



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Politécnica Superior de Gandia

Efecto del ruido submarino generado por tráfico marítimo
sobre especies de interés comercial en acuicultura.

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Evaluación y Seguimiento Ambiental de
Ecosistemas Marinos y Costeros

AUTOR/A: Giner Tarazona, Pablo

Tutor/a: Pérez Arjona, Isabel

Cotutor/a: Espinosa Roselló, Víctor

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024

Resumen

El aumento de las actividades antrópicas en el medio marino conlleva un aumento de la contaminación acústica en este medio. La contaminación acústica puede afectar a diferentes especies del medio marino a nivel de comportamiento, a nivel físico y fisiológico. En el ámbito de la acuicultura, una de las actividades al alza, obtener información sobre los impactos generados por el ruido en las especies de cultivo es crucial. Estos efectos son particularmente relevantes si se consideran individuos juveniles que se encuentran en etapas tempranas de su crecimiento. En este estudio se propuso evaluar los efectos a corto plazo (30 minutos, 3 horas, 24 horas y 7 días) de la exposición al ruido de tráfico marítimo sobre el comportamiento de juveniles de *Dicentrarchus labrax*. Las emisiones acústicas empleadas pertenecen a grabaciones de cuatro barcos pesqueros diferentes a una distancia de 10 a 15 metros, emitidas de forma aleatoria con un intervalo de silencio de 10 a 30 segundos entre grabaciones. Los resultados obtenidos no pueden aplicarse a todas las especies de interés en acuicultura ya que tienen diferente sensibilidad auditiva, pero pueden ayudar a reducir impactos y mejorar el bienestar de los animales en este tipo de granjas.

Palabras Clave: ruido antropogénico, efectos del ruido submarino, comportamiento, juveniles, bienestar de peces en acuicultura.

Abstract:

The increase of anthropogenic activities in the marine environment leads to an increase of noise pollution in this environment. Noise pollution can affect different species in the marine environment at behavioural, physical and physiological levels. In the field of aquaculture, one of the growing activities, obtaining information on the impacts generated by noise on farmed species is crucial. These effects are particularly relevant when considering juveniles in early stages of growth. In this study we set out to assess the short-term effects (30 minutes, 3 hours, 24 hours and 7 days) of exposure to marine traffic noise on the behaviour of juvenile *Dicentrarchus labrax*. The acoustic emissions used were recordings from four different fishing boats at a distance of 10 to 15 metres, emitted randomly with a silence interval of 10 to 30 seconds between recordings. The results obtained cannot be applied to all species of interest in aquaculture as they have different hearing sensitivity, but they can help to reduce impacts and improve animal welfare in this type of farms.

Key words: antropogenic noise, underwater noise effects, fish behaviour, fish juveniles, aquaculture fish welfare.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. AUMENTO DE LA ACTIVIDAD HUMANA EN EL MAR Y PROBLEMÁTICA ASOCIADA	1
1.2. TIPOS DE FUENTES ACÚSTICAS EN EL MAR Y PROBLEMÁTICA DEL AUMENTO DEL RUIDO.	3
1.2.1. Naturales	4
1.2.2. Antropogénicas	5
1.3. POSIBLES EFECTOS DEL RUIDO: DESCRIPCIÓN GENERAL Y PARTICULARIZACIÓN EN PECES	8
1.4. ONDAS ACÚSTICAS: INTRODUCCIÓN Y CONCEPTOS BÁSICOS	19
1.5. ESPECIE DE ESTUDIO: LUBINA	21
2. OBJETIVOS	22
3. MATERIAL Y MÉTODOS	23
3.1. SISTEMA DE EMISIÓN Y GRABACIÓN DE AUDIO	24
3.2. EMISIÓN ACÚSTICA	26
3.3. PLAN EXPERIMENTAL	27
3.4. MUESTREO BIOLÓGICO Y ESTUDIO DE CRECIMIENTO	28
3.5. ANÁLISIS DE COMPORTAMIENTO	30
3.5.1. Motilidad	30
3.5.2. Cohesión	30
3.6. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	31
4. RESULTADOS	31
4.1. MUESTREO BIOLÓGICO	31
4.2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO. MOTILIDAD	37
5. DISCUSIÓN	41
6. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE	44
7. BIBLIOGRAFÍA	45

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas e instituciones que han hecho posible la realización de este Trabajo Final de Máster.

Primero, a mi tutora Isabel Pérez Arjona, por darme la oportunidad de formar parte de este proyecto, guiarme durante todo el proceso y por la paciencia y apoyo constante. A Manuela Mauro por su contribución, sus consejos prácticos y por el tiempo invertido en explicar y mejorar este trabajo.

Gracias también a mi tutor Víctor Espinosa, y a todos los miembros de la UPV, el IEO-CSIC y la UA que han participado en este proceso.

A mis compañeros Sergi, Carles y Álvaro, por toda la ayuda que me han proporcionado y por crear un buen ambiente de trabajo.

A mi familia y mi pareja, por su amor y apoyo incondicional. Finalmente, a mi padre por ser mi inspiración y ejemplo a seguir.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. AUMENTO DE LA ACTIVIDAD HUMANA EN EL MAR Y PROBLEMÁTICA ASOCIADA.

Tradicionalmente la contaminación química, sobreexplotación pesquera, el tráfico marítimo y la contaminación por plásticos han sido reconocidas como una gran fuente de presión en la biodiversidad marina (*Ministerio Para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico*, s. f.). Pero en los últimos años se ha hecho relevante el problema que causa la contaminación acústica en distintas especies marinas.

La creciente actividad humana en todas las costas de la Tierra y en los océanos, ha producido el aumento del ruido antropogénico generado por la construcción de infraestructuras, los sonares militares, la generación de energía con turbinas eólicas y mareomotrices en alta mar, la navegación, las excavaciones y por campañas sísmicas. Esto afecta a los animales que habitan en estos lugares y a sus ecosistemas de formas complejas, por efectos agudos, crónicos y acumulativos.

El ruido generado por estas fuentes se superpone a los niveles sonoros naturales, perturbando así el paisaje sonoro natural de los océanos y su biota. La generación de ruido antropogénico es importante para la economía azul en su desarrollo ya que está ligada a las actividades industriales, económicas y recreativas, muchas de ellas en aumento.

Para poder proteger y evitar que la biodiversidad marina se vea afectada negativamente por el ruido antropogénico se decretó la Ley 41/2010, de 29 de diciembre, de protección del medio marino que establece un marco de acción, en el que se incluye el ruido submarino entre los 11 descriptores del correcto estado ambiental del medio marino.

El desarrollo de directrices de seguimiento e investigación científica, alentado por las Directivas de Aves y Hábitats de la Unión Europea, se ha visto empujado por la actividad de acuerdos internacionales, convenios y comités de normas para la mitigación de los efectos del sonido antropogénico (*Underwater Noise In The Marine Environment*, s. f.). En esta directiva se clasifican las fuentes de ruido en función de su nivel acústico y

duración en ruido impulsivo generado por acciones como el pilotaje o ruido continuo cuya mayor contribución proviene del tráfico marítimo.

Un estudio realizado por Andrew et al. (2002) compara la actividad humana y el ruido ambiente producido por esta, en el mar en la Costa de California. En los 33 años del estudio, en el rango de frecuencia de 20-80 Hz aumentó unos 10 dB y se debe principalmente a un aumento del transporte comercial. La causa del aumento más allá de 100Hz hasta 400Hz (llega a 9 dB) es menos obvio, generalmente está dominado por la fricción del viento en la superficie del océano.

La investigación relacionada con este campo, sobre todo en su impacto en los ecosistemas marinos es relativamente joven. Pese a que hay un número relevante de estudios relacionados al impacto de estas fuentes de ruido en mamíferos marinos, siguen siendo escasos los estudios de otras facetas muy importantes como los efectos sobre otras especies, los efectos sobre las dinámicas de poblaciones, sobre el impacto ecológico y sobre los impactos acumulativos y sinérgicos.

En este estudio se ha decidido enfocarse en los efectos tanto fisiológicos como de comportamiento que tiene el ruido en especies mantenidas en acuicultura que desempeñan un papel importante en la alimentación humana. La acuicultura es una de las actividades en aumento durante las últimas décadas, siendo cada vez mayor su relevancia en el aporte del pescado de consumo. Existen dos tipos de acuicultura, la de mar y la de tierra, cuyas condiciones han ido mejorando en las últimas décadas.

Sin embargo, debido al aumento en el interés por el bienestar y el tratamiento de los peces en acuicultura y la necesidad de mitigar los factores estresantes agudos y crónicos, se ha investigado otros posibles tipos de estrés como el causado por el ruido.

En una instalación de acuicultura en tierra las fuentes de ruido puede asociarse a las actividades del personal de la instalación, las bombas de agua y aire, las cosechadoras y a las remolcadoras. Por otro lado, en las instalaciones en alta mar los peces están expuestos a mayor cantidad de fuentes de ruido, tanto naturales como antropogénicas.

1.2. TIPOS DE FUENTES ACÚSTICAS EN EL MAR Y PROBLEMÁTICA DEL AUMENTO DEL RUIDO.

El ruido subacuático es considerado cualquier sonido que no es el deseado. El océano es un cuerpo de agua muy ruidoso, con sonidos generados por distintas razones. El ruido en el océano se considera como ruido ambiente y se mide según la intensidad que detecta un hidrófono. La intensidad del ruido es posible medirla en diferentes bandas de frecuencia (Au & Hastings, 2008).

El ruido que encontramos en los océanos se produce por dos tipos de fuentes, naturales y antropogénicas. Hay diferentes fuentes que predominan en los tres bandas de frecuencia, bajo (10 a 500 Hz), medio (500 a 25 kHz) y alto (mayor de 25 kHz).

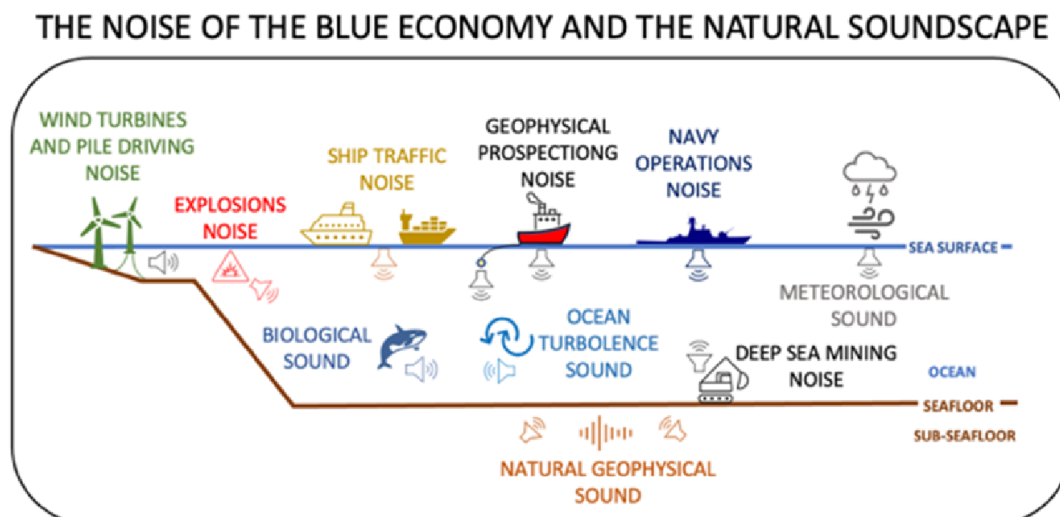


Figura 1. Fuentes de ruido antropogénico y fuentes de sonido natural en el ecosistema marino (Underwater Noise In The Marine Environment, s. f.).

El bando de frecuencia baja está dominado mayoritariamente por fuentes antropogénicas de las cuales la principal fuente de ruido es el tránsito marítimo comercial y también en menor medida las exploraciones sísmicas. Este tipo de ruido contribuye al ruido ambiente en las cuencas oceánicas, ya que el sonido de baja frecuencia experimenta muy poca atenuación, lo que genera que se propague largas distancias (Hildebrand, 2009).

Por otro lado, el ruido ambiente en frecuencias medias se debe principalmente a la agitación de la superficie del mar producida por el oleaje, la formación de burbujas y la

lluvia entre otros. El sonido a frecuencias medias no se puede propagar largas distancia ya que tiene una mayor atenuación, por lo tanto, solo fuentes de sonido que se encuentran cercanas a decenas de km de distancia contribuyen al ruido ambiente.

En cuanto al ruido ambiente de altas frecuencias, la atenuación acústica es muy grande por lo que el ruido no se propaga y solo las áreas cercanas al emisor del ruido es afectada. El ruido térmico que se produce por el movimiento de las partículas de aguas es la fuente de ruido ambiente que domina por arriba de los 60 kHz (*Hildebrand, 2009*).

El ruido en un rango de frecuencia infrasónico, es decir, por debajo del rango auditivo humano de 1Hz a 20Hz, está generado por la actividad sísmica. También en las frecuencias bajas encontramos el ruido generado por los barcos y se extienden hasta 1kHz. En las frecuencias altas el ruido está causado por la irregularidad de la superficie del mar que está relacionada con el oleaje y la actividad del viento.

En aguas poco profundas el ruido ambiente depende mayoritariamente de la velocidad del viento a frecuencias entre 10 y 100kHz (*Au & Hastings, 2008*). Este tipo de ruido para frecuencias superiores a 500 Hz en aguas poco profundas es aproximadamente entre 5 y 10 dB superior que en aguas profundas. En ausencia de fuentes de ruido biológico y de ruido producido por la navegación, el ruido ambiente en este tipo de aguas es menos variable.

Como se ha comentado anteriormente, dentro de los océanos se pueden encontrar dos tipos de fuentes generadoras de ruido. Por un lado, encontramos las naturales y por otro las antropogénicas.

1.2.1. Naturales

En el medio marino se producen una serie de ruidos de origen natural que también se llama ruido ambiente. Este consiste en el generado por fenómenos físicos como el viento, las olas y el movimiento de la tierra. A estos hay que añadirles los ruidos de origen biológico, producidos por diferentes organismos marinos como invertebrados, peces y cetáceos.

Los peces son organismos que generan sonido de manera individual y colectiva. Estos sonidos generados por grupos de peces se llaman coros, cambian dependiendo de la

estación y de las especies y generan un aumento del ruido a frecuencias bajas de unos 20 a 30 dB.

El sonido producido por los peces se encuentra dentro de los sonidos de frecuencia baja de entre los 50 a 2000 Hz. Estos tienen varias maneras de generar sonido entre las cuales se destacan principalmente el rasgado o el generado usando los músculos ligados a la vejiga natatoria (*Fuiman et al., 2004*)

Algunas especies de crustáceos de la familia *Alpheoidea*, se caracterizan por tener una de las dos pinzas de tamaño desproporcional a la otra, con la que generan sonido de 183 a 189 dB y picos de entre 2 y 5 kHz. Son una fuente de sonido de frecuencia media dominante en el ruido ambiente, pudiendo aumentar 20 dB el nivel de ruido ambiente a estas frecuencias.

Además del ruido generado por la biota, también obtenemos en los océanos el ruido generado por el movimiento de la superficie del mar.

Debido al oleaje y a la turbulencia generada por el viento se produce el llamado ruido ambiente, que se encuentra entre los 500 Hz y 50 kHz. Este varía según la velocidad del viento, el estado del mar y el movimiento de la superficie.

También se genera ruido ambiente con la caída de las gotas de agua en la superficie del mar, produciendo un pulso de presión agudo por el impacto de la gota continuado por el pulso de la explosión de gas generada al caer la gota (500 a 10kHz) (*Wilcock et al., 2014*).

Por último, se encuentra el ruido térmico. Este se debe a la agitación térmica de las moléculas de aguas del mar, que produce ruido que restringe la sensibilidad de la detección acústica a frecuencias altas (>50 kHz).

