosounder, acoustic current profilers due to Doppler or ADCPs etc).

Data from an anchoring of at least one month duration in El Cachucho AMP (Cantabrian Sea) at a depth of 700 m will be analyzed for the characterization of underwater noise of anthropogenic origin and natural, environmental and biological sources (with special emphasis on attention to cetacean species), and the appropriate improvements will be proposed in the design of the system or the planning of future missions.

Índice

Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Acústica pasiva.....	1
1.2 Proyecto LIFE Intemares	1
1.3 Cetáceos	2
1.3.1 Delfines	2
1.4 Objetivos	3
Capítulo 2. Metodología y marco teórico	4
2.1 Área de estudio: El Cachucho	4
2.2 Recogida de datos.....	4
2.3 Entornos de trabajo.....	6
2.3.1 MATLAB	6
2.3.2 R	6
2.4 Marco teórico. Índices acústicos	6
2.4.1 Índice de complejidad acústica.....	6
2.4.2 Índice de diversidad acústica.....	7
2.4.3 Índice bioacústico.....	8
2.4.4 Índice espectral de diferencia normalizada	9
Capítulo 3. Análisis preliminares y resultados.....	11
3.1 Planteamiento del problema	11
3.2 Primer análisis en Matlab	13
3.2.1 Propiedades del objeto	13
3.2.2 Validación de eventos	14
3.2.3 Resultados del primer análisis.....	15
3.2.4 Implementación parámetro duración en MATLAB	17
3.3 Segundo análisis en Matlab.....	19
3.3.1 Distribución de píxeles.....	19
3.3.2 Programación en Matlab	19
3.3.3 Resultados del segundo análisis	20
3.4 Tercer análisis, aplicación de índices acústicos	24
3.4.1 Índice de complejidad acústica.....	25
3.4.2 Índice de diversidad acústica.....	26
3.4.3 Índice bioacústico.....	26
3.4.4 Índice espectral de diferencia normalizada	27
3.4.5 Resultados del tercer análisis	27

Capítulo 4.	Resultados de la aplicación de los análisis estudiados a los datos del fondeo	28
4.1	Diagramas de caja y bigotes.....	29
4.1.1	Índice de complejidad acústica:	29
4.1.2	Índice de diversidad acústica.....	30
4.1.3	Índice bioacústico.....	30
4.1.4	Índice espectral de diferencia normalizada	30
4.1.5	Resumen del análisis anterior y conclusiones	30
Capítulo 5.	Conclusiones	33
Capítulo 6.	Bibliografía.....	34

Capítulo 1. Introducción

La ingeniería acústica estudia sonidos y vibraciones, estudia cómo se emiten, reciben y transmiten las ondas sonoras por medios físicos y, además, investiga sobre la naturaleza del sonido. Existen distintos ámbitos en ingeniería acústica: arquitectónica, ambiental, electroacústica, caracterización de materiales, instalaciones, ... El ámbito con el que se relaciona este trabajo es la **acústica submarina** [1].

Un 71% de la superficie terrestre está cubierto por agua. Desde siempre, el ser humano se ha sentido intrigado por el océano, los primeros exploradores del océano comenzaron a adentrarse en el mar para recoger alimentos alrededor del año 5000 a.C. [2]. Existen muchísimos sucesos que estudiar en el océano, organismos marinos, procesos físicos que ocurren en el mar, procesos geológicos, ... La acústica submarina estudia cómo se propagan los sonidos en el agua, estos sonidos se encuentran dentro de un amplio rango de frecuencias. El sonido en el agua se propaga unas 4'5 veces más rápido que en el aire, aunque dependiendo de los factores este valor puede variar. La fórmula propuesta por *L.E Kinsler* es la siguiente:

$$c = 1410 + 4'21t - 0'037t^2 + 11s + 0'018d$$

Ecuación 1-1. Velocidad del sonido en el agua según L.E Kinsler

Donde c es la velocidad del sonido (metros por segundo), t es la temperatura (grados Celsius), s es la salinidad y d la profundidad del agua (metros) [3].

Este proyecto se centra en el estudio de grabaciones submarinas grabadas utilizando técnicas de acústica pasiva. La campaña de grabación se realizó en el Mar Cantábrico en diciembre de 2021, como parte del proyecto LIFE Intemares.

1.1 Acústica pasiva

Estudiar animales marinos es un desafío para los científicos, ya que el mar es un entorno poco conocido y con difícil acceso. En el pasado, el estudio de estos animales se limitaba a lo que se pudiera ver desde la superficie, hoy en día, la tecnología se ha desarrollado y es posible utilizar la acústica pasiva para estudiarlos desde dentro del mar.

La acústica pasiva es una técnica que utiliza sensores automáticos para poder estudiar ciertos animales sin intervenir en su comportamiento. Los sistemas de acústica pasiva se realizan con **sensores programables** que permiten recoger datos de manera sencilla [4]. Un ejemplo de una herramienta de acústica pasiva es el **hidrófono**, un transductor de sonido a electricidad que capta el sonido que se propaga en el agua [5].

El sistema utilizado para este proyecto ha sido el **SAMARUC**, creado por investigadores del Instituto iTEAM de la Universitat Politècnica de València. Este dispositivo permite la detección, grabación y clasificación de sonidos de diferentes especies marinas a la vez que contribuye a la protección del entorno marino y el medio ambiente. La ventaja que presenta este dispositivo frente a un simple hidrófono, es que, además de actuar como instrumento de grabación de sonido, integra algoritmos de procesamiento de señal que detectan automáticamente sonidos de **cetáceos** [6]. Este proyecto se centra en la mejora de uno de estos algoritmos, el que detecta los sonidos de **delfín**, así como en analizar las grabaciones con diferentes índices acústicos a la hora de evaluar su paisaje sonoro.

1.2 Proyecto LIFE Intemares

Este trabajo se ha desarrollado gracias a que el campus de Gandía de la Universitat Politècnica de València (UPV) trabaja en el proyecto **LIFE Intemares** desde el 2021 hasta el 2024 (aunque el proyecto en sí comenzó en 2017). Durante este periodo de tiempo se ha desarrollado un amplio

programa de trabajo de investigación, seguimiento, conservación, gestión y formación, así como de comunicación, sensibilización y educación ambiental sobre la biodiversidad marina y costera.

El proyecto LIFE Intemares es el mayor proyecto de conservación del medio marino en Europa. Su objetivo es lograr una gestión eficaz de los espacios marinos de la Red Natura 2000, una red de áreas de conservación de la biodiversidad que se encuentran en la Unión Europea.

La participación de la UPV en el proyecto se centra en desarrollar una red de plataformas (*Landers*) que permitan la observación a largo plazo del fondo marino. De esta manera, se pueden monitorizar aspectos como la presencia de especies protegidas, la dinámica del fondo marino o, en lo que se centra este trabajo, el **ruido submarino**, concretamente el de los **delfines** [7].

1.3 Cetáceos

A los cetáceos se les conoce como un tipo de mamíferos completamente adaptados a la vida acuática, tienen un cuerpo parecido al de los peces, pero realizan respiración pulmonar. En total hay 80 especies de cetáceos repartidas en 12 familias.

La zona donde se ha realizado este estudio, el monte submarino Cachucho, está frecuentada por diversos cetáceos, entre ellos el delfín listado, el común, el mular, el zifio y el rorcual común. Además de delfines, en las aguas profundas del Cachucho hay una colonia estable de cachalotes [8].

Tanto los delfines como los cachalotes presentan **ecolocalización**, es decir, producen sonidos e interpretan el eco de los objetos a su alrededor para conocer el entorno que les rodea. Son capaces de esto gracias a un órgano que presentan en la parte superior de la cabeza, llamado bursas dorsales. En esta zona hay una franja grasa, el melón, que disminuye la resistencia a las ondas de sonido entre el cuerpo de los cetáceos y el agua, aclarando así el sonido.

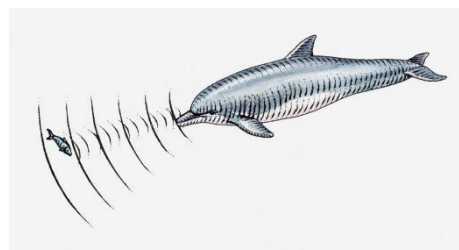


Figura 1-1. Dibujo de delfín utilizando ecolocalización.

Puesto que el seguimiento de las poblaciones de cetáceos en mar abierto es muy complicado, es necesario conocer de manera óptima los patrones migratorios de los mamíferos marinos y los factores antropogénicos que les afectan, como la contaminación acústica. Es por esto por lo que el SAMARUC ayuda de manera muy eficaz a controlar la presencia de estos animales, aportando información muy valiosa respecto al número de animales y especies de la zona [6].

1.3.1 Delfines

Los delfines pueden emitir dos tipos de sonido, **silbidos** y **clicks**.

Los **clicks** son pequeños pulsos de 300 sonidos por segundo que se generan justo debajo de su espiráculo, son sonidos de baja y alta frecuencia que pueden llegar a alcanzar hasta los 150kHz. Utilizan este tipo de sonido para la ecolocalización, gracias a esto pueden determinar información acerca de un objeto: su tamaño, su forma, su textura y su densidad, además de la distancia y dirección en la cual se encuentran. El proceso de la ecolocalización consiste en producir estos **clicks**, que rebotan en el objeto y generan un eco, cuando el delfín procesa el eco generan una especie de **imagen acústica**, similar a una ecografía [9].

Sin embargo, utilizan los **silbidos** para comunicarse entre ellos. Este tipo de sonido se emiten a altas frecuencias (2kHz – 26kHz).

Gracias a los **espectrogramas** se pueden visualizar estos dos tipos de sonidos. Un espectrograma es una representación visual de cualquier tipo de señal acústica, permite identificar las variaciones de la frecuencia e intensidad del sonido a lo largo del tiempo, mostrando en el eje vertical la frecuencia y en el horizontal el tiempo. A continuación, se muestran dos espectrogramas obtenidos con el software SAMLab, donde se pueden visualizar este tipo de sonidos:

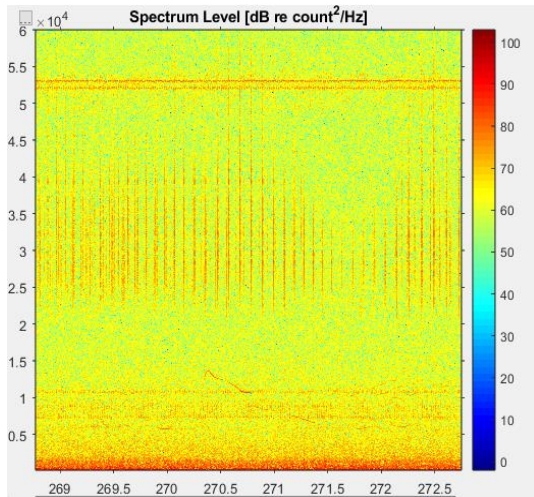


Figura 1-3. Espectrograma donde aparecen clicks de delfín

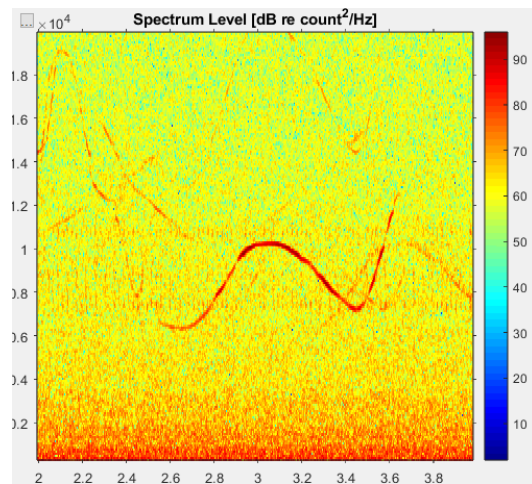


Figura 1-2. Espectrograma donde aparecen silbidos de delfín

Se puede apreciar que ambos sonidos tienen formas diferentes, los *clicks* son señales rectas y pulsadas, se puede ver que su espectrograma forma señales que no son continuas. Son señales direccionales de corta duración que presentan en forma de “trenes”. Mientras que los silbidos, la imagen de la derecha, son curvos y continuos.

1.4 Objetivos

Este proyecto consiste en analizar los datos del fondeo realizado en monte submarino, El Cachucho, a 700 metros de profundidad, para poder mejorar el sistema de detección automática de sonidos de cetáceos, centrándose en el **algoritmo de detección de silbidos de delfines**. Además de comprobar si hacer uso de diversos **índices acústicos** puede ayudar en la previsualización de los datos en un fondeo.

El trabajo se ha dividido en **tres análisis distintos**, los dos primeros tienen el mismo objetivo, y es, perfeccionar el sistema que detecta automáticamente los silbidos de delfín en las grabaciones. A veces, el algoritmo identifica silbidos de delfín donde realmente no los hay, el objetivo de estos dos primeros estudios es arreglar este error para poder perfeccionar el algoritmo.

Respecto al tercer análisis, ha consistido en trabajar con índices acústicos, detallados en el siguiente capítulo. Con este estudio se quiere realizar un análisis metodológico, comprobando si el uso de los índices acústicos puede aportar información relevante de los cetáceos en la zona antes de analizar las grabaciones con el software.

Capítulo 2. Metodología y marco teórico

2.1 Área de estudio: El Cachucho

En el fondo marino se encuentra el sustento para la vida marina, una de las áreas marinas con mayor biodiversidad de nuestro litoral es el **monte Cachucho**.

El Cachucho se trata de un monte submarino que alcanza hasta los 4000 metros de profundidad, de aproximadamente 57 km de longitud y 17 km de anchura, se encuentra en el **mar Cantábrico**. Su nombre se debe a un pescado muy abundante en la zona, la palometa roja, también llamado cachucho.

Este monte se caracteriza por su abundante fauna y recursos biológicos, cuenta con más de 550 especies, se han descubierto una decena de nuevas especies y es una zona a la que acuden un gran número de **cetáceos**. Es por ello por lo que se ha etiquetado como la primera reserva exclusivamente marina de España [10].



Figura 2-1. Ubicación de El Cachucho

2.2 Recogida de datos

En diciembre de 2021 se realizó un fondeo a 700 metros de profundidad en el Cachucho utilizando una **red de landers multiparamétricos**. Un *lander* oceanográfico es una herramienta de acústica pasiva que se utiliza para monitorizar el océano mediante dispositivos de acción remota durante un periodo de tiempo establecido [11].

El hardware utilizado en el proyecto es el **SAMARUC**, un aparato de grabación submarina programable que proporciona al usuario grabaciones de alta calidad y hojas de cálculo con los eventos y estadísticas de la sesión de grabación.

El dispositivo se puede utilizar de dos maneras distintas, o usando una plataforma formada por un ancla, un disparador acústico, el propio SAMARUC, y una boya flotante. O también, se puede fijar en el fondo marino utilizando el ancla, aunque para esta opción hacen falta buzos que lo instalen. Para recoger los datos grabados, en este proyecto se ha utilizado un vehículo submarino que permite instalar y recuperar instrumental oceanográfico fondeado con gran precisión, reduciendo el tamaño y los costes de dicho instrumental. El vehículo se explica detalladamente más adelante en este apartado.



