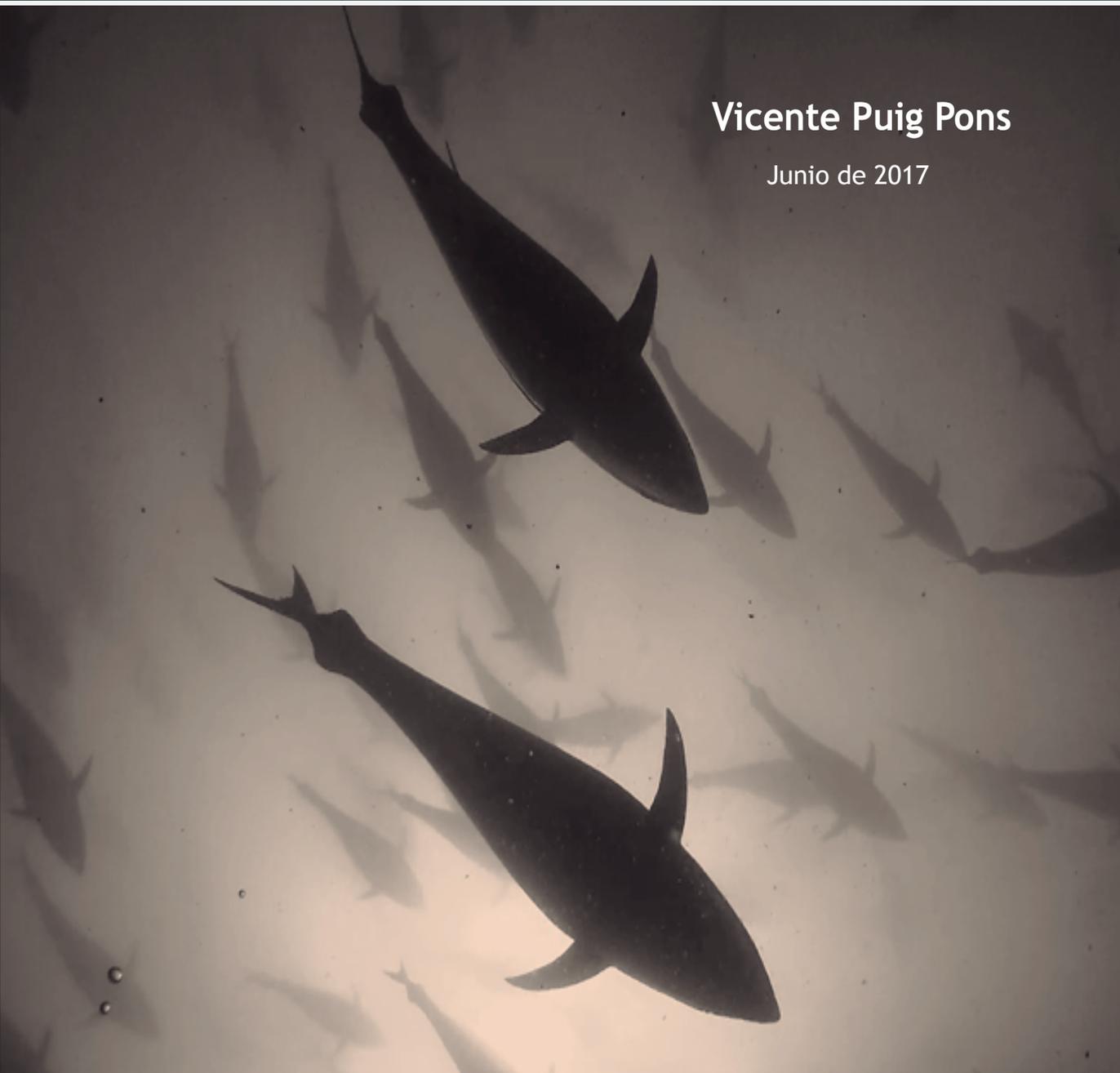


Tesis Doctoral

Control y Caracterización del Atún Rojo en jaulas marinas

Vicente Puig Pons

Junio de 2017



Dirigida por:

Dr. Victor Espinosa Roselló

Dra. Ana Tomás Vidal

Dr. Vicente Domingo Estruch Fuster



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Control y caracterización del atún rojo en jaulas marinas

Vicente Puig Pons

Institut per a la Gestió Integrada de Zones Costaneres

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Gandia, junio de 2017

Tesis Doctoral dirigida por:

Dr. Víctor Espinosa Roselló

Dra. Ana Vidal Tomás

Dr. Vicente Domingo Estruch Fuster

Índice

Resumen	7
Resum	11
1. Introducción.....	19
1.1. Motivación y objetivos	19
2. El atún rojo.....	23
2.1. El Atún rojo	23
3. La acústica como herramienta.Fundamentos teóricos.	29
3.1. La ecosonda científica	31
3.1.1. El transmisor	32
3.1.2. El transductor acústico.....	33
3.1.3. Propagación y dispersión de la onda acústica.....	41
3.1.3.1. Dispersor individual.....	43
3.1.3.2. Múltiples dispersores	46
3.1.4. El receptor.....	47
3.1.5. Ecuación del sónar	49
3.2. La ecosonda EK60 de simrad	50
3.2.1. Conceptos básicos.....	51
3.2.2. Calibración.....	53
3.2.3. Comparación de las ecosondas utilizadas en la tesis	54
3.3. Medida del <i>TS</i> a distancias cortas	55
3.3.1. Determinación de la distancia al blanco	55
3.3.2. La función TVG.....	57
3.3.3. El coeficiente de absorción del medio	58
3.3.4. La posición angular del blanco	58
3.3.5. Campo cercano del pez.....	59

3.3.6. Aproximación de onda plana	60
3.4. Consideraciones básicas sobre los sistemas de visión estereoscópica.	60
4. Comportamiento del atún rojo y su respuesta a ruidos antropogénicos en condiciones de cautividad.....	65
4.1. Comportamiento del atún rojo en condiciones de cautividad.....	65
4.1.1. Introducción.....	65
4.1.2. Materiales y métodos.....	66
4.1.2.1. Lugar de medida	66
4.1.2.2. Equipo utilizado durante las medidas	67
4.1.2.3. Diario de operaciones en la granja.....	73
4.1.2.4. Recogida, tratamiento y análisis de los datos	74
4.1.3. Resultados y discusión.....	77
4.1.3.1. Resultados configuración 1.....	77
4.1.3.2. Resultados configuración 2.....	82
4.1.3.3. Alimentación de los atunes	86
4.1.4. Conclusiones.....	90
4.2. Respuesta a ruidos antropogénicos del atún rojo en cautividad.....	91
4.2.1. Introducción.....	91
4.2.2. Materiales y métodos.....	93
4.2.2.1. Lugar de medida	93
4.2.2.2. Equipo utilizado durante el experimento	94
4.2.2.3. Configuraciones de medida utilizadas	100
4.2.2.4. Señales emitidas durante el experimento	103
4.2.2.5. Recogida, tratamiento y análisis de los datos	107
4.2.3. Resultados.....	112
4.2.3.1. Reacción a las grabaciones del aerogenerador de corta duración	121
4.2.3.2. Reacción a las grabaciones del aerogenerador de larga duración	122
4.2.4. Conclusiones.....	125

5. Medida del TS del atún rojo en jaulas de engrase desde el punto de vista dorsal	127
5.1. Introducción.....	127
5.2. Materiales y métodos.....	129
5.2.1. Lugar de medida	129
5.2.2. Equipo utilizado durante las medidas	130
5.2.3. Recogida y análisis de los datos	135
5.3. Resultados y discusión.....	142
5.3.1. Longitud media de los atunes en cada jaula.....	142
5.3.2. Estimación del TS desde el punto de vista dorsal.....	143
5.3.3. Relación del TS desde el punto de vista dorsal con la longitud.....	147
5.3.4. Dependencia del TS con la distancia al transductor	153
5.3.5. Relación del TS desde el punto de vista dorsal con el área	156
5.4. Conclusiones.....	159
6. Relación entre el peso y las dimensiones del atún rojo tras ser engrasado en cautividad	161
6.1. Introducción.....	161
6.2. Materiales y métodos.....	162
6.3. Resultados.....	167
6.4. Conclusiones.....	175
7. Medida del TS del atún rojo desde el punto de vista ventral mediante el uso combinado de técnicas acústicas y ópticas.....	177
7.1. Introducción.....	177
7.2. Materiales y métodos.....	179
7.2.1. Lugar de medida	179
7.2.2. Equipo utilizado durante las medidas	180
7.2.3. Recogida y análisis de los datos	182
7.3. Resultados y discusión.....	189
7.3.1. Estimación de los parámetros biométricos automáticamente	189
7.3.2. Estimación del TS desde el punto de vista ventral.....	195

7.3.2.1. Resultados de la jaula 16 (J16)	195
7.3.2.2. Resultados de la jaula 18 (J18)	199
7.3.2.3. Resultados de la jaula 20 (J20)	202
7.3.2.4. Resultados al unir todas las jaulas (J16+J18+J20).....	205
7.3.3. Relación del TS desde el punto de vista ventral con la longitud	212
7.3.4. Relación del TS desde el punto de vista ventral con la anchura	217
7.3.5. Relación del TS desde el punto de vista ventral con la masa	221
7.3.6. Dependencia del TS con la distancia al transductor	225
7.3.7. Relación del TS con inclinación del atún	230
7.4. Conclusión	235
8. Mecanismo para el conteo de ejemplares de atún rojo durante las transferencias	239
8.1. Introducción.....	239
8.2. Materiales y Métodos	243
8.2.1. Lugar de medida	243
8.2.2. Equipo utilizado durante las medidas	244
8.2.3. Recogida y análisis de los datos	251
8.3. Resultados y discusión.....	256
8.4. Conclusión	261
Conclusiones.....	263
Referencias	267
Agradecimientos	279
Índice de Tablas	283
Índice de Figuras	289
Símbolos y abreviaturas	299

Resumen

El atún rojo (*Thunnus thynnus*) es una especie de alto valor económico que se vio amenazada en el cambio de siglo por la sobrepesca. Este hecho llevó a la Comisión Internacional para la Conservación del Atún Atlántico (ICCAT) y a las autoridades, a establecer un férreo sistema de cuotas de pesca, a limitar los periodos en los que esta especie puede ser capturada, a fijar una talla mínima de captura y, finalmente, a diseñar un Plan de recuperación que ha permitido observar signos de recuperación del stock en los últimos dos años.

La acuicultura basada en la captura del atún rojo generó en 2014, alrededor de 4000 Tn de atún engrasado en España frente a las más de 6000 Tn de 2004 (de la Gándara *et al.*, 2016). Los productores, afectados por las restricciones impuestas a la captura necesitan de herramientas para el control del proceso de engrase que permitan mejorar la eficiencia de dicho proceso. Del mismo modo, la mejora de las herramientas utilizadas para el control de la cuota pesquera asignada, es objeto de debate continuo entre productores, autoridades y científicos.

Las técnicas acústicas se han revelado como una herramienta eficiente para el control de la biomasa en jaulas de cría para otras especies de gran consumo, como la dorada o el salmón. Este tipo de técnicas, ya utilizadas por los pescadores para la detección remota de cardúmenes a grandes distancias, no se aplican de manera masiva en las plantas piscícolas como si se hace en mar abierto. Sin embargo, el control de la biomasa en las jaulas de cría (y en las de engrase de atunes) se realiza, bien mediante muestreos manuales que pueden

provocar daños a los peces y resultar costosos operacional y económicamente, o bien mediante el uso de sistemas de cámaras estereoscópicas, no invasivas con los peces, pero que se ven limitadas por el alcance del campo de visión de las cámaras, la profundidad y la turbiedad del agua.

En esta tesis, como se detalla en el Capítulo 1, se propone estudiar la viabilidad del uso de las técnicas acústicas para el control de los atunes en las jaulas de engrase, así como para la evaluación del comportamiento de los atunes cuando pasan de vivir en estado salvaje a estar confinados en jaulas marinas. El tamaño de los atunes, así como la forma y tamaño de las jaulas donde son engrasados, limita los estudios y las configuraciones de medida presentadas en el presente documento.

En el Capítulo 2 se incluye información general sobre del atún rojo y sobre su engrase en cautividad a partir de peces adultos capturados (normalmente mediante técnicas de cerco), a diferencia del resto de producciones acuícolas en las que los peces nacen en cautividad. Seguidamente, en el Capítulo 3, se ofrecen los conceptos básicos y la formulación sobre acústica submarina para facilitar la comprensión del resto de capítulos. Es necesario conocer el funcionamiento de la tecnología utilizada en el desarrollo de los experimentos, y para ello se presenta el funcionamiento de una ecosonda y se aborda de manera separada cada una de las partes que la componen y sus particularidades. Desde el transmisor, pasando por el transductor hasta el receptor de la señal, sin olvidar el medio de propagación y las particularidades del blanco que se pretende detectar, así como la manera en la que afectan las limitaciones de medir dentro de una jaula a la determinación de la energía acústica retropropagada por los peces (también conocida como *TS* o target strength).

Se realizó un experimento con el objetivo de conocer cómo se comporta el atún rojo en cautividad y si dicho comportamiento se veía alterado cuando era sometido a estímulos sonoros externos de carácter antropogénico. La metodología y los resultados de este estudio se muestran en el Capítulo 4.

En el Capítulo 5, se evalúa la idoneidad del uso de técnicas acústicas para establecer una relación entre el tamaño del atún rojo y el *TS*, cuando se realizan las medidas desde la superficie del mar y con los sensores orientados hacia el fondo (vista dorsal de los peces). Para ello, se midieron cuatro tallas diferentes de atún a dos frecuencias distintas 120 y 200 kHz. Las medidas se llevaron a cabo en jaulas de engrase, por lo que se asumieron las limitaciones que la determinación del *TS* a cortas distancias lleva implícitas.

A partir de datos provenientes del sacrificio de peces engrasados, se han buscado relaciones entre el peso y las dimensiones del atún rojo. De este modo se han obtenido expresiones que predicen el peso medio de los peces engrasados en una jaula a partir de su longitud, altura y anchura máxima. Dichas expresiones se muestran en el Capítulo 6.

Haciendo uso de las técnicas acústicas combinadas con un sistema de visión estereoscópica, se ha estudiado la viabilidad de obtener relaciones entre la longitud del atún rojo y el *TS* en jaulas de engrase desde el punto de vista ventral. Para ello, se dispusieron los equipos en el fondo de la jaula de engrase y se registraron los datos con todos los sensores sincronizados y mirando hacia la superficie. Se realizó el estudio para las frecuencias de 120 y 200 kHz como en el caso dorsal, con la particularidad de poder conocer el valor del *TS* de un pez determinado que es grabado con un sistema estereoscópico que nos facilitara datos sobre su longitud, anchura máxima y orientación respecto del transductor. Como en el caso de las medidas dorsales, se pretendía conocer la aplicabilidad de la técnica para conseguir el objetivo fijado.

Por último, en el Capítulo 8 se presenta un método para el conteo de atunes mediante técnicas acústicas. Esta técnica novedosa pretende facilitar el conteo de ejemplares durante los procesos de transferencia, automatizándolo en gran medida y haciéndolo inmune a la falta de visibilidad en el momento de la maniobra. Para conseguirlo se utilizó un sonar de barrido lateral trabajando a 200 kHz y se acompañó el sensor de un sistema de video estereoscópico que permitiera conocer la talla de manera automática.

Resum

La tonyina roja (*Thunnus thynnus*) és una espècie d'alt valor econòmic que es va veure amenaçada durant el canvi de segle per la sobrepesca. Este fet va portar a la Comissió Internacional per a la Conservació de la Tonyina Atlàntica (ICCAT) i a les autoritats, a establir un ferri sistema de quotes de pesca, a limitar els períodes en què esta espècie pot ser capturada, a fixar una talla mínima de captura i, finalment, a dissenyar un pla de recuperació que ha permès observar signes de recuperació de l'estoc en els últims dos anys.