1.2.2. Antropogénicas

El ruido antropogénico en el medio marino procede de una gran cantidad de fuentes diferentes. Algunas de estas fuentes generan un ruido intencionado y otras sin embargo generan ruido como subproducto no deseado de otras actividades (*Hildebrand, 2009*).

Una fuente agresiva de ruido antropogénico son los explosivos químicos, que se emplean para diferentes fines en el medio marino, de los cuales incluye estudios

sísmicos, remoción de estructuras, minas y bombas militares, cargas pequeñas para disuadir cetáceos.

Este tipo de explosiones generan un impulso de presión con un aumento brusco del tiempo y que se encuentra en un rango de frecuencia relativamente ancho. La amplitud de las explosiones y otras características de las explosiones varían según la profundidad de detonación y el peso de la carga (*Filadelfo et al., 2009*).

El ruido producido por una explosión se propaga en todas direcciones y normalmente se detectan a escalas locales, aunque se han dado casos en los que se ha registrado el sonido en varias cuencas oceánicas (*Munk et al., 1988*).

Cooperative Research in the National Marine Fisheries Service (2003), registró el ruido generado por distintas cantidades y tipos de explosivos. Se obtuvo que una carga de 4536 kg de TNT genera un pico de energía máximo en una banda de frecuencia de entre los 0,5 y 50 Hz, y la energía adicional generada por el pulso oscilativo de las burbujas aumentaría unos 5 dB al nivel de la fuente. La detonación de un torpedo con 44 kg de TNT se encontraba con una frecuencia casi constante entre los 10 y 200 Hz.

Actualmente los explosivos han sido sustituidos por pistolas de aire en algunos de las actividades para las que se empleaban. Sin embargo, se siguen usando para la construcción y remoción de estructuras bajo del agua (*Hildebrand, 2009*).

También se encuentra la contaminación generada por el ruido que producen las embarcaciones. Estas se encuentran en gran cantidad por todos los océanos del mundo. Se ha registrado que el sonido generado por sus sistemas de propulsión emite a frecuencias <200 Hz.

La cavitación producida por las hélices de los barcos, son una fuente de ruido constante en todas las frecuencias pese a que no se propagan lejos en las frecuencias altas. Esta fuente de ruido incluye tanto el ruido de banda ancha generado por el colapso de las burbujas, como el ruido generado por el movimiento de las hélices.

El paso del flujo del agua por el casco de barco y el resto de mecanismos adjuntos al casco es una fuente de sonido de banda ancha, especialmente cuando va aumentando la velocidad del barco. También se generan picos tonales agudos gracias a la maquinaria

giratoria que presentan los barcos, como el motor, los ventiladores, plantas de energía hidráulicas y generadores (*Hildebrand, 2009*).

En general los niveles están relacionados con el tamaño y la velocidad del barco. Por ello a mayor tamaño del barco el nivel de ruido aumenta. Lo mismo sucede con la velocidad, a mayor velocidad mayor es el nivel de ruido.

En las exploraciones sísmicas en concreto las excavaciones petroleras actualmente se emplean un conjunto de pistolas de aire comprimido que son remolcadas por embarcaciones. Estas liberan un volumen de aire a altas presiones, generando así una onda sonora a partir de la contracción y expansión de las burbujas que se liberan (*Hawkins et al., 2020*).

Otra fuente de contaminación, pero menos conocida, son los sonares activos de baja frecuencia que se usan en actividades militares de inspección, para la detección, localización y clasificación de objetos submarinos. Se han diseñado para proporcionar una fuente de sonido a cientos de km de distancia para otros aparatos de escucha pasiva.

Los sonares activos de baja frecuencia utilizan unos proyectores que emiten en un rango de frecuencia de entre 100 a 500 Hz. Para aquellos que se emplean en la detección de objetos a una distancia moderada (<10 km), utilizan frecuencias medias.

También hay sonares que se emplean para hacer un mapa del fondo oceánico y estos varían de frecuencias medias (12 kHz) en aguas profundas a frecuencias altas (70 a 100 kHz) en aguas superficiales.

Por otro lado, se encuentran los sonares hidroacústicos que se emplean para conocer la presencia de organismos biológicos en ríos, lagos y océanos (*MacLennan & Simmonds, 2013*). Estos emiten a frecuencias medias-altas (20 a 1000 kHz).

Por último, se encuentra la contaminación generada por las diferentes actividades industriales como la perforación petrolera y parques eólicos, que en el mar suelen emitir ruido a frecuencias medias.

En las perforaciones desde plataformas fijas en el mar, producen ruido mayoritariamente a frecuencia baja-media entre los 700 a 1400 Hz. Generalmente el

sonido registrado en los buques de perforación es más alto que el que obtenemos en plataformas o islas (George & Thewissen, 2020). La propagación del ruido generado por este tipo de actividades depende en gran parte del tipo de fondo oceánico.

1.3. POSIBLES EFECTOS DEL RUIDO: DESCRIPCIÓN GENERAL Y PARTICULARIZACIÓN EN PECES

La contaminación acústica marina puede causar multitud de impactos en muchos organismos, pero la información suele estar dispersa y los resultados generales son difíciles de evaluar.

Tanto el ruido antropogénico crónico como el agudo son producidos por diversas actividades humanas, estas causan efectos detectables en la comunicación intraespecífica, los procesos vitales, la fisiología, los patrones de comportamiento, el estado de salud y la supervivencia (Di Franco et al., 2020).

Estos efectos sobre los individuos pueden extenderse hasta inducir alteraciones en toda la población y el ecosistema, especialmente cuando afecta a especies importantes, como los depredadores clave y las especies que forman hábitats.

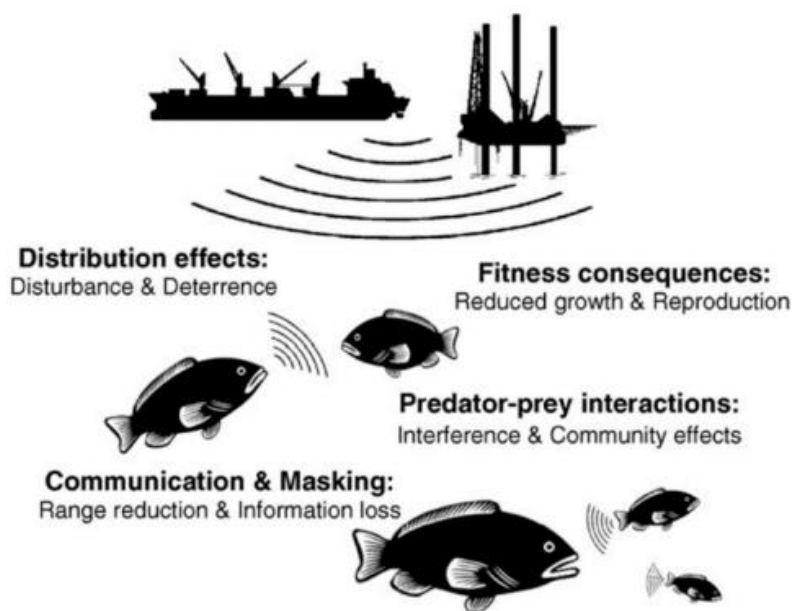


Figura 2. Representación de posibles efectos de la contaminación en organismos marinos (Slabbekoorn et al., 2008).

El ruido puede provocar estrés físico y fisiológico en los organismos marinos provocando cambios en el metabolismo y en las respuestas inmunitarias, cambios hormonales, cambios en la cantidad de proteínas de choque térmico, en el consumo de oxígeno, en el gasto cardíaco y en las tasas de excreción.

El ruido también puede provocar estados de irritación y ansiedad, aumento de parásitos y enfermedades, disminución de las condiciones corporales, tasas de crecimiento, peso y consumo de alimentos, y daños irreversibles a nivel del ADN.

Los cambios de comportamiento juegan un papel clave en el destino de las especies y los ruidos antropogénicos pueden influir en ellos, aunque algunas especies pueden ser más sensibles a la contaminación acústica que otras, la mayoría de las especies de peces muestran efectos negativos. Los ruidos también cambian los niveles de depredación, la locomoción, las estrategias de refugio, la capacidad de búsqueda de alimento y la habilidad de encontrar refugio en diferentes especies (*Hubert et al., 2020*).

La percepción del sonido por parte de los peces varía según la sensibilidad que tienen, esta depende de las estructuras del sistema auditivo periférico y de la neuroanatomía. Hay algunas especies que son consideradas especialistas auditivas, ya que tienen una mayor sensibilidad.

Las especies especialistas tienen una capacidad auditiva de ancho de banda más sensible y amplia debido a que presentan una anatomía especializada que mejora la estimulación del oído interno mediante presión acústica, a parte de la estimulación directa mediante el movimiento de partículas acústicas.

Teniendo en cuenta los niveles de presión sonora, los peces con vejiga natatoria tienen un umbral mínimo de entre 50-60 dB desde 200 a 1500 Hz. Sin embargo, para las especies que carecen de vejiga natatoria o que no tienen una conexión clara entre la vejiga natatoria y el oído interno es de 65-110 dB desde 50 a 500 Hz.

Además del oído interno algunos peces presentan la línea lateral, que es un sistema mecanosensorial formado por una serie de neuromastos, los cuales tienen un conjunto de células capilares y de sostén cubiertas por una masa gelatinosa llamada cúpula. Este sistema es capaz de detectar el movimiento de partículas acústicas a frecuencias inferiores a 200 Hz (*Popper & Hawkins, 2019*).

El conjunto del oído interno y de la línea lateral se conoce como sistema octavolateral. La línea lateral se encarga de detectar señales hidrodinámicas a poca distancia del cuerpo del pez, mientras que el oído interno se encarga de detectar ondas sonoras a mayores distancias (Au & Hastings, 2008).

A continuación, se muestra la exhaustiva búsqueda bibliográfica que se ha realizado sobre los efectos de la contaminación acústica en especies marina, en particular en peces. Se han revisado y filtrado más de 200 artículos científicos para trabajar únicamente sobre estudios relativos al impacto acústico sobre diferentes estados de vida de los peces a nivel conductual o bioquímico. En la tabla se indican el tipo de organismos estudiados. En el caso de tratarse de peces, la especie específica sólo se ha indicado en los estudios que se refieren a la especie tratada en este.

- Comportamiento

Tabla 1. Resumen con los efectos en el comportamiento de los peces y su referencia bibliográfica.

REFERENCIA	ESTIMULO ACÚSTICO	EFECTO	ORGANISMO
Simpson et al., 2010	Ruido antropogénico (contaminación acústica)	Consecuencias en su forma física	Larvas de peces
Nedelec et al., 2015; Spiga et al., 2017; Simpson et al., 2015	Ruido antropogénico (contaminación acústica)	Activar respuestas de alarma y la capacidad de reconocer amenazas de depredación, causando ansiedad	Larvas de peces
Gendron et al., 2020	Ruido antropogénico (estrés acústico)	Pasan más tiempo andando	Larvas de peces
Gendron et al., 2020	Ruido antropogénico (frecuencias emitidas por barcos)	Influyen de manera negativa en el comportamiento de alimentación, incluso reduciendo sus niveles estomacales.	Larvas de peces
Popper & Fay, 2011; Alves et al., 2016; Codarin et al., 2009	Ruido antropogénico	Compromete la comunicación y enmascara sus propias señales acústicas.	Peces

	(contaminación acústica)		
Di Franco et al., 2020	Ruido antropogénico (contaminación acústica)	Efectos idiosincráticos sobre la densidad y la etapa de desarrollo	Familia <i>Sparidae</i>
Faucher et al., 2010; Mueller-Blenkle et al., 2010; Popper et al., 2019) Kojima et al., 2010;	Ruido antropogénico (contaminación acústica)	Pierden información de sus movimientos y posición mediante el uso de la línea lateral	Peces
Slabbekoorn et al., 2008; Løkkeborg 2012; Miller & Cripps, 2013; Peña et al., 2013; Paxton et al., 2017	Ruido antropogénico (estrés acústico)	Afectan de forma negativa a: <ul style="list-style-type: none"> - Conservación de la especie - Ratios de crecimiento - Velocidad y estado de agregación - Ratio de capturas - Abundancia y distribución 	Peces
Hawkins et al., 2015; Shannon et al., 2016	Ruido antropogénico (nivel de ruido alto)	Implicaciones en el balance energético	Peces
Krahforst et al., 2017; Correa et al., 2018; Stanley et al., 2017; Amorim et al., 2016; De Jong et al., 2017; Picciulin et al., 2010; Blom et al., 2019; Casaretto et al., 2014	Ruido antropogénico	Afecta negativamente a: <ul style="list-style-type: none"> - Número de llamadas entre individuos. Causando gasto energético a nivel muscular y reducción de la reproducción, por lo tanto compromete el cortejo, el comportamiento parental, la liberación de gametos y el éxito de desove	Peces
Bruintjes et al., 2014	Ruido antropogénico	Le llevo más tiempo al pez a llegar al sitio donde tenía que desovar	<i>Dicentrarchus labrax</i>

Neo et al., 2015; Buscaino et al., 2010; Herbert-Read et al., 2017	Ruido antropogénico (emisión intermitente y continua)	<ul style="list-style-type: none"> - Desencadenan reacciones de alarma - Incremento en la velocidad, cohesión y profundidad del nado - La recuperación es más lenta en la presencia de ruido intermitente 	Peces
Mauro et al., 2020; Kastelein et al., 2008;	Ruido antropogénico (63 Hz, 125 Hz, 500 kHz y 1 kHz)	Todas las frecuencias afectan a la profundidad de nado. Bajas frecuencias afectan a la cohesión y a la movilidad.	<i>Sparus aurata</i>
Hirst & Rodhouse, 2000; Wardle et al., 2001; Popper & Hastings, 2009a; b; Mauro et al., 2020	Ruido antropogénico	Reacción C-start, cambiando: <ul style="list-style-type: none"> - Patrones de agrupamiento (schooling) - Posición en la columna de agua - Velocidad de nado 	Peces
2007; Bracciali et al., 2012; Herbert-Read et al., 2017; Correa et al., 2018	Ruido antropogénico	Cambios: <ul style="list-style-type: none"> - Estructura - Dinámica de nado - Velocidad - Cohesión - Profundidad de nado 	Peces
Bracciali et al., 2012; Holles et al., 2013; Neo et al., 2016; Purser & Radford, 2011	Ruido antropogénico	Afecta negativamente: <ul style="list-style-type: none"> - Forrajeo u orientación de los peces - Especies que no son capaces de distinguir entre alimento 	Peces

		comestible y el que no.	
Kusku et al., 2018	Ruido antropogénico (estrés acústico)	Baja absorción de alimentos y reducción del crecimiento	Peces
Boeger et al., 2006; Fewtrell & McCauley, 2012	Ruido antropogénico (estrés acústico)	Algunos peces se acostumbran al disturbio causado por el ruido	Peces
Nedelec et al., 2017b	Ruido antropogénico	Influye en relaciones interespecíficas e intraespecíficas, como actividades de limpieza en peces de arrecifes de coral.	Peces
Papoutsoglou et al., 2008	Expuesto a música de Mozart	Mejora en el crecimiento, calidad y producción de algunas especies	Peces
Simpson et al., 2015; McCormick et al., 2018b	Ruido antropogénico	Uso del espacio y reacciones de escape	Peces
Voellmy et al., 2014b; Simpson et al., 2015; Bruintjes et al., 2016; Purser et al., 2016; La Manna et al., 2016	Ruido antropogénico	Cambios en las respuestas anti-depredadores	Peces
Voellmy et al., 2014; Xinhai et al., 2016; Magnhagen et al., 2017	Ruido antropogénico (contaminación acústica)	Cambios en el comportamiento social, miedo, estrés y niveles de forrajeo, con diferentes efectos entre especies	Peces
Sabet et al., 2016; Picciulin et al., 2012; Holt & Johnston, 2015; Montie et al., 2017	Ruido antropogénico (contaminación acústica)	Cambio en: <ul style="list-style-type: none"> - Reacciones de alarma - Velocidad de nado - Vocalizaciones - Puesta de huevos - Profundidad de nado 	Peces
Ladich et al., 2013	Ruido antropogénico	Afecta:	Peces de agua dulce

	(contaminación acústica)	<ul style="list-style-type: none"> - Detección del sonido - Orientación acústica 	
Wysocki et al., 2007; Bruitjes & Radford, 2013	Ruido antropogénico (contaminación acústica)	Efectos negativos en: <ul style="list-style-type: none"> - Crecimiento - Supervivencia - Resistencia a enfermedades 	Peces de agua dulce
Bruitjes & Radford, 2013	Ruido antropogénico (contaminación acústica)	Cambios en: <ul style="list-style-type: none"> - Intensidad o excavación - Reacción a la presa - Comportamiento de agresión 	Peces de agua dulce

- Fisiológicos

Tabla 2. Resumen de los efectos a nivel fisiológico en peces y sus referencias bibliográficas.