Figura 2-2. Dispositivo SAMARUC

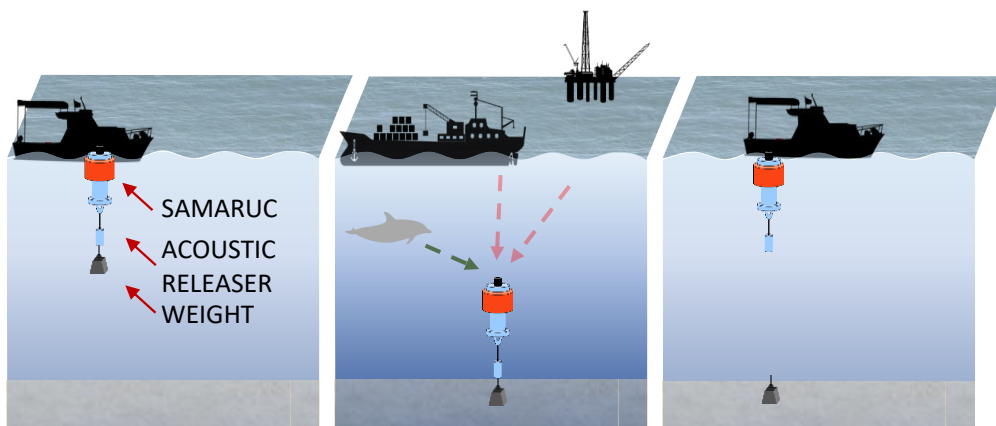


Figura 2-3. Ciclo de despliegue del SAMARUC

En colaboración con el proyecto LIFE Intemares, la UPV ha diseñado y fabricado la estructura de una red de *landers* multiparamétricos. Este componente está formado por una infraestructura **cilíndrica** de acero inoxidable. Consiste en dos anillos unidos por tres barras perpendiculares a sus bases, entre los anillos se colocan los múltiples sensores (sensor de temperatura, de presión, conductividad, etc.) pero también se pueden colocar otros aparatos como una cámara de video, un ADCP o una grabadora de acústica pasiva, como se ve en la figura 5.

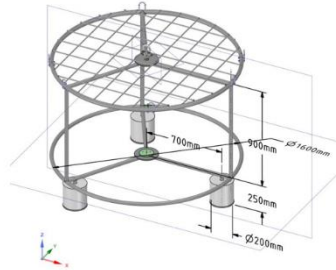


Figura 2-4. Estructura y dimensiones del lander cilíndrico

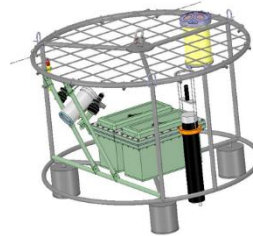


Figura 2-5. Lander cilíndrico con diferentes sensores integrados

Gracias a la configuración seleccionada para el diseño, este aparato no afecta al entorno marino y no necesita medidas de prevención y control de contaminación.

Además, se ha creado un diseño más abreviado de esta herramienta, un **disk lander**. Debido a su diseño simplificado es más difícil introducir los sensores por lo que solo se utiliza para monitorizar las corrientes y variables físicas básicas como la temperatura o salinidad.

Aunque también tiene espacio para poder colocar sobre el de manera horizontal una grabadora de acústica pasiva.

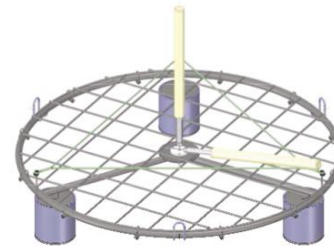


Figura 2-6. Estructura del disk lander

En el fondeo de diciembre de 2021 en El Cachucho se utilizan combinaciones de ambas estructuras dependiendo de las necesidades de cada situación.

Complementariamente, también se ha diseñado un **vehículo submarino** llamado *LanderPick*. Este vehículo es un ROTV (Remotely Operated Towed Vehicle), es decir un vehículo que se controla de manera remota. Se ha diseñado específicamente para instalar y recuperar instrumental oceanográfico fondeado que no posee sus propios elementos de recuperación, pero si que tienen una estructura (malla de recuperación) que hace que puedan ser recogidos mediante un gancho. A continuación, se muestra la estructura y componentes del vehículo:

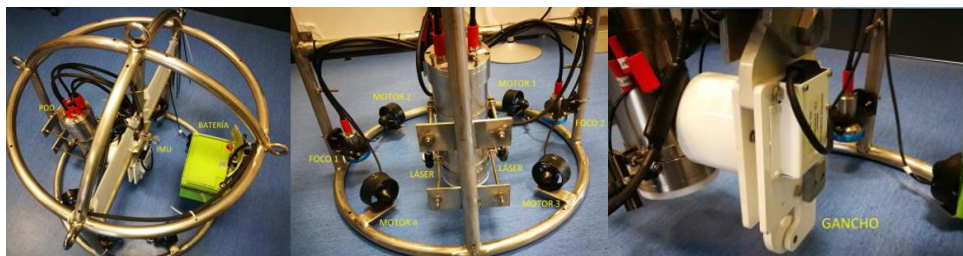


Figura 2-7. Estructura y componentes del vehículo landerpick

Esta estructura está formada por un gancho que se controla de manera remota con un *joystick* y un panel de control desde la cabina del barco, esto permite un control total para el despliegue y recuperación de la estructura en el fondo marino con una alta precisión espacial. Como complementos, una cámara de video, dos focos de luz y dos punteros laser ayudan a guiar los

movimientos. El sistema *lander* multiparamétrico y el vehículo se conectan mediante cuerdas como se puede ver en las figuras 8 y 9.

Respecto al método de recuperación, una vez que el sistema *lander* multiparamétrico se localiza utilizando el sistema de posicionamiento del barco, la extracción del sistema se lleva a cabo utilizando la cuerda con el gancho. En las siguientes figuras se muestra el *LanderPick* (figura 8) y la estructura cilíndrica *lander* escogida para el proyecto LIFE Intemares en el fondeo de diciembre 2021 [12] .



Figura 2-8. Dispositivo landerpick en el fondeo de diciembre en 2021

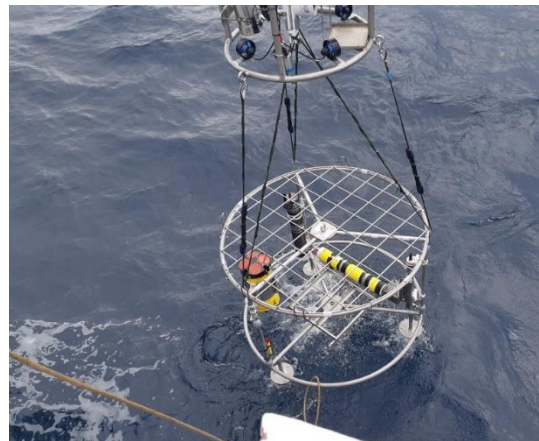


Figura 2-9. Estructura cilíndrica lander en el fondeo de diciembre en 2021

2.3 Entornos de trabajo

2.3.1 MATLAB

Para implementar modificaciones en el algoritmo de detección de silbidos se ha utilizado la plataforma de programación MATLAB, utilizando el software **SAMLab**.

2.3.1.1 SAMLab

SAMLab es un software de escritorio de monitorización acústica pasiva que se utiliza para analizar grabaciones en sesiones de grabación largas. Está formado por **dos herramientas**.

La primera es una herramienta de análisis de audio que, entre otras cosas, permite estudiar el espectrograma, aplicar a la grabación distintos algoritmos de detección automática, escuchar los sonidos y anotar manualmente las grabaciones.

La segunda es una herramienta de visualización, con ella se puede navegar a través de todas las grabaciones utilizando representaciones en *big data*. Esto es muy útil para realizar un primer vistazo a todas las grabaciones y ver los eventos registrados durante el periodo de grabación.

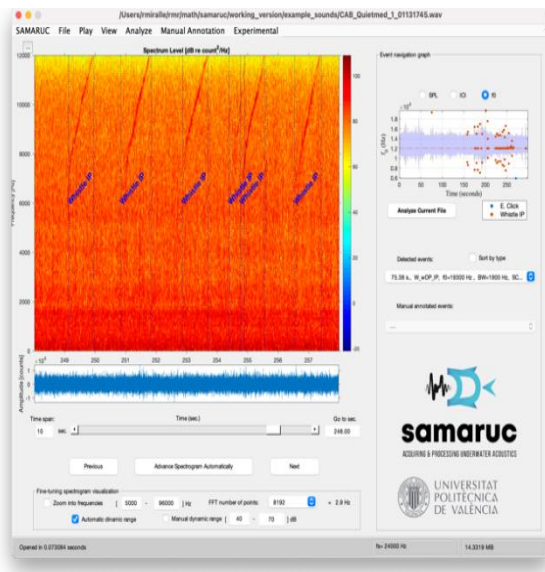


Figura 2-10. Primera herramienta

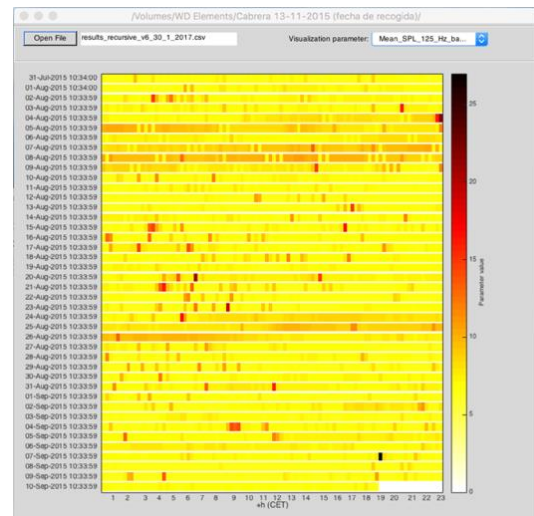


Figura 2-11. Segunda herramienta

Actualmente, SAMLab presenta bastantes algoritmos, detectores automáticos de sonidos de ballenas, de cachalotes ... sin embargo, en este proyecto se ha trabajado con el detector de **silbidos de delfín**. Dentro del código de SAMLab, este algoritmo tiene el nombre de **función whistle**.

La función *whistle* identifica automáticamente los silbidos de delfines captados en las grabaciones, a continuación, se va a explicar su funcionamiento. Al ser una función tiene argumentos de entrada y de salida.

Los argumentos de entrada que necesita esta función son:

- Un vector con la señal temporal de la grabación
- La frecuencia de muestreo
- Un vector con el número de bits y la ganancia
- Un *struct* con la calibración en bandas

Al acabar, la función devolverá los siguientes argumentos de salida:

- Un *struct* con los datos de los silbidos detectados (SPL, ancho de banda, frecuencia máxima, mínima, central...)
- Otro *struct* con otro tipo de indicadores

Después de haberse creado todas las variables necesarias, el programa va analizando fotograma a fotograma la imagen binaria de la grabación escogida.

Para este análisis se utiliza la herramienta de **procesado de imágenes** de Matlab, *regionprops*. *Regionprops* se utiliza para medir propiedades de regiones de imágenes, al utilizar esta función se obtiene una tabla con distintos valores de cada componente (objeto) de conectividad 8 en la imagen binaria. El propósito de la conectividad en una imagen binaria es separar los objetos del ruido de fondo. Utilizando *regionprops* se identifican todos los eventos registrados en el fotograma con el cual se está trabajando en ese momento, y se almacena la información en un objeto. Después, se analiza si cada elemento de este objeto se encuentra en un rango de valores específicos sobre el cual se suelen encontrar silbidos, si el objeto supera todas las condiciones, el evento queda registrado como silbido y aparecerán en SAMLab de la siguiente manera:

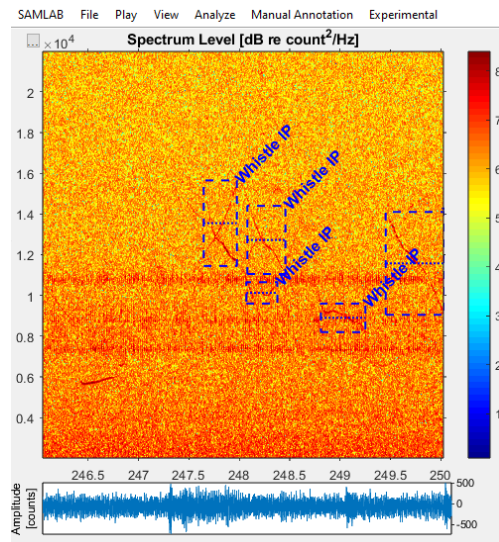


Figura 2-12. Ejemplo indicador silbido en SAMLab

2.3.2 R

R es un lenguaje y software de programación *Open Source* utilizado para el análisis estadístico. Se usa mucho en investigación científica y *machine learning* puesto que se pueden importar distintas librerías y paquetes con funciones específicas. En este caso se ha utilizado el paquete *soundecology*, con el cual se han calculado los índices acústicos explicados a continuación.

2.4 Marco teórico. Índices acústicos

Recientemente, se han creado diversos índices acústicos que se utilizan como una herramienta con el objetivo de evaluar la complejidad o diversidad de un paisaje sonoro. Un paisaje sonoro se forma por el conjunto de sonidos que se producen en ese lugar. Sin embargo, estos índices han sido desarrollados mayoritariamente para entornos terrestres. No hay demasiada información sobre la aplicación de estos índices en entornos submarinos, es por ello por lo que en este trabajo se realiza un estudio sobre su posible uso en fondeos submarinos.

Para mayor comprensión de estos índices primero se ha de tener clara la diferencia entre un sonido **biótico** y uno **antropogénico**. Los sonidos antropogénicos son producidos por los humanos de manera no intencionada, este tipo de sonido es constante en intensidad. Por otra parte, los sonidos bióticos son producidos por los demás organismos vivos y pueden ser tanto voluntarios como involuntarios, estos suelen tener una gran cantidad de intensidades diferentes [13].

Una vez aclarados estos conceptos, se procede a la descripción de los índices acústicos utilizados en este proyecto.

2.4.1 Índice de complejidad acústica

El índice de complejidad acústica, **ACI**, por sus siglas en inglés (*Acoustic Complexity Index*), indica el **grado de complejidad** de un espacio acústico. Se calcula variando las intensidades registradas en las grabaciones a través de intervalos de frecuencia. El objetivo de este índice es registrar sonidos bióticos sin verse alterado por los sonidos antropogénicos. Resumidamente, el ACI contrasta la diferencia de intensidad entre un corto periodo de tiempo de la grabación y el siguiente, teniendo en cuenta los sonidos bióticos e ignorando los antropogénicos [14].

En el software R, este índice se calcula usando *SoundscapeMeter*, cortesía de A. Farina. *SoundscapeMeter* es un *plug-in* del editor de audio *Wavesurfer* para el procesamiento de archivos de sonido.