L'aqüicultura basada en la captura de la tonyina roja va generar, en 2014, al voltant de quatre mil tones de tonyina engreixada a Espanya, enfront de les més de sis mil tones de 2004 (*de la Gándara et al., 2016*). Els productors, afectats per les restriccions imposades a la captura necessiten de ferramentes per al control del procés de engreixament que permeten millorar l'eficiència del procés. De la mateixa manera, la millora de les ferramentes utilitzades per al control de la quota pesquera assignada és objecte de debat continu entre productors, autoritats i científics.

Les tècniques acústiques s'han revelat com una ferramenta eficient per al control de la biomassa en gàbies de cria per a altres espècies de gran consum com la daurada o el salmó. Este tipus de tècniques, ja utilitzades pels pescadors per a la detecció remota de bancs de peixos a grans distàncies, no s'apliquen de manera massiva en les plantes piscícoles com si es fa en mar obert. No obstant això, el control de la biomassa en les gàbies de cria (i en

les de engreixament de tonyines) es realitza, bé per mitjà de mostrejors manuals que poden provocar danys als peixos i resultar costosos operacional i econòmicament, o bé per mitjà de l'ús de sistemes de càmeres estereoscòpiques no invasives amb els peixos, però que es veuen limitades per l'abast del camp de visió de les càmeres, la profunditat i la terbolesa de l'aigua.

En esta tesi, com es detalla en el Capítol 1, es proposa estudiar la viabilitat de l'ús de les tècniques acústiques per al control de les tonyines en les gàbies d'engreixament, així com per a l'avaluació del comportament de les tonyines quan passen de viure en estat salvatge, a estar confinades en gàbies marines. La grandària de les tonyines, així com la forma i grandària de les gàbies on són engreixades, limita els estudis i les configuracions de mesura presentades en este document.

En el Capítol 2, s'inclou informació general sobre la tonyina roja i sobre el seu engreixament en captivitat a partir de peixos adults capturats (normalment per mitjà de tècniques d'art d'encerclament), a diferència de la resta de produccions aquícoles en què els peixos naixen en captivitat.

A continuació, en el Capítol 3, s'ofereixen els conceptes bàsics i la formulació sobre acústica submarina per a facilitar la comprensió de la resta de capítols. És necessari conèixer el funcionament de la tecnologia utilitzada en el desenrotllament dels experiments. Per a això, es presenta el funcionament d'una sonda acústica i s'aborda de manera separada cada una de les parts que la componen i les seues particularitats. Des del transmissor passant pel transductor, fins al receptor del senyal, sense oblidar el mitjà de propagació i les particularitats d'allò que es pretén detectar, així com la manera com afecten les limitacions de mesurar dins d'una gàbia a la determinació de l'energia acústica propagada cap enrere pels peixos (també coneguda com *TS* o *target strength*).

Es va realitzar un experiment amb l'objectiu de conèixer com es comportava la tonyina roja en captivitat, i si este comportament es veia alterat quan era sotmesa a estímuls sonors externs de caràcter antropogènic. La metodologia i els resultats d'este estudi es mostren en el Capítol 4.

En el Capítol 5, s'avalua la idoneïtat de l'ús de tècniques acústiques per a establir una relació entre la grandària de la tonyina roja i el *TS*, quan es realitzen les mesures des de la superfície del mar i amb els sensors orientats cap al fons (vista dorsal dels peixos). Per a això, es van mesurar quatre talles diferents de tonyina a dos freqüències distintes: 120 i 200 kHz. Les mesures es van dur a terme en gàbies flotants, per la qual cosa es van assumir les limitacions que la determinació del *TS* a curtes distàncies porta implícites.

A partir de dades provinents del sacrifici de peixos engreixats, s'han buscat relacions entre el pes i les dimensions de la tonyina roja. D'esta manera, s'han obtingut dades que prediuen

el pes mitjà dels peixos engreixats en una gàbia a partir de la seua longitud, alçària i amplària màxima. Estes dades es mostren en el Capítol 6.

Fent ús de les tècniques acústiques combinades amb un sistema de visió estereoscòpica, es va estudiar la viabilitat d'obtenir relacions entre la longitud de la tonyina roja i el *TS* en gàbies d'engreixament des del punt de vista ventral. Per a això, es van disposar els equips en el fons de la gàbia marina i es van registrar les dades amb tots els sensors sincronitzats i mirant cap a la superfície. Es va realitzar l'estudi per a les freqüències de 120 i 200 kHz com en el cas dorsal, amb la particularitat de poder conèixer el valor del *TS* d'un peix determinat que és gravat amb un sistema estereoscòpic que ens facilitara dades sobre la seua longitud, amplària màxima i orientació respecte del transductor. Com en el cas de les mesures dorsals, es pretenia advertir l'aplicabilitat de la tècnica per a aconseguir l'objectiu fixat.

Finalment, en el Capítol 8, es presenta un mètode per al comptatge de tonyines per mitjà de tècniques acústiques. Esta tècnica nova pretén facilitar el comptatge d'exemplars durant els processos de transferència, automatitzant-lo al màxim i fent-lo immune a la falta de visibilitat en el moment de la maniobra. Per a aconseguir-ho, es va utilitzar un sonar d'escombrat lateral treballant a 200 kHz i es va acompanyar el sensor d'un sistema de vídeo estereoscòpic que permetia conèixer les dimensions de manera automàtica.

Abstract

Atlantic Bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) is a highly value specie that was endangered during the turn of the century by overfishing. Due to the massive resource exploitation, a recovery plan was implemented by the International Commission for the conservation of Atlantic Tunas (ICCAT). That plan enforces three major rules: to establish a fishing quota, to impose a closed fishing seasons and to fix minimum catching size (30kg). These efforts have allowed to observe signs of stock recovery.

Bluefin tuna ranching (based on adult capture in breeding areas) generated about 4000 tons of fattened tuna in 2014 in Spain (that values reached 6000 tons in 2004) (de la Gándara *et al.*,2016). With the aim to control and improve as much as possible the fattening process turns necessary develop tools to help tuna ranchers. These tools will help them to improve tuna production efficiency in sea cages. Moreover, the improvement of fishing quota control mechanisms is being debated by all involved actors.

Acoustic techniques have been revealed as an efficient biomass control tool in aquaculture cages (mainly to salmon and gilthead sea bream). However, underwater acoustic methods (that are used to remote sensing of fish schools in free water) are not usually applied in sea cages. Nowadays, production control, in tuna fattening cages, has made either by manual sampling or by the use of stereoscopic cameras system. The former, it can cause damages to fishes and increases costs to ranchers. The latter, it is non-intrusive to tuna but it is affected by depth and water turbidity and it is limited by camera field of vision.

In Chapter 1 of this thesis, a feasibility study of the use of acoustic techniques in tuna fattening cages to production control as well as to evaluate tuna behavior in captivity is

presented. Research and development of techniques together with experimental setups used are limited by tuna size and cage volume.

General information about Bluefin tuna and their farming in sea cages is included in Chapter 2. In order to provide the necessary understanding of the field, Chapter 3 perform a progressive introduction of theoretical concepts in relation with underwater acoustic techniques linked with biomass estimation. In this chapter, operation of echosounder parts are explained: considering the whole chain, this means taking in to account transmitter, transducer, signal receiver and also keeping in mind the relevance of propagation medium. Specific emphasis was placed on the target particularities, as well as how is affected the target strength determination by measuring within sea cage.

To find out the tuna behavior inside the cages after being captured an experiment was carried out. Likewise, a second experiment was proposed to evaluate the response of tunas to certain anthropogenic sounds (as those produced by offshore wind turbine). The methodology and results of both studies presented are discussed in Chapter 4.

Chapter 5 shows the feasibility of the use of acoustic techniques to evaluate "ex situ" dorsal target strength (TS). A relationship between dorsal aspect TS and tuna length was obtained. To perform it, four different tuna size in four separated sea cages were measured using two EK60 echosounders working at 120 and 200 kHz respectively. Measurements were carried out considering close distances, that fact implies a series of complications and uncertainties like compensation of propagation losses of the acoustic wave, determination of incidence angle of backscattered sound field and alteration of echo envelope caused by the finite size of fish basically due to the nearfield of the fish.

Using data from tuna slaughter on a farm, relations between the weight and the different dimensions of the tuna: length, maximum width and height have been looked for. Obtained expressions allow to calculate fattened tunas weight from the three tuna dimensions. Results are shown in Chapter 6.

In order to expand the study carried out in Chapter 5, an experiment was proposed to determine the relationship between ventral TS and tuna size. In this case, measurements were carried out using acoustic and optic techniques in a new setup concept. A stereoscopic vision system synchronized with two echosounders (EK60) emitting at 120 and 200 kHz were used. With this setup, it is possible to know the value of the TS for a certain tuna that was recorded and measured with the cameras. As in the dorsal measures case, it was sought to know the applicability degree of combined technique in fattened tuna cages. This study and its results are presented in Chapter 7.

Finally, in Chapter 8, a new method to counting tuna using acoustic techniques is presented. This method is intended to facilitate counting tuna during transfer process. The use of underwater acoustic techniques allows to automate tuna counting and to make it

immune to water turbidity during transfers. To achieve it, a side scan sonar working 200 kHz was used. Acoustic equipment and a stereoscopic system worked together to obtain number and medium size of tuna during transfer.



1.1. MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS

El atún rojo del atlántico (*Tunnus thynnus* (Linnaeus, 1758)) es un pez de la familia de los escómbridos con un crecimiento espectacular que puede llegar a los 3 metros de longitud (Cort *et al.*, 2013). Se trata de una especie emblemática que se captura en el Mar Mediterráneo desde hace milenios y que desde mediados de los años 90 viene siendo engrasado en cautividad tras ser capturado mediante la técnica de cerco en las zonas de puesta.

Los peces engrasados en las granjas alcanzan precios altos en los mercados, este hecho junto con el exceso de pesca provocó una sobreexplotación de las poblaciones naturales, con una importante reducción del stock de reproductores. Por ello, la Comisión Internacional para la Conservación del Atún Atlántico (ICCAT) estableció primero en 1999 un sistema de cuotas y después en 2008 un plan de recuperación con una reducción significativa de las cuotas vigentes hasta el momento, así como un sistema de vedas que limita el periodo de captura dependiendo del arte de pesca utilizado y el tamaño mínimo de captura (de la Gándara, 2015).

La amenaza sobre la especie ha incentivado la investigación en torno al atún rojo, de tal manera que ya se ha podido cerrar su ciclo biológico en cautividad. Por primera vez se han obtenido huevos viables a partir de atunes reproductores nacidos en cautividad. Este importante trabajo científico realizado por el Instituto Español de Oceanografía (IEO),

después de 10 años de investigación, posibilitará el desarrollo de la acuicultura integral de la especie, que en estos momentos se basa en la captura de peces para ser engrasados.

Independientemente de las restricciones impuestas a la pesquería por la evidente disminución de la población, la industria acuícola entorno al atún rojo ha mantenido un ritmo de producción creciente desde el 2008 hasta la actualidad. Los productores, han tenido que introducir mejoras en la eficiencia del proceso de engrase para paliar la disminución de capturas permitida, con el fin de minimizar las pérdidas. Así mismo, algunos de ellos, contagiados por la sinergia generada por los grupos de investigación han decidido apostar por la colaboración y el apoyo a los trabajos de Investigación, desarrollo e innovación (*I+D+i*) promovidos en torno al atún rojo.

Esta tesis doctoral trata de sumarse a dichos trabajos desde varios puntos de vista. El primero estudiar si se puede conocer más sobre el comportamiento de la especie en cautividad, ya que se trata de una especie altamente migratoria (según el Anexo I de la convención de 1982 sobre la ley del Mar) capaz de desplazarse miles de kilómetros, que pasa de vivir en estado salvaje a hacerlo confinada en jaulas flotantes después de la captura en las zonas de puesta. No se tiene demasiada información hasta el momento sobre cómo se comportan los atunes, ni como les afectan, por ejemplo, los diferentes estímulos sonoros generados por el hombre o por sus acciones. Aunque si se han realizado estudios sobre cómo se ven afectados sus marcadores biológicos tras pasar un tiempo cautivos y ser engrasados, faltan por conocer más datos sobre la capacidad de adaptación de la especie a la vida en una planta de engrase. Para abordar este primer objetivo se utilizan las técnicas acústicas de manera cualitativa, y se complementan con el uso de cámaras submarinas que permiten clarificar y ratificar los datos acústicos obtenidos. De esta manera se pretende discernir cual es el comportamiento habitual del atún rojo en cautividad y si existe alguna variación cuando es sometido a diferentes ruidos de carácter antropogénico.

El segundo objetivo que se propone en el presente trabajo es evaluar la viabilidad de las técnicas acústicas como mecanismo de control del proceso de engrase de los atunes en las plantas de producción. Se sabe que es posible la determinación del tamaño medio de los peces en una jaula a partir de la energía acústica devuelta por un individuo dentro de la jaula al ser insonificado por un haz acústico. El análisis de la energía acústica retrodispersada por un pez, conocida como *TS* (target strength), ha permitido establecer relaciones entre la longitud de los peces en una jaula y dicho parámetro (*TS*) para especies como el salmón, la dorada o la lubina.

Esta problemática en el caso del atún rojo se aborda desde dos vertientes. Por un lado, se llevan a cabo medidas desde el punto de vista dorsal, con los equipos en la superficie del mar orientados hacia el fondo. De este modo, los resultados obtenidos a partir de este experimento podrán compararse con otros realizados con la misma filosofía de medida y

además, podrán utilizarse como punto de partida para trabajos posteriores con peces no confinados, pero si agregados cerca de los dispositivos de agregación de peces o *FADs* (fish aggregating devices). Por otro lado, persiguiendo el mismo objetivo, se realizan medidas acústicas desde el punto de vista ventral, sincronizadas con grabaciones ópticas. En este caso, los equipos colocados en el fondo de la jaula y orientados hacia la superficie intentaran establecer correlaciones de datos acústico- ópticos de peces individuales, ofreciendo la mayor cantidad posible de pares de datos *TS*-longitud y *TS*-anchura máxima de los atunes. Hay que destacar que la configuración de medida presenta una clara particularidad, los peces son de gran tamaño y se encuentran a poca distancia de los transductores acústicos. Este hecho, afectará a todos los resultados obtenidos, por ello se persigue principalmente estudiar la viabilidad del procedimiento y no los valores cuantitativos, aunque estos sean representativos de la aptitud de las técnicas acústicas para cumplir los objetivos planteados.

El estudio de la energía acústica devuelta por un atún rojo de un tamaño determinado desde el punto de vista ventral, servirá como base a la última parte del estudio, englobada en un proyecto financiado por la Comisión de la Unión Europea que pretende la estimación de la talla y el número de atunes durante los procesos de transferencia (proyecto BIACOP (2013/410/UE)). Los procesos de transferencia entre jaulas de transporte y las jaulas de engrase sirven a las autoridades para ejercer el control sobre la cuota de pesca estipulada mediante la grabación de las transferencias con sistemas estereoscópicos. Las grabaciones resultantes de dichos procesos, son tratadas manualmente por la inspección de pesca para determinar el número de individuos y su tamaño medio en cada transferencia realizada con el fin de saber en qué momento la cuota asignada a un determinado productor ha sido satisfecha. Se propone en la presente tesis el uso combinado de técnicas acústicas y ópticas para poder realizar el conteo y el tallaje de los atunes durante el proceso de transferencia con un alto grado de automatización, sin apenas intervención de un operador. Se presenta una configuración de medida novedosa, que se revela útil incluso en condiciones de baja visibilidad en la que las técnicas ópticas empleadas hasta el momento pierden eficiencia.