REFERENCIA	ESTIMULO ACÚSTICO	EFEECTO	ORGANISMO
Carrol et all., 2017	Ruido antropogénico	Cambio en: <ul style="list-style-type: none"> - Metabolismo y respuesta inmune - Hormonas - Cantidad de proteínas de choque térmico - Consumo de oxígeno - Salida cardiaca - Ratios de excreción 	Peces e invertebrados
Carrol et all., 2017	Ruido antropogénico	A nivel anatómico: <ul style="list-style-type: none"> - Lesiones auditivas - Pérdida auditiva - Cambio en el umbral auditivo - Lesiones internas - Daño celular Todo causa desorientación y la muerte.	Peces e invertebrados
Kight & Swaddle, 2011	Ruido antropogénico	<ul style="list-style-type: none"> - Estado de irritación y ansiedad - Incremento de parásitos y enfermedades - Declive de las condiciones del cuerpo, ratio crecimiento, peso y consumo de alimento. - Daño irreversible a nivel de ADN 	Peces
Fitzgibbon et al., 2017; Filiciotto et al., 2017; Zhou et al., 2018; Shi et al., 2019; Vazzana et al., 2016; 2020 a	Ruido antropogénico	Respuestas bioquímicas (diferentes entre especies): <ul style="list-style-type: none"> - Contenido de electrolitos - Minerales - Ratios metabólicas - Consumo de oxígeno - Recuentos sanguíneos diferenciales 	Peces (especies diferentes)

		<ul style="list-style-type: none"> - Niveles de glucosa - Proteínas totales - Integridad del ADN - Nivel enzimático - Concentraciones de lactato - Niveles de hidrocortisona - Actividad de AChE - Síntesis de ATP - pH del nivel de hemolinfa 	
Kostyuchenko, (1973)	Ruido antropogénico (cerca de la fuente de ruido)	Alta mortalidad	Huevos de varias especies de peces
Nedelec et al., 2015	Ruido antropogénico	Reduce el crecimiento	Huevos y larvas de peces
Nedelec et al., 2017	Ruido antropogénico	Reducción de la supervivencia de las crías debido a cambios en el comportamiento de los padres estresados por ruido acústico	<i>Familia Pomacentridae</i>
Fakan et al., (2019)	Ruido antropogénico	<ul style="list-style-type: none"> - Efectos adversos en la embriogénesis - Aumento de la frecuencia cardíaca 	<i>Familia Pomacentridae</i>
Caiger et al., 2012; Akinrotimi et al., 2009	Ruido antropogénico	Cambios en la capacidad auditiva	Juveniles de peces
Buscaino et al., 2010; Celi et al., 2016; Vazzana et al., 2017; Lin et al., 2019	Ruido antropogénico (estrés acústico)	<p>Efectos endocrinos con variaciones en los niveles de:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Adrenalina - Cortisol - Glucosa - Lactato - AMP - ADP - ATP - cAMP - HSP70 	Peces
McCauley et al., 2003	Ruido antropogénico	Daño en las células capilares y no hay reparo o mejora después de 58 días de la exposición al ruido	Peces

Nichols et al., 2015; Radford et al., 2016	Ruido antropogénico (Ruido intermitente)	Niveles de cortisol más influenciados por ruidos intermitentes	Peces
Debusschere et al., 2016; Filiciotto et al., 2017	Ruido antropogénico (estrés acústico)	Efectos negativos en: <ul style="list-style-type: none"> - Consumo de oxígeno - Niveles de lactato - Niveles de oxidantes totales - Actividad lisozima - Actividad antiproteasa - Células blancas de la sangre - Ratio albumina/globulina 	Peces
Bruintjes et al., 2017; Nedelec et al., 2016;	Ruido antropogénico (estrés acústico)	Dependiendo de la frecuencia puede causar mortalidad y cambio en el ratio de ventilación.	Peces
Andrews et al., (2014)	Ruido antropogénico (estrés acústico)	Los cambios transcripcionales de proteínas confirman el daño a los tejidos del oído.	Peces
Picciulin et al., (2012); Popper et al., 2005; Popper & Hastings, 2009 ^a ; Popper et al., 2014	Sonidos baja frecuencia	Provocar barotrauma o daño físico, detectado histológica o morfológicamente, con efectos también a nivel celular/estructural, como el desplazamiento temporal del umbral (TTS).	Peces
Popper & Hastings, 2009	Sonidos alta intensidad	Puede crear un cambio de umbral permanente (PTS), depende de: <ul style="list-style-type: none"> - Número y frecuencia de repeticiones - SPL - Duración - Estado fisiológico del organismo 	Peces
Halvorsen et al., 2012	Sonidos Impulsivos	<ul style="list-style-type: none"> - Hematomas leves (a bajo nivel de sonido) - Sangrado (Alta exposición al ruido) 	Salmón del Pacífico
Bruintjes et al., 2016; Simpson et al., 2015; Purser et al., 2016;	Ruido antropogénico	Cambios en: <ul style="list-style-type: none"> - Mortalidad en los huevos Efectos negativos en:	Fish

		<ul style="list-style-type: none"> - Ratio de ventilación - Ratio metabólicos - Ratio de crecimiento <p>Serios efectos en la supervivencia de la población</p>	
Graham & Cooke, 2008; Song et al., 2008; Liu et al., 2013	Ruido antropogénico	<ul style="list-style-type: none"> - Niveles de gasto cardiaco - Efectos en los umbrales auditivos 	Peces de aguas salada
Trabulo et al., 2023	Ruido antropogénico (ruido de barcos)	<p>Embriones:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Reduce el nivel del sistema de transporte de electrones. <p>Larvas:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Incremento en los niveles de superóxido dismutasa - Daño en el ADN - Reduce el crecimiento 	Embriones y larvas de peces
Scholik & Yan, 2001; Amoser & Ladich, 2003	Ruido antropogénico	<p>Depende de la frecuencia y la duración de la exposición.</p> <p>Ruido emitido por 2 horas:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Incrementa la pérdida auditiva - Compromete los niveles reproductivos. - Reduce la distancia de comunicación - Efectos negativos en la supervivencia de la especie 	Peces

1.4. ONDAS ACÚSTICAS: INTRODUCCIÓN Y CONCEPTOS BÁSICOS

El sonido consiste en una serie de vibraciones mecánicas que viajan como una onda. viaja a través de un medio (líquido, sólido o gas) para poder transmitirse. Una onda se puede describir como una perturbación que viaja a través de un medio.

La onda sonora es un modelo de compresión u onda longitudinal. Las partículas de este tipo de ondas se desplazan de forma paralela a la dirección a la que viaja la onda. Aunque el sonido viaja como una onda las partículas individuales del medio no viajan con esta, solo vibran hacia delante y hacia atrás (*Robinson et al., 2014*).

Los sonidos normalmente se describen como fuertes o suaves, agudos o graves. Estos términos se emplean para describir o caracterizar como se perciben los sonidos. Sin embargo, los científicos describen el sonido según la intensidad y la frecuencia.

Se encuentran varios parámetros que caracterizan una onda. Entre los que están la frecuencia y la amplitud e intensidad.

La frecuencia de una onda es el número de ciclos por segundo. La unidad para medir la frecuencia son los hercios. Conforme se aumenta la frecuencia, el sonido se vuelve más agudo y se producen más ciclos por segundo. Sin embargo, cuando la frecuencia disminuye el tono obtenido también es más bajo.

La amplitud de una onda sonora tiene correlación con la cantidad de energía que transporta, también está relacionada con el cambio de presión causado por la onda en un lugar concreto. Cuando una onda es de gran amplitud, el sonido se percibe más fuerte y se transporta mayor cantidad de energía. Por el contrario, cuando la amplitud es más baja, el sonido se percibe más bajo y hay menos cantidad de energía transportada.

Se conoce como la intensidad de una onda sonora a la energía transmitida a través de una unidad de área, por unidad de tiempo, en la dirección en la que viaja la onda sonora. Esta energía transmitida está formada tanto por el componente presión como el componente velocidad de la partícula (*Slabbekoorn et al., 2018*).

En cuanto a las formas de propagación del sonido en el agua del mar. En un medio fluido la propagación del sonido es únicamente longitudinal por lo que las partículas del sonido vibran en la dirección de la energía de propagación.

A menudo el sonido es considerado solo una onda de presión, ya que la presión es una magnitud fácil de medir. La presión también está relacionada con la temperatura y la densidad de un fluido, ya que si la presión varía localmente la densidad y la temperatura también lo harán. Por lo que tanto la temperatura como la densidad también son variables acústicas.

En los océanos los sonidos emitidos por una fuente se refraccionan conforme se van propagando ya que es un medio que está estratificado horizontalmente. Sin embargo, este es un proceso complicado ya que el océano es un medio muy complejo debido a que las condiciones de este son muy cambiantes por diferentes factores como la latitud, el viento, oleaje y distintas condiciones meteorológicas.

En la propagación del sonido en el océano hay una serie de elementos que pueden afectar a la pérdida del sonido conforme se propaga, la mayoría dependen de la frecuencia acústica. Entre ellos se encuentra la absorción del sonido por parte del agua y del lecho marino, la refracción del sonido debido al gradiente de velocidad del sonido y la profundidad de la fuente y el receptor.

Dentro de los parámetros que se usan para la medición de las ondas acústicas, encontramos el SPL, SPN, PSD, RMS y el SEL.

El SPL o nivel de presión sonora, es una medida logarítmica de la presión efectiva de un sonido respecto a valores de referencia, se mide en decibelios. Es igual a $20 \times \text{Log}_{10}$ de la relación entre la raíz cuadrada media de la presión sonora y la presión de referencia.

También se describe como la relación entre la presión sonora absoluta y un nivel de referencia de sonido en el medio. Este parámetro puede medirse en el agua con un hidrófono y en el aire con un micrófono (*Slabbekoorn et al., 2018*).

El SPN es la máxima sobrepresión o subpresión exhibida por el pulso sonoro, medida como el nivel de cero a pico o el nivel de pico a pico.

Es fácil de medir y su relevancia biológica es alta, ya que se ha observado una correlación entre el SPN y los impactos físicos y de comportamiento (Robinson et al., 2014).

Nivel sonoro RMS es la raíz cuadrada de la media de las presiones al cuadrado de la forma de onda total. El RMS se utiliza más comúnmente para sonidos de mayor duración como los producidos por fuentes de ruido continuo.

El SEL suma la energía acústica a lo largo de un periodo de medición y tiene en cuenta tanto el SPL de la fuente sonora como la duración del sonido. Es una medida que puede sumarse a través de emisiones repetidas para dar una medida global de la energía acústica durante un período de tiempo (Hawkins et al., 2020).

1.5. ESPECIE DE ESTUDIO: LUBINA

En este estudio se emplea una especie de pez de interés comercial en la acuicultura del mar Mediterráneo. La lubina europea (*Dicentrarchus labrax* (Linneaus, 1758)).

La lubina es un perciforme de la familia de los Serránidos. Posee un cuerpo largo y robusto, con cabeza con forma picuda y boca grande y ligeramente protráctil. Tiene un color gris que se oscurece en la zona dorsal, en cambio la zona ventral se aclara y la lateral es más plateada (Ortega, 2013).

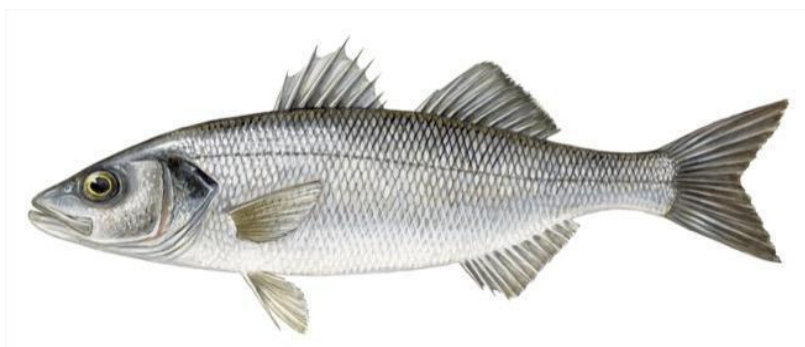


Figura 3. Ilustración de lubina europea (Ortega, 2013).

Esta especie se encuentran en zonas de aguas poco profundas cercanas a la costa, llegando a entrar en estuarios y desembocaduras de ríos. Cuando son juveniles se encuentran en grupos teniendo un comportamiento más social, sin embargo, conforme se hacen adultos se empiezan a encontrar en solitario.

Tiene una gran distribución, encontrándose en el Mediterráneo, Mar Negro y en el norte y sur del Océano Atlántico. Es una especie muy resistente, debido a que es muy euriterma y eurihalina. Esto quiere decir que pueden vivir en aguas de salinidad elevada y también en zonas donde la salinidad es muy baja y el agua es prácticamente dulce. Lo mismo pasa con la temperatura, soportan aguas entre los 3 y 30°C.

Es un depredador muy activo y se alimenta de pequeños peces e invertebrados, especialmente cefalópodos y algunos crustáceos.

La Lubina europea es una especie gonocórica, es decir, que no tiene dimorfismo sexual. Los machos alcanzan la madurez sexual a partir de los dos años y las hembras a partir de los 3-4 años de vida. Las hembras maduras solo realizan una puesta al año de unos 300.000 huevos/kg aproximadamente y suele ser en época invernal entre los meses de enero a marzo.

2. OBJETIVOS

La investigación realizada a lo largo de este proyecto se enmarca dentro del proyecto europeo PCI2022-135054-2 SONORA-JPI Oceans, uno de los objetivos del cual es estudiar el efecto del ruido sobre especies de interés comercial en acuicultura.

El objetivo general de este trabajo es estudiar los efectos del ruido en especies de peces comerciales que se encuentran en tanques de acuicultura (incluyendo etapas de desarrollo tempranas).

Como objetivos específicos encontramos: por un lado, el desarrollo de una metodología apta para este tipo de experimentos bajo condiciones controladas. Y por otro lado, el estudio de los efectos del ruido generado por tráfico marítimo sobre juveniles de lubina europea.

3. MATERIAL Y MÉTODOS

El experimento se ha realizado en las instalaciones pertenecientes a la Universidad Politécnica de Valencia en el Puerto de Gandía. Para el plan experimental se utilizaron 348 juveniles de *Dicentrarchus labrax*, con un peso de $1,5 \pm 0,5$ g y una longitud $4,7 \pm 1$ cm procedentes de una granja de acuicultura de Burriana. Los peces fueron transportados en una furgoneta equipada con un tanque con agua salada a una temperatura de 18°C y una salinidad de 36,5.



Figura 4. Vehículo de transporte de juveniles.