El cálculo de este índice se realiza haciendo una aproximación de un extracto de la señal para analizar la grabación. Como al final los resultados que se obtienen son acumulativos, grabaciones largas van a devolver valores muy altos del ACI.

Para el cálculo de este índice se utilizan los siguientes parámetros:

- Δt_k : es un intervalo de tiempo
- Δf_i : intervalo (*bin*) de frecuencia
- $I\Delta f_i(t)$: es la intensidad registrada en un Δf_i .

Partiendo de la matriz de intensidades obtenida del espectrograma de la señal, se calcula la diferencia absoluta (d_k) entre dos valores contiguos de intensidad I_k e I_{k+1} en un intervalo de frecuencia (Δf_i).

$$d_k = |I_k - I_{k+1}|$$

Ecuación 2-1. Fórmula de la diferencia absoluta

Después, se suman todos los valores de la diferencia absoluta comprimidos en el primer intervalo temporal de la grabación (este intervalo es de elección propia, pueden ser 5 segundos, 10 segundos, etc.).

$$D = \sum_{k=1}^n d_k$$

Ecuación 2-2. Sumatorio de la diferencia absoluta

Donde D es la suma de todas las d_k contenidas en j, siendo j:

$$j = \sum_{k=1}^n \Delta t_k$$

Ecuación 2-3. Sumatorio del intervalo de tiempo

Y siendo n el número de Δt_k en j.

Para calcular la intensidad relativa y reducir el efecto de la distancia de los animales al micrófono, D se divide entre la suma total de los valores de intensidad registrados en j:

$$ACI = \frac{D}{\sum_{k=1}^n I_k}$$

Ecuación 2-4. ACI en un solo paso temporal

Donde el ACI ha sido calculado en un solo paso temporal (j) y en un solo intervalo de frecuencias (Δf_i). Después, el ACI, se calcula para todos los pasos temporales de la grabación:

$$ACI_{(\Delta f)} = \sum_{j=1}^m ACI$$

Ecuación 2-5. ACI en todos los intervalos de frecuencia

Siendo m el número de total de j en toda la grabación. $ACI_{(\Delta f)}$ equivale a el ACI de todo el intervalo de frecuencia. Finalmente, el ACI para todos los intervalos de frecuencia de toda la grabación se calcula como [15]:

$$ACI_{tot} = \sum_{l=1}^q ACI_{(\Delta f)}$$

Ecuación 2-6. ACI total de la grabación

2.4.2 Índice de diversidad acústica

La abreviación de este índice es **ADI** (*Acoustic Diversity Index*), este índice calcula el **índice de diversidad de Shannon**. Con este índice se mide la diversidad específica en un ecosistema, es

decir, se realiza una separación por especies. El resultado normalmente varía entre 0,5 y 5, aunque los resultados normales suelen estar entre 2 y 3 [16].

El **ADI** se calcula realizando la división del espectrograma en intervalos de igual tamaño (bins), por defecto en 10, y utilizando la proporción de las señales de cada *bin* por encima de un umbral establecido, por defecto, 50 dBFS. El ADI es el resultado del **índice de Shannon** aplicado a esos *bins*.

En R, este índice ha sido calculado en el paquete *soundecology* por *Luis J. Villanueva-Rivera* utilizando otros dos paquetes, *TuneR* para guardar el archivo (.wav) de sonido como un objeto, y el paquete *seewave*. *Seewave* permite guardar los valores numéricos de la amplitud del espectrograma dentro de una matriz. Una vez hecho esto, se puede calcular el índice de *Shannon* con la fórmula:

$$H' = \sum_{i=1}^S p_i \ln p_i$$

2-7. Ecuación para calcular el índice de Shannon

Donde p_i es la fracción de sonido en la banda de frecuencia que indique i en ese momento, en un total de s bandas de frecuencia [17]. Teniendo en cuenta que la proporción de sonido que hay en cada banda de frecuencia puede asociarse a diferentes especies.

2.4.3 Índice bioacústico

El índice bioacústico, **BIO**, calcula la energía total en el rango de frecuencias establecido, en este caso el rango en el que se encuentran los silbidos de delfín, pero puede variar según el animal que se quiera analizar. Se utiliza para estimar la **abundancia de la especie** comparándola con la vegetación de la zona. Se suele utilizar para investigar diferencias entre distintas especies de un mismo tipo de animal [18].

Este índice se calcula en *soundecology* con una inspiración de un código de Matlab, proporcionado por *Natalie T. Boelman*, la creadora del Índice Bioacústico.

Para la explicación de este índice se va a utilizar la siguiente gráfica de un estudio ejemplo realizado a la avifauna por *N.T Boelman*.

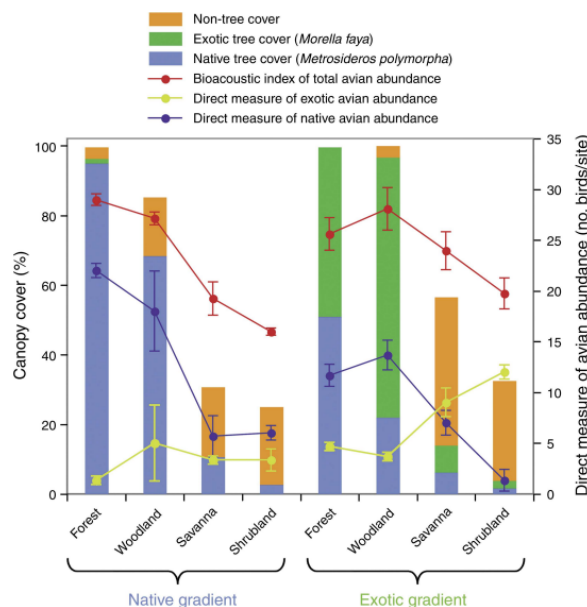


Figura 2-13. Gráfica resumen estudio avifauna

La gráfica anterior es un **ejemplo** de un uso de este índice para la abundancia de aves en relación con la vegetación (nativa y exótica) de la zona. La altura total de las barras del histograma muestra estimaciones en porcentaje del hábitat formado por las copas de los árboles de la zona. Según el tipo de árbol se muestra en naranja, azul, o verde. Los símbolos y líneas (rojo, azul y amarillo) que aparecen son medidas de la abundancia de las aves estudiadas en el ejemplo.

El índice bioacústico (rojo) se calcula a partir del espectro bioacústico de cada lugar (frecuencia Hz vs, nivel de sonido dB). El área bajo cada espectro bioacústico incluye todas las bandas de frecuencia asociadas con el valor en dB que es mayor que el valor mínimo de dB para cada espectro. Los valores del área son, por tanto, una función tanto de nivel de sonido como de número de bandas de frecuencia usadas por la fauna [19].

2.4.4 Índice espectral de diferencia normalizada

El **NDSI** (*Normalized Difference Soundscape Index*) indica la proporción entre ruido antropogénico y biótico estimando el nivel de perturbación humana sobre el paisaje sonoro. El índice se varía entre -1 y +1, valores positivos indican la presencia de sonidos bióticos y valores negativos, antropogénicos.

El cálculo del NDSI se realiza con un código de Matlab creado por *S. Gage*, que estima la proporción de sonidos acústicos generados por los humanos (antropogénicos) y por los demás organismos (bióticos).

Este código se encarga primero de calcular el nivel general de sonidos bióticos presentes en la señal acústica, para esto calcula la **densidad espectral de potencia** (*PSD*, por sus siglas en inglés) de la señal con el método de Welch (1967) [20].

$$PSD_{Welch}(u) = \frac{1}{K_W} \sum_{k=1}^K P_K(u)$$

Ecuación 2-8. Fórmula de Welch (1967) para el cálculo de la densidad espectral de potencia

Luego, se hace una estimación rectangular de la integral de la densidad espectral de potencia para los rangos de frecuencia establecidos para las señales bióticas y antropogénicas. En la gráfica siguiente se observa un **ejemplo** de histograma formado por intervalos del mismo tamaño (*bins*) en este caso de 1kHz cada uno, donde el eje horizontal es la frecuencia y el vertical la densidad de potencia espectral normalizada. Cada *bin* del histograma representa una estimación del total de densidad espectral de potencia para un rango de 1kHz específico. Los *bins* oscuros representan los sonidos antropogénicos mientras que los blancos representan los bióticos.

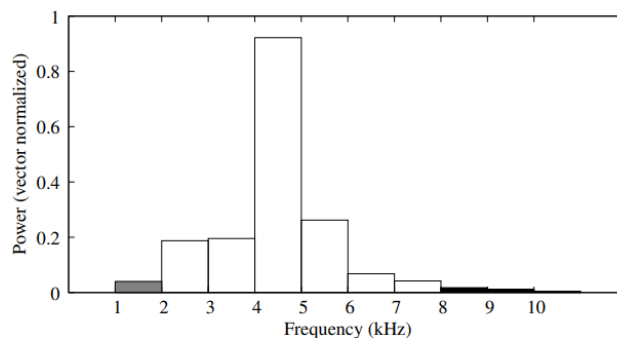


Figura 2-14. Gráfica ejemplo de bins

Finalmente, el **NDSI** se calcula con la siguiente fórmula:

$$NDSI = \frac{\beta - \alpha}{\beta + \alpha}$$

Ecuación 2-9. Cálculo del NDSI

Donde β y α son la estimación total de la densidad espectral para el mayor *bin* de tamaño 1kHz, el biótico y el antropogénico, respectivamente. Como resultado de aplicar esta fórmula se obtienen valores que van desde -1 hasta +1, donde los valores positivos indican la presencia de sonidos bióticos y los valores negativos, antropogénicos [21].

Capítulo 3. Análisis preliminares y resultados

En este capítulo se explican los **tres análisis preliminares** que se han realizado para el proyecto. El primero y segundo tienen como objetivo perfeccionar el algoritmo de SAMLab que detecta los **silbidos de delfín**, *WHISTLE_without_DP*. Las modificaciones a esta función se han realizado para poder eliminar las detecciones de silbidos de delfín erróneas. Este problema consiste en que, a veces, el software indica que hay silbidos de delfín en las grabaciones cuando realmente no los hay. El principal objetivo del trabajo es corregir este problema y que solo detecte los silbidos de delfín que realmente lo son.

Por otra parte, el tercer análisis se ha realizado utilizando distintos índices acústicos con el objetivo de encontrar una manera previa de analizar grandes cantidades de grabaciones antes de aplicar un software, esto permite hacerse una idea previa de lo que se va a encontrar en las grabaciones y tener otra manera de abordar los objetivos que se quieren obtener.

Se ha trabajado con las grabaciones obtenidas en el fondeo de diciembre de 2021, pero, puesto que en fondeo se obtuvieron muchas grabaciones, a la hora de realizar los análisis se ha priorizado tener un equilibrio entre algo abordable y acotado. Por tanto, el periodo de grabaciones que se ha utilizado ha sido de 5 días, desde el 24 hasta el 29 de diciembre, lo que equivale a un total de **503 grabaciones** de 5 minutos cada una.

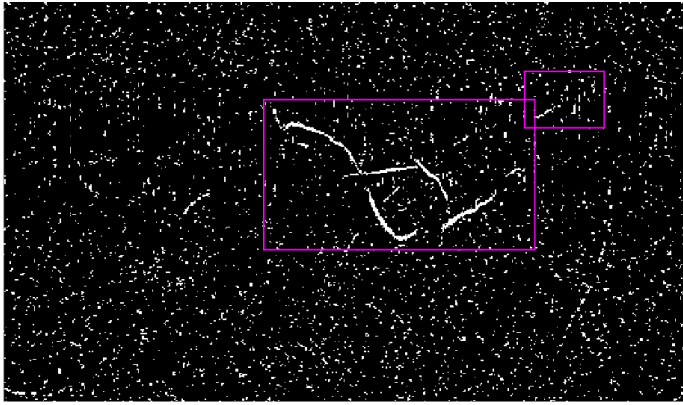
3.1 Planteamiento del problema

A continuación, se explica el problema de los **silbidos falsos** detectados para el primer y segundo análisis. Antes que nada, se ha de tener en cuenta el aspecto que tiene un silbido de delfín de manera visual. Los silbidos tienen aspecto de una o varias líneas curvas continuas, como en Matlab se van a ver los fotogramas de manera binaria, estas líneas serán de color blanco. En la siguiente imagen, un fotograma extraído de las grabaciones que contiene muchos silbidos de delfín:



Figura 3-1. Fotograma con silbidos de delfín

Seguidamente, se puede ver una serie de imágenes binarias, obtenidas por el algoritmo de Matlab, donde se representan en **recuadros los silbidos detectados por el algoritmo**, se puede apreciar que dentro de algunos recuadros no hay verdaderamente un silbido.



En este primer ejemplo se observan dos recuadros, en el grande se puede observar claramente la presencia de silbidos, son líneas curvas y continuas como las de la figura 1. Sin embargo, se forma otro recuadro más pequeño en la parte superior de la imagen, indicando que se ha detectado un silbido, aunque no lo hay, solo es ruido de fondo. Este tipo de recuadros son los que se van a identificar como **falsos silbidos**.

Figura 3-2. Primer ejemplo de silbido falso detectado

En las siguientes figuras se muestran más ejemplos de fotogramas de las grabaciones analizadas por el algoritmo de detección automática de silbidos de delfín. En ellas se pueden observar diversos recuadros que representan los **candidatos a silbidos**, se les procede a llamar de esta manera porque, aunque el objeto se encuentre en un rectángulo no significa que sea un silbido de delfín al 100%, tal y como se puede observar en las siguientes imágenes.