Aprovechando la recogida de datos biométricos necesaria para la comprensión de los datos recogidos durante los diferentes experimentos realizados, se estudia el proceso de engrase de los atunes desde el punto de vista estadístico. Es decir, se buscan expresiones que permitan predecir el peso medio de los atunes en las jaulas después de haber sido engrasados a partir de sus dimensiones, longitud, altura y anchura máxima. Se dispone de relaciones entre la masa y la longitud de los atunes cuando estos se encuentran en libertad, pero no existe tanta información sobre atunes engrasados. Además, el estudio presentado introduce la posibilidad de añadir más de una dimensión (dos o tres) a las expresiones predictivas.



En este capítulo se presenta una descripción sobre la morfología del atún rojo, su hábitat, su distribución geográfica, hábitos de alimentación y reproductivos. Se realiza, además, una breve introducción sobre el método de producción del atún rojo que presenta peculiaridades respecto al de otras especies producidas en el Mediterráneo. Es necesario conocer dichas peculiaridades asociadas al engorde en jaulas de esta especie para comprender su comportamiento e interpretar los datos obtenidos en los diferentes experimentos que se presentan en esta tesis.

2.1. EL ATÚN ROJO

El atún rojo *Thunnus thynnus* (Linnaeus, 1758) es un pez teleósteo perteneciente a la familia Scombridae. Se le conoce como el atún rojo del atlántico (*bluefin tuna*, *ABFT*), y conforma la especie de mayor tamaño entre los túnidos, pudiendo alcanzar más de 3 metros de longitud y los 600 kg de peso (Cort, 2007).

Esta especie tiene un cuerpo alargado, fusiforme con una parte delantera más robusta. El dorso es azul oscuro, las zonas laterales y el estómago presentan un tono blanco plateado con líneas transversales incoloras que se alternan con líneas de puntos también incoloros. El atún rojo posee 39 vértebras, de 12-14 radios duros dorsales y de 13 a 15 radios blandos dorsales. La primera aleta dorsal es de color amarillo o azulado y la segunda aleta dorsal (más alta que la primera) presenta un tono marrón-rojizo. La aleta caudal y las pínulas son de color amarillo-gris con el contorno negro; la quilla caudal mediana es negra en los adultos. Se observa la presencia de vejiga natatoria y las aletas pectorales son muy cortas, menos del 80% de la longitud de la cabeza. (Figura 2.1) (Fromentin, 2006).



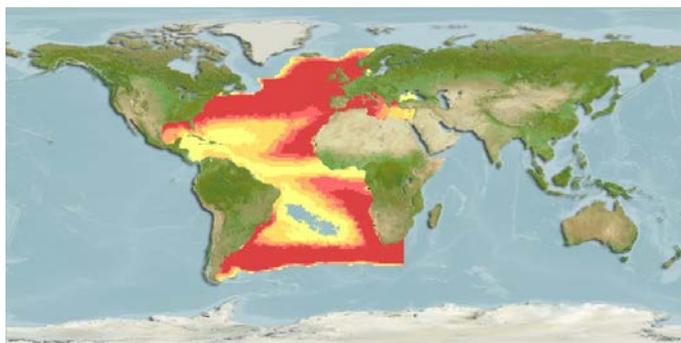
Fuente: I.E.O. (Murcia)

Figura 2.1. Fotografía de un ejemplar de atún rojo (*Thunnus thynnus*, Linnaeus 1758)

Se ha constatado que el atún rojo puede alcanzar una edad, de al menos, 20 años. Es un pez con velocidades de nado elevadas que oscila entre los 5.9 km/h de media y una máxima entre los 13 y los 31 km/h, se le considera una especie altamente migratoria pudiendo cruzar el Océano Atlántico en menos de 60 días.

El atún rojo habita el ecosistema pelágico de la totalidad del Atlántico norte y sus mares adyacentes, sobre todo el Mediterráneo (Figura 2.3). Es el de distribución geográfica más amplia entre los túnidos y el único pez pelágico que vive de forma permanente en aguas templadas del Atlántico. Tolerancia un gran rango de temperaturas pudiendo resistir tanto aguas frías (hasta 3° C) como cálidas (hasta 30° C), ya que, posee la capacidad de elevar y mantener su temperatura corporal gracias a un sistema de contracorriente vascular denominado *rete mirabile*. Este hecho le permite mantener un metabolismo elevado y constante, parecido al de los homeotermos y poder habitar zonas del océano con muy alta gama de temperaturas. Cubren además un gran rango de profundidades, ya que se ha

constatado que, tanto los individuos jóvenes como los adultos descienden frecuentemente a profundidades de 500 a 1000 m.

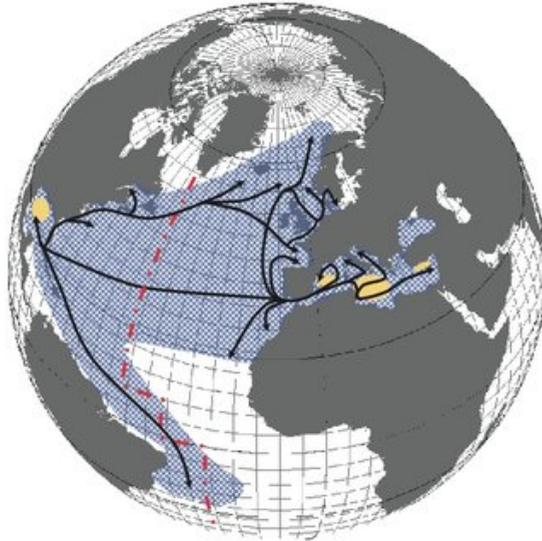


Fuente: www.fishbase.org

Figura 2.2. Mapa de distribución del atún rojo. El gradiente rojo-amarillo indica la mayor-menor presencia.

Realiza migraciones estacionales, relacionadas fundamentalmente con la reproducción y la búsqueda de alimento. Los peces adultos migran en verano hacia las zonas de puesta y regresan al océano para alimentarse intensamente. Los atunes se alimentan principalmente de pequeños pelágicos (lanzones, boquerones, arenques, caballas, jureles, calamares) y pequeños crustáceos. Es un pez ovíparo e iteróparo, como todas las especies de túnidos. Posee un desarrollo de oocitos asíncrono, y es un desovador modal múltiple. La producción de huevos depende de la edad o de la talla (una hembra de 15- 20 años puede llevar hasta 45 millones de huevos). El desove del atún rojo se produce en aguas cálidas ($>24^{\circ}$ C) en zonas específicas y restringidas (Islas Baleares, Sicilia, Malta, Chipre y algunas áreas del Golfo de México (Figura 2.3)) y se produce una única vez al año en mayo-junio (Karakulak et al. 2004).

Se reconocen dos stocks (separados por el meridiano 45° W) determinados por sus áreas de puesta, el occidental con el área de puesta en el Golfo de México y el oriental, que tiene el área de puesta en el Mediterráneo. Pero la mezcla entre ambos stocks es muy grande producida en casi todos los casos en la zona del Atlántico Central, donde los atunes acuden para alimentarse.



Fuente: ICCAT (2010)

Figura 2.3. Principales rutas migratorias del atún rojo (flechas negras) y principales zonas de desove (en amarillo).

Existen datos que fechan el comienzo de la pesca y el consumo de atunes procedentes del Mediterráneo desde la época de los fenicios. Autores tan importantes como Aristóteles relatan en sus escritos como el pueblo fenicio viajaba hasta Cádiz durante días para poder capturar unos atunes de gran tamaño, que eran pescados, guardados en jarras y trasladados a Cartago para su consumo. La pesca de esta especie se mantuvo más tarde por los romanos, que entre los meses de abril y agosto aprovechaban el paso de los atunes por el estrecho de Gibraltar, haciendo uso de liñas de mano (cuerda delgada que habilitaban los marineros para pescar a mano, generalmente desde un barco) y diversas variedades de cerco, principalmente el cerco de playa. La explotación del atún rojo permaneció activa durante la Edad Media, desde el siglo XVI los cercos de playa van siendo sustituidos por la almadraba. La captura se realizaba colocando a pocos kilómetros de la costa una red somera entre dos barcos, en la que quedaban retenidos atunes y otros peces, los pescadores bajaban a la red donde los peces aún se mantenían vivos y seleccionaban los mejores ejemplares de atún que eran subidos al barco. Antes de subir a bordo las piezas elegidas, estas eran desangradas. Esta técnica de pesca es conocida actualmente como almadraba.

Las almadrabas sufrieron algunas modificaciones técnicas hasta comienzos del siglo XX, pero el incremento del tráfico, ruido y polución costeros contribuyeron a una reducción

de la eficacia de la almadraza al inicio de este siglo. Las flotas de cerco crecieron con gran rapidez, y sus rendimientos excedieron a los de las almadrazas. Las capturas de cerco eran de ejemplares de gran tamaño que migraban al océano para alimentarse de pelágicos.

El auge del mercado japonés del sushi y el sashimi durante la década de los 80 convirtió la pesca del atún rojo en una actividad más rentable, por ello, durante los años 80 y 90 se incrementó la capacidad y la eficacia de las pesquerías sobre todo de la de cerco.

En la actualidad, cuando se habla de cultivo del atún rojo (en Europa), se hace referencia al mantenimiento y engrase de peces en jaulas flotantes. Para ello, los atunes son capturados vivos mediante técnicas de cerco aprovechando que llegan al Mediterráneo para reproducirse (entre mayo y junio). Suele realizarse el cerco de los bancos en las zonas de reproducción habitual (Sicilia, Malta, Baleares y Turquía). Cuando el banco es cercado, los peces son transferidos a jaulas de transporte que serán remolcadas hasta las instalaciones de engrase cerca de la costa. Una vez alojados en las jaulas de engrase son alimentados diariamente a saciedad a base de sardina, alacha, jurel, caballa, estornino y algunas clases de cefalópodos, de tal manera que puedan aumentar la cantidad de grasa en el músculo. Después de finalizar el engrase (periodo que dura alrededor de 6 meses) los atunes son sacrificados, haciendo uso de técnicas de sacrificio que permitan la muerte rápida del pez, evitando la formación de lactato en el músculo, que confiere un sabor metálico a la carne cuando se consume cruda. Este efecto conocido como síndrome de la carne quemada (o *yake niku* en japonés) hace que el precio del ejemplar disminuya enormemente o que sea rechazado por el mercado nipón.

Este tipo de producción acuícola, por su singularidad frente al resto de explotaciones piscícolas, conforma un semicultivo, ya que, solo entre el 10 y el 20 % de la biomasa ha sido ganada en el cultivo. No obstante, se consideran producto acuícola y su producción se suma a la del resto de explotaciones en las estadísticas anuales.

La rapidez con la que se ha desarrollado esta actividad, sumado a los altos precios que los ejemplares obtienen en el mercado (ya que permite disponer de pescado fresco todo el año), han llevado en los últimos años a la especie a una situación de sobrepesca que ha puesto el foco sobre el atún rojo, ante la posibilidad de la extinción comercial y la especie. Con el fin de revertir esta situación el Consejo Internacional para la Conservación del Atún Atlántico (ICCAT) estableció en 1999 un sistema de cuotas para limitar las capturas. En 2008 se estableció un plan de recuperación, reduciendo de manera importante las cuotas, limitando el tamaño mínimo (30 kg) y un sistema de vedas. La aplicación de todas estas medidas ha permitido observar signos de recuperación de la especie. Estos signos de recuperación han permitido los aumentos de las cuotas, por ello, ICATT permitió que España aumentara el total admisible de captura (TAC) en un 19.5% para 2016 disponiéndose de un total de 3.524 toneladas (ICCAT, 2006; de la Gándara *et al.*, 2016).

En paralelo con estas medidas y con el fin de desarrollar una acuicultura integral y sostenible de esta especie que no esté basada en la captura como actualmente; se han llevado a cabo investigaciones para la cría en cautividad del atún rojo. Proyectos internacionales como REPRODOTT y SELFDOTT, han permitido que se desarrollen cultivos larvarios y se obtengan ejemplares juveniles de la especie (de la Gándara, 2013; de la Gándara *et al.*, 2016). El Instituto Español de Oceanografía (IEO) ha logrado por primera vez a escala mundial cerrar el ciclo biológico del atún rojo atlántico (*Thunnus thynnus*) en cautividad, lo que supone la obtención de puestas de huevos viables a partir de reproductores nacidos también en cautividad.

En Europa los países que producen atún rojo son España, Italia, Túnez, Malta, Chipre, Croacia, Grecia y Turquía. En España el cultivo se concentra en la Comunidad de Murcia, Cataluña, Almería y Cádiz. Su producción mundial anual ha alcanzado las 12.900 Tn en 2012 de las cuales 2.411 Tn correspondieron a España (FAO, 2015).



La acústica como herramienta. Fundamentos teóricos

La acústica submarina se ha convertido en una herramienta fundamental, que ha permitido al ser humano explorar, estudiar y conocer el medio marino. Es sabido que en 1490 Leonardo da Vinci constataba que las ondas acústicas podían transmitirse por el mar a grandes distancias, por ello escribió que: *“Si paras tu barco e introduces el extremo de un tubo en el agua, y aplicas el oído al otro extremo, oirás barcos que se encuentran a gran distancia de tí”*. Este simple ejemplo sirve para explicar cómo funciona la acústica submarina moderna en la que un emisor (el barco) produce un sonido que es transmitido y captado por un receptor (oído). Para poder escuchar el ruido se precisa tecnología que nos ayude a escuchar, en este caso el tubo sería el equivalente al transductor acústico. Además, esta cita de Leonardo da Vinci nos da información sobre la capacidad de las ondas acústicas de desplazarse a grandes distancias con pocas pérdidas debidas a la absorción del medio, ya que, el autor nos indica que los barcos que se podían escuchar estaban a gran distancia. Esto no ocurre con las ondas electromagnéticas que se ven fuertemente afectadas por la absorción del medio y por lo tanto no pueden ser transmitidas

a distancias suficientes para que se las considerase una herramienta a utilizar en el medio marino.

En 1827 el físico Daniel Collandon y el matemático Charles Sturton estimaron por primera vez la velocidad del sonido en el agua, mediante un experimento en el lago Ginebra (Suiza). Esta primera aproximación calculada con mucha exactitud para los medios disponibles en la época sentó las bases para el desarrollo de estudios posteriores. Pero la verdadera revolución en el campo de la acústica submarina se produjo con el desarrollo del primer transductor piezoeléctrico por Paul Langevin en 1917. Los esfuerzos para obtener conocimientos y tecnología aumentaron en el periodo entre las dos guerras mundiales, convirtiéndose la acústica en una herramienta de ayuda a la navegación, de comunicación bajo el agua y de defensa frente a buques enemigos.

Respecto al uso de la acústica para la detección y el estudio de peces, fue Kimura (1929) quien realizó un experimento en el que pudo estudiar como cambiaba la amplitud que captaba un transductor acústico dependiendo de la cantidad de peces insonificados. Aunque los estudios en este campo no cesaron, fue en la década de los 50 cuando se obtuvieron importantes avances en las investigaciones sobre la aplicación de métodos acuáticos para evaluar la abundancia de peces. Diversos autores realizaron importantes investigaciones en los años posteriores sobre el conteo de ecos individuales o la suma de las amplitudes de los ecos devueltos por los peces al ser insonificados por el haz acústico, de tal manera que permitían evaluar la abundancia y el tamaño de los peces mediante técnicas sencillas, aunque de exactitud relativa. En 1966, Sherbino & Truskanov propusieron técnicas de integración de la intensidad de los ecos que proporcionaban valores más exactos, permitiendo hablar por primera vez de valores cuantitativos.