Una vez en Gandía los peces se colocaron en dos tanques con unas dimensiones de 147cm x 118cm x 89cm (L x A x A) y dimensiones interiores de 137cm x 108cm x 71cm (L x A x A), aclimatados con las condiciones similares a la del transporte.

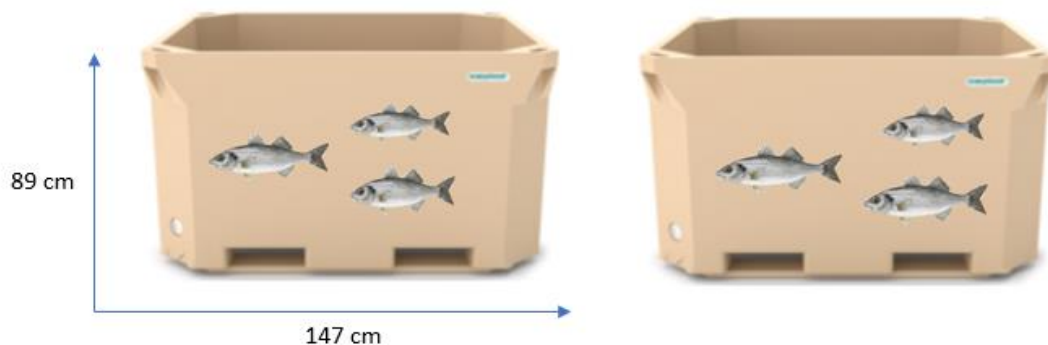


Figura 5. Tanques de sección cuadrada empleados, con sus dimensiones.

Los tanques se llenaron de agua proveniente del puerto de Gandía mediante el uso de bombas de agua. Para la eliminación de bacterias y virus dañinos para los peces en el agua, se empleó hipoclorito sódico (lejía) y se dejó durante 24 horas. Una vez pasado este periodo para eliminar del agua todos los restos de cloro nocivo para los peces se aplicó ácido ascórbico.

Para el mantenimiento y acondicionamiento de todos los tanques, se empleó en cada uno de ellos un calentador Aquael 150W para llevar el control de la temperatura y para la recirculación y filtrado del agua se usaron Filtro exterior Eheim 600.

Los peces se mantuvieron en un fotoperiodo natural y se alimentaron con pellets secos (0,5% del peso corporal). Estos no fueron alimentados durante las 24 horas previas a cada muestreo.

3.1. SISTEMA DE EMISIÓN Y GRABACIÓN DE AUDIO

Para la emisión de ruido dentro de los tanques se diseñó un sistema electroacústico compuesto por una tarjeta de adquisición digital (DAQ) conectada a un amplificador (FA-TE370 Sony Integrated Stereo Amplifier, Sony Corporation, Tokio, Japan) y finalmente un altavoz (prototipo UA-UPV) situado en una esquina del tanque experimental sin entrar en contacto con las paredes. Se calibró previamente el altavoz usando un hidrófono de referencia.

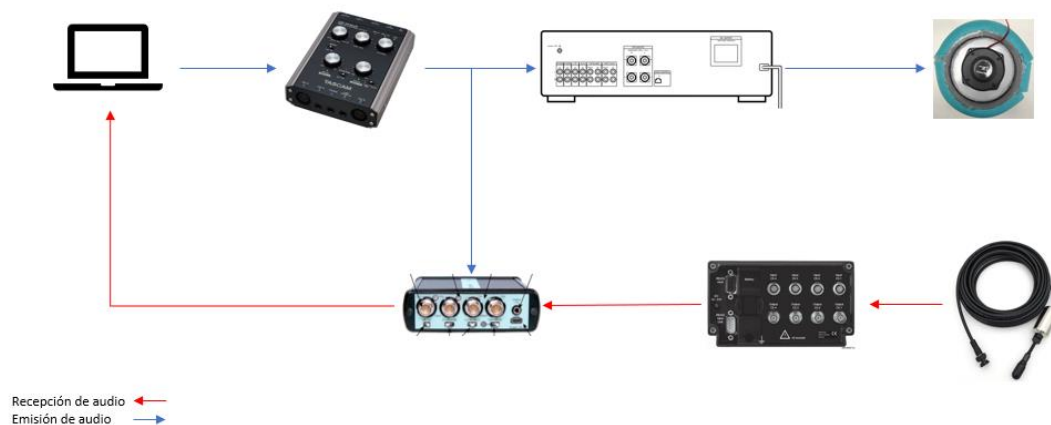


Figura 6. Esquema de conexiones del sistema de emisión y recepción de audio.

Se ha utilizado un Hidrófono AS-1, con las siguientes características:

- Rango lineal: 1Hz a 100kHz \pm 2Db
- Sensibilidad de recepción: -208dBV re 1 μ Pa
- Sensibilidad de transmisión: 140dB SPL re
- Voltaje máximo de entrada: 30V p-p (continuo)
- Profundidad operativa: 200m
- Profundidad de supervivencia: 350m
- Rango de temperatura operativo: -10°C a +80°C
- Conexión de salida: BNC
- Tamaño: 12mm D x 40mm L
- Peso: 8g más el cable
- Longitud de cable: 9 metros

Y para la grabación del video se emplearon las cámaras Creative Live Cam Sync 4K UHD con las siguientes especificaciones:

- Resolución Máx: UHD (2160p) @ 25 fps / QHD (1440p) @ 25 fps / FHD (1880p) @ 40fps
- Compensación de contraluz
- Enfoque Manual
- Micrófono integrado
- Dimensiones (L x A x A), 106 x 57.5 x 53.2 mm 103 g
- Longitud de cable de 1.8 m
- Compatibilidad con plataformas Windows PC, macOS

Para asegurarse de que tanto los tanques experimentales como los control estaban aislados acústicamente, se realizaron medidas del ruido ambiental previas a empezar el experimento con el sistema de emisión del tanque experimental encendido y apagado.

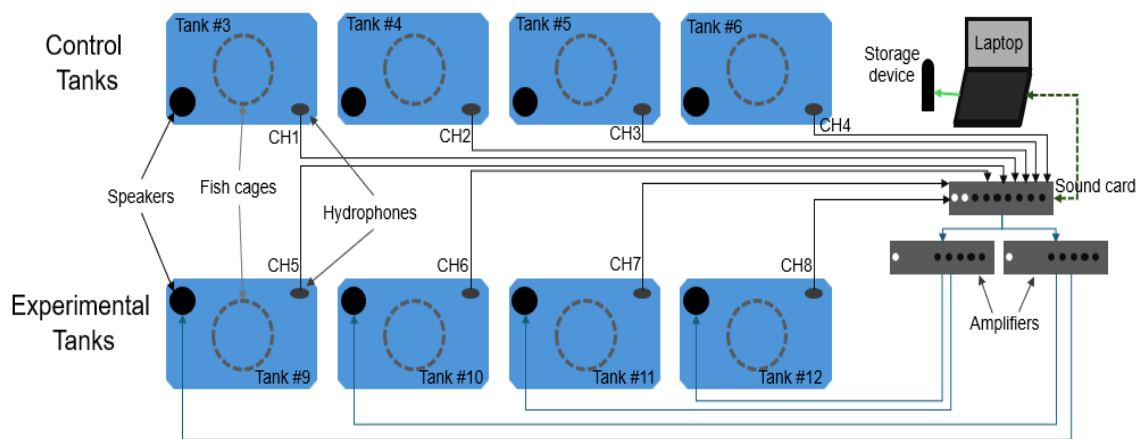


Figura 7. Esquema de los tanques y las conexiones de los sistemas acústicos.

3.2. EMISIÓN ACÚSTICA

Las emisiones acústicas correspondían a grabaciones de cuatro barcos pesqueros a 10-15 metros de distancia. Se creó específicamente para este proyecto una rutina en Matlab que emite y recibe sonido de manera simultánea.

Las grabaciones se emitieron aleatoriamente (con una duración de 90s a 150s dependiendo del tipo de emisión acústica) con intervalos sin ruido de 10 a 30 segundos entre dos emisiones consecutivas y correspondían principalmente a la banda de baja frecuencia, entre 50 y 2000 Hz.

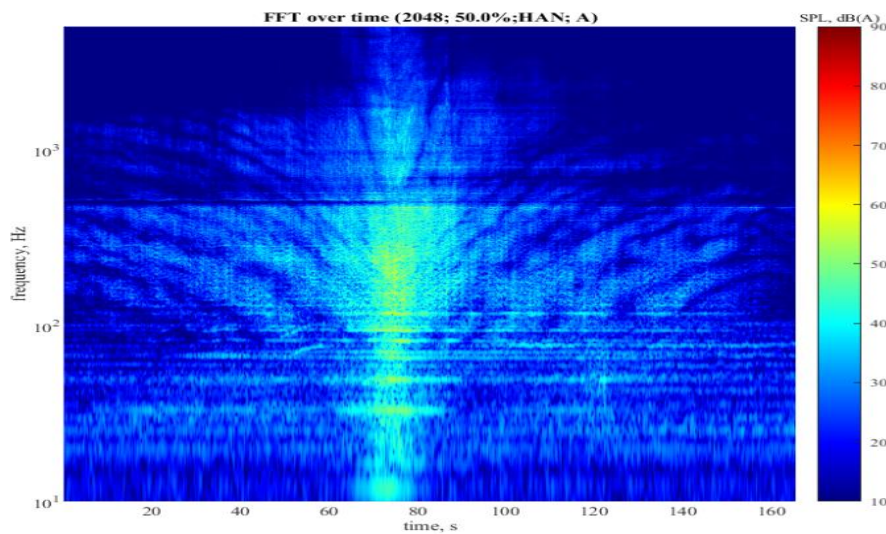


Figura 8. Ejemplo de un espectrograma correspondiente a una de las emisiones procedentes de la grabación de una embarcación.

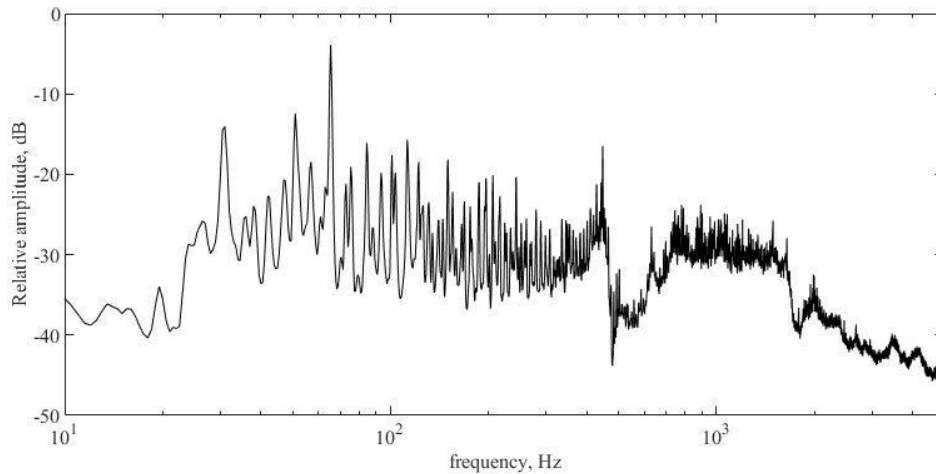


Figura 9. Amplitud relativa de presión registrada por el hidrófono de control para un rango de frecuencia bajas y medias.

3.3. PLAN EXPERIMENTAL

Los animales se eligieron al azar y se dividieron entre los tanques. Cada uno de los tanques tenía una cesta de una altura de 75 cm y un diámetro de 40 cm. En cada cesta se colocaron 11 peces.



Figura 10. Estructura de las redes empleadas en el experimento.

Se separaron los peces en grupo control y experimental. El grupo control se encuentra en las mismas condiciones que el experimental, pero sin el estrés acústico.

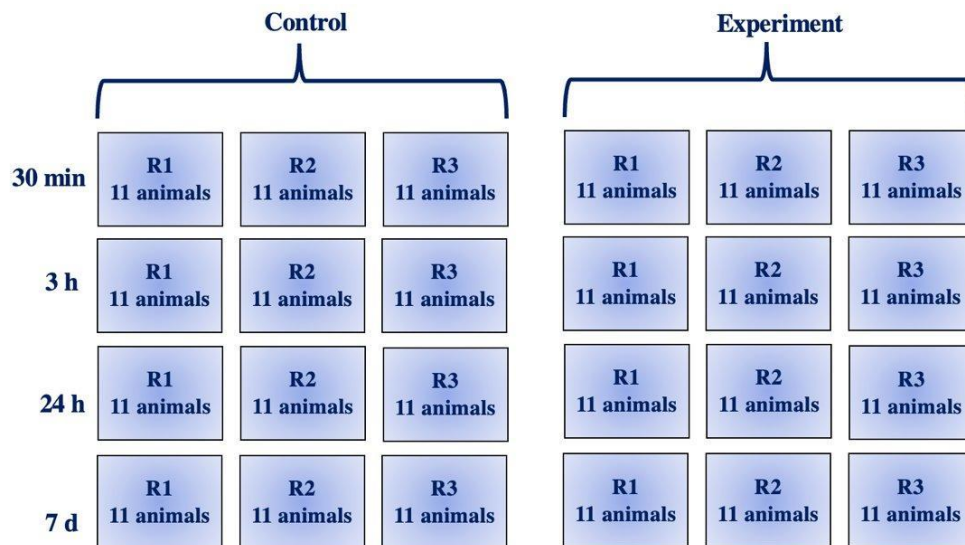


Figura 11. Esquema representativo del plan experimental.

Se realizaron 3 réplicas del muestreo. Cada una estaba dividida en un muestreo tras 30 minutos de exposición al estrés acústico, otro tras 3 horas, tras 24 horas y por último tras 7 días expuestos.

Dichos muestreos fueron repartidos entre 8 tanques, 4 en condiciones del grupo control y otros 4 bajo las condiciones del grupo experimental. Entre cada una de las réplicas los peces se mantenían 24 horas de aclimatación para que se acostumbraran a las condiciones del nuevo tanque.

3.4. MUESTREO BIOLÓGICO Y ESTUDIO DE CRECIMIENTO

El muestreo se realizó después de 30 minutos, 3 horas, 24 horas y 7 días sometidos a estrés acústico. Se capturaron los peces con una red en diferentes horas y momentos del día.

En primer lugar, se extrajeron los peces del grupo experimental y seguidamente los del grupo control. Una vez capturados se colocaron en un cubo de agua con una concentración de 20 mg/l de MS-222 (metanosulfonato de triclaína), para practicarles la eutanasia.

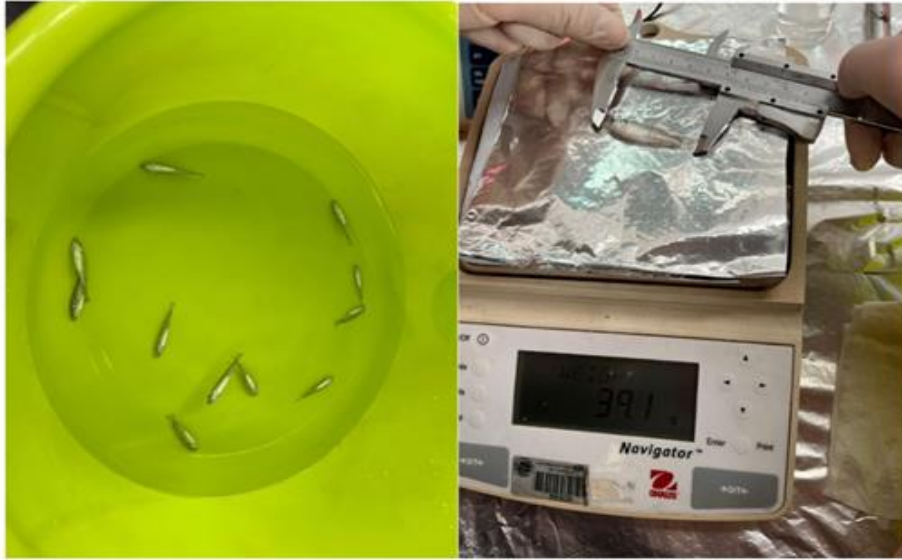


Figura 12. Animales después de practicarles la eutanasia, usando metanosulfato de tricaina (MS-222)(izquierda), pesado y medición de peces (derecha).