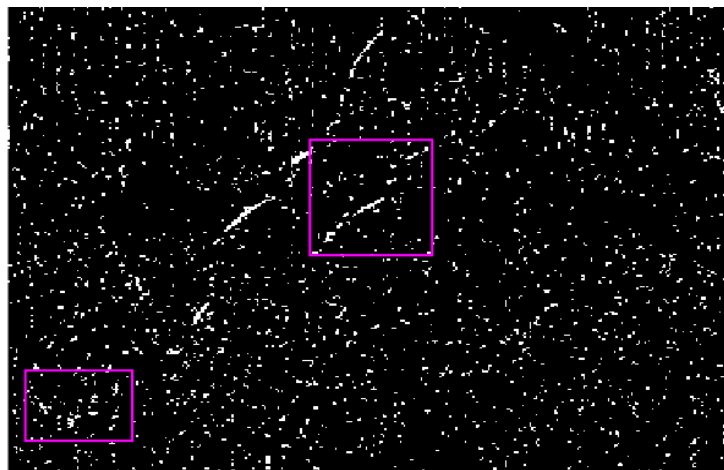


Figura 3-3. Ejemplo 2 de silbido falso detectado

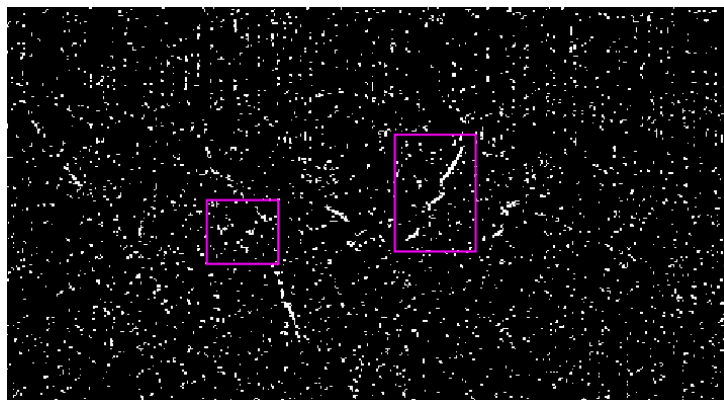


Figura 3-4. Ejemplo 3 de silbido falso detectado

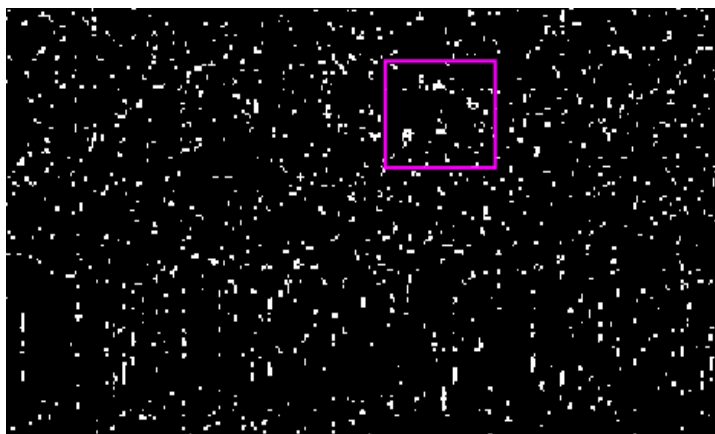


Figura 3-5. Ejemplo 4 de silbido falso detectado

En los ejemplos aparecen más silbidos falsos detectados como reales, en la figura 3 aparece en la esquina inferior izquierda, en la figura 4, en el primer recuadro.

El objetivo de los dos primeros análisis es lograr que, de todos los candidatos a silbidos de delfín, el máximo posible sean silbidos reales. En estos dos análisis se proponen dos maneras distintas de solucionar este problema.

3.2 Primer análisis en Matlab

3.2.1 Propiedades del objeto

Para evitar que se detecten como silbidos objetos que en realidad no lo son, hay que averiguar cuáles son las propiedades de un verdadero silbido y las de uno que no sea real para poder realizar un filtrado según sus diferentes propiedades.

En la función sobre el cual se trabaja en este apartado, *whistle*, hay una variable que muestra las propiedades del objeto que ha detectado como silbido, la variable se llama *objetos_whistle_final*. Si la función se ejecuta poco a poco se pueden ir viendo las propiedades de cada objeto que detecta el programa. Las propiedades que se obtienen con esta variable son el **área**, el **centroide** y el **bounding box**.

En un objeto, el área es el tamaño del propio objeto. El centroide es la posición media aritmética de todos los puntos de la figura. El *bounding box* son las coordenadas de los bordes que encierran una imagen, es decir, cada esquina del recuadro es por ello por lo que hay 4 columnas.

El primer proceso para encontrar porqué se detectan algunos candidatos a silbidos que no son silbidos ha sido el siguiente. Se ha ido ejecutando la función poco a poco, fotograma por fotograma, se han anotado en una hoja Excel las propiedades de 29 silbidos reales y las de 12 falsos. Obteniendo así una tabla con las propiedades anteriormente mencionadas de los 41 candidatos a silbidos.

De primeras se han escogido “pocos” objetos ya que ha sido un trabajo manual para tantear el valor de las propiedades de estos y ver si había una solución rápida. Con la tabla creada, a primera vista no se puede ver que puede causar que los objetos que no son silbidos que se identifiquen como tal. Ni ordenando las columnas de mayor a menor o menor a mayor se pudo encontrar ningún patrón que indicara porque sucedía nuestro error.

Finalmente, se llega a la conclusión de que con tan pocos datos el problema no puede solucionarse y se pasa a la siguiente fase del análisis.

3.2.2 Validación de eventos

Esta fase del análisis consiste en utilizar el fichero proporcionado por SAMlab, *detected_events*. Este fichero es un archivo *.mat* que contiene los eventos que el software ha detectado automáticamente como silbidos de delfín en las grabaciones.

Se ha estudiado una parte del fondeo, 5 días, desde el 24 hasta el 29 de diciembre. En este periodo de tiempo el algoritmo original de detección de silbidos ha detectado 7230 candidatos a silbidos. Se ha decidido que estos 5 días son una muestra clara del fondeo, ya que hay grabaciones que contienen muchos silbidos y grabaciones que apenas contienen ninguno, además, al obtener 7230 eventos (una cantidad considerable) se han podido obtener conclusiones.

Puesto que no todos los eventos registrados son realmente silbidos, se ha creado un breve *script* en Matlab que muestra imágenes de los 7230 eventos, una por una. Con este *script* se puede indicar manualmente si se trata de un silbido, pulsando el 1, o si no, pulsando el 0. El objetivo de este proceso es validar todos los eventos registrados para ver cuáles de ellos son realmente silbidos y cuales no, y poder hacer un análisis más extenso obteniendo nueva información.

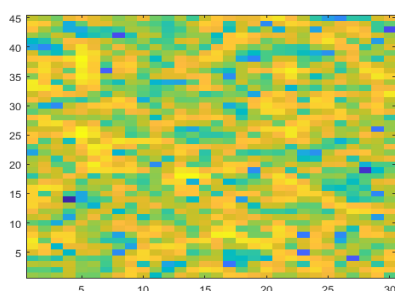


Figura 3-7. Ejemplo de fotograma donde no hay un silbido

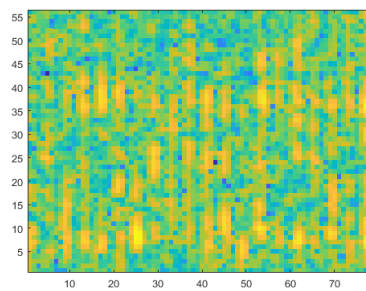


Figura 3-6. Otro ejemplo de fotograma donde no hay un silbido

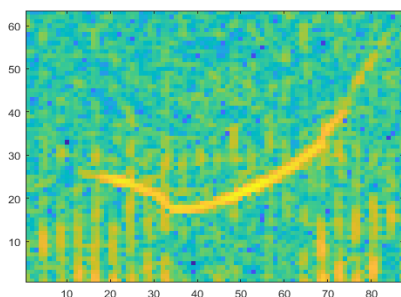


Figura 3-8. Ejemplo de fotograma donde sí hay un silbido

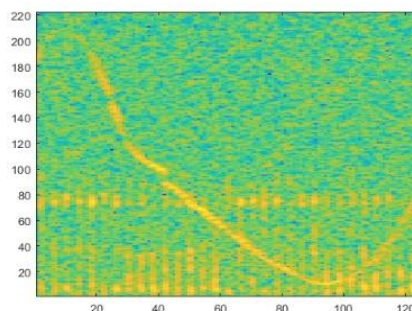


Figura 3-9. Otro ejemplo de fotograma donde sí hay un silbido

En estas cuatro figuras se puede ver el tipo de imágenes que se obtienen con el *script*, en las dos de arriba no se puede identificar ningún silbido, mientras que en las dos de abajo se ve resaltada la forma característica de los silbidos de delfín, por lo que sí que hay uno en cada una.

Al acabar la validación de todos los eventos se ha obtenido un fichero *.mat* con todos los eventos registrados, de esos 7230 candidatos a silbidos detectados inicialmente tan sólo 1719 han resultado ser silbidos de verdad.

Con este proceso se han obtenido nuevas propiedades de cada evento:

- Start: El tiempo de comienzo del silbido (en muestras)
- End: El tiempo de finalización del silbido (en muestras)
- Fmin: La frecuencia mínima del silbido (Hz)

- Fmax: La frecuencia mínima del silbido (Hz)
- F0: La frecuencia central
- Bw: El ancho de banda
- SPL: El SPL del evento (dB)

3.2.3 Resultados del primer análisis

De estas propiedades se han calculado los siguientes **histogramas**, en azul los silbidos reales y en naranja los silbidos falsos, es decir, los candidatos a silbido que han resultado no serlo:

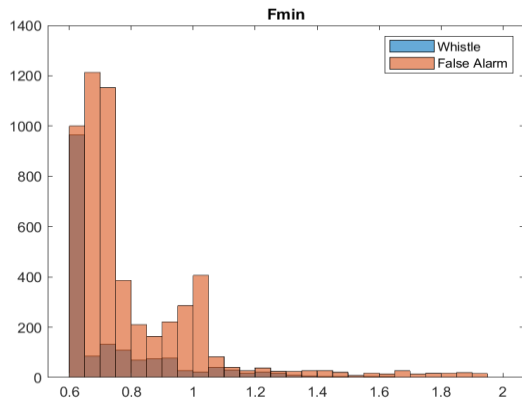


Figura 3-10. Histograma de la frecuencia mínima

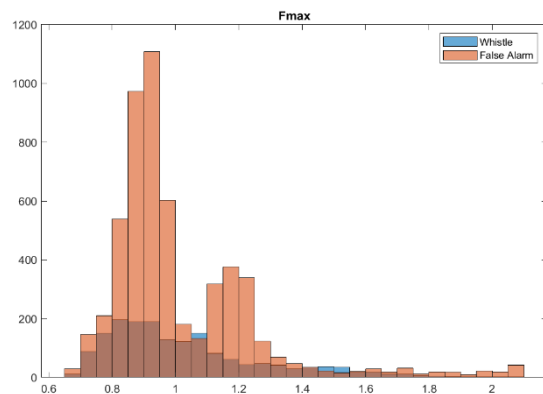


Figura 3-11. Histograma de la frecuencia máxima

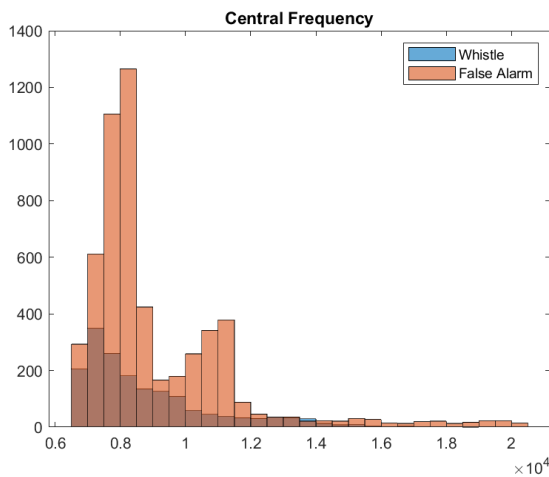


Figura 3-12. Histograma frecuencia central

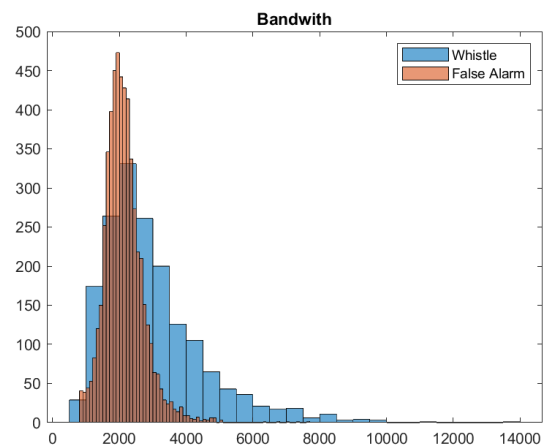


Figura 3-13. Histograma ancho de banda

En estos histogramas se representan en **naranja** las 5511 **falsas alarmas** y en **azul** los 1719 **silbidos reales**. El eje vertical representa la cantidad de silbidos en cada valor y el eje horizontal el valor del parámetro que representa el histograma. Viendo los histogramas de las frecuencias no se encuentra ninguna diferencia significativa entre el comportamiento de los silbidos falsos y de los reales. En la figura 13, el histograma del ancho de banda, se puede ver que los silbidos falsos están comprendidos en un rango de valores menor que los reales, aproximadamente de 1000 a 5000 Hz, mientras que los reales se encuentran en un rango de 500 Hz a 10000 Hz.

Sin embargo, si se decidieran eliminar los silbidos con un ancho de banda menor a 5000 Hz se perderían demasiados silbidos reales por lo que no es una opción acertada.

Puesto que filtrando los eventos según estas propiedades no se ha podido solucionar el problema, se ha decidido implementar un nuevo parámetro a partir de estos, la **duración** del silbido. Calculada con la siguiente fórmula:

$$duración = (start - end) * \frac{1}{f_s}$$

Ecuación 3-1. Fórmula para calcular la duración de un silbido.

Donde la frecuencia de muestreo es 192 kHz. Aplicando la fórmula, se obtiene la duración de cada silbido en segundos.

Una vez hecho esto, se separaron las duraciones de los silbidos reales (1719) y la de los falsos (5511) y se elaboró un gráfico similar a los anteriores para poder observar visualmente el comportamiento de estos.



Figura 3-14. Histograma con la duración de los silbidos falsos y reales

En la figura 14 se puede ver un gráfico con dos curvas. La naranja, representa los silbidos falsos, es decir, los que realmente no lo son, y la azul, que son los eventos validados que realmente si son silbidos de delfín. Respecto a los ejes, el eje vertical representa la cantidad de silbidos y el eje horizontal los intervalos de tiempo (segundos) en los que se encuentra cada silbido. Se puede observar que la mayoría de los silbidos de la curva naranja se encuentran antes de los 0'4 segundos de duración. Mientras que, en la curva azul, los silbidos no comienzan a aparecer hasta los 0'3 segundos.

Con la representación de este histograma se llegó a la conclusión de que la mejor idea para perfeccionar el detector de silbidos era establecer un tiempo mínimo a partir del cual se empiecen a contar como válidos los silbidos. Para entenderlo más claramente, en la figura 15 se ha dibujado una línea en gris sobre el histograma que equivale a un **umbral**. Esto significa que los candidatos a silbidos solo se van a clasificar como silbidos si superan el umbral de tiempo establecido. Los silbidos a la izquierda de la línea se perderían y todos los de la derecha serian clasificados como silbidos reales. Hay que tener en cuenta que, al establecer el umbral, se dejarán de detectar muchos falsos silbidos, pero además se descartarán algunos que sí que son reales.