La estabilidad y la fiabilidad de los equipos utilizados ha ido aumentando con los años, de tal modo que actualmente se dispone de tecnología científica para poder realizar estimaciones más certeras sobre abundancia y tamaño de los peces. Las conocidas como ecosondas científicas, que permiten el procesado digital de las señales obtenidas y la calibración de los sensores; son la herramienta fundamental en el ámbito de la acústica submarina aplicada al control y caracterización de las diferentes especies marinas. Estos equipos son capaces de emitir un pulso acústico que impacta en los bancos de peces, tras alcanzarlos, la misma ecosonda detecta y registra las ondas sonoras retrodispersadas por dichos peces. Dependiendo de las características del sonido devuelto por los peces se determinará la cantidad de peces o abundancia (si la onda acústica es devuelta por un banco de peces) o el tamaño de los peces (si la onda acústica proviene de un solo individuo).

En este capítulo se presentarán los conceptos fundamentales sobre acústica submarina que permitirán entender el resto de capítulos que componen esta tesis. Para simplificar la formulación se asume que el medio es homogéneo, isotrópico y no dispersivo, en el que

las variaciones de presión acústica son muy inferiores a la presión ambiente (Medwin & Clay, 1997).

Aunque no esté implícito en el título, la última sección de este capítulo se dedica a una breve introducción a los sistemas de visión estereoscópica que serán utilizados durante los trabajos presentados en la presente tesis.

3.1. LA ECOSONDA CIENTÍFICA

Una ecosonda científica es un tipo particular de SONAR (SOUND, NAVIGATION and Ranging). Se trata de un sistema utilizado para obtener información acerca de sucesos y objetos submarinos por medio de la transmisión de ondas sonoras y la observación de los ecos devueltos. Cuando el sistema se usa únicamente para recibir sonidos generados por sucesos u objetos submarinos se dice que es un sistema pasivo. Por el contrario, si el sistema es utilizado para la detección de blancos submarinos emitiendo sonido y recibiendo los ecos devueltos por el blanco detectado, estaremos frente a lo que se conoce como un sistema activo.

Existen diferentes tipos de sistemas SONAR, las ecosondas son un tipo particular que emite verticalmente, mientras que la mayoría de estos sistemas lo hacen horizontalmente. El funcionamiento de estos sistemas (independientemente de la dirección en la que emitan) es el mismo, por ello en la presente tesis se hará referencia a todos con ambos términos indistintamente.

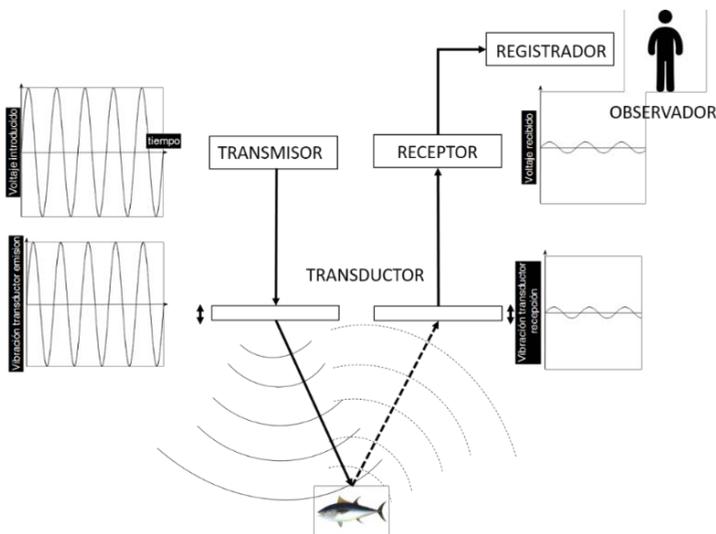


Figura 3.1. Esquema de funcionamiento de una ecosonda en modo activo.

En la figura 3.1 se muestra el esquema típico de una ecosonda. En dicha figura puede apreciarse el funcionamiento de la misma. El transmisor genera una señal eléctrica de una frecuencia determinada (normalmente un “tone burst”), que se envía a un transductor acústico después de una amplificación adecuada. El transductor transforma el pulso eléctrico en una señal acústica que es radiada a través del agua en un haz direccional. Cuando el pulso encuentra un blanco en su camino de propagación, la energía incide en él de tal manera que una porción de la misma se refleja y el resto se dispersa. Parte de esa energía reflejada o “eco” es captada por el transductor, que la convierte de nuevo en una señal eléctrica, que será procesada para obtener información del obstáculo encontrado en el camino de propagación.

3.1.1. EL TRANSMISOR

El transmisor se encarga de generar y amplificar el pulso eléctrico. Normalmente este pulso está constituido por varios ciclos de una señal sinusoidal a la frecuencia de trabajo del transductor. Cuando una onda acústica se propaga a través de un medio como el agua, su intensidad se atenúa con la distancia a la fuente. Esta reducción de la intensidad se denomina pérdidas por propagación, y es debida a la divergencia geométrica del haz acústico y a la absorción del medio de propagación. La divergencia geométrica hace referencia a la distribución de la energía acústica en una superficie que aumenta con la distancia a la fuente. Y la absorción del medio consiste en la transformación de energía acústica en energía calorífica, que depende de las características del propio medio de propagación y de la frecuencia del sonido. La duración de dicho pulso transmitido atiende a la expresión:

$$\tau(s) = \frac{n}{f_0} \quad (3.1)$$

donde f_0 es la frecuencia de trabajo y n el número de ciclos.

La frecuencia de trabajo dependerá de la aplicación (entre 1kHz y 1MHz en pesquerías). En la elección de la frecuencia de trabajo ha de llegarse a una situación de compromiso, ya que, al aumentar la frecuencia se consigue mayor resolución (al disponer de pulsos más cortos) pero la absorción del medio de propagación es mayor, por lo que dicho aumento de la frecuencia limita el alcance de la ecosonda. Por lo tanto, la elección de la frecuencia de trabajo dependerá del blanco a caracterizar. Cuanto menor sea el tamaño del blanco, mayor será la frecuencia elegida para poder realizar estudios alejados de la zona de

Rayleigh donde la potencia del blanco varía rápidamente con la frecuencia (Kinsler *et al.*, 1999).

Para dos blancos detectados de forma individual, la diferencia de caminos de los ecos procedentes de cada uno de ellos, ha de ser lo suficientemente grande para que no se solapen entre ellos. Sean R_1 y R_2 las distancias a las que se encuentran dos blancos, si el eco del primero de ellos se recibe en el instante temporal $T_1=2R_1/c$, el segundo se recibirá en $T_2=2R_2/c$, por lo tanto, la diferencia de caminos deberá cumplir la expresión:

$$T_2 > T_1 + \tau(s) \quad (3.2)$$

$$R_2 - R_1 > \frac{c\tau}{2}(m) \quad (3.3)$$

Esta expresión nos indica que como mínimo deberán estar separados media longitud del pulso en el agua para poder distinguirlos como dos ecos separados.

La potencia media que transporta el pulso aumenta conforme aumenta la longitud del pulso (entendiéndose por longitud del pulso el producto entre la duración del pulso y la velocidad del sonido en el agua); consiguiéndose alcances mayores a costa de pérdida de resolución espacial. Por esta razón, al igual que en la elección de la frecuencia de trabajo, se ha de llegar a una situación de compromiso para obtener la resolución requerida para la aplicación, teniendo en cuenta la distancia a la que se encuentra el blanco del transductor.

3.1.2. EL TRANSDUCTOR ACÚSTICO

El transductor es el encargado de transformar el pulso eléctrico en un pulso acústico que se transmite en el agua por medio de un haz direccional. Además, al tratarse de un sistema recíproco, realiza el proceso contrario cuando el transductor detecta un eco procedente de un blanco, enviando la señal eléctrica resultante al receptor.

El tipo de transductor más utilizado, en aplicaciones de pesca, es el piezoeléctrico por su gran eficiencia. No obstante, ningún transductor es totalmente eficiente y parte de la energía se pierde en la conversión eléctrico-acústica y viceversa. Cuando se habla de eficiencia de un transductor, normalmente se hace referencia a su rendimiento y sensibilidad.

Se puede definir el rendimiento (η) como la relación entre la potencia acústica radiada por el transductor y la potencia eléctrica entregada por el transmisor:

$$\eta = \frac{W}{W_{Tx}} \quad (3.4)$$

donde W es la potencia acústica radiada y W_{Tx} la potencia entregada.

La sensibilidad es la más pequeña variación de la magnitud de entrada para la cual es posible distinguir variaciones apreciables en la salida. Cuando el transductor funciona como emisor, emite una onda acústica con una amplitud proporcional a la sensibilidad del transductor como emisor. En el caso contrario, cuando el transductor trabaja como receptor, el transductor genera una señal eléctrica proporcional a la sensibilidad del transductor como receptor.

La sensibilidad del transductor en emisión puede definirse como:

$$S_{Tx,v} \left(\frac{Pa}{V} \right) = \frac{p_{out}(R_0, 0, 0)}{V_{Tx}} \quad (3.5)$$

donde p_{out} es la presión acústica generada por la fuente y V_{Tx} es la tensión aplicada al transductor. Se entiende que el valor de p_{out} se obtiene evaluando la presión acústica sobre el eje acústico a un metro de distancia.

Si definimos la sensibilidad en términos de corriente $S_{Tx,i}$ como la relación entre la presión generada a la distancia de referencia sobre el eje acústico y la intensidad suministrada al transductor durante la emisión I_{Tx} .

$$S_{Tx,i} \left(\frac{Pa}{A} \right) = \frac{p_{out}(R_0, 0, 0)}{I_{Tx}} \quad (3.6)$$

Relacionando la sensibilidad definida en voltaje y en corriente tenemos que:

$$S_{Tx,i} = S_{Tx,v} \cdot |Z_T| \quad (3.7)$$

donde Z_T es la impedancia eléctrica de entrada del transductor.

Para definir la sensibilidad de recepción (S_{Rx}), se establece una relación entre la tensión generada en circuito abierto V_0 en bornes del transductor y la presión incidente en la cara del transductor:

$$S_{Rx} \left(\frac{V}{Pa} \right) = \frac{V_0}{p_{bs}} \quad (3.8)$$

Urlick (1983) define el parámetro de reciprocidad J como el cociente de la sensibilidad del transductor durante la recepción y la sensibilidad durante la radiación definida en corriente. Atendiendo a dicha definición el valor de J será:

$$J = \frac{S_{Rx}}{S_{Tx,i}} = -j \frac{2 \cdot \lambda \cdot R_0}{\rho_0 \cdot c} \quad (3.9)$$

donde λ es la longitud de onda, ρ_0 la densidad del medio de propagación en kg/m^3 , c la velocidad del sonido y R_0 la distancia de referencia (que es de 1 metro).

Los transductores acústicos se caracterizan principalmente por la frecuencia de trabajo y el patrón de radiación. Como es sabido, el patrón de radiación (también llamado función de directividad) hace referencia a la sensibilidad del transductor con la dirección, debido a las diferencias de fase entre los diferentes puntos o elementos del transductor. Si se considera el transductor como una fuente acústica directiva, la presión en cualquier punto del espacio puede expresarse en términos de la presión en el eje a una distancia de referencia, las pérdidas por propagación y la función directividad $D(\theta)$:

$$p_{inc}(R, \theta, \varphi) (Pa) = p_{inc}(R_0, \theta, \varphi) \frac{R_0}{R} e^{-\beta(R-R_0)} \sqrt{D(\theta, \varphi)} \quad (3.10)$$

La función directividad, se define como el cuadrado del cociente de la amplitud de la presión acústica generada a una distancia de referencia y la amplitud de la presión que se tiene en el eje acústico a dicha distancia, considerando el eje como la dirección de máxima radiación:

$$D(\theta, \varphi) = \left| \frac{P_{inc}(R_0, \theta, \varphi)}{P_{inc}(R_0, 0, 0)} \right|^2 \quad (3.11)$$

La función de directividad indica cómo radia el transductor en función de la dirección. Para un transductor recíproco la directividad durante la recepción es igual a la directividad en emisión. Cuando el transductor funciona como un hidrófono (recepción), la directividad se define como el cociente al cuadrado de la tensión registrada en bornes V_{Rx} cuando la onda acústica incide en la cara del transductor desde cualquier dirección y la tensión generada cuando la onda incide en la dirección del eje del transductor:

$$D(\theta, \varphi) = \left| \frac{V_{Rx}(\theta, \varphi)}{V_{Rx}(0, 0)} \right|^2 \quad (3.12)$$

Por definición, el patrón de radiación (D), es igual a uno en la dirección de mayor sensibilidad, es decir, en el eje acústico del transductor y menor que 1 en el resto de direcciones. Si se define de forma logarítmica (expresado en dB) tendremos que:

$$D_{dB}(\theta, \varphi) = 10 \log D(\theta, \varphi) \quad (3.13)$$

Para un pistón plano circular de radio r , montado sobre una pantalla infinita y para $r \gg \lambda$, la función de directividad en campo lejano se puede calcular según la siguiente expresión:

$$D(\theta, \varphi) = \left(\frac{2 \cdot J_1(k \cdot r \cdot \sin \theta)}{k \cdot r \cdot \sin \theta} \right)^2 \quad (3.14)$$

siendo J_1 la función de Bessel de primera clase de orden 1 (Kinsler *et al.*, 1999; Sherman & Butler, 2007). En la Figura 3.2 se representa la función directividad para un pistón plano de 4 cm de radio, montado en pantalla infinita y radiando a 200 kHz.

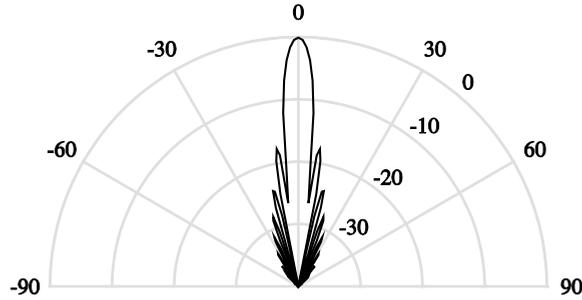


Figura 3.2. Patrón de directividad de un pistón plano circular de 4 cm de radio, montado sobre una pantalla infinita, para una frecuencia de 200 kHz ($kr = 33.5$).

La presión de una onda acústica también puede obtenerse mediante la expresión logarítmica de la Ecuación (3.10), de forma que el nivel de presión LP (usando como unidad el dB) en cualquier punto del campo situado en campo lejano de la fuente puede calcularse como:

$$LP(R, \theta, \varphi) = SL - TL(R) + D_{dB}(\theta, \varphi) \quad (3.15)$$

De la ecuación (3.15) es importante fijarnos en varios parámetros. El primero de ellos es el nivel de fuente (SL) se define como el nivel de presión sonora generado por la fuente sobre el eje acústico a una distancia de referencia y en condiciones de campo lejano:

$$SL(\text{dB @ ref } 1\mu\text{Pa}) = 20 \log \frac{p_{rms}(R_0, 0, 0)}{p_{ref}} \quad (3.16)$$

Las pérdidas por propagación (TL) son las debidas a la propagación de la onda acústica a través del medio. Cuando la onda se propaga su intensidad se ve reducida al alejarse de la fuente debido a la divergencia geométrica y a la absorción del medio (Kinsler *et al.*, 1999). Para una onda con divergencia esférica, las pérdidas por propagación pueden calcularse como:

$$TL = \frac{I(R, \theta, \varphi)}{I(R_0, \theta, \varphi)} = \left(\frac{R_0}{R}\right)^2 e^{-2\beta(R-R_0)} \quad (3.17)$$

Expresando la Ecuación (3.17) de forma logarítmica (en dB), las pérdidas debidas a la propagación TL pueden formularse de la siguiente manera:

$$TL = -10 \log \frac{I(R, \theta, \varphi)}{I(R_0, \theta, \varphi)} = 20 \log \frac{R}{R_0} + \alpha(R - R_0) \quad (3.18)$$

donde α es el coeficiente de absorción expresado en dB/m ($\alpha = 8.69\beta$), que depende del cuadrado de la frecuencia. Uno de los modelos más utilizado hoy en día para el cálculo del coeficiente de absorción, dadas unas condiciones de temperatura, salinidad, profundidad y acidez, es la fórmula empírica desarrollada por Francois & Garrison (1982).