Después de ser extraídos del tanque y anestesiados los peces se midieron con un calibrador y pesaron con una balanza de precisión. De los 12 peces muestreados por cada tanque, 6 se pusieron en tubos de muestras de laboratorio con 1,5 ml de RNAlater (Sigma Aldrich) y los otros 5 se pusieron en seco en los tubos. Todos fueron colocados en un congelador a -20° para su óptima conservación.



Figura 13. Individuo muestreado en solución de RNAlater (R) para análisis molecular (izquierda). Individuo muestreado en seco para análisis celular (derecha).

El crecimiento de los individuos consideró las variables peso y longitud. Se estudió la variación de estas variables a lo largo del tiempo por un lado y entre los grupos experimentales y de control por otro.

3.5. ANÁLISIS DE COMPORTAMIENTO

El comportamiento de los peces y su reacción a los estímulos acústicos se grabó con una cámara colocada sobre el tanque con dos soportes verticales, a 0 '90 metros de la cesta y 1' 30 metros del fondo.

La colocación de las cámaras se seleccionó de manera que todo el tanque fuera visible. Las grabaciones de vídeo hacen posible estudiar la cohesión del grupo, la motilidad y la velocidad de nado.

Para evaluar los datos de motilidad y cohesión, las grabaciones de vídeo se dividieron en una cuadrícula de cuadrados de 5 cm utilizando Python OpenCV (Open Source Computer Vision Library). También se visualizaron para el análisis usando Windows Media Player Classic (Microsoft Corporation, Redmond, Washington).

3.5.1. Motilidad

Para el análisis de la motilidad, se usaron los videos de la cámara colocada encima del tanque. Se analizó un fragmento de 10 segundos del video cada 6 minutos, empezando en tiempo cero. Por cada fragmento se contaron el número de cuadrículas cruzadas por cada pez.

Seguidamente el número de cuadrados se convirtió en la velocidad de nado aproximada de cada pez, teniendo en cuenta el tamaño del cuadrado (25 cm²) y el periodo de tiempo de cada fragmento (10 s). De esta manera, se evaluó la motilidad de cada pez y también el promedio de todos los peces.

3.5.2. Cohesión

De la misma manera que la motilidad, la cohesión se analizó con los videos de la cámara situada sobre el tanque. En este caso se utilizó una imagen del video cada 30 segundos y se midió la cohesión contando el número de cuadrados ocupados por los peces, dibujando virtualmente un polígono cerrado alrededor del grupo de peces. La superficie ocupada por los peces se midió en cm².

No se han obtenido resultados de esta variable durante la realización de este trabajo, pero si se hizo el muestreo por lo que se incluye dentro de la metodología.

3.6. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para el estudio estadístico de la motilidad en la primera réplica y las tres primeras horas de muestreo, se realizó el test Shapiro-Wilk para distribuciones normales. Para conocer las diferencias de motilidad entre las muestras de control y las experimentales para cada periodo, se emplearon las pruebas no paramétricas U-Mann Whitney. Se realizó un test de comparación de dos muestras independientes.

Se realizaron las mismas pruebas para conocer la diferencia del crecimiento de los peces entre el grupo control y el experimental a los 30 minutos y a los 7 días.

4. RESULTADOS

4.1. MUESTREO BIOLÓGICO

Se pesaron y midieron 264 peces, se registró en gramos el peso de cada pez y en centímetros la longitud.

En la Tabla 3 se representan las medias de peso y longitud de las muestras analizadas en los diferentes intervalos de tiempo para las 3 réplicas. Se puede observar que el peso de los individuos muestreados en los 30 minutos, 3 horas y 24 horas son bastante similares. Sin embargo, en los individuos muestreados a los 7 días de exposición se observa un aumento de aproximadamente 1 gramo en el peso medio.

Tabla 3. Peso y longitudes con sus desviaciones estándar para cada tiempo de muestreo.

	g	cm
30'	1,90 ± 0,18	5,51 ± 0,20
3h	1,87 ± 0,19	5,51 ± 0,24
24h	1,79 ± 0,13	5,46 ± 0,14
7d	2,60 ± 0,11	6,18 ± 0,03

En cuanto a la longitud, se puede observar que ocurre lo mismo que con el peso. No hay una varianza grande entre las medias de peso de los 3 primeros periodos de muestreo y a los 7 días los peces aumentan casi 1 cm en la longitud media.

La desviación estándar indica la variabilidad de los datos en cada tiempo de muestreo, teniendo un valor menor a los 7 días lo que sugiere una mayor consistencia de las mediciones en este tiempo.

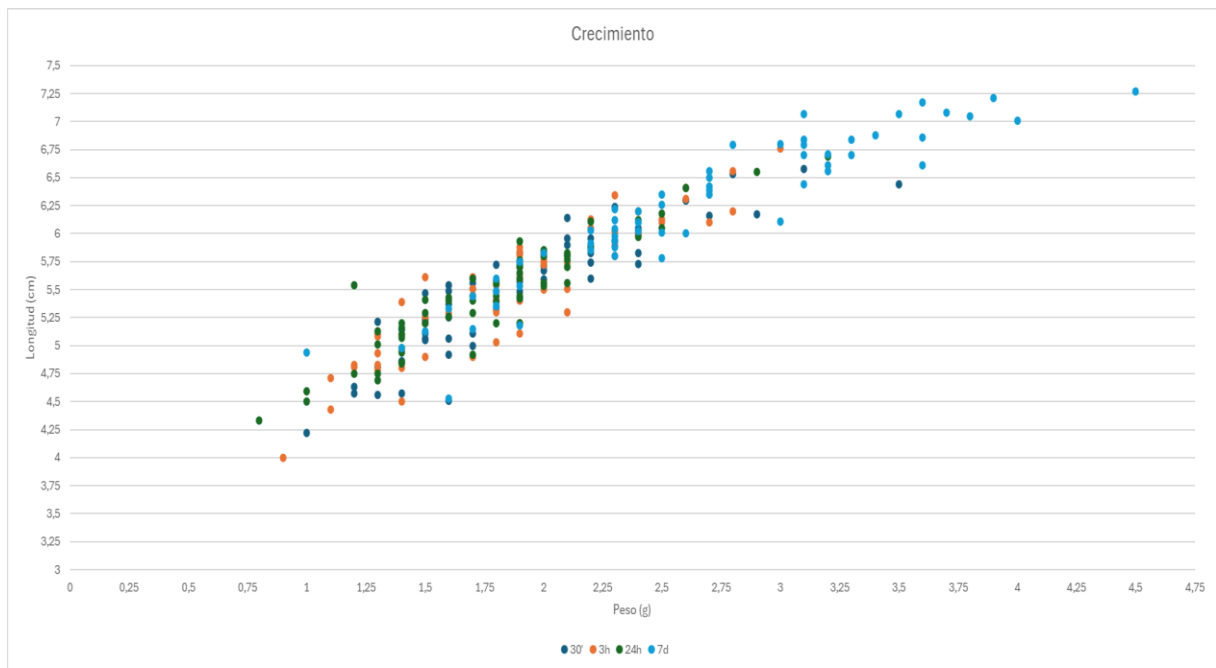


Figura 14. Gráfico de dispersión representando longitud (cm) vs peso (g) para los ejemplares muestreados. Los distintos colores indican los tiempos de muestreo.

La Figura anterior es un gráfico de dispersión que representa el crecimiento de todos los peces. En el eje X encontramos el peso en gramos y en el eje Y la longitud en centímetros. Cada punto de la gráfica representa un pez individual y los diferentes colores muestran los 4 diferentes tiempos de muestreo (30 minutos, 3 horas, 24 horas y 7 días).

Se observa como la tendencia general es que a medida que el peso de los peces aumenta, también lo hace su longitud. Siendo una tendencia esperada para un estudio de crecimiento de peces. También se encuentra una mayor variabilidad en los valores conforme avanza el tiempo.

Respecto al peso de los peces se ha realizado la comparación de los dos grupos de muestras y se han comparado en dos tiempos de muestreo distintos, a los 30 minutos y a los 7 días, con el fin de comprobar la existencia de alguna diferencia entre los grupos control y experimental.

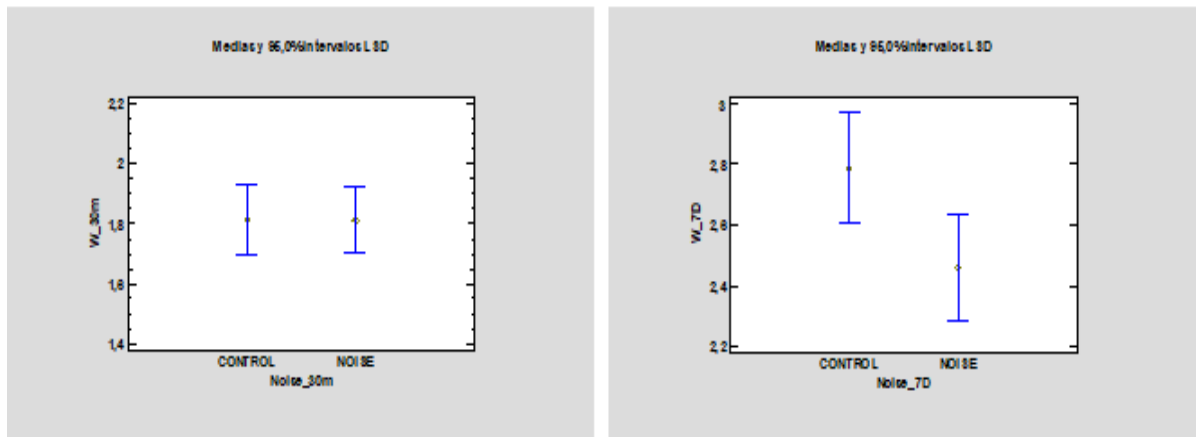


Figura 15. Medias e intervalos (95%) de peso para control y experimental a los 30 minutos y 7 días, respetivamente. (los ejes verticales tienen el mismo tamaño para poder comparar visualmente).

Comparación de Dos Muestras - W CONTROL 30min & W EXP 30min

Muestra 1: W_CONTROL_30min

Muestra 2: W_EXP_30min

Muestra 1: 31 valores en el rango de 1,2 a 2,8

Muestra 2: 32 valores en el rango de 1,0 a 3,5

Tabla 4. Resumen Estadístico del peso a los 30 minutos

	W_CONTROL_30min	W_EXP_30min
Recuento	31	32
Promedio	1,79677	2,00938
Desviación Estándar	0,393687	0,579966
Coefficiente de Variación	21,9108%	28,863%
Mínimo	1,2	1,0
Máximo	2,8	3,5

Rango	1,6	2,5
Sesgo Estandarizado	2,08929	1,17954
Curtosis Estandarizada	0,568507	0,0774013

Se ha realizado la prueba t para comparar dos muestra, donde se ha obtenido que:

- Hipótesis nula: $media1 = media2$
- Hipótesis Alt.: $media1 \neq media2$
- suponiendo varianzas iguales: $t = -1,69691$ valor-P = 0,0948105

No se rechaza la hipótesis nula para $\alpha = 0,05$.

Comparación de Dos Muestras - Control_7D & W_EXP_7D

Muestra 1: Control_7D

Muestra 2: W_EXP_7D

Muestra 1: 30 valores en el rango de 1,7 a 4,5

Muestra 2: 33 valores en el rango de 1,0 a 3,9

Tabla 5. Resumen Estadístico del peso a los 7 días.

	Control_7D	W_EXP_7D
Recuento	30	33
Promedio	2,78667	2,44242
Desviación Estándar	0,748669	0,675014
Coefficiente de Variación	26,8661%	27,6371%
Mínimo	1,7	1,0
Máximo	4,5	3,9
Rango	2,8	2,9
Sesgo Estandarizado	0,688309	0,273382
Curtosis Estandarizada	-0,745235	-0,195975

Se ha realizado la prueba t para comparar medias:

- Hipótesis nula: $media1 = media2$

- Hipótesis Alt.: $media1 <> media2$
- suponiendo varianzas iguales: $t = 1,91934$ valor-P = 0,059622

No se rechaza la hipótesis nula para $\alpha = 0,05$.

También se ha realizado el mismo procedimiento con los valores de longitud obtenidos para cada pez, separando en grupo control y experimental y comparando en los dos tiempos de muestreo de 30 minutos y 7 días.

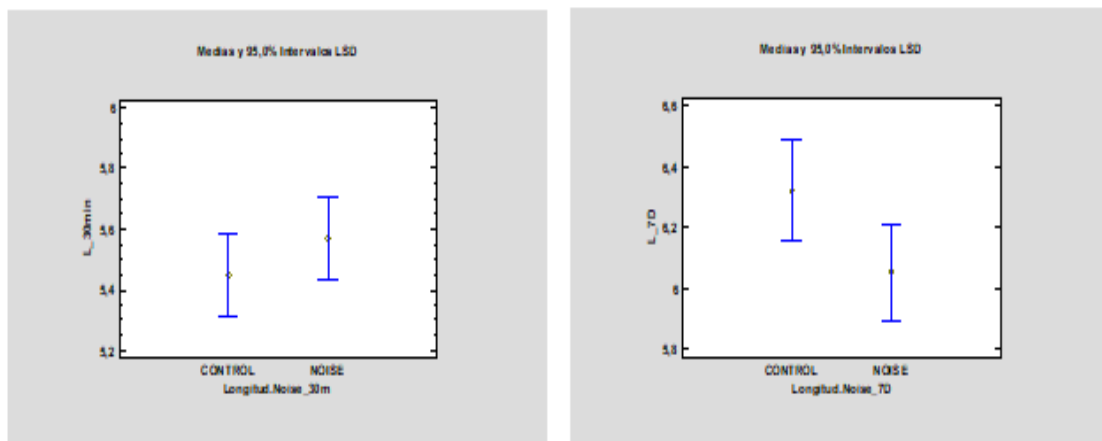


Figura 16. Medias e intervalos (95%) de longitud para control y experimental a los 30 minutos y 7 días, respectivamente. (los ejes verticales tienen el mismo tamaño para poder comparar visualmente).

Tabla 6. Resumen Estadístico de la longitud a los 30 minutos.

	L_Control_30min	L_EXP30min
Recuento	31	32
Promedio	5,44968	5,5675
Desviación Estándar	0,424119	0,635651
Coefficiente de Variación	7,78245%	11,4172%
Mínimo	4,63	4,22
Máximo	6,53	6,58
Rango	1,9	2,36
Sesgo Estandarizado	0,679607	-1,14703
Curtosis Estandarizada	0,0987703	-0,811298

Comparación de Dos Muestras - L Control 30min & L EXP30min

Muestra 1: L_Control_30min

Muestra 2: L_EXP30min

Muestra 1: 31 valores en el rango de 4,63 a 6,53

Muestra 2: 32 valores en el rango de 4,22 a 6,58

Prueba t para comparar medias:

- Hipótesis nula: $\text{media1} = \text{media2}$
- Hipótesis Alt.: $\text{media1} \neq \text{media2}$
- suponiendo varianzas iguales: $t = -0,862555$ valor-P = 0,391761

No se rechaza la hipótesis nula para $\alpha = 0,05$.

Comparación de Dos Muestras - L_control_7D & L_EXP_7D

Muestra 1: L_control_7D

Muestra 2: L_EXP_7D

Muestra 1: 30 valores en el rango de 5,15 a 7,27

Muestra 2: 33 valores en el rango de 4,53 a 7,21

Tabla 7. Resumen Estadístico de la longitud a los 7 días.