Figura 3-15. Representación del umbral en el histograma

Es por ello por lo que se ha de encontrar el umbral óptimo con el cual no se pierdan demasiados silbidos reales. Para esto, se ha calculado el porcentaje de pérdidas según el umbral. Estos cálculos se muestran en la siguiente tabla:

Posición umbral		silbidos (%)	
		falsos	reales
0,3 (s)	<i>se pierden</i>	84,85	15,31
	<i>se quedan</i>	15,15	84,69
0,35 (s)	<i>se pierden</i>	84,85	15,31
	<i>se quedan</i>	15,15	84,75
0,4 (s)	<i>se pierden</i>	94,14	37,60
	<i>se quedan</i>	5,86	62,40

Figura 3-16. Tabla del estudio para determinar umbral optimo

La primera columna de la tabla indica los distintos umbrales analizados, es decir, a partir de qué segundo se van a empezar a contar los candidatos a silbidos como silbidos reales. En las siguientes columnas se indica el porcentaje de silbidos, reales y falsos, que se perderían y los que se quedarían según el umbral. Por ejemplo, con un umbral a partir de 0'3 segundos, se eliminarían el 84'85% de los silbidos falsos, pero también el 15'31% de los reales.

Tras valorar las diversas opciones, se ha escogido el umbral de 0'35 segundos ya que se pierde un 84'85% de silbidos falsos y tan solo un 15'31% de silbidos reales, lo cual no es demasiado.

3.2.4 Implementación parámetro duración en MATLAB

Para implementar la duración en el algoritmo modificado se ha realizado lo siguiente. Se ha añadido un **nuevo parámetro** al *struct* que contiene todas las propiedades del evento registrado, este nuevo parámetro es la duración. Que se ha calculado siguiendo la ecuación 1. El código funciona de igual manera que el algoritmo sin modificar, salvo que una vez registrados los candidatos a silbidos cada uno de ellos pasa por un nuevo filtro. Este nuevo filtro se trata de una condición según la cual, al analizar la duración de los candidatos a silbidos, si esta es menor de 0'35 segundos el evento se borra, es decir, no se cuenta como silbido.

A continuación, algunos ejemplos de fotogramas de cómo queda el resultado del estudio:

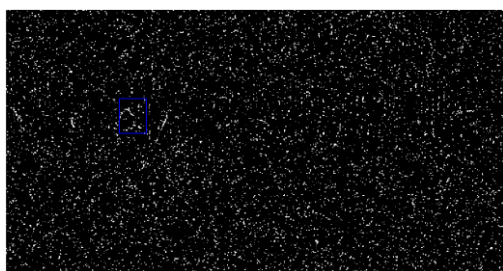


Figura 3-17. Ejemplo 1 del resultado

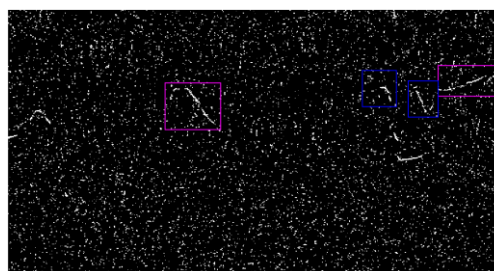


Figura 3-18. Ejemplo 2 del resultado

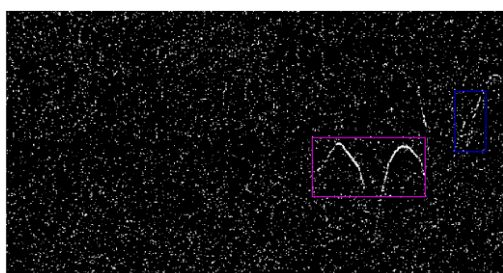


Figura 3-19. Ejemplo 3 del resultado

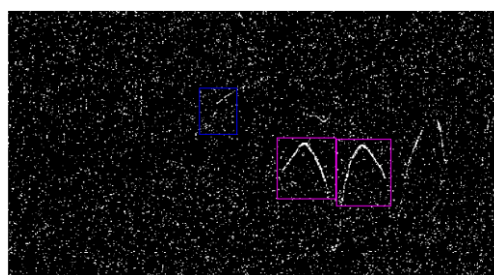


Figura 3-20. Ejemplo 4 del resultado

Las figuras anteriores representan 4 fotogramas binarios de distintos momentos de las grabaciones. Los recuadros en morado representan los candidatos a silbidos que han superado el nuevo filtrado y, por tanto, se establecen como silbidos reales. Los azules representan lo contrario, es decir, son candidatos a silbidos que al principio se registraban como silbidos pero que tras pasar por el filtro de la duración dejaron de considerarse como tal y por tanto se eliminan.

Como se indica en la figura 16, este nuevo filtrado no es 100% efectivo, se van a perder un 15% de los silbidos reales. Pero estas pérdidas merecen la pena ya que también se perderán un 85% de falsos silbidos.

3.3 Segundo análisis en Matlab

El análisis anterior muestra buenos resultados, sin embargo, finalmente se pierde un porcentaje de silbidos reales. Con el objetivo de reducir este porcentaje de pérdidas de los silbidos reales se ha realizado un estudio morfológico de las grabaciones aplicando tratamiento digital de imágenes.

3.3.1 Distribución de píxeles

Matlab permite realizar **procesado de imágenes** de manera muy completa. La otra idea que se propuso para distinguir los silbidos falsos de los reales fue analizar la distribución de los píxeles de los candidatos a silbidos.

La idea es trabajar con la parte de la imagen que se detecta como silbido, recorrer ese trozo de la imagen por columnas y contar cuantos píxeles blancos hay en cada columna. Como se ha comentado al inicio del capítulo, un silbido suele tener una forma continua y curva y, además, un grosor similar en toda la curva, la forma más común de estos se ve en la siguiente imagen:

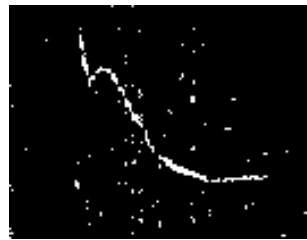


Figura 3-21. Ejemplo forma más común de un silbido

Es por esto por lo que para que un candidato a silbido se considere como silbido real, el número de píxeles blancos en cada columna debería de ser similar, indicando así que su forma tiene un grosor similar en cada columna. Además de similar, el número de píxeles blancos en cada columna debe de ser continuo, es decir que no haya demasiados píxeles negros entre los blancos.

3.3.2 Programación en Matlab

Lo primero que se ha realizado para abordar este problema ha sido un **filtrado del ruido de fondo** en la imagen para poder analizar los píxeles del silbido en sí con más claridad y que al contar los píxeles blancos solo se cuenten los que realmente pertenecen al silbido. Esto se ha realizado utilizando la función de Matlab *medfilt2*, que se encarga de realizar un filtrado de mediana de la imagen en 2D, esta función se suele utilizar para eliminar el ruido de sal y pimienta en imágenes por lo que ha sido útil para este proceso. A continuación, varios ejemplos visuales de como quedan las imágenes tras quitarles el ruido de fondo.



Figura 3-22. Ejemplo 1 de silbido con ruido de fondo



Figura 3-23. Ejemplo 1 de silbido sin ruido de fondo



Figura 3-24. Ejemplo 2 de silbido con ruido de fondo

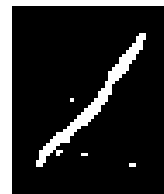


Figura 3-25. Ejemplo 2 de silbido sin ruido de fondo

Como cada silbido tiene formas y grosores distintos, la función de filtrado de ruido no actúa a la perfección en todos ellos, pero sí que se obtiene un buen resultado, consiguiendo que los píxeles blancos que forman el silbido no se confundan con los del ruido de fondo.

Una vez arreglado esto, se ha recorrido la imagen resultante de la función anterior por columnas. Contando cuantos píxeles blancos hay en cada columna, y obteniendo un vector de una sola fila y tantas columnas como tenga el evento detectado. En cada columna aparece la suma de todos los píxeles blancos de las filas de la columna. Con este vector resultante se puede analizar mejor el silbido y analizar la continuidad del silbido.

Para comprobar la **continuidad** del silbido se ha realizado lo siguiente. Leyendo una por una las columnas de este nuevo vector, cuando el valor de una posición del vector sea distinto de 0 se comprueba si cumple la condición explicada a continuación y si la cumple, el valor en esa posición se convertirá a 0. Esta condición se ha establecido analizando el contenido de muchos vectores obtenidos de diferentes silbidos. Hay tres condiciones independientes que pueden hacer que esto ocurra:

- Si las dos posiciones anteriores y las dos posteriores a esa posición son 0
- Si la antepenúltima y las dos posteriores son 0
- Si las dos anteriores y la siguiente a la posterior son 0

Una vez aplicada esta condición el vector con los píxeles se actualiza y se aplica al trozo de la imagen donde está el silbido.

3.3.3 Resultados del segundo análisis

Con este método, los resultados obtenidos son buenos. Los silbidos reales se mantienen como silbidos y los silbidos falsos se eliminan casi por completo. A continuación, unas imágenes con ejemplos de los silbidos antes (imágenes de la izquierda) y después (imágenes de la derecha) de pasarles el código modificado.

Primeramente, se muestran tres **silbidos reales** antes y después de aplicarles el algoritmo modificado según la distribución de píxeles:



Figura 3-26. Ejemplo 1 de silbido antes



Figura 3-27. Ejemplo 1 de silbido después



Figura 3-28. Ejemplo 2 de silbido antes

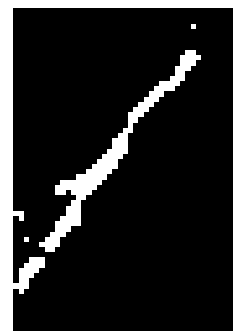


Figura 3-29. Ejemplo 2 de silbido después



Figura 3-30. Ejemplo 3 de silbido antes



Figura 3-31. Ejemplo 3 de silbido después

En los tres ejemplos anteriores puede observarse como el silbido real queda con la misma forma, pero sin el ruido de fondo tras aplicar el algoritmo modificado, con lo cual se sigue considerando como silbido.

A continuación, se muestran tres candidatos a silbidos que realmente son **falsas alarmas** (no son silbidos de delfín) antes y después de aplicarles el algoritmo modificado. En ellas se observa el efecto contrario a lo que sucede con las figuras anteriores, los píxeles blancos que forman el falso silbido se eliminan casi por completo, dejando de ser un candidato a silbido.

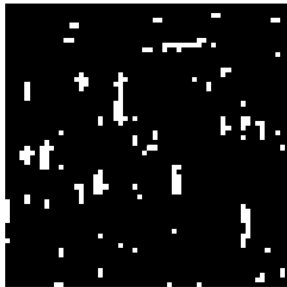


Figura 3-32. Ejemplo 1 de falsa alarma antes

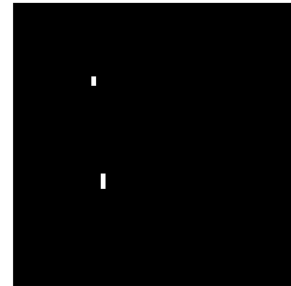


Figura 3-33. Ejemplo 1 de falsa alarma después



Figura 3-34. Ejemplo 2 de falsa alarma antes



Figura 3-35. Ejemplo 2 de falsa alarma después



Figura 3-36. Ejemplo 3 de falsa alarma antes



Figura 3-37. Ejemplo 3 de falsa alarma después

Se ha realizado un histograma con el porcentaje de reducción de los píxeles a todos los candidatos a silbidos.

En la siguiente gráfica se muestra cómo se comporta el algoritmo de **distribución de píxeles**, propuesto en este proyecto, para todos los candidatos a silbidos sugeridos por el algoritmo de silbidos original. En el eje horizontal se muestra el porcentaje y en el vertical la cantidad de silbidos. Se muestran dos colores, el azul con los silbidos reales y el naranja con los falsos silbidos. Respecto a los resultados, se ve que la barra más pronunciada se encuentra en el extremo derecho, es decir, el porcentaje de 90% a 100%. Esto significa que en unos 4700 falsos silbidos aproximadamente, sus píxeles se han reducido entre un 90% y un 100%.

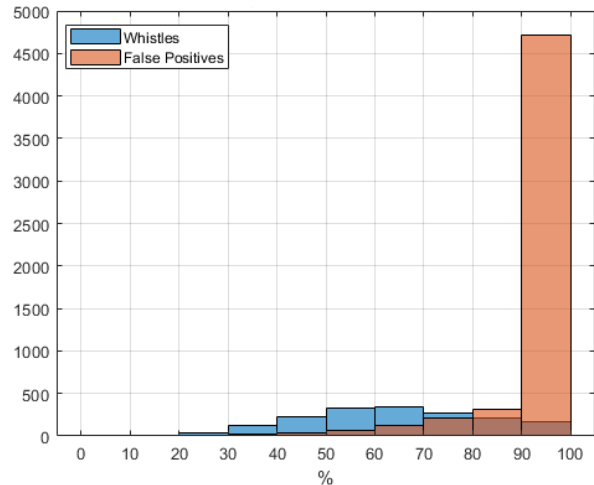


Figura 3-38. Histograma con el % de reducción de píxeles

Se ha obtenido, además, la **curva PR** (precisión – recall). La gráfica PR es una herramienta que permite visualizar la relación entre la precisión y la sensibilidad del algoritmo, es una herramienta muy utilizada en el ámbito de *machine-learning*. Para entender esta curva primero se han de explicar algunos conceptos, aplicados al algoritmo modificado de los silbidos.

Contextualizando, casi ningún algoritmo de detección automática es 100% perfecto, esto quiere decir que a veces el modelo va a equivocarse, es decir, habrá falsos positivos y falsos negativos:

- **FP** (False positives): Estos son muestras negativas las cuales se han clasificado erróneamente como positivas, para nuestro caso serían píxeles que no contienen un silbido de delfín que se detecta como silbido de delfín, las falsas alarmas que se tratan de corregir durante todo el capítulo.
- **FN** (False negatives): Son muestras positivas las cuales se han clasificado de manera incorrecta como negativas. Aunque es menos común en este caso, también puede darse el caso en el que un silbido de delfín pase desapercibido por el algoritmo y no se detecte como tal.

Se espera que el algoritmo de detección automática también funcione correctamente, por tanto, también se van a encontrar:

- **TP** (True positives): Muestras positivas clasificadas correctamente. Los silbidos de delfín que se detectan de manera correcta.
- **TN** (True negatives): Son las muestras negativas clasificadas correctamente. En este caso son los píxeles de la imagen los cuales no forman un silbido de delfín, y, por tanto, no se detecta como silbido de delfín.

Una vez explicadas estas cuatro posibilidades, se proceden a explicar los conceptos precisión y recall.

- **Precisión:** Equivale al porcentaje de clasificaciones correctas del modelo, lo que vienen a ser todas las muestras que el modelo ha identificado como positivas, ya sean incorrectas (FP) o correctas (TP). Se calcula con la siguiente fórmula:

$$precision = \frac{TP}{TP + FP}$$

Ecuación 3-2. Fórmula para calcular la precisión

- **Recall:** El *recall* equivale a la **sensibilidad** del modelo, es decir, el porcentaje de muestras positivas de la base de datos, ya sean detectadas (TP) o no detectadas (FN).

$$recall = \frac{TP}{TP + FN}$$

Ecuación 3-3. Fórmula para calcular el recall

El equilibrio entre estas dos métricas se relaciona de manera que si disminuye la precisión aumenta el *recall* y viceversa. Puesto que un modelo de predicción no va a ser 100% perfecto nunca, se debe tener en cuenta que, si un valor es muy preciso, el otro no lo será tanto. Por ejemplo, si se quiere que el detector sea **muy sensible** a los silbidos (aumentar el *recall* a un valor muy cercano a 1), la precisión del modelo sería bastante imprecisa, prácticamente aleatoria. En el caso contrario, si es más conveniente tener un detector **muy preciso** identificando silbidos de delfín, se van a omitir muchos silbidos que también son verdaderos y esto va a disminuir la sensibilidad del modelo.