Otra forma común de definir la directividad de un transductor es mediante el factor de directividad, la apertura del haz y el ángulo equivalente. El factor de directividad Q de una fuente en una dirección dada se define como la relación entre la intensidad acústica en esa dirección y la intensidad que emitiría una fuente isotrópica (I_{iso}) que radiara con igual potencia:

$$Q(\theta, \varphi) = \frac{I(\theta, \varphi)}{I_{iso}} \quad (3.19)$$

Cuando el factor de directividad toma forma logarítmica se conoce como índice de directividad ID , y se define como:

$$ID(dB) = 10 \log Q \quad (3.20)$$

En la dirección de máxima radiación se cumple que:

$$Q_{m\acute{a}x} = Q(0,0) = \frac{4 \cdot \pi}{\int_{4\cdot\pi} D(\theta, \varphi) \cdot d\Omega} \quad (3.21)$$

$$ID_{m\acute{a}x} (dB) = 10 \log Q_{m\acute{a}x} \quad (3.22)$$

donde $d\Omega$ es el diferencial del ángulo sólido. El patrón de radiación y el factor de directividad mantienen la siguiente relación (Kinsler *et al.*, 1999):

$$Q(\theta, \varphi) = Q_{m\acute{a}x} \cdot D(\theta, \varphi) \quad (3.23)$$

De forma análoga, la relación entre el patrón de radiación expresado en dB y el índice de directividad viene dado por:

$$ID(\theta, \varphi) = ID_{m\acute{a}x} + D_{dB}(\theta, \varphi) \quad (3.24)$$

La apertura del haz a -3 dB se define como el ángulo entre las direcciones de los lados opuestos del lóbulo principal donde el nivel de presión sonora se ve reducido 3 dB respecto a su valor en el eje, es decir, donde $D = 1/2$ (Simmonds & MacLennan, 2005). Este ángulo suele definirse para las direcciones longitudinal y transversal. Para un transductor circular la apertura del haz a -3 dB se puede aproximar según la siguiente expresión:

$$\theta_{-3dB} = \frac{58 \cdot \lambda}{2 \cdot r} \quad (3.25)$$

donde θ_{-3dB} viene expresado en grados (Lurton, 2002).

El ángulo equivalente del haz se define como el ángulo sólido de un haz cónico ideal que produciría la misma integral de la señal recibida que un transductor real cuando los blancos se encuentran aleatoriamente distribuidos en el espacio. Ese haz cónico radiaría con intensidad constante e igual a la máxima en todos sus puntos, con toda la potencia que es capaz de suministrar la fuente (Simmonds & MacLennan, 2005). El ángulo equivalente bidireccional ψ (expresado en grados) se define como:

$$\psi = \int_{\Omega=0}^{4\pi} D^2(\theta, \varphi) \cdot d\Omega = \int_{\theta=0}^{\pi} \int_{\varphi=0}^{2\pi} D^2(\theta, \varphi) \cdot \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\varphi \quad (3. 26)$$

Para un pistón plano circular el ángulo equivalente bidireccional puede estimarse a partir de las dimensiones del transductor y la frecuencia o la apertura del haz a -3 dB, de forma que:

$$\Psi(dB) \approx 20 \log \frac{1}{k \cdot r} + 7.7 \approx 20 \log \frac{\theta_{-3dB}}{2} - 31.6 \quad (3. 27)$$

donde θ_{-3dB} viene expresado en grados (Urlick ,1983; Balk & Lindem, 2011).

Dependiendo de su patrón de radiación encontramos los siguientes tipos de transductores:

- Haz simple (single-beam): la señal que proporciona depende de la dirección del blanco respecto al eje acústico y de la sección transversal del blanco. No facilita información de la dirección del blanco, por lo que la estimación de la potencia del blanco se realiza de manera indirecta, empleando métodos estadísticos (el más utilizado de ellos es el de Craig y Forbes (1969)).
- Haz doble (Dual-Beam): facilita la medida directa de la potencia del blanco. Los elementos cerámicos del transductor se ordenan en círculos concéntricos alrededor de un elemento central. Si se requiere un haz estrecho se aplica señal a todos los elementos, si el haz requerido es ancho se aplica señal únicamente a los elementos centrales. Se procesa separadamente la señal recibida del haz ancho y del estrecho, proporcionando información (con algunas ambigüedades) respecto a la dirección. Estas desviaciones pueden minimizarse aplicando umbrales a las intensidades y al cociente de las mismas (Simmonds & MacLennan, 2005).
- Haz dividido (split-beam): también realiza la medida directa de la potencia del blanco, compensando el patrón de radiación del transductor. El transductor se divide en cuatro cuadrantes, determinándose la dirección del blanco de forma precisa, comparando las diferencias de fase entre cuadrantes (Simmonds & MacLennan, 2005). El pulso se emite por el transductor entero, pero las señales recibidas por cada cuadrante se procesan por separado.

3.1.3. PROPAGACIÓN Y DISPERSIÓN DE LA ONDA ACÚSTICA

Después de la generación de la señal por el transmisor, y su conversión electro-acústica por parte del transductor, la onda acústica se propaga a través del medio (en el caso particular de esta, tesis el agua), hasta que detecta un obstáculo. Del mismo modo, cuando la onda acústica impacta en un blanco, la onda reflejada por dicho blanco se propaga por el medio hasta llegar al transductor, que, tras convertirla en una señal eléctrica, la enviará al receptor. En ambos casos, y siempre que nos halleemos en campo lejano, la onda acústica sufre divergencia esférica, de tal forma que, la presión disminuye de manera inversamente proporcional con la distancia de la fuente. Además, hay que tener en cuenta las pérdidas por absorción que introduce el medio, estas pérdidas implican que la amplitud de la presión de la onda acústica disminuya de forma exponencial con la distancia.

Considerando una fuente armónica, la presión acústica p (expresada en Pa) en un punto del campo situado a una distancia R de la fuente, localizado en campo lejano, viene dada por la siguiente expresión:

$$p(R, \theta, \varphi) = p(R_0, \theta, \varphi) \frac{R_0}{R} e^{-\beta(R-R_0)} e^{-j \cdot k(R-R_0)} \quad (3. 28)$$

donde R_0 es la distancia de referencia a la fuente (1 m), $k = \omega / c$ es el número de onda, $\omega = 2\pi f$ es la frecuencia angular, f es la frecuencia de la onda acústica, c es la velocidad de propagación del sonido en el medio de propagación, y β es el coeficiente de absorción del medio expresado normalmente en Np/m o Np/km. R , θ y φ son las coordenadas esféricas del punto del campo respecto a la fuente sonora, que se encuentra situada en el origen del sistema de coordenadas (Kinsler *et al.*, 1999).

Cuando se utiliza la escala logarítmica para definir la presión acústica en un punto, se habla de nivel de presión acústica (LP), en este caso la unidad de medida será el decibelio (dB referidos a $1 \mu Pa$), y queda definida por:

$$LP(R, \theta, \varphi) = 20 \log \frac{p_{rms}(R, \theta, \varphi)}{p_{ref}} \quad (3. 29)$$

donde p_{rms} es la presión eficaz de la onda acústica y p_{ref} es la presión eficaz de referencia. En aplicaciones de acústica submarina se suele emplear una p_{ref} de $1 \mu Pa$.

Si nos encontramos en campo lejano, la intensidad I (usando como unidades W/m^2) de la onda acústica es proporcional al cuadrado de la presión y se puede expresar como:

$$I(R, \theta, \varphi) = \frac{p_{rms}^2(R, \theta, \varphi)}{\rho_0 \cdot c} \quad (3. 30)$$

donde ρ_0 es la densidad del medio de propagación. Cuando expresamos la intensidad mediante la escala logarítmica (como en el caso de la presión), se hablará de nivel de intensidad (con el decibelio (dB) como unidad) cuya expresión atiende a la ecuación (3.31):

$$LI(R, \theta, \varphi) = 10 \log \frac{I(R, \theta, \varphi)}{I_{ref}} \quad (3.31)$$

siendo I_{ref} la intensidad de referencia.

Como ya se indicó en el punto anterior, durante la propagación de la onda acústica se producen pérdidas por propagación (TL), que pueden calcularse a partir de las ecuaciones (3.28) y (3.30). Las expresiones que permiten el cálculo de dichas pérdidas ya quedaron reflejadas en las ecuaciones (3.17) para el caso lineal y (3.18) cuando se hace uso de la escala logarítmica.

Cuando una onda acústica transmitida por el transductor y propagada en el medio se encuentra con un blanco (objeto de densidad distinta al medio) parte de la energía es absorbida por el blanco y el resto es dispersada. Al ser alcanzado por la onda acústica, dicho blanco se convierte en una fuente secundaria que dispersa la onda acústica incidente en todas las direcciones. La energía dispersada por el blanco que regresa hasta el transductor se conoce como energía retrodispersada o eco.

El sonido dispersado por un blanco depende de la relación entre su tamaño y la longitud de onda, de tal manera que se producen tres situaciones diferenciadas a partir de esta relación. Si consideramos que el blanco es un pez tenemos que (Simmonds & MacLennan, 2005):

- Cuando el pez es mucho más pequeño que la longitud de onda, la onda acústica incidente somete a todo el blanco a la misma presión y este se contraerá y se expandirá actuando como una fuente puntual que radia de forma omnidireccional. Este es el régimen de dispersión de Rayleigh, donde la intensidad dispersada es proporcional a $(L/\lambda)^4$, siendo L la longitud del pez.
- En el caso que el tamaño del pez sea del orden de la longitud de onda, las ondas acústicas resuenan en la vejiga y la intensidad del sonido varía rápidamente con la frecuencia dependiendo de la geometría y las propiedades del material del que está formado el dispersor.
- Para tamaños de peces superiores a la longitud de onda se tiene dispersión geométrica, el dispersor se vuelve más directivo y tanto la forma como el tamaño del blanco afectan en gran medida al campo dispersado.

Para poder entender cómo se comporta la onda retropropagada, es interesante tratar dos casos, cuando el blanco es individual o cuando nos encontramos frente a un blanco múltiple.

3.1.3.1. DISPERSOR INDIVIDUAL

Hablaremos de dispersor individual, cuando el blanco sea único y lo suficientemente pequeño para ser insonificado totalmente por el haz acústico del transductor. Del mismo,

también podremos considerar un blanco individual a una agrupación de blancos cuyo volumen total sea tan pequeño que la energía retrodispersada parezca provenir de un único blanco (Lunde *et al.*, 2013).

Como se explicó en el apartado dedicado al transmisor, para poder diferenciar dos blancos próximos, estos deben estar separados como mínimo media longitud de onda del pulso emitido en el agua (como queda reflejado en la ecuación (3.3)). Cada blanco tiene unas propiedades características, que se pueden expresar como la relación entre la intensidad de la onda incidente y la intensidad de la onda acústica reflejada. La intensidad de la onda incidente I_{inc} en el blanco, situado a una distancia R del transductor en la dirección definida por θ y φ se define en la ecuación (3.30). Partiendo de la suposición de que el dispersor no absorbe energía podemos definir la intensidad acústica dispersada en una dirección (I_s) como se muestra en la ecuación (3.32).

$$I_s(R_0', \theta', \varphi') = I_{inc}(R, \theta, \varphi) \cdot \sigma_s \quad (3.32)$$

donde R_0 es la distancia de referencia que normalmente es de 1m y σ_s es la sección transversal de dispersión en todas direcciones de un blanco individual. Las unidades de la intensidad acústica dispersada serán W/m^2

Si consideramos únicamente la dirección de vuelta al transductor, la intensidad acústica retrodispersada I_{bs} a una distancia de referencia R_0' viene dada por:

$$I_{bs}(R_0', \theta', \varphi') \left(\frac{W}{m^2} \right) = I_{inc}(R, \theta, \varphi) \cdot \sigma_{bs} \quad (3.33)$$

donde σ_{bs} es la sección transversal de retrodispersión de un blanco individual.

La sección transversal de retrodispersión (σ_{bs}) nos da información entre la relación entre la intensidad de la onda incidente y la intensidad de la onda acústica dispersada en la dirección de vuelta al transductor (a una distancia concreta del blanco). A partir de la ecuación (3.33) obtenemos que:

$$\sigma_{bs} = \frac{I_{bs}(R_0', \theta', \varphi')}{I_{inc}(R, \theta, \varphi)} \quad (3.34)$$

A la dispersión de la onda acústica (en la dirección de vuelta del transductor) se la conoce como retrodispersión o backscattering. Normalmente se usa como distancia de referencia 1m para definir la sección trasversal de retrodispersión (Urick, 1983). El valor de σ_{bs} depende de la forma y el tamaño del blanco, de su absorción o reflectividad y de la frecuencia.

Para un blanco individual que dispersa la energía de forma isotrópica (es decir, radia por igual en todas direcciones), se cumple que:

$$\sigma_{bs} = \frac{\sigma_s}{4 \cdot \pi} \quad (3.35)$$

Al igual que para el caso de la intensidad y la presión acústica, la sección transversal de retrodispersión puede expresarse de forma logarítmica. En este caso se conoce como potencia del blanco o target strength (TS) y que se define como (Urick, 1983):

$$TS(dB) = 10 \log \frac{I_{bs}(R_0', \theta', \varphi')}{I_{inc}(R, \theta, \varphi)} = 10 \log \sigma_{bs} \quad (3.36)$$

Durante todo este apartado se ha hecho referencia a blancos individuales sin describir las características de dichos blancos. En la presente tesis, los blancos a estudiar son peces, que pueden considerarse blancos acústicos complejo por su fisiología y su comportamiento (diferente para cada especie). Por lo tanto, la energía que dispersa un pez, dependerá de su tamaño y su forma, así como de su comportamiento y movimientos como individuo. El comportamiento influye en la orientación del mismo respecto al haz acústico

que lo insonifica. Por otro lado, la energía que dispersa dependerá también de cómo se comporta el pez cuando forma parte de un grupo (banco), ya que, según la especie

encontraremos diferentes densidades y distribuciones verticales de los peces dentro del banco (Dahl & Mathisen, 1983; Clay & Heist 1984).

Experimentos con peces sin vejiga natatoria y con vejiga natatoria han revelado que alrededor del 90% de la energía dispersada por el pez se debe a este órgano (Simmonds & MacLennan, 2005). Pero aun considerando peces de la misma especie y de tamaño similar, la energía dispersada por un pez es variable y depende fuertemente de la orientación del pez, ya que, el pez dispersará la máxima energía cuando la superficie de la vejiga sea perpendicular a la dirección de la onda incidente. La potencia dispersada dependerá también del estado fisiológico de la vejiga natatoria, que puede reducir su volumen (hasta un 90 % por el llenado de las vísceras o un 35% por el desarrollo de la producción en las

gónadas (Ona, 1990)). Cuando se estudia al comportamiento de los peces cuando nadan en grupo, existe también una gran variabilidad en los valores del TS asociados a la forma de nado (a mayor coordinación en el nado menor variabilidad), o a estrategias de huida o de alimentación que varían la orientación de los peces respecto al haz acústico, la densidad del banco y su trayectoria dentro del haz. Por todas estas consideraciones, conviene considerar la sección transversal de dispersión (σ_{bs}) o el TS como un proceso estocástico.