	L_control_7D	L_EXP_7D
Recuento	30	33
Promedio	6,32233	6,05545
Desviación Estándar	0,636205	0,635064
Coefficiente de Variación	10,0628%	10,4875%
Mínimo	5,15	4,53
Máximo	7,27	7,21
Rango	2,12	2,68
Sesgo Estandarizado	-0,804633	-0,905192
Curtosis Estandarizada	-1,12802	-0,0765778

Prueba t para comparar medias

- Hipótesis nula: $media1 = media2$
- Hipótesis Alt.: $media1 \neq media2$
- suponiendo varianzas iguales: $t = 1,66446$ valor-P = 0,10115

No se rechaza la hipótesis nula para $\alpha = 0,05$.

4.2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO. MOTILIDAD

La Tabla 8 contiene un ejemplo detallado del análisis estadístico para dos conjuntos de muestras de datos para el muestreo realizado a los 30 minutos. Se han empleado todos estos parámetros para evaluar si las diferencias entre los dos estadísticos de las dos muestras son estadísticamente significativas.

Tabla 8. Resumen estadístico de los primeros 30 minutos de muestreo.

	<i>control_30</i>	<i>Experiment_30</i>
Recuento	60	60
Promedio	1,2	1,98333
Varianza	3,68814	4,22006
Desviación Estándar	1,92045	2,05428
Mínimo	0	0
Máximo	9,0	7,0
Rango	9,0	7,0
Rango Intercuartílico	1,5	3,5
Sesgo Estandarizado	6,91197	2,60596
Curtosis Estandarizada	7,67639	-0,536865

Son de particular interés el sesgo estandarizado y la curtosis estandarizada, que pueden usarse para comparar si las muestras provienen de distribuciones normales. Valores de estos estadísticos fuera del rango -2 a +2 indican desviaciones significativas de la normalidad, lo que tendería a invalidar las pruebas que comparan las desviaciones estándar.

En este caso, ambas muestras tienen valores de sesgo estandarizado fuera del rango normal y las muestras control tienen una curtosis estandarizada fuera del rango normal. Esto indica que los datos obtenidos en este caso no siguen una distribución normal.

Los datos obtenidos en la tabla muestran que el grupo control tiene una mayor variabilidad en sus valores comparado con el grupo experimental. Las medias de ambos grupos son similares pero el grupo experimental obtiene una distribución más concentrada en torno a su media.

La mediana y los cuartiles sugieren que la distribución de los datos en el grupo control son más dispersos y hay valores extremos, mientras que en el grupo experimental son más uniformes.

Tabla 9. Tabla 3. p-valor de la media y desviación estándar, comparando muestras control y experimental para cada periodo de muestreo.

Tiempo (minutos)	p-valor (media)	p_valor (desv.st)
30	0,0329808	0,606519
60	0,0854221	0,104797
90	0,732068	0,967522
120	0,00475584	0,0290374
150	0,186228	0,00327265
180	0,0448356	0,79159

En la tabla 9 se observan 3 columnas, la primera se indica los diferentes tiempos de muestreo en minutos, la segunda columna muestra los p-valores para la media de los datos obtenidos en esos tiempos y la última columna indica el p-valor para la desviación estándar.

En los valores obtenidos para los tiempos de muestreo 30, 120 y 180 minutos se observa que los p-valor de las medias sugiere una significancia estadística. Aunque en la desviación estándar se ha obtenido valores altos, lo que indica que no todas las pruebas para estos tiempos son significativas. En el resto de tiempos de muestreo como 60 y 150 minutos se observa que el p-valor de la desviación estándar son más bajos, indicando una mayor consistencia en los resultados.

Los p-valor de la desviación estándar indican que los resultados obtenidos no son concluyentes. Sin embargo, en el p-valor de las medias sí que se observa indicadores de que hay diferencias significativas (30, 120 y 180).

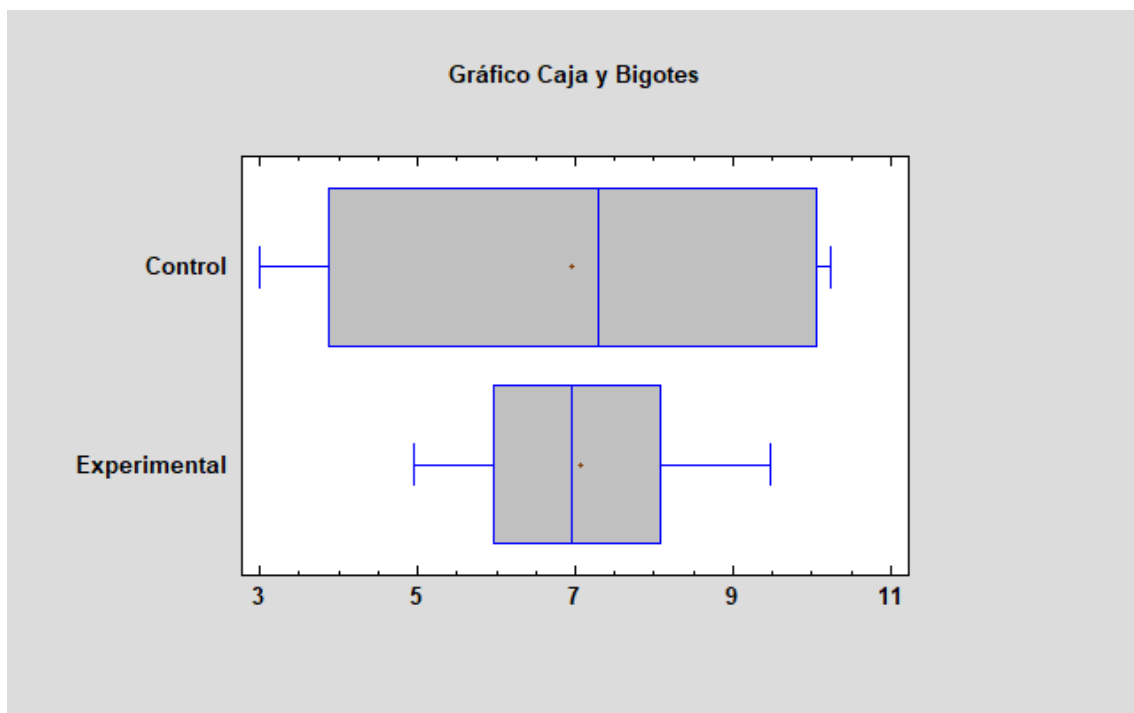


Figura 17. Gráfico de Cajas y Bigotes para el grupo control y el grupo experimental.

Se ha obtenido un gráfico de cajas y bigotes, en el cual se muestra la distribución de los datos de los dos grupos (Figura 18).

Se puede observar como en el grupo Control la caja que representa el rango intercuartil se extiende desde el 4 hasta el 10, lo que indica que el 50% central de los datos se encuentra en este rango. La línea que se encuentra en el interior de la caja nos muestra la mediana, la cual se encuentra cercana a valores de 7,5. También se observa los bigotes que van desde aproximadamente 3 hasta 11 indicando el rango total de los datos.

Por parte del grupo experimental, se puede observar como el rango de datos que se encuentran en la caja (50% central) se extiende de 6 a 8, la mediana se encuentra cercana a 7 y el rango total de datos va desde 5 hasta 9,5.

Si comparamos los dos grupos, obtenemos que la mediana del grupo control es mínimamente superior a la del grupo experimental. También muestra que el grupo control tiene una mayor variabilidad en sus datos y un rango total más amplio.

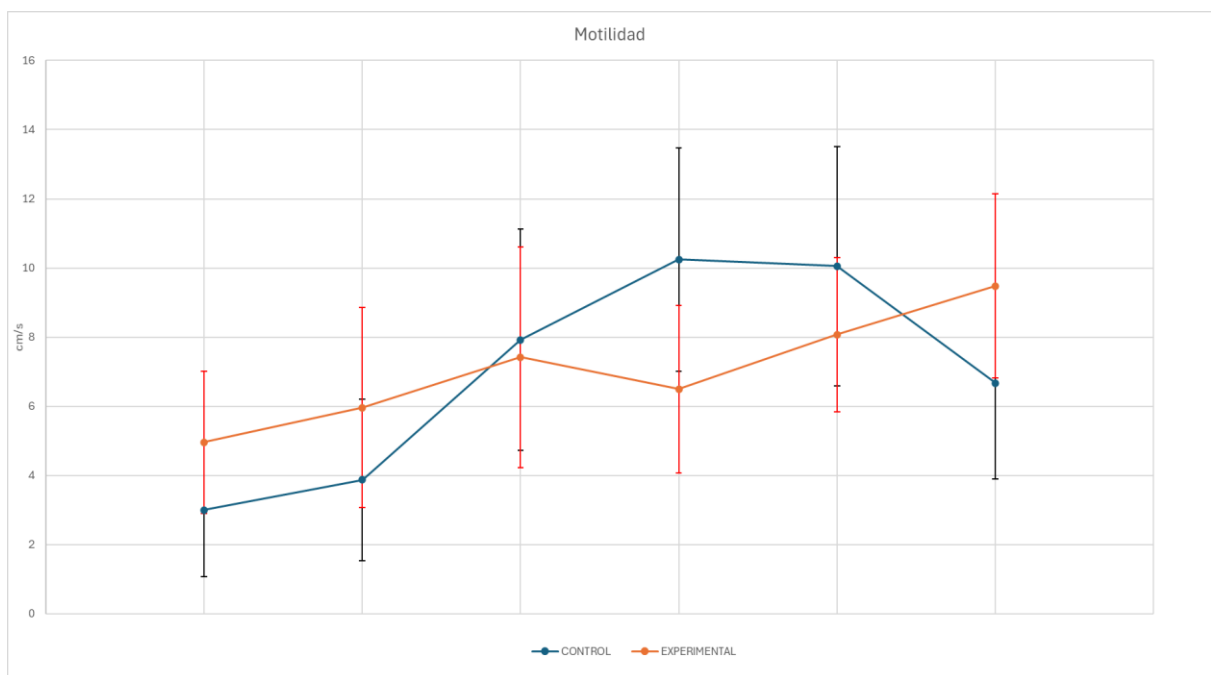


Figura 18. Gráfico de líneas con barras de error, para el grupo control (azul) y grupo experimental (naranja).

La Figura 19 es una gráfica que muestra la comparación de la motilidad entre dos grupos de peces, grupo control (azul) y grupo experimental (naranja), cada uno consta de 6 puntos de medición. El eje Y muestra la velocidad aproximada en cm/s, mientras que el eje X muestra los distintos tiempos de muestreo.

En general, los dos grupos siguen una tendencia similar de aumento de la motilidad con el tiempo, aunque el grupo control muestra un aumento más pronunciado al principio y una caída al final. El grupo experimental, sin embargo, muestra un aumento más constante en los valores medios.

Se puede observar que las barras de error son bastante amplias en ambos grupos, lo que muestra una alta variabilidad en la motilidad. En el grupo control se muestra mayor variabilidad en los valores correspondientes a los 90, 120 y 150 minutos y menor en los de 30, 60 y 180 minutos. Sin embargo, en el grupo experimental la variabilidad de los datos es más uniforme.

La gráfica muestra el cambio de la motilidad de estos dos grupos de peces a lo largo del tiempo de muestreo (30, 60, 90, 120, 150 y 180 minutos). Destacando que se produce un aumento general en ambos grupos, pero con diferencias en la variabilidad.

5. DISCUSIÓN

En primer lugar, se determina a partir de los resultados obtenidos que no hubo diferencias significativas en el crecimiento de los peces para los tres primeros periodos de muestreo, es decir, las primeras 24 horas.

Sin embargo, el crecimiento de los peces es significativo tanto en peso como en longitud a los 7 días, con casi 1 cm y 1 g de diferencia en promedio lo cual es esperable considerando el estado de crecimiento temprano de los individuos utilizados en este experimento.

Cabe destacar indicios de cambio de crecimiento, tanto en peso (Fig.16) como en longitud (Fig. 17), entre los grupos de control y experimental al cabo de 7 días. Cuando los valores medios del peso entre los grupos de control y experimental son comparados a través de una prueba t al principio de la emisión acústica (insonificación durante 30 minutos), no existe diferencia significativa entre ambos valores medios (p -valor=0.09).

Sin embargo, cuando el mismo estudio estadístico se realiza para los individuos insonificados durante 7 días, obtenemos un p -valor=0.59 (existe una diferencia significativa de las muestras con un intervalo de confianza superior al 90%). Resultados similares aunque menos significativos, se encuentran en el estudio comparativo entre

las longitudes medias de los grupos de control y experimental a los 30 minutos (p-valor=0.39) y 7 días (p-valor=0.1).

Estudios previos han relacionado los estímulos acústicos con cambios en el crecimiento de los individuos describiéndose en la literatura resultados dispares (*Hang et al. 2021*), con efectos más dramáticos para estadios iniciales de crecimiento, como el larvario (*Nedelec et al. 2015*). Otros autores han descrito un efecto negativo en el crecimiento que desaparece a medio plazo (*Davidson et al., 2009*). El resultado que se presenta en este trabajo abre la vía a un estudio futuro de mayor duración temporal.

Los resultados obtenidos para el estudio de la motilidad nos muestran que tanto para el grupo control como el experimental se muestra una tendencia general en la que la motilidad aumenta con el tiempo. Pero el grupo control obtiene un aumento más pronunciado al principio y el experimental un aumento más regular.

La variabilidad en la motilidad nos dice que pese a que ambos grupos mostrasen un aumento general, existen diferencias en el comportamiento motriz de los peces teniendo el grupo control una mayor variabilidad en los distintos tiempos en los que se hizo el muestreo.

Se ha podido observar mediante los p-valores de las medias y la desviación estándar, que sí existen indicadores de diferencias significativas en las medias de los valores para cada periodo de tiempo. Sin embargo, en relación a la desviación estándar, dado que la distribución parece no corresponder a una distribución gaussiana no se pueden sacar conclusiones referidos al análisis de esta variable.

En definitiva, se puede concluir que hay diferencias importantes entre los peces del grupo control y los peces del grupo experimental que han sido sometidos al estrés, pero es necesario un mayor número de datos para poder obtener conclusiones significativas.

Debido al rápido crecimiento de los peces en el momento del estudio es necesario la sincronización de varios sistemas acústicos al mismo tiempo, con el fin de realizar todas las réplicas del muestreo de una manera más rápida y simultáneamente. De este modo, el factor del crecimiento natural de los peces no es relevante en los resultados del comportamiento de estos, ya que todos los peces se encuentran bajo las mismas condiciones de crecimiento. Este hecho tiene como consecuencia la necesidad de

replicar los sistemas de emisión y adquisición acústica y óptica, lo que eleva el coste económico de este tipo de ensayos. Sin embargo, el desarrollo de sistemas de bajo coste como los utilizados en este trabajo (desarrollados en colaboración con la Universitat d'Alacant) ha permitido llevar a cabo estos experimentos de forma adecuada y con un coste asumible. Aún así hay elementos del sistema que podrían mejorarse para optimizar el análisis de los resultados.

El sistema óptico que se ha empleado para el muestreo de la motilidad de estos peces ha sido adecuado para obtener los resultados que se esperaban en este trabajo. Sin embargo, el contraste obtenido en las imágenes para analizar la motilidad ha sido un poco bajo, por lo que no se ha podido automatizar este tipo de análisis. Siendo el método empleado apto pero no el más eficiente.

En este trabajo se intentó la automatización de las imágenes de los peces para obtener los resultados de la motilidad. Sin embargo, como ya se ha comentado debido a la baja calidad de la imagen no se pudo realizar.