Recordando el proceso del principio del capítulo de validación de eventos, después de validar los archivos se obtienen 1719 true positivos, es decir, silbidos reales y 5511 falsas alarmas. El objetivo es evaluar la curva PR al introducir el algoritmo de porcentaje de reducción de píxeles. La curva PR después de añadir el algoritmo de reducción de píxeles a los candidatos a silbidos es la siguiente:

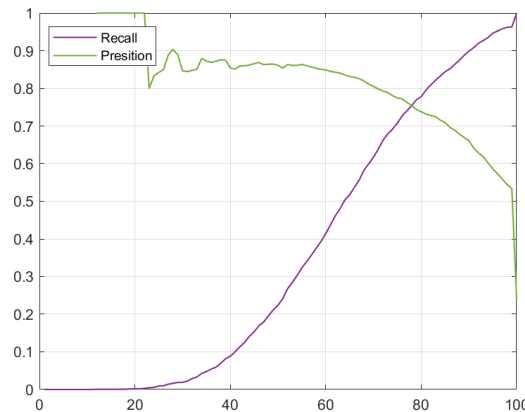


Figura 3-39. Curva PR

En la gráfica se puede observar cómo cambia el *recall* y la precisión de los candidatos a silbidos según el umbral que se haya utilizado para discriminar entre True Positives y False Positives. Como era de esperar, al aumentar la sensibilidad disminuye la precisión. Si se observa la parte final de la gráfica se observa que en el punto 99, la gráfica tiene un pico donde comienza a subir de repente el *recall* y la precisión comienza a bajar. Si se situara un umbral justo en ese punto donde las dos curvas comienzan a distanciarse, eliminando la parte que queda a la derecha, se lograrían mantener prácticamente todos los silbidos reales y eliminar la mayoría de falsas alarmas.

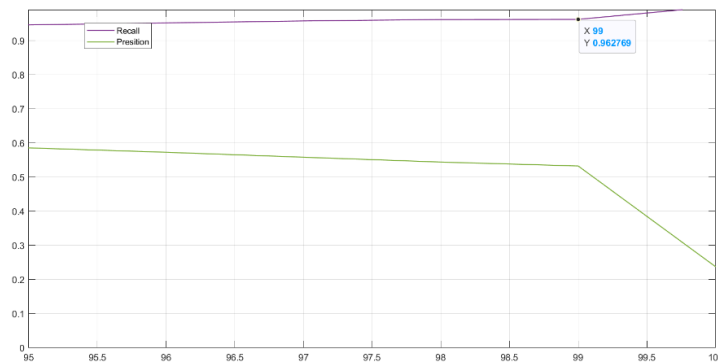


Figura 3-40. Curva PR zoom

3.4 Tercer análisis, aplicación de índices acústicos

Las grabaciones acústicas realizadas en el Cachucho son difíciles de analizar puesto que contienen mucha información, dejando atrás las modificaciones del software en Matlab, se ha realizado otro estudio utilizando los **índices acústicos** explicados en el capítulo 2.

El objetivo de este análisis es obtener información de las grabaciones antes de aplicar los algoritmos de Matlab, de esta manera se logra ahorrar tiempo. Este estudio ha consistido en elegir un fichero que presente muchos silbidos de delfín y uno que tuviera muy pocos, estos ficheros se han escogido visualizando el *heatmap* de todas las grabaciones. Como archivo que tiene muchos silbidos se ha escogido una grabación del 25/12/2021 y como archivo con pocos una del 16/12/2021. Para este estudio se ha analizado cada archivo por separado, dividiendo cada archivo en archivos de 10 segundos, quedando así el archivo del día 25 en 31 archivos y el del 16 en 31 también, ya que presentan la misma duración.

A todos estos archivos se les han aplicado los diversos índices acústicos explicados anteriormente, estos han sido:

- El índice de complejidad acústica
- El índice de diversidad acústica
- El índice bioacústico
- El índice espectral de diferencia normalizada

Antes de pasar a los resultados obtenidos, hay que tener en cuenta dos aspectos relevantes sobre el estudio. La primera es que las grabaciones duran 4,9955 minutos, no 5 por lo que, al dividir el archivo en archivos más pequeños, el archivo 31, es decir, el último tiene una duración de 9,73 segundos en vez de 10 por lo que hay veces que este último punto no se debería tener en cuenta.

El otro aspecto a tener en cuenta es que, en el silbido del 16 de diciembre, a pesar de no haber silbidos, en el minuto 4:22 (al final de la grabación) aparece el sonido del **ADCP**, *Acoustic Doppler current profiler*. Esto es un instrumento que mide la corriente hidroacústica y cuyo ruido ha afectado a esta grabación, sin embargo, se ha seguido utilizando esta grabación para ver si los índices podrían distinguir entre los sonidos de delfín y otro tipo de sonidos. El espectrograma de este ruido es totalmente diferente al que tienen los silbidos de delfín:

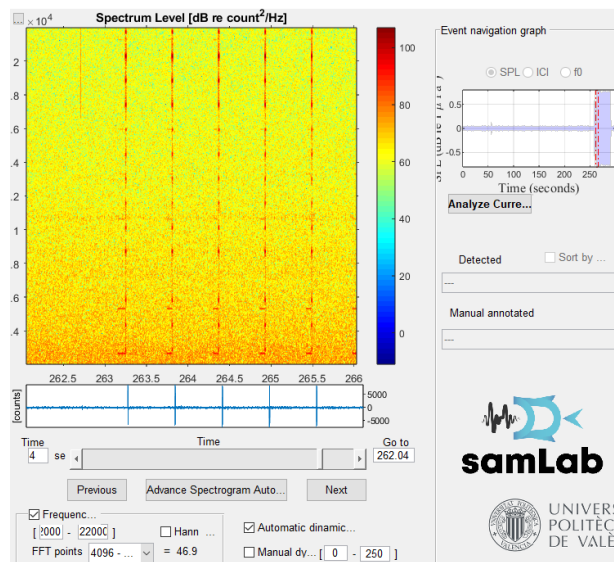


Figura 3-41. Espectrograma del ruido del ADCP

Aclarados estos dos aspectos, se presentan los resultados obtenidos para cada uno de estos índices. En las gráficas mostradas a continuación aparecen dos series, una azul representando al día en el que se detectaron muchos silbidos y otra verde representando al día en el que no había. Cada una de ellas está formada por puntos, cada uno de estos puntos equivale a un archivo. La gráfica

avanza temporalmente, el eje horizontal está en segundos y cada punto está distanciado 10 segundos del anterior. En el eje vertical se muestra el valor obtenido para cada índice.

3.4.1 Índice de complejidad acústica

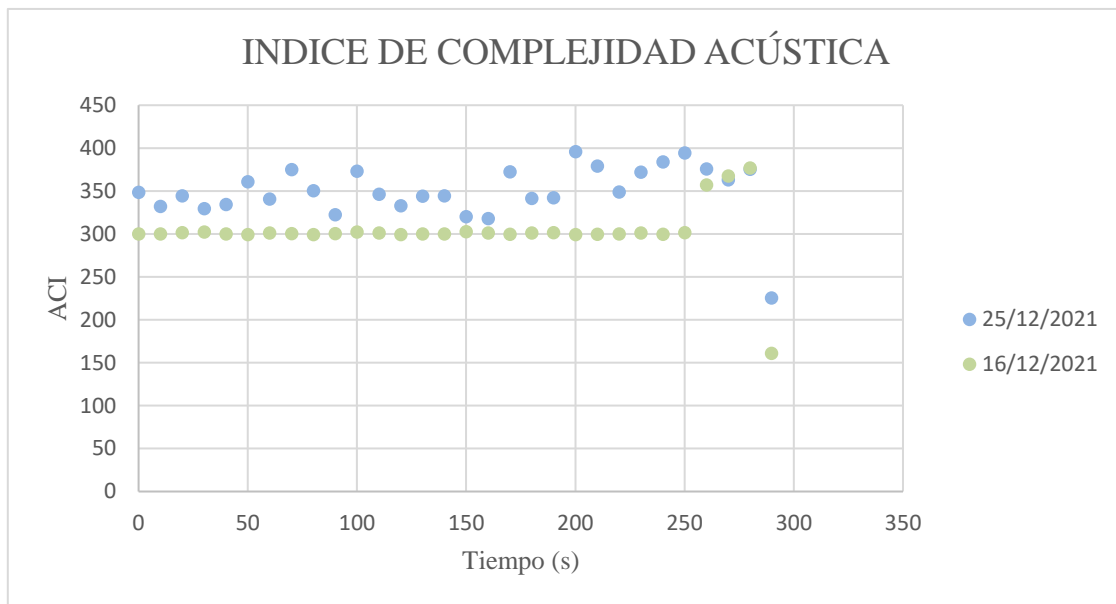


Figura 3-42. Resultados ACI

El aspecto más notable de esta gráfica es la diferencia en la forma entre las dos series. La serie verde, del día que no se habían detectado silbidos, permanece con un valor constante (300) formando una línea recta, mientras que la azul presenta valores más diversos por lo que forma una línea curva con subidas y bajadas.

La explicación para el comportamiento de estas dos series se debe a que, como se ha explicado anteriormente, el índice de complejidad acústica es sensible a los sonidos bióticos y no a los antropogénicos. Es por ello por lo que la línea verde se mantiene constante al no haber sonidos bióticos (de animales). Sin embargo, hay tres puntos (260, 270 y 280) al final de la serie verde que de repente rompen el patrón constante y comienzan a ascender. Estos tres puntos son justo en el instante en el que ADCP aparece en las grabaciones.

Como se ha mencionado al principio, se pueden ver que el último punto de cada serie tiene un valor muy diferente a los demás, no se debería tener en cuenta ya que la duración de este archivo es distinta a la de todos los demás.

3.4.2 Índice de diversidad acústica

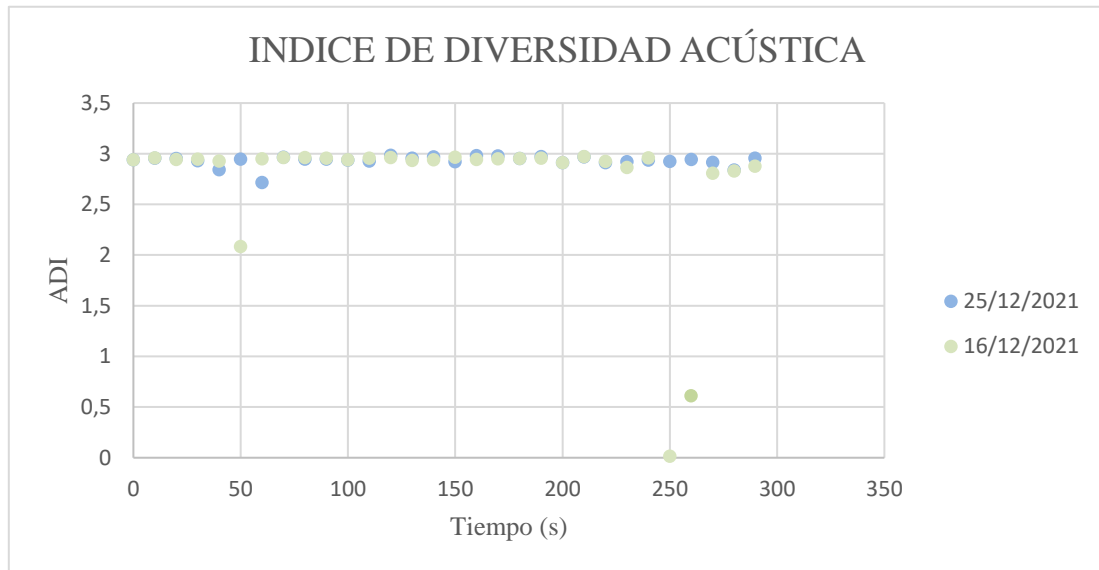


Figura 3-43. Resultados ADI

En esta gráfica las dos series presentan casi la misma forma y valor, ambas forman una línea recta con valor 3 aproximadamente. El punto del segundo 60 de la serie azul es el más distanciado de los demás con un valor de 2,7, pero es prácticamente el mismo valor que los demás.

Como el índice de diversidad acústica representa la diversidad de especies en el ecosistema, y en esta grabación (25/12/2021) solo aparecían silbidos de delfín tiene sentido que el valor sea constante. En la otra grabación (16/12/2021) no hay silbidos, pero tampoco se escucha a ninguna otra especie animal por lo que el valor también es constante.

Hay tres puntos anómalos en la serie verde, el del segundo 50 con un valor de casi 2. Y los más interesantes, los del segundo 250 y 260 con un valor de casi 0 aproximadamente, muy distintos a los demás. Esto coincide de nuevo con el instante en el que se empieza a escuchar el ADCP.

3.4.3 Índice bioacústico

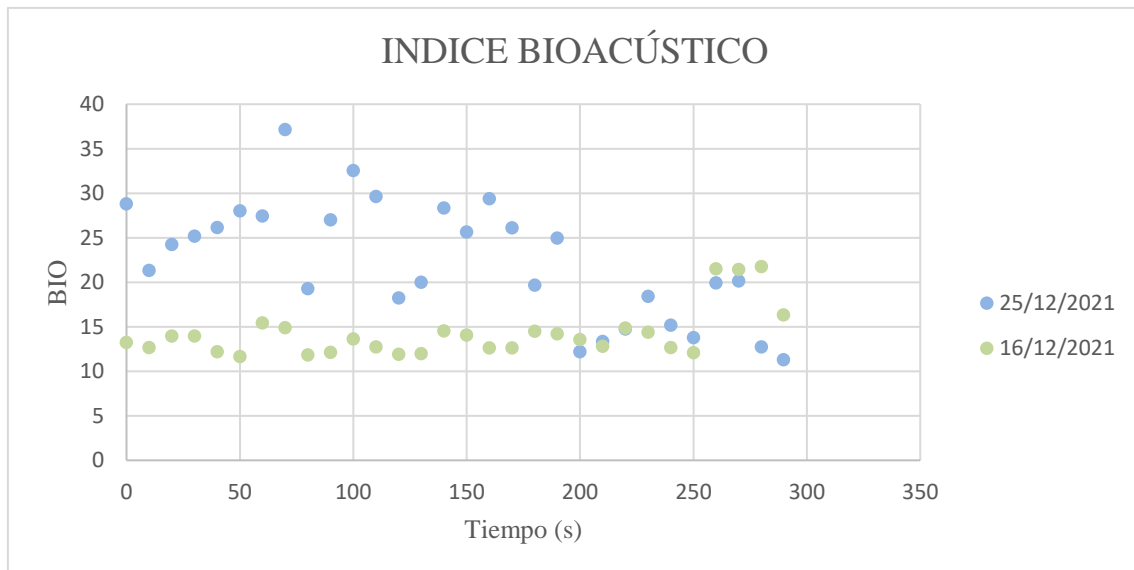


Figura 3-44. Resultados BIO

La serie azul tiene valores más altos que la serie verde generalmente. Ambas presentan formas dispersas que suben y bajan, aunque en la azul es más notable este comportamiento. A partir de

segundo 250, la serie verde aumenta notablemente el valor del índice. Sin embargo, este índice no aporta resultados demasiado relevantes al estudio.