De lo mencionado en los párrafos anteriores se infiere que, es difícil obtener los valores del TS para un pez de una especie determinada a partir de estimaciones teóricas. Por este motivo, es necesario medir el TS de forma experimental, o en caso que sea computacionalmente posible, abordar el problema a partir de integraciones numéricas de modelos tridimensionales del pez. Como se ha indicado, el TS es un parámetro estocástico, por ello, para obtener valores de manera fiable, se deben realizar medidas de muchos individuos de la misma especie para poder conseguir una distribución estadística del TS que nos permita obtener el valor medio para el pez observado. Para que el resultado sea adecuado, los peces medidos deberán tener alguna característica que los una, como por ejemplo el tamaño.

Ha quedado demostrada experimentalmente la dependencia del TS de los peces con su longitud, comparando los resultados obtenidos en estudios acústicos y de muestras capturadas de diferentes especies. Esta dependencia es válida en el rango de frecuencias en que se observa dispersión geométrica, para peces relativamente grandes ($L/\lambda \gg 1$) o para frecuencias altas (Sainza et al., 2005). Generalmente la dependencia del TS medio con la longitud del pez (L) es lineal en escala logarítmica y atiende a la expresión:

$$\overline{TS}(dB) = m \cdot \log \frac{L}{L_0} + b_m \quad (3.37)$$

donde m es un coeficiente de proporcionalidad, L_0 es la longitud de referencia, y b_m es una constante que depende de la especie en estudio y la frecuencia. Es habitual que m toma valores próximos a 20, ya que, para una longitud de onda dada, existe una relación entre la sección transversal de dispersión y la longitud de onda (Sainza et al., 2005) es proporcional a L^2) (Foote, 1979; Love, 1971). Sin embargo, el valor de m puede tomar

valores muy diversos que pueden llegar a oscilar entre 10 y algo más de 40 según la presencia o ausencia de vejiga, las diversas morfologías y las relaciones entre el tamaño de la vejiga y la longitud total de los peces (McClatchie *et al.*, 2003).

3.1.3.2. MÚLTIPLES DISPERSORES

Un grupo de dispersores individuales situados tan próximos que no es posible diferenciar el eco procedente de cada uno de ellos, constituyen lo que se conoce como un blanco múltiple. Si los dispersores están distribuidos de manera aleatoria, la energía total reflejada por un blanco múltiple será, en promedio, la suma de la energía reflejada por los dispersores individuales (Simmonds & MacLennan, 2005).

Cuando un grupo de dispersores se encuentran distribuidos en un volumen extenso, la potencia de la energía acústica del conjunto de dispersores dependerá del volumen considerado. Dicho volumen dependerá de la apertura del haz acústico y la duración del pulso acústico que se haya transmitido. Por lo tanto, podremos decir que el volumen muestreado (V_s) será el volumen del haz del transductor que contiene al grupo de dispersores a considerar, de tal modo que dichos dispersores se encuentren distribuidos aleatoriamente dentro del volumen considerado y situados en el campo lejano del transductor.

Se puede demostrar que el volumen muestreado (V_s) se corresponde con el volumen de un casquete esférico de espesor igual a media longitud del pulso emitido. Si se realiza la aproximación de considerar la porción del casquete insonificado por el pulso transmitido en un instante como un cilindro, podremos calcular V_s como:

$$V_s (m^3) = \frac{c \cdot \tau}{2} \psi \cdot R^2 \quad (3.38)$$

donde $\psi \cdot R^2$ es el área insonificada por el transductor a una distancia R .

Como se ha indicado, los dispersores se encuentran distribuidos de forma aleatoria en el volumen muestreado. Este hecho hace que sus ecos tengan también fases aleatorias. Además, los blancos (peces) se encuentran en continuo movimiento por lo que las fases en cada transmisión también son aleatorias. Aplicando el principio de linealidad a la intensidad retrodispersada, se puede afirmar que la intensidad total retrodispersada por el volumen muestreado será la suma incoherente de la intensidad retrodispersada individualmente por cada uno de los dispersores (siempre que se asuman que los efectos de la dispersión múltiple y el exceso de la absorción debido al apantallamiento el haz son despreciable) (Simmonds & MacLennan, 2005). Se puede definir, por tanto, la potencia

dispersora del volumen muestreado como la suma de las secciones transversales de retrodispersión de cada dispersor situado en V_s , como se indica en la ecuación (3.39):

$$s_v(m^{-1}) = \frac{\sum_{i=1}^N \sigma_{bs}}{V_s} \quad (3.39)$$

siendo s_v es el coeficiente volumétrico de retrodispersión y N el número de dispersores. Al tratarse de blancos en movimiento y distribuidos de forma aleatoria el coeficiente

volumétrico de dispersión (s_v) varía en tre un ping y el siguiente, por lo que, para realizar un cálculo adecuado de la densidad de blancos dentro del haz, se necesitará el valor promedio del s_v para un gran número de pings:

$$\overline{s_v}(m^{-1}) = \frac{\sum_{j=1}^K s_v}{K} \quad (3.40)$$

donde K es el número de pings transmitidos. La medida logarítmica de s_v es la potencia volumétrica de retrodispersión S_v , que se calcula como:

$$S_v(dB @ ref 1m^{-1}) = 10 \log \frac{S_v}{S_{v,ref}} \quad (3.41)$$

siendo $s_{v,ref}$ igual a $1 m^2/m^3$.

Si se integra toda la energía devuelta por una capa situada entre dos distancias al transductor R_1 y R_2 se obtiene el coeficiente de retrodispersión de área s_a :

$$s_a = \int_{R_1}^{R_2} s_v \cdot dR \quad (3.42)$$

Tradicionalmente este coeficiente se ha definido en términos de la sección transversal de dispersión y la milla náutica (1852 m), de forma que:

$$s_A = 4 \cdot \pi \cdot 1852^2 \cdot s_a \quad (3.43)$$

3.1.4. EL RECEPTOR

El receptor filtra y procesa la señal recibida facilitando la señal de salida de la ecosonda, de manera sincronizada con el transmisor para hacer efectivo el uso de un solo transductor.

En primer lugar, se filtra la señal para eliminar ruido, desechando las componentes frecuenciales fuera de la banda de paso del receptor. El ancho de banda del receptor debe permitir el paso de la mayor parte de la energía recibida, sin embargo, cuanto más estrecho sea, más fácilmente se podrán detectar ecos de pequeña amplitud debido al aumento de la relación señal a ruido.

El segundo paso que se realiza, tras la eliminación de ruido, es la estimación de la envolvente de la señal recibida, teniendo en cuenta que el área alojada bajo ella nos proporcionará el valor de la energía dispersada por el blanco. A continuación, se aplica a la señal una función de ganancia cronovariable conocida como *TVG* (Time Varied Gain). Esta función compensa la dispersión geométrica del haz y la absorción del medio, de tal modo que, a la salida de la misma se tienen ecos independientes de la distancia al blanco (Figura 3.3). Es decir, que en el caso de tener dos peces idénticos dentro del haz situados uno más cerca y el otro más lejos del transductor, el que se encuentre más alejado no proporcionará un valor de salida más bajo que el más cercano, aunque la intensidad del eco del pez más alejado sea menor debido a la dispersión geométrica del haz y a la absorción del medio.

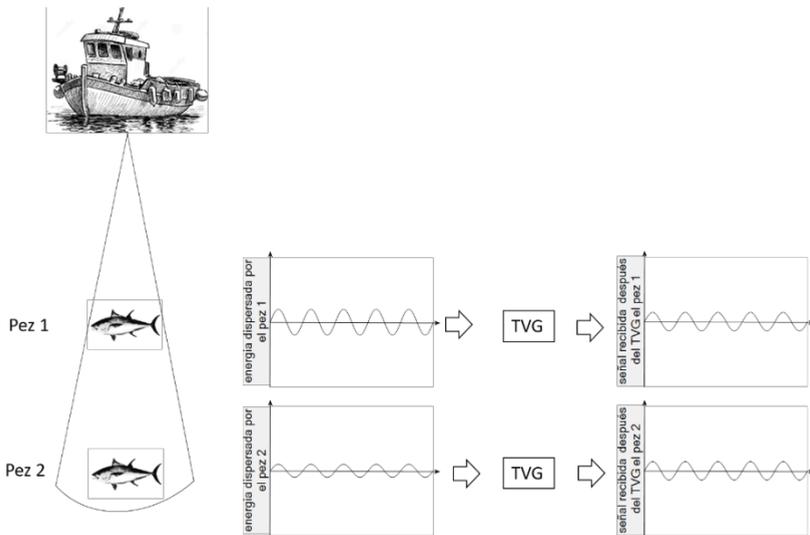


Figura 3.3. Esquema de funcionamiento del TVG.

Para un blanco individual la función *TVG* expresada en dB viene dada por:

$$TVG(R) = 2 \cdot TL = 40 \log \frac{R}{R_0} + 2 \cdot \alpha \cdot R \quad (3.44)$$

Que en su forma lineal toma la expresión:

$$tvG^2(R) = \left(\frac{R}{R_0} \right)^4 \cdot e^{4 \cdot \beta \cdot R} \quad (3.45)$$

Finalmente, el Integrador de Ecos se encarga de integrar la energía de todos los ecos detectados. Prácticamente se trata de calcular la integral del cuadrado de la tensión producida por la ecosonda en los intervalos correspondientes a la detección del blanco. Cuando nos encontramos en capas profundas cerca del fondo es necesario excluir los ecos procedentes del fondo para poder detectar blancos más pequeños, como por ejemplo un pez.

3.1.5. ECUACIÓN DEL SÓNAR

En un sistema activo el nivel de eco recibido depende del nivel de la señal transmitida, de las pérdidas por propagación y de la potencia del blanco detectado. Además, hay que tener en cuenta que para poder recibir un eco éste debe superar el nivel de ruido existente (NL). Dicho nivel de ruido puede ser generado por diversas fuentes: ruido ambiente, reverberación, interferencias acústicas, ruido provocado por la misma ecosonda, etc.

La ecuación del sonar describe el balance de potencias electroacústicas empleado para determinar las características de retrodispersión de la energía acústica de un blanco situado en campo lejano del transductor. Dicha ecuación en su forma simplificada puede escribirse como:

$$EL - NL \geq DT (dB_{ref} P_{ref}) \quad (3.46)$$

donde EL es el nivel de eco recibido por el sistema sonar, NL es el nivel de ruido y DT es el umbral de detección. El umbral de detección (DT), es el valor que debe exceder el nivel de eco recibido por encima del nivel de ruido para poder discriminar un blanco. En caso que se cumpla esta condición, existe un 50% de probabilidad de acertar en la detección de un eco.

La ecuación del sonar comprende todos aquellos efectos que sufre la señal desde su transmisión hasta su recepción. En un sistema de sonar activo el pulso generado por el transmisor posee un nivel de fuente SL . El frente de ondas se propaga hasta encontrar un blanco, sufriendo pérdidas por propagación de la onda en el medio (TL). Parte de la energía incide sobre un blanco que la refleja en dirección de vuelta al sistema sonar, quedando caracterizada por la potencia del blanco (TS). Esta onda reflejada vuelve a sufrir pérdidas por propagación (TL'), hasta que llega al receptor, donde se recibe la señal con un nivel de eco determinado (EL). El nivel de eco puede definirse por tanto como se indica a continuación:

$$EL = SL - TL + TS - TL' (dB_{ref} P_{ref}) \quad (3.47)$$

El nivel de fuente (SL) es el nivel de intensidad generado por la fuente a una distancia de un metro. Considerando que el transductor trabaja en régimen lineal y en condiciones de campo lejano tenemos que:

$$SL(R_0, \theta, \varphi) = 10 \log \frac{\frac{W}{4\pi R_0} Q(R_0, \theta, \varphi)}{I_{ref}} = LW - 11 - DI(R_0, \theta, \varphi) (dB_{ref} I_{ref}) \quad (3.48)$$

Donde W es la potencia de la fuente, Q el factor de directividad del transductor, I_{ref} la intensidad de referencia ($I_{ref} = (p_{ref})^2 / Z_0$, siendo Z_0 la impedancia acústica del medio de propagación), LW es el nivel de potencia acústica de la fuente y DI es el índice de directividad del transductor.

Las pérdidas por propagación TL ya fueron definidas en la ecuación (3.18), del mismo modo que la potencia del blanco que fue definida en la ecuación (3.36).

3.2. LA ECOSONDA EK60 DE SIMRAD

Durante los siguientes capítulos de la presente tesis se mostrarán diferentes experimentos para los que se han usado ecosondas. En algunos casos sin una finalidad cuantitativa, solo con el objetivo de monitorizar los peces en las jaulas. Cuando el objetivo ha sido obtener datos cuantitativos de los ecos recibidos provenientes de los peces, se ha hecho uso de la ecosonda EK60 de Simrad con diferentes transductores y a diferentes frecuencias. Por ello, en este apartado se describen levemente el funcionamiento de la misma.

3.2.1. CONCEPTOS BÁSICOS

Según indica el fabricante la ecosonda EK60 de Simrad muestrea las señales recibidas a una frecuencia fija de 500 KHz, dicha señal muestreada se filtra mediante un filtro paso banda y se somete a un proceso de diezmado de tal manera que se almacenan 4 muestras por duración del pulso transmitido. Los valores de nivel de potencia se guardan en archivos binarios con la extensión .raw (Simrad 2008).

Las ecosonda EK60 de Simrad tiene una frecuencia de muestreo efectiva (f_s) variable con la duración del pulso (ya que se queda con 4 muestras por pulso transmitido). Se puede calcular la resolución temporal (dt) como la inversa de la frecuencia de muestreo.

$$f_s (\text{Hz}) = \frac{1}{dt} = \frac{4}{\tau} \quad (3.49)$$

La resolución espacial depende de la resolución temporal y la velocidad del sonido (c):

$$dR(m) = \frac{c \cdot dt}{2} \quad (3.50)$$

Para el cálculo del TS , debe conocerse la distancia al blanco de cada muestra dentro de un mismo ping, para ello se hace uso del R_{TS} .

$$R_{TS}(m) = i \cdot dR \quad (3.51)$$

donde $i = 1 \dots n$ es el número de muestra respecto al origen, siendo n el número de muestras totales en un determinado ping.

Existen dos valores del TS proporcionados por la ecosonda, el valor del TS sin compensar y el valor del TS compensado. El TSu (uncompensated target strength) es el resultante de no compensar el patrón de directividad del transductor, se calcula a partir de la siguiente expresión (expresado en dB):

$$TSu = 10 \log W_{Rx} + 40 \log R_{TS} + 2 \cdot \alpha \cdot R_{TS} - 10 \log \frac{W_{Tx} \cdot \lambda^2}{16 \cdot \pi^2} - 2 \cdot G_{TS} \quad (3.52)$$

donde W_{Rx} es la potencia eléctrica que proporciona el transductor durante la recepción de ecos, G_{TS} es parámetro ganancia del transductor o *gain transducer* obtenido a partir de la calibración de la ecosonda, que corresponde a la ganancia del transductor en el eje.

Al ser detectado por el transductor el eco se ve afectado por el ancho de banda limitado del sistema. Este hecho provoca que el pulso rectangular emitido deje de serlo de tal

manera que resulta complicado determinar el momento de inicio del eco. El instante inicial del eco de un blanco individual se calcula como el centro de gravedad. En la ecuación (3.53) se muestra la expresión que permite calcular el valor de R_{TS} corregido teniendo en cuenta la dificultad de determinar el instante inicial del eco.

$$R_{TS,corr} = \frac{\sum_{i=R_{m\acute{a}x} - \frac{c \cdot \tau}{4}}^{R_{m\acute{a}x} + \frac{c \cdot \tau}{4}} i \cdot 10^{TSu_i/10}}{\sum_{i=R_{m\acute{a}x} - \frac{c \cdot \tau}{4}}^{R_{m\acute{a}x} + \frac{c \cdot \tau}{4}} 10^{TSu_i/10}} - \frac{c \cdot \tau}{4} \quad (3.53)$$

donde i es el número de muestra y TSu_i es el valor del TSu de la i -ésima muestra.