Como líneas de investigación futuras y con el objetivo de mejorar este tipo de ensayos, sería muy importante la mejora de la calidad de la imagen para poder automatizar el análisis óptico y así tener un proceso de muestreo más eficiente. Se pretende seguir trabajando en esta línea, realizando un estudio sobre distintas ópticas (cámaras) y distancias de trabajo de forma que pueda definirse un sistema experimental que permita el uso de herramientas de machine learning en la identificación y seguimiento de los individuos en su movimiento.

Por otro lado, los resultados obtenidos en el estudio de crecimiento, tanto en longitud como en peso, abren la puerta a estudios de más larga duración.

Por último, reproducir este tipo de ensayos en otras especies y con otros estímulos acústicos enriquecerían la aportación de este trabajo.

6. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

Este trabajo se ha querido enfocar de manera que se cumplieran algunos de los objetivos de desarrollo sostenible. Relacionar estos objetivos con el impacto de la contaminación acústica en especies de peces de acuicultura se puede hacer generando conexiones entre las metas de los ODS y los efectos que puede tener la contaminación en ecosistemas marinos y en particular en especies de peces de interés en acuicultura.

En primer lugar, el ODS 14 que se enfoca en la conservación y uso sostenibles de los océanos, mares y recursos marinos. El ruido submarino puede afectar a la capacidad de los peces para detectar depredadores, en reproducirse y alimentarse, lo que puede reducir su supervivencia afectando a poblaciones e incluso a todo el ecosistema.

Siguiendo con el ODS 12, la reducción de del impacto que puede tener la producción de acuicultura debe realizarse de forma responsable y con el mínimo impacto posible del ruido en la salud de las poblaciones de peces. Promoviendo un consumo responsable de productos de la acuicultura y teniendo en consideración una práctica industrial que minimice la contaminación acústica.

Finalmente, el ODS 9 se relaciona la construcción de infraestructuras, la innovación y también la minimización de impactos ambientales. Por lo tanto, para reducir la contaminación acústica se promueve el desarrollo de tecnologías y métodos que reduzcan el ruido submarino minimizando así su impacto.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Akinrotimi, O.A., Abu, O.M.G., Ansa, E.J., Edu, O.M., & George, O.S. (2009). Haematological responses of *Tilapia guineensis* to acute stress. *International J. Nat. App.Sci.* 5, 338–343.
- Alves, D., Amorim, M.C.P., Fonseca, P.J. (2016). Assessing acoustic communication active space in the Lusitanian toadfish. *J. Exp. Biol.* 219, 1122e1129.
- Amorim, M.C.P., Conti, C., Sousa-Santos, C., Novais, B., Gouveia, M.D., Vicente, J.R., Modesto, T., Goncalves, A., Fonseca, P.J. (2016). Reproductive success in the Lusitanian toadfish: influence of calling activity, male quality and experimental design. *Physiology Behav.* 155, 17e24.
- Amoser, S., and Ladich, F. (2003). Diversity in noise-induced temporary hearing loss in otophysine fishes. *J. Acoust. Soc. Am.* 113, 2170–2179.
- Andrew, R. K., Howe, B. M., Mercer, J. A., & Dzieciuch, M. A. (2002). Ocean ambient sound: Comparing the 1960s with the 1990s for a receiver off the California coast. *Acoustics Research Letters Online*, 3(2), 65-70. <https://doi.org/10.1121/1.1461915>.
- Andrews, C.D., Payne, J.F., and Rise, M. L. (2014). Identification of a gene set to evaluate the potential effects of loud sounds from seismic surveys on the ears of fishes: a study with *Salmo salar*. *J. Fish Biol.* 84, 1793–1819.
- Au, W. W. L., & Hastings, M. C. (2008). Principles of Marine Bioacoustics. En *Springer eBooks*. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-78365-9>.
- Blom, E. L., Kvarnemo, C., Dekhla, I., Schöld, S., Andersson, M. H., Svensson, O., Amorim, M. C. P. (2019). Continuous but not intermittent noise has a negative impact on mating success in a marine fish with paternal care. *Sc. Rep.* 9 (1), 5494.

- Boeger, W.A., Pie, M.R., Ostrensky, A., Cardoso, M.F. (2006). The effect of exposure to seismic prospecting on coral reef fishes. *Braz. J. Oceanogr.* 54, 235–239.
- Bracciali, C., Campobello, D., Giacoma, C., Sará, G. (2012). Effects of nautical traffic and noise on foraging patterns of Mediterranean damselfish (*Chromis chromis*). *PLoS One* 7 (7), e40582.
- Bruintjes, R., Purser, J., Everley, K.A., Mangan, S., Simpson, S.D., and Radford, A.N. (2016). Rapid recovery following short-term acoustic disturbance in two fish species. *Open Science* 3(1): 150686.
- Bruintjes, R., Radford, A.N. (2013). Context-dependent impacts of anthropogenic noise on individual and social behaviour in a cooperatively breeding fish. *Anim. Behav.* 85, 1343–1349.
- Bruintjes, R., Renshaw, E., Rossington, K., Armstrong-Smith, E., Tozer, B., Jones, D., Botterell, Z., Benson, T., Simpson, S.D. (2014). A tool to predict the impact of anthropogenic noise on fish. In: 2nd International Conference on Environmental Interactions of Marine Renewable Energy Technologies (EIMR2014). 28 April – 02 May 2014, Stornoway, Isle of Lewis, Outer Hebrides, Scotland.
- Bruintjes, R., Simpson, S.D., Harding, H., Bunce, T., Benson, T., Rossington, K., and Jones, D. (2017). The impact of experimental impact pile driving on oxygen uptake in black seabream and plaice. *Proc. Mtgs. Acoust.* 27: 010042.
- Buscaino, G., Filiciotto, F., Buffa, G., Bellante, A., Stefano, V.D., Assenza, A., Fazio, F., Caola, G., Mazzola, S. (2010). Impact of an acoustic stimulus on the 280 motility and blood parameters of European sea bass (*Dicentrarchus labrax* L.) and gilthead sea bream (*Sparus aurata* L.). *Mar. Environ. Res.* 69, 136–142.
- Caiger, P.E., Montgomery, J.C., Radford, C.A. (2012). Chronic low-intensity noise exposure affects the hearing thresholds of juvenile snapper. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 466: 225–232.

- Carroll. A.G., Przeslawski. R., Duncan. A., Gunning. M., Bruce.B. (2017). A critical review of the potential impacts of marine seismic surveys on fish & invertebrates. *Mar. Poll. Bull.*114,9–24.
- Casaretto, L., Picciulin, M., Olsen, K., Hawkins, A.D. (2014). Locating spawning haddock (*Melanogrammus aeglefinus*, Linnaeus, 1758) at sea by means of sound. *Fish. Res.* 154, 127–134.
- Celi, M., Filiciotto, F., Maricchiolo, G., Genovese, L., Quinci, E.M., Maccarrone, V., Mazzola, S., Vazzana, M., and Buscaino, G. (2016). Vessel noise pollution as a human threat to fish: assessment of the stress response in gilthead sea bream (*Sparus aurata*, Linnaeus 1758). *Fish Physiol. Biochem.* 42(2), 631–641.
- Codarin, A., Wysocki, L.E., Ladich, F., Picciulin, M. (2009). Effects of ambient and boat noise on hearing and communication in three fish species living in a marine protected area (Miramare, Italy). *Mar. Pollut. Bull.* 58, 1880–1887.
- Cooperative Research in the National Marine Fisheries Service. (2003). En *National Academies Press*. <https://doi.org/10.17226/10836>
- Correa, J.M.G., Sempere, J.B., Juanes, F., Rountree, R., Ruiz, J.F., Ramisa, J. (2018). Recreational boat traffic effects on fish assemblages: First evidence of detrimental consequences at regulated mooring zones in sensitive marine areas detected by passive acoustics. Online 2018. *Ocean Coast. Manag.* 168, 22–34.
- Cort, J. L., & Abaunza, P. (2019). *The Bluefin Tuna Fishery in the Bay of Biscay: Its Relationship with the Crisis of Catches of Large Specimens in the East Atlantic Fisheries from the 1960s*. Springer.
- Davidson, J., Bebak, J., & Mazik, P. (2009). The effects of aquaculture production noise on the growth, condition factor, feed conversion, and survival of rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*. *Aquaculture*, 288(3-4), 337-343.

- De Jong, K., Amorim, M.C.P., Fonseca, P.J., Fox C.J., Heubel, K.U. (2017). Noise can affect acoustic communication and subsequent spawning success in fish. 0269- 7491/© 2017 Elsevier Ltd. All rights reserved.
- Debusschere, E., Hostens, K., Adriaens, D., Ampe, B., Botteldooren, D., De Boeck, G., De Muynck, A., Sinha, A.K., Vandendriessche, S., Van Hoorebeke, L. (2016). Acoustic stress responses in juvenile sea bass *Dicentrarchus labrax* induced by offshore pile driving. *Environ. Pollut.* 208, 747–757.
- Di Franco, E., Pierson, P., Di Iorio, L., Calò, A., Cottalorda, J. M., Derijard, B., Di Franco, A., Galvé, A., Guibbolini, M., Lebrun, J., Micheli, F., Priouzeau, F., Rissode Faverney, C., Rossi, F., Sabourault, C., Spennato, G., Verrando, P., & Guidetti, P. (2020). Effects of marine noise pollution on Mediterranean fishes and invertebrates: A review. *Marine Pollution Bulletin*, 159, 111450. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111450>
- Fakan, E.P., McCormick, M.I. (2019) Boat noise affects the early life history of two damselfishes. *Mar.Poll. Bull.*141, 493–500.
- Faucher, K., Parmentier, E., Becco, C., Vandewalle, N., Vandewalle, P. (2010). Fish lateral system is required for accurate control of shoaling behaviour. *Anim. Behav.* 79, 679 – 687
- Fewtrell, J.L., McCauley, R.D. (2012). Impact of air gun noise on the behaviour of marine fish and squid. *Mar. Pollut. Bull.* 64, 984–993.
- Filadelfo, R., Mintz, J., Michlovich, E., D’Amico, A., Tyack, P. L., & Ketten, D. R. (2009). Correlating Military Sonar Use with Beaked Whale Mass Strandings: What Do the Historical Data Show? *Aquatic Mammals*, 35(4), 435-444. <https://doi.org/10.1578/am.35.4.2009.435>
- Filiciotto, F., Cecchini, S., Buscaino, G., Maccarrone, V., Piccione, G., Fazio, F. (2017). Impact of aquatic acoustic noise on oxidative status and some immune parameters in gilthead sea bream *Sparus aurata* (Linnaeus, 1758) juveniles. *Aquaculture Res.* 48, 1895–1903.

- Filiciotto, F., Cecchini, S., Buscaino, G., Maccarrone, V., Piccione, G., Fazio, F. (2017). Impact of aquatic acoustic noise on oxidative status and some immune parameters in gilthead sea bream *Sparus aurata* (Linnaeus, 1758) juveniles. *Aquaculture Res.* 48, 1895–1903.
- Fitzgibbon, Q.P., Daya, R.D., McCauley, R.D., Simona, C.J., Semmens, J.M. (2017). The impact of seismic air gun exposure on the haemolymph physiology and nutritional condition of spiny lobster, *Jasus edwardsii*. *Mar. Poll. Bull.*
- Fuiman, L. A., Higgs, D. M., & Poling, K. R. (2004). Changing structure and function of the ear and lateral line system of fishes during development. *American Fisheries Society Symposium*, 2004(40), 117-144. <https://scholar.uwindsor.ca/biologypub/115/>.
- Gendron, G. I. M., Tremblay, R., Jolivet, A., Olivier, F., Chauvaud, L., Winkler, G., Audet, C. (2020). Anthropogenic boat noise reduces feeding success in winter flounder larvae (*Pseudopleuronectes americanus*). *Environmental Biology Of Fishes*, 103(9), 1079-1090. <https://doi.org/10.1007/s10641-020-01005-3>.
- George, J., & Thewissen, J. (2020). *The Bowhead Whale: Balaena Mysticetus: Biology and Human Interactions*. Academic Press.
- Graham, A.L., and Cooke, S.J. (2008). The effects of noise disturbance from various recreational boating activities common to inland waters on the cardiac physiology of a freshwater fish, the largemouth bass (*Micropterus salmoides*). *Aquatic Conserv. Mar. Freshw. Ecosyst.* 18(7): 1315-1324.
- Halvorsen, M.B, Casper, M.C, Woodley, C.M, Carlson, T.J, Popper, A.N. (2012a). Threshold for Onset of Injury in *Chinook Salmon* from Exposure to Impulsive Pile Driving Sounds. 7(6), e38968. PloseOne.
- Hang, S., Zhao, J., Ji, B., Li, H., Zhang, Y., Peng, Z., ... & Ye, Z. (2021). Impact of underwater noise on the growth, physiology and behavior of *Micropterus salmoides* in industrial recirculating aquaculture systems. *Environmental Pollution*, 291, [118152.a1](#). 2021).

- Hawkins, A. D., Johnson, C., & Popper, A. N. (2020). How to set sound exposure criteria for fishes. *The Journal Of The Acoustical Society Of America/The Journal Of The Acoustical Society Of America*, 147(3), 1762-1777. <https://doi.org/10.1121/10.0000907>.
- Hawkins, A.D., Pembroke, A.E., Popper, A.N. (2015). Information gaps in understanding the effects of noise on fishes and invertebrates. *Rev. Fish Biol. Fish.* 25, 39–64
- Herbert-Read, J.E., Kremer, L., Bruintjes, R., Radford, A.N., Ioannou, C.C. (2017) Anthropogenic noise pollution from pile-driving disrupts the structure and dynamics of fish shoals. *Proc. R. Soc. B* 284, 20171627. H
- Hildebrand, J. (2009). Anthropogenic and natural sources of ambient noise in the ocean. *Marine Ecology. Progress Series*, 395, 5-20. <https://doi.org/10.3354/meps08353>
- Hirst, A.G., Rodhouse, P.G. (2000). Impacts of geophysical seismic surveying on fishing success. *Rev. Fish Biol. Fish.* 10, 113–118.
- Holles, S., Simpson, S.D., Radford, A.N., Berten, L., Lecchini, D. (2013) Boat noise disrupts orientation behaviour in a coral reef fish. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 485, 295–300.
- Holt, D.E., Johnston, C.E. (2015). Traffic noise masks acoustic signals of freshwater stream fish. *Biol. Conserv.* 187, 27e33.
- Hubert, J., Neo, Y., Winter, H., & Slabbekoorn, H. (2020). The role of ambient sound levels, signal-to-noise ratio, and stimulus pulse rate on behavioural disturbance of seabass in a net pen. *Behavioural Processes*, 170, 103992. <https://doi.org/10.1016/j.beproc.2019.103992>
- Kastelein, R.A., van der Heul, S., Verboom, W.C., Jennings, N., van der Veen, J., de Haan, D. (2008). Startle response of captive North Sea fish species to underwater tones between 0.1 and 64 kHz. *Mar. Environ. Res.* 65, 369–377.