3.4.4 Índice espectral de diferencia normalizada

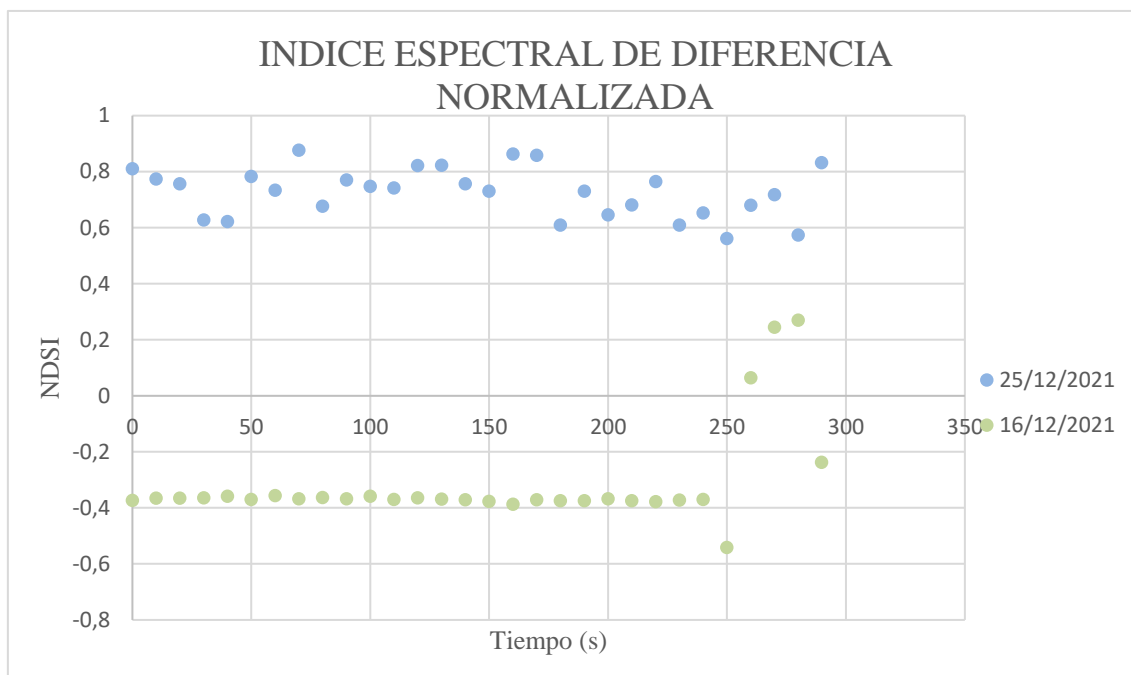


Figura 3-45. Resultados NDSI

Esta gráfica es interesante ya que se ve claramente que los valores del día 25 son positivos y los del día 16 negativos. Como se ha explicado en el capítulo 2, para este índice valores positivos indican la presencia solamente de sonidos bióticos y valores negativos indican la presencia de sonidos solamente antropogénicos. Es por ello, que en la grabación donde se encuentran los sonidos bióticos, los delfines, todos los valores son positivos. En la otra, al no haber sonidos bióticos son negativos.

Sin embargo, hay algunos puntos dispares en la serie verde. Como siempre, a partir del segundo 250 cuando se detecta el ADCP.

3.4.5 Resultados del tercer análisis

Los índices que más información aportan a este estudio son el índice de complejidad acústica y el índice espectral de diferencia normalizada.

Con el **ACI** se puede ver la clara diferencia entre la grabación donde no hay sonidos y donde si los hay. Por otra parte, el **NDSI** además de mostrar esto también aporta otro dato interesante. En el trozo donde se encuentra el ruido del ADCP los valores son mucho más inferiores al valor de los silbidos de delfín por lo que se podrían distinguir silbidos de delfín de otro tipo de ruido.

Capítulo 4. Resultados de la aplicación de los análisis estudiados a los datos del fondeo

En este capítulo se presentan los resultados de este proyecto. Hay que recordar que se han escogido solo **5 días del fondeo** (24 al 29 de diciembre) ya que hay más de 7000 silbidos en ellos y se ha priorizado trabajar con una cantidad de datos abordable y acotada. Además, 5 días representan una muestra clara del fondeo y permiten sacar conclusiones ya que hay días con muchos silbidos y días con pocos o ninguno. Sin embargo, en un futuro se pretende expandir este estudio a más días y más fondeos.

A continuación, se exponen dos gráficas, comúnmente utilizadas en el campo de la bioacústica. En el caso de los ficheros utilizados en este proyecto, estas gráficas indican la presencia de silbidos de delfín antes y después de aplicar las modificaciones al algoritmo, desde el día 24 hasta el 29 de diciembre. En el eje horizontal aparecen las horas de la grabación y en el vertical el día. Si se detecta al menos un silbido en la hora correspondiente de la grabación, el píxel correspondiente a dicha hora pasa del color blanco al negro. Con este tipo de gráfica se puede apreciar cómo tras validar los silbidos, la gráfica pasa de ser casi negra a tener muchos más trozos en blanco, es decir, disminuyen la mayoría de ellos porque eran falsas alarmas.

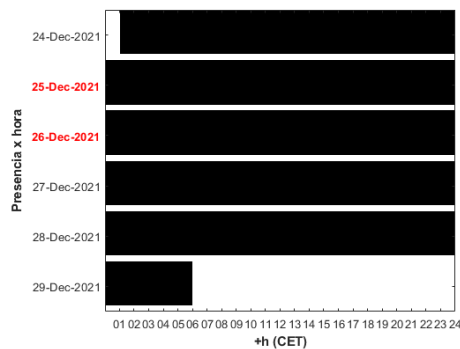


Figura 4-1. Gráfica presencia de silbidos antes de aplicar el algoritmo modificado

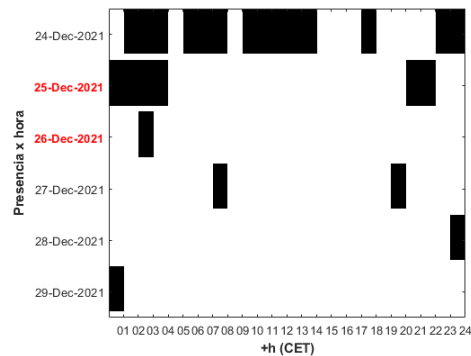


Figura 4-2. Gráfica presencia de silbidos después de aplicar el algoritmo modificado

Las gráficas que se presentan a continuación representan la densidad temporal de ocupación, es decir, la cantidad de tiempo en la que en una hora hay al menos un silbido. Es una representación que permite ver en qué horas ha habido más actividad acústica de silbidos y por tanto llegar a cuantificar la densidad de vocalizaciones de los silbidos de los delfines. Los ejes son iguales que las gráficas anteriores, sin embargo, en estas dos gráficas se representan con colores que van desde el azul claro hasta el rosa. El color representa el porcentaje de la densidad temporal de ocupación, es decir, según el porcentaje de silbidos en el momento correspondiente el color variará desde el azul claro (muy pocos silbidos) hasta el rosa (muchos silbidos).

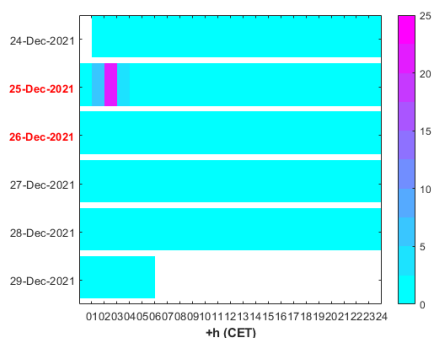


Figura 4-3. Gráfica densidad temporal de ocupación antes de aplicar el algoritmo modificado

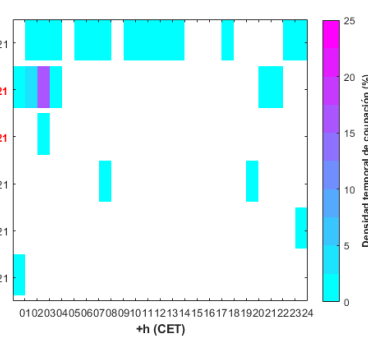


Figura 4-4. Gráfica densidad temporal de ocupación después de aplicar el algoritmo modificado

La forma de estas cuatro figuras es la misma, la diferencia entre las dos de arriba y las dos de abajo se representa en que en las de arriba no se distingue entre cantidad de silbidos y en las de abajo sí. Obteniendo como conclusión que el día donde más silbidos aparecen es la madrugada del 25 de diciembre.

4.1 Diagramas de caja y bigotes

Por otra parte, tras realizar el tercer análisis para dos grabaciones se aplicaron los índices a más grabaciones, concretamente a las grabaciones correspondientes a los mismos días utilizados en el estudio de los silbidos. Distribuyendo los datos de cada día en diagramas de Caja y bigotes. Se ha escogido este tipo de gráfica porque estas permiten visualizar una cantidad elevada de datos además de identificar valores atípicos y comparar distribuciones. En estos diagramas hay una **caja** (azul) formada por las siguientes partes:

- **Primer cuartil:** Es la parte inferior de la caja azul, representa que el 25% de los valores son menores a ese valor.
- **Mediana / Segundo cuartil:** Es la raya roja que aparece dentro de la caja, divide en dos partes iguales la distribución haciendo que el 50% de los valores sean menores o igual a este valor.
- **Tercer cuartil:** Es la parte superior de la caja azul, representa que el 75% de los valores son menores a ese valor.

Además, presenta los **bigotes** (las rayas negras) que se extienden por arriba y debajo de la caja. Los bigotes equivalen al 25% de valores de datos de la parte inferior y el 25% de la parte superior, sin contar los valores atípicos. [22]

Seguidamente se exponen los diagramas de caja y bigotes para los índices acústicos. Los diagramas se han obtenido para todos los índices y todos los días, pero como no todas son relevantes a continuación se van a presentar tan solo las gráficas de los días que aportan algo de información:

4.1.1 Índice de complejidad acústica:

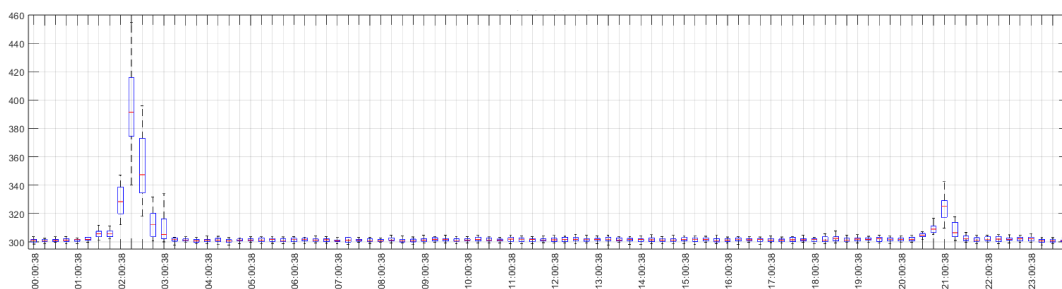


Figura 4-5. Diagrama de caja y bigotes ACI día 25

Con estas gráficas se puede observar fácilmente en que archivos se puede encontrar información asociada al índice en cuestión, tal y como se ha explicado en el capítulo 2. Se puede ver como en el día 25 a las 2 de la mañana hay un *boxplot* con unos niveles por encima de los de su entorno, de todos los días analizados es el día en el que el ACI es más alto. Este día coincide con la actividad de la vocalización de silbidos de delfines mostrada en la figura 4 de este mismo capítulo.

Este tipo de gráfica es útil porque a simple vista se puede ver que parte de las grabaciones presentan un comportamiento atípico. Al escuchar la grabación del día 25 a las 02:15h se escucha como, en efecto, es una de las grabaciones con más silbidos de delfín de todo el fondeo.

4.1.2 Índice de diversidad acústica

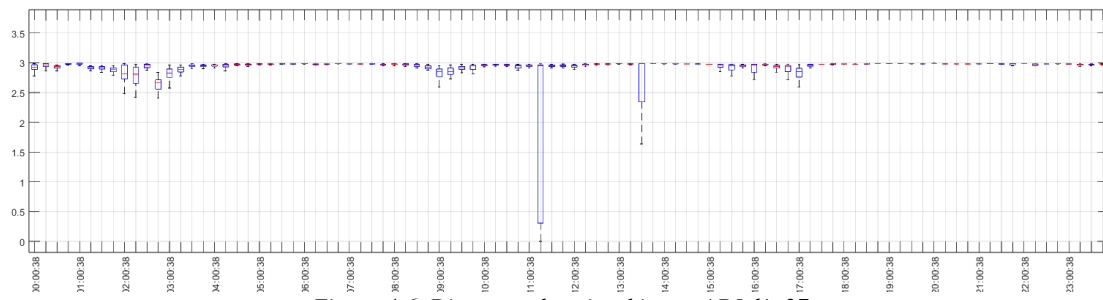


Figura 4-6. Diagrama de caja y bigotes ADI día 27

Las gráficas de este índice no han aportado demasiada información relevante al estudio, el día 27 hay un valor bastante anómalo en la grabación de las 11:15h, se comentará sobre el más adelante.

4.1.3 Índice bioacústico

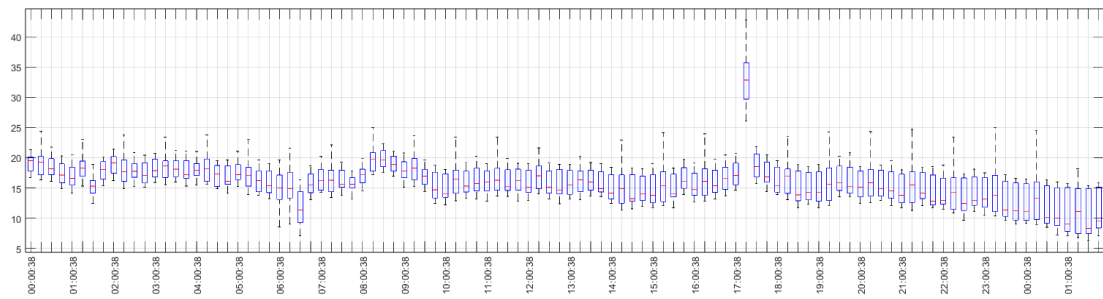


Figura 4-7. Diagrama de caja y bigotes BIO día 28 y día 29

Casi todas las gráficas para el índice bioacústico presentan valores estables o progresivos, el día 28 a las 17 de la tarde hay un valor que destaca algo más que los demás ya que presenta un cambio brusco frente a los otros días.