Calise (2009) indica en su trabajo que el procedimiento para el cálculo del instante inicial del eco consiste en calcular el valor máximo del TSu y la distancia a éste ($R_{m\acute{a}x}$). Después se obtiene la distancia al blanco detectado ($R_{TS,corr}$) como el centro de gravedad menos la mitad de la longitud del pulso. Para estimar el centro de gravedad del eco se tienen en cuenta las muestras delimitadas por una ventana espacial con una anchura igual a la longitud del pulso centrada en $R_{m\acute{a}x}$.

Por lo tanto para cada eco proveniente de un blanco individual tendremos un valor del TSu y un valor del TSu_{corr} (correspondiente al valor del TSu a la distancia $R_{TS,corr}$). Según indican Balk & Lindem (2011), se puede calcular el valor corregido del TSu como:

$$TSu_{corr} = 10 \log W_{Rx} + 40 \log R_{TS,corr} + 2 \cdot \alpha \cdot R_{TS,corr} - 10 \log \frac{W_{Tx} \cdot \lambda^2}{16 \cdot \pi^2} - 2 \cdot G_{TS} \quad (3.54)$$

Si se desea tener un valor del TS que compense la dirección de las detecciones, de tal modo que se elimine la dependencia del nivel del eco con la dirección, es necesario compensar dichos niveles de eco mediante el patrón de radiación del transductor. El valor del TS compensado (TSc) se obtendrá a partir del parámetro conocido como compensación de ganancia (CG). Este parámetro se corresponde con la función de directividad del transductor y puede expresarse como se indica a continuación:

$$CG(\beta_1, \beta_2) = D_{dB}(\beta_1, \beta_2) \quad (3.55)$$

donde la CG en función de la dirección se expresa normalmente en función de los ángulos longitudinal β_1 y transversal β_2 . Por lo tanto, el TSc quedará como:

$$TSc = TSu_{corr} + 2 \cdot CG(\beta_1, \beta_2) \quad (3.56)$$

Para la EK60 el valor de la CG puede calcularse a partir de los ángulos longitudinal y transversal y la apertura del haz a -3dB en ambas direcciones mediante la siguiente expresión (Balk & Lindem, 2011):

$$CG(\beta_1, \beta_2) = 3 \left[\left(\frac{\beta_1}{\frac{\theta_{-3dB, \beta_1}}{2}} \right)^2 + \left(\frac{\beta_2}{\frac{\theta_{-3dB, \beta_2}}{2}} \right)^2 - 0.18 \left(\frac{\beta_1}{\frac{\theta_{-3dB, \beta_1}}{2}} \right)^2 \left(\frac{\beta_2}{\frac{\theta_{-3dB, \beta_2}}{2}} \right)^2 \right] \quad (3.57)$$

donde θ_{-3dB, β_i} son los ángulos longitudinal y transversal y la apertura del haz a -3dB y los valores angulares se expresan en grados.

3.2.2. CALIBRACIÓN

Para poder disponer de datos cuantitativos fiables, es necesaria la calibración de los sistemas de medida, por ello, las ecosondas deben ser calibradas. Cuando se calibra una ecosonda se necesita conocer el “valor correcto” de la sección transversal de retrodispersion de los blancos que se encuentran dentro del haz del transductor. Habitualmente se hace uso del método del blanco estándar, ya que, ofrece muy buenos resultados (Foote *et al.*, 1987). Este método de calibración emplea un blanco estándar (o de referencia) cuyas propiedades acústicas (entre ellas la dispersión acústica que produce) son conocidas. La ecosonda se calibra en las mismas condiciones en las que se pretende realizar las medidas (duración de pulso, TVG, nivel de potencia...). Se mide el eco devuelto por el blanco, así como el desfase temporal entre la llegada del eco y el pulso transmitido. Estas medidas son suficientes para poder estimar tanto la distancia al blanco

como la sensibilidad del sistema emisor-receptor en la dirección del blanco (Simmonds & MacLennan, 2005).

En el proceso de calibración se utiliza una esfera de calibración como blanco, dicha esfera suele fabricarse de cobre o carburo de tungsteno. El tamaño del blanco dependerá de la frecuencia de trabajo. Además, Simrad (2008) indica que la elección del tamaño de la esfera es importante para eliminar la dependencia del *TS* con la temperatura. El procedimiento experimental consiste en desplazar la esfera lentamente a través del haz acústico de tal manera que se consigan detecciones en toda la sección del haz. Es relevante, que se puedan asegurar un número suficiente de detecciones cerca del eje acústico para que la calibración se considere correcta. Durante el procedimiento de calibración, se recomienda colocar la esfera de calibración a una distancia mínima de unos 10 m, ya que; la superficie abarcada por el haz acústico ha de ser lo suficientemente grande para que el eco de la esfera no se vea afectado por pequeños movimientos, aunque no ha de ser demasiado extensa de forma que pueda abarcarse toda la sección del haz. Los estudios presentados en esta tesis se realizan en jaulas de engorde de atunes, y los blancos detectados pueden encontrarse a distancias más cercanas a 10 metros por ello se hacía necesaria una calibración a distancias menores. Además, fue imposible la calibración “in situ” debido a la complejidad del procedimiento de medida, por lo que se optó por la realización de una calibración en un ambiente controlado que reprodujese las condiciones de medida. Hay que hacer constar, por lo tanto, que los resultados de la calibración a tan cortas distancias se verá afectada por la incertidumbre asociada a la medida del *TS* a cortas distancias como indica Ona *et al.* (1996) en su trabajo.

Simrad ofrece con la ecosonda EK60 un programa de calibración, con el que se obtienen los parámetros para corregir la ganancia en el eje acústico y los parámetros de radiación del transductor. Este programa ajusta dos modelos del haz a los niveles de eco registrados por la ecosonda mediante el método de mínimos cuadrados. El primero de los modelos, el modelo EK (Ona, 1990a), permite calcular los parámetros de calibración: la ganancia del transductor (G_{TS}), el factor de corrección ($Sa,corr$), los ángulos longitudinal y transversal y la apertura del haz a -3 dB ($\theta_{-3dB,\beta i}$) y la desviación del eje acústico del transductor respecto a la normal en la dirección i ($Offset_{\beta i}$). Las expresiones que permiten el cálculo de todos estos factores están ampliamente desarrolladas en la bibliografía (Simrad, 1997; Simrad, 2008; Balk & Lindem, 2011). En el procedimiento de calibración se recomienda que el error cuadrático medio cometido en el ajuste del modelo sea inferior a 0.2 dB, considerándose aceptable errores menores e iguales a 0.4 dB (Simrad, 2008).

3.2.3. COMPARACIÓN DE LAS ECOSONDAS UTILIZADAS EN LA TESIS

En el desarrollo de los experimentos que se presentan en este trabajo se utilizaron tres tipos de ecosondas diferentes. Los dos primeros tipos de ecosonda presentados no se utilizaron para obtener valores cuantitativos del *TS* de los atunes en las jaulas, se usaron únicamente para evaluar el comportamiento de los peces. En todas las medidas realizadas

que pretendían evaluar cuantitativamente el *TS* (dorsal y ventral de los peces) se utiliza la misma ecosonda presentada en tercer lugar:

- Una ecosonda ROVer de Knudsen Engineering con un transductor single beam de gran apertura. Dicho ecosonda se utiliza habitualmente para la caracterización de fondos marinos. Se decide su uso para la monitorización de los peces, ya que presenta la ventaja de su tamaño y rigidez, así como la posibilidad de disponer del transeceptor y un ordenador integrados en el mismo dispositivo lo que la convierte en una herramienta perfecta para trabajar de manera autónoma. Por el contrario, presenta la desventaja poseer un rango dinámico limitado (suficiente para la caracterización de fondos) pero insuficiente para disponer de medidas cuantitativas del *TS* de los peces. No se dispone de procedimiento de calibración del equipo recomendado por el fabricante.
- Una ecosonda DT-X de Biosonics junto con un transductor single-beam de gran apertura. Se trata de una ecosonda científica de gran rango dinámico adecuada para la medida de peces, capaz de medir el *TS* sin aplicar la compensación del patrón de

directividad del transductor (por el tipo de transductor utilizado). Se trata de una ecosonda digital, ya que, la digitalización de los datos se realiza bajo el agua, transmitiéndose por el cable una señal digital y por lo tanto menos susceptible al ruido. La ecosonda y el transductor están calibrados por el fabricante en el momento de su suministro.

- Una ecosonda EK60 de Simrad junto con un transductor split-beam de haz estrecho. Esta ecosonda científica posee un gran margen dinámico, es capaz de obtener medidas del *TS* de los peces. Este dispositivo permite la calibración por el usuario por el procedimiento del blanco estándar. Se trata de la ecosonda científica de uso más extendido, lo que permite la comparación de resultados. Al usarse junto con un transductor de haz dividido es posible obtener los valores compensados del *TS*.

3.3. MEDIDA DEL *TS* A DISTANCIAS CORTAS

Como ya se ha indicado en puntos anteriores, en esta tesis se realizan medidas del *TS* en jaulas de engorde de atunes. Las características de las medidas hacen posible detectar blancos a distancias cortas. Es sabido que existen varios efectos que pueden producir valores poco fiables del *TS* cuando se realizan medidas a cortas distancias. En este punto se detallan los más relevantes.

3.3.1. DETERMINACIÓN DE LA DISTANCIA AL BLANCO

Para determinar la distancia al blanco es indispensable conocer la velocidad del sonido y el tiempo que tarda la señal en llegar del transductor al blanco y del blanco de vuelta al

transductor. Al tiempo transcurrido entre que la señal es emitida hasta que regresa al transductor se le conoce como tiempo de vuelo. Las señales emitidas se ven altamente afectadas por el ancho de banda limitado del transductor utilizado tanto para emitir como para recibir las señales acústicas, además; la señal también se ve afectada por la respuesta en frecuencia del blanco, que provoca un ensanchamiento de la señal. La conjunción de estos dos efectos provoca una incertidumbre en la estimación del instante de llegada del eco. Existen dos factores añadidos que contribuyen al error en la estimación del tiempo de inicio del eco. El primero de ellos está relacionado con el ruido proveniente de blancos no deseados que se encuentran en el camino de la onda acústica y que pueden superponerse al eco. Este efecto puede ser muy pernicioso, sobre todo cuando la relación señal a ruido es muy baja. El segundo, sería el error que introduce la digitalización de la señal analógica, ya que, durante el proceso de muestreo y diezmado de la señal puede perderse información e incluso la posición del máximo. Según se indica en la bibliografía (MacLennan, 1986; Foote *et al.*, 1987; Ona *et al.*, 1996; Furusawa *et al.*, 1999) la incertidumbre en la estimación del instante inicial del eco puede expresarse como un tiempo de retardo. Dicho tiempo de retardo es despreciable a grandes distancias, pero puede ser relevante a distancias cercanas al transductor. Si se desea conocer la distancia al blanco, es necesario estimar el tiempo transcurrido entre el instante inicial del pulso transmitido y el instante (t) en el que el eco alcanza una amplitud igual a la mitad del máximo. Una vez conocido dicho retardo (t_{del}) puede calcularse la distancia al blanco:

$$R(m) = \frac{c}{2}(t - t_{del}) \quad (3.58)$$

Foote *et al.* (1987), en su guía para la calibración de ecosondas, indican que el retardo aumenta con la duración del pulso y al reducir el ancho de banda del sistema. En esta guía también se indica que dicho retardo puede calcularse mediante una serie de cálculos complejos. No obstante, se indica la conveniencia de corregir este retardo a cortas distancias, ya que, una estimación errónea de la distancia al blanco podría sobreestimar el nivel de eco detectado. Por el contrario, a grandes distancias este retardo se considera insignificante y no es necesario aplicar ninguna corrección.

En esta tesis se hace uso de ecosondas EK60 de Simrad, que según indica el fabricante calcula la distancia al blanco como el centro de gravedad menos la mitad de la duración del pulso (como ya se indicó en la sección 3.2.1 del presente capítulo), sin embargo, no implementa la corrección del retardo del sistema.

Otro factor importante a la hora de determinar la distancia al blanco es la velocidad del sonido. Es sabido que la velocidad del sonido depende de la temperatura, la salinidad y la profundidad. A grandes distancias no debería asumirse que el valor de la velocidad del

sonido no depende de la distancia pues puede introducir errores significativos. Sin embargo a cortas distancias, el uso de un valor promediado de la velocidad puede minimizar el error en la estimación de la distancia (Simmonds & MacLennan, 2005).

3.3.2. LA FUNCIÓN TVG

En el punto 3.1.4 se explicó en que consiste la función *TVG* y la importancia de su aplicación. Las ecuaciones (3.44) y (3.45) ofrecen una expresión (logarítmica y lineal) del *TVG* que realizan una compensación exacta a distancias infinitas o para duraciones del pulso muy cortas. La aproximación asintótica del *TVG* se suele obtener sustituyendo en la ecuación (3.45) la distancia (*R*) por $c \cdot t / 2$.

La aproximación asintótica produce una sobrecompensación de las pérdidas a corta distancia, por ello se recomienda el uso en estos casos de la función exacta. MacLennan (1986) indica que debido al ancho de banda limitado del sistema y a la respuesta en frecuencia del dispersor, el uso de la función *TVG* exacta mejora la estimación del *TS* para blancos puntuales. En ese trabajo se propone la función exacta como:

$$tvg(t) = (c \cdot t)^2 \cdot e^{\frac{2 \cdot \beta \cdot c \cdot t}{2}} \cdot \sqrt{1 + \sum_{i=1}^4 a_i \left(\frac{\tau}{t}\right)^i} \quad (3.59)$$

donde a_i son coeficientes que se calculan a partir de los momentos de la tensión normalizada de la forma de onda del eco registrada en el receptor $V(t)$. Los coeficientes a_i se calcula de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} a_1 &= -4I_1 \\ a_2 &= -6I_2 + 12I_1^2 \\ a_3 &= -4I_3 + 24I_1I_2 - 24I_1^3 \\ a_4 &= -I_4 + 8I_1I_3 + 6I_2^2 - 36I_1^2I_2 + 24I_1^4 \end{aligned} \quad (3.60)$$

Los momentos I_m se definen como:

$$I_m = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} t^m \cdot e^{2 \cdot \beta \cdot c \cdot t} \cdot |V(t)|^2 \cdot dt}{\tau^m \int_{-\infty}^{\infty} e^{2 \cdot \beta \cdot c \cdot t} \cdot |V(t)|^2 \cdot dt} \quad (3.61)$$

La ecuación (3.59) tiene en cuenta los efectos de la duración del pulso, el ancho de banda limitado del sistema electroacústico y la respuesta en frecuencia del dispersor. La solución exacta tan solo existe cuando el factor bajo la raíz cuadrada es positiva, y a distancias muy próximas este factor puede ser negativo y no se tendría definida una función exacta (MacLennan, 1986).

3.3.3. EL COEFICIENTE DE ABSORCIÓN DEL MEDIO

En el mar Mediterráneo las temperaturas suelen ser elevadas en los primeros metros y cambiar en el trascurso del día. Este fenómeno es más acusado durante los meses de más calor. Por ello debería realizarse un estudio de la variación del coeficiente de absorción en la columna de agua antes de realizar una medida del *TS*. Sin embargo, al igual que sucede con la velocidad del sonido, se suele asumir un valor de la absorción del sonido constante en toda la columna de agua durante el tiempo que duran las medidas; sin tener en cuenta que puede variar con el tiempo, la profundidad y las condiciones ambientales del medio. Este hecho introduce un error en la estimación de las pérdidas por propagación que debe ser tenida en cuenta.