- Kight, C.R., Swaddle, J.P. (2011). How and why environmental noise impacts animals: an integrative, mechanistic review. *Ecol. Lett.* 14, 1052–1061.
- Kojima, T., Suga, T., Kusano, A., Shimizu, S., Matsumoto, H., Aoki, S., Takai, N., Taniuchi, T. (2010). Acoustic pressure sensitivities and effects of particle motion in red sea bream *Pagrus major*. *Fish Sci.* 76,13–20
- Kostyuchenko, L. (1973). Effects of elastic waves generated in marine seismic prospecting on fish eggs in the Black Sea. *Hydrobiol. J.* 9, 45–48.
- Krahforst, C.S. (2017). Impact of vessel noise on oyster toadfish (*Opsanus tau*) behavior and implications for underwater noise management. Ph.D. thesis, East Carolina University
- Kuşku, H., Yiğit, M., Ergün, S., Yiğit, Ü., Taylor, N. (2018). Acoustic Noise Pollution from Marine Industrial Activities: Exposure and Impacts. *Aqu. Res.* 1(4),148-161.
- La Manna, G., Manghi, M., Perretti, F., and Sarà, G. (2016). Behavioral response of brown meagre (*Sciaena umbra*) to boat noise. *Mar. Poll. Bull.* 110(1):324-334.
- Ladich, F., Fay, R. (2013). Auditory evoked potential audiometry in fish. *Rev. Fish Biol. Fish.* 23, 317–364.
- Lin, H., Wang, X., Sun, X (2019). Effects of Noise Stress on the Pathological Sections of the *Epinephelus coioides* and the Expression of Hsp70 Protein in the Liver. 2019 Intern. Conf. Biom. Sci. Inf. Syst.(ICBSIS 2019).
- Liu, M., Wei, Q.W., Du, H., Fu, Z.Y., Chen, Q.C. (2013). Ship noise-induced temporary hearing threshold shift in the Chinese sucker *Myxocyprinus asiaticus* (Bleeker, 1864). *J. Appl. Ichthyol.* 29, 1416–1422 © 2013 Blackwell Verlag GmbH ISSN 0175–8659.
- Løkkeborg, S., Ona, E., Vold, A., Salthaug, A. (2012). Sounds from seismic air guns: gear-and species-specific effects on catch rates and fish distribution. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 69 (8), 1278-129

- MacLennan, D., & Simmonds, E. (2013). *Fisheries acoustics*. Springer Science & Business Media.
- Magnhagen, C., Johansson, K., Sigray, P. (2017). Effects of motorboat noise on foraging behaviour in Eurasian perch and roach: a field experiment. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 564, 115e125.
- Mauro, M., Pérez-Arjona, I., Belda, E., Ceraulo, M., Bou-Cabo, M., Benson, T., Espinosa, V., Cuomo, G., Beltrame, F., Mazzola, S., Vazzana, M., Buscaino, G. Anthropogenic noise: the behavioural responses of *Sparus aurata* juveniles as the basis for a numerical model. 80° National Congress Of Italian Zoological Union (UZI). Roma, 23 - 26 September 2019.pag.119. ISBN – 9788883442445.
- McCauley, R. D., Fewtrell, J., & Popper, A. N. (2003). High intensity anthropogenic sound damages fish ears. *The Journal Of The Acoustical Society Of America*, 113(1), 638-642. <https://doi.org/10.1121/1.1527962>.
- McCormick, M.I., Bridie, J.M.A., Harding, H., Simpson, S.D. (2018b). Boat noise impacts risk assessment vessel a coral reef fish but effects depend on engine type. *Sci.Rep.* 8:3847.
- Miller, I., Cripps, E. (2013). Three dimensional marine seismic survey has no measurable effect on species richness or abundance of a coral reef associated fish community. *Mar. Pollut. Bull.* 77, 63–70.
- *Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.* (s. f.). Ministerio Para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. <https://www.miteco.gob.es/> (Fecha última consulta: 08/07/2024)
- Montie, E.W., Hoover, M., Kehrer, C., Yost, J., Brenkert, K., O'Donnell, T., Denson, M.R. (2017). Acoustic monitoring indicates a correlation between calling and spawning in captive spotted seatrout (*Cynoscion nebulosus*). *PeerJ5:* e2944; DOI10.7717/peerj.2944.

- Mueller-Blenkle, C., McGregor, P.K., Gill, A.B., Andersson, M.H., Metcalfe, J., Bendall, V., Sigray, P., Wood, D.T., Thomsen, F. (2010). Effects of pile-driving noise on the behaviour of marine fish. COWRIE Ref: Fish 06-08, Tech. Rep. 31st March 2010
- Munk, W. H., O'Reilly, W. C., & Reid, J. L. (1988). Australia-Bermuda Sound Transmission Experiment (1960) revisited. *Journal Of Physical Oceanography*, 18(12), 1876-1898. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1988\)018](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1988)018)
- Nedelec, S.C., Mills, S.C., Lecchini, D., Nedelec, B., Simpson, S.D., Radford, A.N. (2016a). Repeated exposure to noise increases tolerance in a coral reef fish. *Envir.Poll.* 216, 428-436.
- Nedelec, S.L., Mills, S.C., Radford, A.N., Beldade, R., Simpson, S.D., Nedelec, B., Côté, I.M. Motorboat noise disrupts cooperative interspecific interactions (2017b). *Sci. Rep.* 7: 6987.
- Nedelec, S.L., Simpson, S.D., Morley, E.L., Nedelec, B., Radford, A.N. (2015). Impacts of regular and random noise on the behaviour, growth and development of larval Atlantic cod (*Gadus morhua*). *Proc. R. Soc. B* 282, 20151943
- Neo, Y.Y., Seitz, J., Kastelein, R.A., Winter, H.V., Ten Cate, C., Slabbekoorn, H. (2016). Noise impact on European sea bass behavior: temporal structure matters. In: *The Effects of Noise on Aquatic Life II*. Springer, pp. 763–76
- Neo, Y.Y., Ufkes, E., Kastelein, R.A., Winter, H.V., ten Cate, C., Slabbekoorn, H. (2015). Impulsive sounds change European seabass swimming patterns: influence of pulse repetition interval. *Mar. Pollut. Bull.* 97, 111–117.
- Nichols, T.A., Anderson, T.W., Širović, A. (2015). Intermittent Noise Induces Physiological Stress in a Coastal Marine Fish, *PLOS ONE*.
- Ortega, A. (2013). Cultivo de lubina : *dicentrarchus labrax*. *Cuadernos de Acuicultura*, 1-45. <https://www.torrossa.com/it/resources/an/2626877>

- Papoutsoglou, S.E., Karakatsouli, N., Batzina, A., Papoutsoglou, E.S. & Tsopelakos, A. (2008). Effect of music stimulus on gilthead seabream *Sparus aurata* physiology under different light intensity in a re-circulating water system. *J. Fish Biol.* 73, 980–1004.
- Paxton, A.B., Taylor, J.C., Nowacek, D.P., Dale, J., Cole, E., Voss, C.M., and Peterson, C.H. (2017). Seismic survey noise disrupted fish use of a temperate reef. *Mar. Policy* 78, 68-73.
- Peña, H., Handegard, N.O., Ona, E. (2013). Feeding herring schools do not react to seismic air gun surveys. *ICES J. Mar. Sci.* 70, 1174–1180
- Picciulin, M., Sebastianutto, L., Codarin, A., Calcagno, G., Ferrero, E.A. (2012). Brown meagre vocalization rate increases during repetitive boat noise exposures: a possible case of vocal compensation. *J. Acoust. Soc. Am.* 132, 3118e3124.
- Picciulin, M., Sebastianutto, L., Codarin, A., Farina, A., Ferrero, E.A. (2010). In situ behavioural responses to boat noise exposure of *Gobius cruentatus* (Gmelin, 1789; fam. Gobiidae) and *Chromis chromis* (Linnaeus, 1758; fam. Pomacentridae) living in a Marine Protected Area. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 386, 125e132.
- Popper, A. N., & Hawkins, A. D. (2019). An overview of fish bioacoustics and the impacts of anthropogenic sounds on fishes. *Journal Of Fish Biology*, 94(5), 692-713. <https://doi.org/10.1111/jfb.13948>
- Popper, A. N., Hawkins, A. D., Fay, R. R., Mann, D. A., Bartol, S., Carlson, T. J., Coombs, S., Ellison, W. T., Gentry, R. L., Halvorsen, M. B., Løkkeborg, S., Rogers, P. H., Southall, B. L., Zeddies, D. G., & Tavolga, W. N. (2014). Sound Exposure Guidelines. En *SpringerBriefs in oceanography* (pp. 33-51). https://doi.org/10.1007/978-3-319-06659-2_7.
- Popper, A.N., Fay, R.R. (2011). Rethinking sound detection by fishes. *Hear. Res.* 273, 25–36

- Popper, A.N., Hastings, M.C. (2009a). The effects of human-generated sound on fish. *Int. Zool.* 4: 43-52.
- Popper, A.N., Hastings, M.C. (2009b). The effects of human-generated sound on fish. *Int. Zool.* 4, 43-52.
- Popper, A.N., Hawkins, A.D. An overview of fish bioacoustics and the impacts of anthropogenic sounds on fishes. *Journal of Fish Biology.* (2019)
- Popper, A.N., Smith, M.E., Cott, P.A., Hanna, B.W., MacGillivray, A.O., Austin, M.E., Mann, D.A. (2005). Effects of exposure to seismic airgun use on hearing of three fish species. *J. Acoust. Soc. Am.* 117, 3958– 3971.
- Purser, J., Bruintjes, R., Simpson, S.D., Radford, A.N. (2016). Conditiondependent physiological and behavioural responses to anthropogenic noise. *Phys. Behav.* 155, 157– 161.
- Purser, J., Radford, A.N. (2011). Acoustic noise induces attention shifts and reduces foraging performance in three-spined sticklebacks (*Gasterosteus aculeatus*). *PLoS ONE* 6, e17478.
- Radford, A.N., Lèbre, L., Lecaillon, G., Nedelec, S.L., Simpson, S.D. (2016). Repeated exposure to impulsive noise increases tolerance in a commercially important fish. *Glob. Change Biol.* 10, 3349 – 3360.
- Robinson, S. P., Lepper, P. A., & Hazelwood, R. A. (2014). Good practice guide for underwater noise measurement. NPL. <https://doi.org/10.25607/obp-21>.
- Sabet, S.S., Wesdorp, K., Campbell, J., Snelderwaard, P., Slabbekoorn, H. (2016). Behavioural responses to sound exposure in captivity by two fish species with different hearing ability. *Animal Behav.* 116, 1-11.
- Scholik, A.R., and Yan, H.Y. (2001). Effects of underwater noise on auditory sensitivity of a cyprinid fish. *Hearing Research* 152, 17-24.

- Shannon, G., McKenna, M.F., Angeloni, L.M., Crooks, K.R., Fristrup, K.M., Brown, E., Warner, K.A., Nelson, M.D., White, C., Briggs, J., McFarland, S., Wittemyer, G. (2016). A synthesis of two decades of research documenting the effects of noise on wildlife. *Biol. Rev.* 91, 982e1005.
- Shi, W., Han, Y., Guan, X., Rong, J., Du, X., Zha, S., Tang, Y., Liu, G. (2019). Anthropogenic Noise Aggravates the Toxicity of Cadmium on Some Physiological Characteristics of the Blood Clam *Tegillarca granosa*. *Front. Physiol.* 10:377.
- Simpson, S.D., Meekan, M.G., Larsen, N.J., McCauley, R.D., and Jeffs, A. (2010). Behavioral plasticity in larval reef fish: orientation is influenced by recent acoustic experiences. *Behav. Ecol.* 21(5): 1098–1105.
- Simpson, S.D., Purser, J., Radford, A.N. (2015). Anthropogenic noise compromises antipredator behaviour in European eels. *Glob. Change Biol.* 21, 586– 593.
- Simpson, S.D., Radford, A.N., Nedelec, S.L., Ferrari, M.C., Chivers, D.P., McCormick, M.I., Meekan, M.G. (2016). Anthropogenic noise increases fish mortality by predation. *Nat. Commun.* 7, 10544.
- Slabbekoorn, H., Dooling, R. J., Popper, A. N., & Fay, R. R. (2018). *Effects of Anthropogenic Noise on Animals*. Springer.
- Slabbekoorn, H., Ripmeester, E.A. (2008) Birdsong and anthropogenic noise: implications and applications for conservation. *Mol. Ecol.* 17, 72 – 83.
- Song, J., Mann, D.A., Cott, P.A., Hanna, B.W., Popper, A.N. (2008). The inner ears of northern Canadian freshwater fishes following exposure to seismic air gun sounds. *J. Acoust. Soc. Am.* 124, 1360–1366.
- Spiga, I., Aldreda, N., Caldwell, G.S. (2017). Anthropogenic noise compromises the anti-predator behaviour of the European seabass, *Dicentrarchus labrax* (L.). *Mar. Poll. Bull.* 122, 297–305

- Stanley, J. A., Van Parijs, S. M., & Hatch, L. T. (2017). Underwater sound from vessel traffic reduces the effective communication range in Atlantic cod and haddock. *Scientific Reports*, 7(1), 14633.
- Trabulo, R., Amorim, M. C. P., Fonseca, P. J., Vieira, M., Matos, A. B., Marin-Cudraz, T., Lemos, M. F., Moutinho, A. B., Novais, S. C., Pousão-Ferreira, P., Candeias-Mendes, A., & Faria, A. M. (2023). Impact of anthropogenic noise on the survival and development of meagre (*Argyrosomus regius*) early life stages. *Marine Environmental Research*, 185, 105894. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2023.105894>.
- *Underwater Noise in the Marine Environment*. (s. f.). JPI Oceans. <https://www.jpi-oceans.eu/en/underwater-noise-marine-environment>
- Vazzana, M., Celi, M., Arizza, V., Calandra, G., Buscaino, G., Ferrantelli, V., Bracciali, C., Sará, G. (2017). Noise elicits hematological stress parameters in Mediterranean damselfish (*Chromis chromis*, perciformes): A mesocosm study. *FishShell.Immun.* 62, 147e152.
- Vazzana, M., Celi, M., Genovese, L., Corrias, V., Quinci, E.M., De Vincenzi, G., Maccarrone, V., Cammilleri, G., Mazzola, S., Buscaino, G., Filiciotto, F. (2016). Are mussels able to distinguish underwater sounds? Assessment of the reactions of *Mytilus galloprovincialis* after exposure to lab-generated acoustic signals. *Compar. Bioch. Phys. A* 201, 61-70.
- Vazzana, M., Mauro, M., Ceraulo, M., Dioguardi, M., Papale, E., Mazzola, S., Arizza, V., Beltrame, F., Inguglia, L., Buscaino, G. Underwater high frequency noise: biological responses in sea urchin *Arbacia lixula* (Linnaeus, 1758). 2020. *Comparative Biochemistry and Physiology, Part A*. 242, 110650. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2020.110650>
- Voellmy, I.K., Purser, J., Flynn, D., Kennedy, P., Simpson, S.D., Radford, A.N. (2014) Acoustic noise reduces foraging success in two sympatric fish species via different mechanisms. *Anim. Behav.* 89, 191– 198.

- Voellmy, I.K., Purser, J., Simpson, S.D., Radford, A.N. (2014b). Increased noise levels have different impacts on the anti-predator behaviour of two sympatric fish species. *PLoS One* 9, e102946.
- Wardle, C.S., Carter, T.J., Urquhart, G.G., Johnstone, A.D.F., Ziolkowski, A.M., Hampson, G., Mackie, D. (2001). Effects of seismic air guns on marine fish. *Cont. Shelf Res.* 21, 1005–1027.
- Wilcock, W. S., Stafford, K. M., Andrew, R. K., & Odom, R. I. (2014). Sounds in the Ocean at 1–100 Hz. *Annual Review Of Marine Science*, 6(1), 117-140. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-121211-172423>
- Wysocki, L.E., Davidson, J.W. III, Smith M.E., Frankel A.S., Ellison T.E., Mazik P.M., Popper A.N. & Bebak J. (2007). The effects of aquaculture production noise on hearing, growth, and disease resistance of rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*. *Aquaculture* 272, 687– 697.
- Xinhai, Z., Xiaomei, X.U., Xinbing, TU., Wenpeng, W., Yougan, C. (2016) Preliminary Exploration of Underwater Noise Impact on Japanese Eel (*Anguilla Japonica*) Elvers. IEE/OES China Ocean Acoustics symposium.
- Zhou, W., Huang, X., & Xu, X. (2018). Changes of movement behavior and HSP70 gene expression in the hemocytes of the mud crab (*Scylla paramamosain*) in response to acoustic stimulation, *Mar. and Fresh. Beh. and Phys.*