4.1.4 Índice espectral de diferencia normalizada

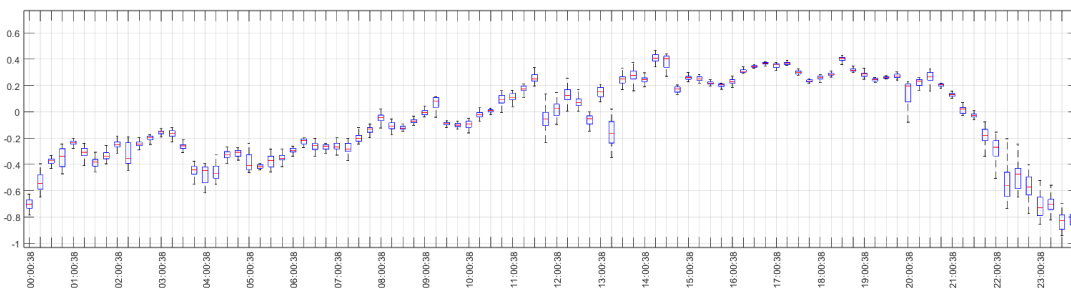


Figura 4-8. Diagrama de caja y bigotes NDSI día 24

Las gráficas del índice espectral de diferencia normalizada siguen más o menos el mismo patrón, van subiendo y bajando de manera progresiva por lo que no se observa ningún valor relevante en ellas.

4.1.5 Resumen del análisis anterior y conclusiones

Otra manera de ver la información presente en las figuras anteriores es mediante mapas de calor o *heatmaps* [23]. El único diagrama que aporta información relevante a este estudio es el del ACI, es por ello por lo que a partir de todos los diagramas anteriores se han obtenido los siguientes *heatmaps* de cada índice, a partir del percentil 75 (parte superior de cada *boxplot*). Cabe decir que cada *boxplot* resume la información de cada uno de los archivos de audio de 5 minutos que

proporciona el dispositivo SAMARUC. En el caso de la figura 10 referente al ADI, el *heatmap* ha sido obtenido con la parte inferior de los *boxplots* de cada archivo, con relación a sus diagramas [24].

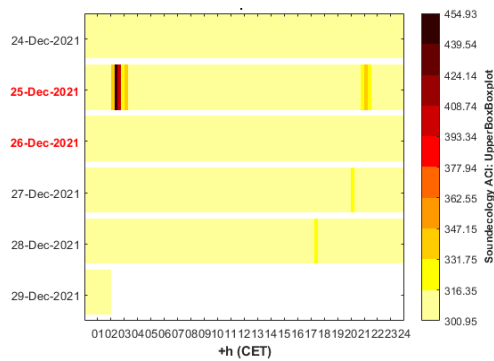


Figura 4-9. Heatmap ACI

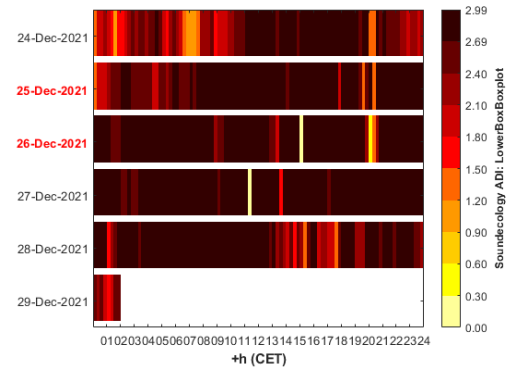


Figura 4-10. Heatmap ADI

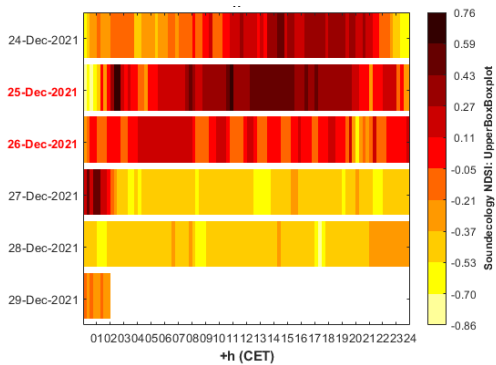


Figura 4-11. Heatmap NDSI

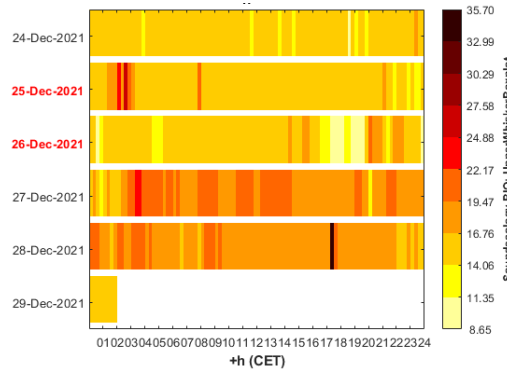


Figura 4-12. Heatmap BIO

En un principio se había concluido con el tercer análisis que los índices más significativos para poder detectar los silbidos de delfín eran el **ACI** y el **NDSI**. Bien, si se observan estos *heatmaps* obtenidos se puede ver como realmente el único que se adapta correctamente a los silbidos de delfín es el del ACI, ya que su patrón coincide con la figura 4 correspondiente a la densidad temporal de ocupación de silbidos mostrada anteriormente. Por tanto, se descarta el NDSI como un buen índice para detectar silbidos de delfín.

Igualmente, se han observado las grabaciones señaladas por cada *heatmap* para entender por qué tienen valores distintos a las demás. En la figura 12, el *heatmap* del BIO, hay una grabación que destaca frente a las demás, el día 28 de diciembre entre las 17:00h y las 18:00h. Lo que ocurre en esta grabación es que se escucha el mar muy revuelto, no se escucha ningún sonido animal pero sí mucho más ruido de fondo (oleaje) que en las demás grabaciones.

El *heatmap* del ADI tiene un color mayoritariamente oscuro, por lo que se ha escuchado una de las grabaciones con menor nivel (amarillo), la del día 27 a las 11:15 de la mañana. A mitad de esta grabación comienza a escucharse un sonido y su SPL aumenta, no son sonidos producidos por delfines. Se le ha aplicado el algoritmo SAMLab y se ha detectado como sonidos producidos por cachalotes, estos también frecuentan el monte Cachucho. En esta grabación no aparecen sonidos de más especies, por lo que el índice de diversidad acústica es mas bajo.

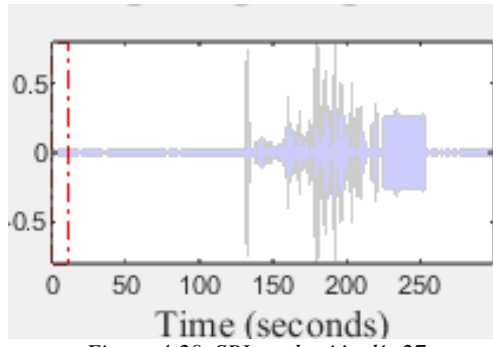


Figura 4-29. SPL grabación día 27

Capítulo 5. Conclusiones

Finalmente, en este proyecto se han analizado datos del fondeo en El Cachucho a 700 metros de profundidad, realizando un estudio sobre cómo mejorar el algoritmo de detección automática de silbidos de delfín, obteniendo como soluciones filtrar los candidatos a silbidos de delfín por su **duración** o por su **distribución de píxeles**. Concluyendo en que el método más eficaz es filtrarlos según la distribución de píxeles. Además, se ha incorporado la idea de aplicar el **Índice de Complejidad Acústica** a los fondeos para obtener una idea general de lo que ha ocurrido en la campaña de grabación antes de pasar las grabaciones por el software. Este valor puede ofrecer un indicador de la actividad de los cetáceos en la zona, para comparaciones estacionales o interanuales.

Se ha logrado **perfeccionar el algoritmo de detección automática de silbidos de delfín**. Solucionando el problema que causaba que silbidos que realmente no eran silbidos se detectaran como tal, los píxeles de estas falsas alarmas se han reducido entre un 90% y un 100%. Al mismo tiempo los silbidos reales, no han perdido los píxeles que los forman, tan solo se les ha eliminado el ruido de fondo.

Con el primer análisis, filtrando los candidatos a silbidos según su **duración**, se ha logrado eliminar el 84'85% de las falsas alarmas. Pero, no muy satisfechos con la pérdida del 15'31% de los silbidos reales se decidió crear un segundo análisis abordando el problema desde otra perspectiva, según la **distribución de los píxeles**. Al crear la curva PR se ha podido observar el comportamiento del nuevo algoritmo modificado, llegando a la conclusión de que situando un umbral al final de la curva se pueden eliminar prácticamente todas las falsas alarmas sin sacrificar apenas ningún silbido real.

El tercer análisis, aplicación de los **índices acústicos**, ha concluido con la idea de que el índice de complejidad acústica se adapta de manera correcta a los silbidos de delfín por lo cual resulta interesante utilizarlo antes de pasar las grabaciones por el software SAMLab y visualizar de manera precisa el fondeo entero.

Se han logrado los objetivos propuestos de perfeccionar el algoritmo de detección de silbidos de delfín y proponer una nueva idea para poder planificar futuras misiones, el Índice de Complejidad Acústica. A raíz de lo estudiado en este proyecto pueden surgir **futuros trabajos**, los cuales se exponen a continuación:

- **Expandir el análisis de los índices acústicos:** Se ha trabajado con cuatro índices acústicos (ACI, ADI, BIO y NDSI) elegidos según su funcionalidad, sin embargo, existen algunos más como el Índice de Uniformidad Acústica (AEI) o el Índice de entropía acústica (H). Se ha visto como el ACI, es el único índice que resulta útil en este estudio, sin embargo, se propone como futuro trabajo realizar un análisis con otros índices y observar si alguno de ellos proporciona resultados que puedan adaptarse a los objetivos.
- **Expandir este proyecto a más días y más fondeos:** Para analizar todos los datos se han escogido cinco días del fondeo, una vez obtenidos los resultados y comprobando los resultados, se propone expandir este proyecto a toda la campaña de grabación de diciembre de 2021 en El Cachucho y poder aplicarlo, además, a más fondeos.
- **Perfeccionar otros algoritmos de detección automática:** En este proyecto no se han trabajado con ellos, pero SAMLab presenta más algoritmos de detección automática para otros animales. Como trabajo futuro se propone adaptar el segundo análisis de este proyecto para otras funciones del software que presenten el mismo problema.

Capítulo 6. Bibliografía

- [1] «vibcon,» 2022. [En línea].
- [2] «Los orígenes de la exploración del océano,» 10 12 2021. [En línea].
- [3] «u-historia,» [En línea]. Available: <http://www.u-historia.com/uhistoria/tecnico/electronica/hidrofonos/hidrofonos.htm>. [Último acceso: 23 Enero 2023].
- [4] de *Passive Acoustic Monitoring of Cetaceans*, Cambridge.
- [5] «Bruel & Kjaer,» [En línea]. Available: <https://www.bksv.com/es/transducers/acoustic/microphones/hydrophones>. [Último acceso: 20 Enero 2023].
- [6] UPV, «Samaruc, un nuevo sistema que graba los sonidos submarinos de las especies del océano,» *Sinc*.
- [7] S. Martín, «Ciencia gandia,» 13 Abril 2021. [En línea]. Available: <https://cienciagandia.webs.upv.es/2021/04/el-campus-de-gandia-se-incorpora-al-proyecto-life-intemares/>. [Último acceso: 7 Enero 2023].
- [8] B. C. Álvarez, «wastemagazine,» *WATE Magazine*.
- [9] L. Borsellino, «Clicks, silbidos y frecuencias: estudian los códigos que usan delfines de Tierra del Fuego para comunicarse,» *La Nación*, 2022.
- [10] G. C. Deus, «El Mundo,» 14 Marzo 2008.
- [11] Quercus, «Revista Decana de Información Ambiental,» 31 Diciembre 2021.
- [12] R. M. M. B.-C. J. A. E. V. E. Guillermo Lara, «New Insights into the Design and Application of a Passive Acoustic Monitoring System for the Assessment of the Good Environmental Status in Spanish Marine Waters,» *Sensors*, vol. 20, 2020.
- [13] M. Tello, «Ecología acústica,» *El Comercio*, 2020.
- [14] J. B. y. A. Uzal, «La relación entre el Índice de Complejidad Acústica y la riqueza y diversidad de especies de aves: una revisión,» vol. 31, n° 5, 2021.
- [15] A. F. D. M. N. Pieretti, «A new methodology to infer the singing activity of an avian community: The Acoustic Complexity Index (ACI),» *Ecological Indicators*, 2011.
- [16] L. Pla, «Biodiversidad: Inferencia basada en el Índice de Shannon y la riqueza,» 2006.
- [17] B. C. P. J. D. B. P. Luis J. Villanueva-Rivera, «A primer of acoustic analysis for landscape ecologists,» 2011.
- [18] A. Eldridge, «A new method for ecoacoustics?,» 2016.
- [19] G. P. A. P. J. H. R. E. M. Natalie T. Boelman, «MULTI-TROPHIC INVASION RESISTANCE IN HAWAII: BIOACOUSTICS, FIELD SURVEYS AND AIRBORNE REMOTE SENSING,» 2007.
- [20] I. M. R. & J. R. Buck, «Spatial power spectral density estimation using a Welch coprime sensor array processor,» *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 145, n° 2350, 2018.

- [21] S. H. G. J. F. W. J. Eric P. Kasten, «The Remote Environmental Assessment Laboratory's Acoustic Library: An archive for studying soundscape ecology,» 2012.
- [22] D. Montes, «Proyectos Gestión Conocimiento,» 23 10 2018. [En línea]. Available: <https://www.pgconocimiento.com/diagrama-boxplot/>. [Último acceso: 2 Febrero 2023].
- [23] G. L. J. G. I. B. A. L. Ramón Miralles, «Improved visualization of large temporal series for the evaluation of good environmental status,» *ScienceDirect*, vol. 148, pp. 55-61, 2019.
- [24] R. Miralles Ricós, G. Lara Martínez, J. Gosálbez Castillo, I. Bosch Roig y A. León Fernández, «Improved visualization of large temporal series for the evaluation of good environmental status,» *Applied Acoustics*, vol. 148, pp. 55-61, 2019.
- [25] S. Abdel-Rahman, «Resonant LLC Converter: Operation and Design: Operation and Design 250W 33Vin 400Vout Design Example,» 2012.
- [26] E. Wagner, «The Sperm Whale's Deadly Call,» *Science*, 2011.
- [27] Wikipedia, «ecolocalización,» [En línea]. Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/Ecolocalizaci%C3%B3n>. [Último acceso: 04 Diciembre 2022].
- [28] Redacción, «Cómo escuchar a los delfines,» *CCiencia*, 11 Noviembre 2013.