3.3.4. LA POSICIÓN ANGULAR DEL BLANCO

Cuando se intenta determinar el *TS* de un pez próximo al transductor, puede que el pez (o su vejiga natatoria), ocupen gran parte de la sección del haz o incluso que abarquen una sección superior que la que tiene el haz a -3 dB a la distancia del blanco (Figura 3.4). En estos casos el blanco deja de ser puntual y se puede cometer un error en la determinación de la posición angular, resultando casi imposible, seguir la trayectoria del pez dentro del haz.

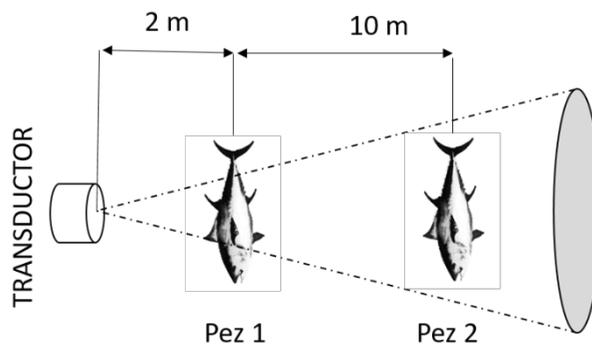


Figura 3.4. Representación gráfica de un blanco extenso.

Una celda es la mínima unidad de superficie perpendicular al eje acústico que es capaz de discriminar el transductor a una distancia dada. El tamaño de la celda determina la resolución espacial en el plano perpendicular al eje acústico y depende de la resolución angular y la distancia al transductor. Cuando nos encontramos en la situación descrita en la Figura 3.4 para el pez 1, en el que el blanco ocupa más de una celda, se aplica un único valor de compensación de ganancia para compensar el efecto del patrón de radiación del transductor (Dawson *et al.*, 2000).

El tamaño de la celda viene dado por:

$$L_{celda} (m) = R \cdot \tan d\beta \quad (3.62)$$

donde L_{celda} es el tamaño o lado de la celda y R es la distancia al transductor. Si la resolución angular es igual en las direcciones longitudinal y transversal se puede calcular la diagonal de la celda a partir de la expresión (expresada en metros):

$$D_{celda} = \sqrt{2} \cdot L_{celda} \quad (3.63)$$

Para determinar si un blanco se puede considerar puntual a una distancia dada, se compara el tamaño del blanco con la diagonal de la celda. Cuando el tamaño del blanco es mayor que la diagonal de la celda se produce un error en la estimación de su posición dentro del haz, y por lo tanto, en la compensación del patrón de radiación del transductor.

3.3.5. CAMPO CERCANO DEL PEZ

Al igual que los transductores, los blancos y en este caso particular los peces (que pueden considerarse blancos complejos), también tiene un campo cercano cuando actúan como dispersores de la onda acústica. En el campo cercano la onda dispersada es compleja afectando a la estimación de la posición angular del pez en el haz acústico. Dawson *et al.* (2000) alertan en su trabajo de que la estimación del campo lejano de un pez según las expresiones típicas no es realista, al ser el pez un dispersor complejo formado por diferentes estructuras internas diferenciadas.

3.3.6. APROXIMACIÓN DE ONDA PLANA

En la medida de la posición angular con un transductor split-beam se asume que la onda acústica incidente es plana. Sin embargo, la onda retrodispersada por un blanco próximo al transductor no presenta un frente de ondas plano, por lo que se puede producir un error en la estimación de la fase (Furusawa *et al.*, 1999).

3.4. CONSIDERACIONES BÁSICAS SOBRE LOS SISTEMAS DE VISIÓN ESTEREOSCÓPICA.

Cuando se toma la imagen de un objeto con una cámara, la distancia del objeto en la imagen con respecto a la lente (profundidad) no se conoce, al menos mientras no sea medida físicamente. Sin embargo, el principio básico de formación de una imagen virtual sostiene que la distancia real de los objetos respecto a la cámara existe implícitamente cuanto el tamaño de los mismos es conocido.

En la Figura 3.5 se muestra el principio de formación de una imagen real e invertida hecha por una lente. Esta es una de las leyes fundamentales en la óptica y nos dice que la distancia del objeto a la lente la determina directamente el tamaño de la imagen virtual en el plano de la imagen, ya que, el tamaño del objeto es conocido y constante y la distancia entre la lente y el plano de la imagen se conoce una vez que se saben los parámetros de la cámara que se está utilizando. Se suele asimilar en muchos casos el funcionamiento de una cámara con el de una lente delgada, para simplificar los cálculos desde el punto de vista geométrico, y se ha comprobado que el error cometido es pequeño usando esta aproximación (Tipler, 1996).

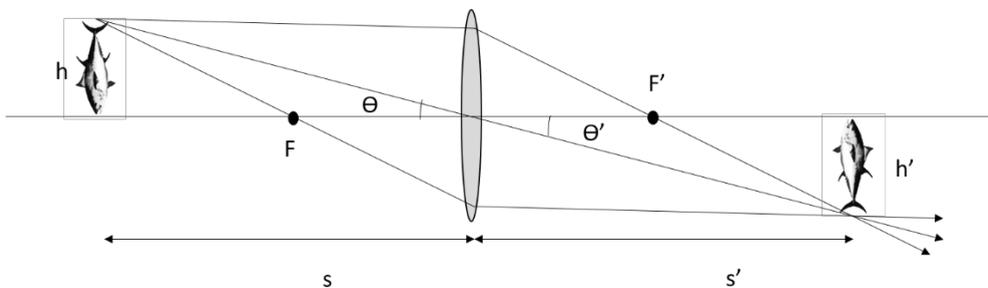


Figura 3.5. Funcionamiento de una lente delgada.

Las ecuaciones que rigen el funcionamiento de una lente delgada son:

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = (n-1) \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r'} \right) \quad (3.64)$$

$$\frac{1}{F} = (n-1) \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r'} \right) \quad (3.65)$$

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{F} \quad (3.66)$$

Donde r y r' son los radios de curvatura de la lente a izquierda y derecha respectivamente, F es la distancia focal de la lente, s es la distancia de la lente a la imagen real y s' es la distancia de la lente a la imagen real invertida. A partir de las ecuaciones (3.64), (3.65) y (3.66) podemos conocer el aumento lateral (m) que produce la lente (Tipler, 1996):

$$m = \frac{h'}{h} = \frac{s'}{s} \quad (3.67)$$

donde h es el tamaño del objeto real y h' es el tamaño del objeto real invertido.

A pesar de toda la información de la que se dispone en una imagen, la profundidad de un punto en una escena no es directamente accesible con una sola imagen. Con, al menos, dos imágenes de la misma escena tomadas simultáneamente, la profundidad puede ser calculada a través de la triangulación. Esta es la razón por la que la mayoría de los animales tienen al menos dos ojos y por la que se equipa a los sistemas autónomos con sistemas de visión estereoscópica. Podemos definir la visión estereoscópica, por tanto, como aquella en la que se emplea más de una imagen para obtener una idea de tridimensionalidad.

Un sistema de visión estereoscópica puede estar formado por una cámara con dos objetivos, dos cámaras iguales separadas una distancia conocida, o por una cámara que se desplaza para obtener fotografías con distintas perspectivas. En aplicaciones en

piscifactorías el método más utilizado es el segundo, por ello nos centraremos en él en esta sección.

Como se puede ver en la Figura 3.6, un punto real w , con coordenadas X, Y, Z será proyectado hacia los sensores de imagen izquierdo y derecho y la disparidad horizontal será función de los siguientes factores: la separación base de la cámara o línea base (B), la distancia focal de las cámaras (F) y la distancia de las cámaras al punto real (Z_w). En resumen, se puede ver el proceso de captura de las imágenes de cada una de las cámaras como una traslación del eje X seguida de una transformación de la perspectiva. Las coordenadas de proyección de la cámara (cámara izquierda (x_l, y_l) ; cámara derecha (x_r, y_r)) respecto al punto real $w(X, Y, Z)$ son:

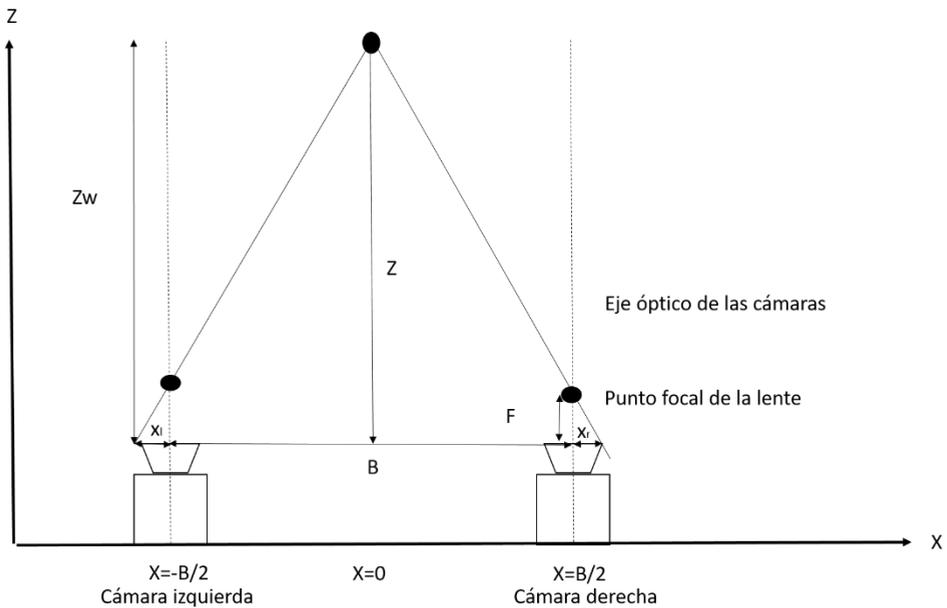


Figura 3.6. Sistema de visión estereoscópica con dos cámaras paralelas.

$$x_l(X, Z) = F \frac{X + \frac{B}{2}}{F - Z} \quad (3.68)$$

$$y_l(Y, Z) = F \frac{Y}{F - Z} \quad (3.69)$$

$$x_r(X, Z) = F \frac{X - \frac{B}{2}}{F - Z} \quad (3.70)$$

$$y_r(Y, Z) = F \frac{Y}{F - Z} \quad (3.71)$$

Comparando las ecuaciones (3.69) y (3.71) se puede determinar que el punto real (X, Y, Z) se proyecta a la misma coordenada Y en las dos cámaras; y si las cámaras están correctamente alineadas no se produce desplazamiento vertical (o paralax vertical). Los sistemas de visión estereoscópica generan dos imágenes ligeramente diferentes a partir de las cuales se puede recomponer una imagen tridimensional. A esta diferencia en las dos imágenes conseguida por las dos cámaras se la conoce como disparidad horizontal. La disparidad horizontal $d_{h,p}$ se obtiene sustrayendo x_l (la coordenada X de la proyección de la cámara izquierda) de la x_r (la coordenada X de la proyección de la cámara derecha):

$$d_{h,p}(Z) = x_r(X, Z) - x_l(X, Z) = F \frac{-B}{F - Z} \quad (3.72)$$

De la ecuación (3.72) se deduce que la disparidad se incrementará con la separación de las cámaras (B) y con la distancia focal (F). Hay que notar que para los puntos en el infinito respecto al eje Z , la disparidad tiende a cero. Por ello si se calibra el sistema apropiadamente, no se produce disparidad vertical, y como consecuencia tampoco distorsiones graves (Hartley & Zisserman, 2003).

Conociendo todos los parámetros necesarios y con la ayuda de las herramientas matemáticas que proporciona la geometría epipolar, se puede obtener información de la profundidad en las imágenes tomadas (a que distancia se encuentra el objeto grabado o fotografiado). A partir de estos datos y de los parámetros intrínsecos de las cámaras se podrá conocer el tamaño del objeto capturado por las cámaras.

Las cámaras poseen parámetros intrínsecos y extrínsecos. Los parámetros intrínsecos describen la geometría y óptica del sistema de visión (cámara y tarjeta de adquisición de imágenes). Los parámetros intrínsecos afectan al proceso que sufre un rayo luminoso desde que alcanza la lente del objetivo hasta que impresiona en el elemento fotosensible. Estos parámetros son la distancia focal, enfoque, el punto principal, el centro óptico... Los parámetros extrínsecos definen la orientación y la posición de la cámara respecto a un sistema de coordenadas conocido (al que se le llama Sistema de Coordenadas del Mundo). Los parámetros más importantes son la rotación y la traslación.

Para disponer de toda la información sobre los parámetros intrínsecos y extrínsecos de la cámara es imprescindible calibrar el sistema antes de utilizarlo. El proceso de calibración es necesario para poder extraer información métrica a partir de las imágenes *2D* del mundo *3D*. El objetivo fundamental del proceso de calibración es obtener las ecuaciones que relacionan el marco de referencia del mundo con el marco de referencia de la imagen, de manera que se puedan establecer correspondencias entre las coordenadas en el espacio *3D* y los puntos en coordenadas de la imagen *2D*. Existen diversas técnicas de calibración, la utilizada para los resultados ofrecidos en esta tesis es la calibración fotogramétrica. Este tipo de calibración hace uso de un patrón cuya geometría en el espacio *3D* es conocida con precisión. Los patrones de calibración se posicionan en dos o tres planos ortogonales entre ellos. Este tipo de calibración necesita una planificación y configuración elaborada pero ofrece muy buenos resultados (Aracena *et al.*, 2005).

En los párrafos anteriores, se ha explicado el caso de un sistema de visión con los ejes ópticos paralelos, pero los sistemas de visión estereoscópica también pueden configurarse con los ejes ópticos convergente. En este caso las cámaras se encuentran ligeramente giradas la una respecto a la otras de modo que los ejes ópticos de ambas cámaras interseccionan y convergen en un punto. Otros parámetros toman relevancia para esta configuración como la separación entre las bases de la cámara (*B*) y el ángulo de convergencia de los planos de la cámara (Capell, 2006). Ambas configuraciones (con los ejes ópticos paralelos y convergentes) son utilizadas indistintamente en sistemas de visión estereoscópica utilizados en piscifactorías. Por ejemplo, el sistema Vicass de AkvaSmart usa un sistema con los ejes ópticos paralelos, por el contrario, el sistema AQ1 de AQ1 Systems utiliza un sistema con los ejes ópticos convergentes. Se ha optado por la representación del sistema con ejes paralelos para facilitar la comprensión general del funcionamiento de la visión estereoscópica.



Comportamiento del atún rojo y su respuesta a ruidos antropogénicos en condiciones de cautividad

Este capítulo se divide en dos partes, en la primera se estudia cuál es el comportamiento “habitual” que presentan los atunes alojados en las jaulas de engrase. En la segunda parte, se evalúa cómo responden los atunes cuando están bajo la influencia de ruidos generados por el ser humano y que no le son conocidos, con la finalidad de conocer si son sensibles a este tipo de emisiones que cada vez se producen en mayor medida y de forma más descontrolada en el ambiente marino.

4.1. COMPORTAMIENTO DEL ATÚN ROJO EN CONDICIONES DE CAUTIVIDAD

4.1.1. INTRODUCCIÓN

La industria acuícola en torno al atún rojo ha sufrido un fuerte desarrollo en los últimos años. Este tipo de actividad piscícola se basa, hasta el momento, en el engorde de atunes que han sido capturados en el mar (mayoritariamente mediante artes de cerco). Después de la captura estos peces son transportados a instalaciones cerca de la costa dónde se alojan en jaulas de piscifactoría de unos 50 metros de diámetro y 30 de profundidad, dónde los atunes se alimentan a saciedad hasta su sacrificio.

Existen algunos estudios sobre cómo se comportan ésta y otras especies de atunes cuando pasan a vivir en cautividad después de ser capturados. Todos ellos coinciden en que cuando se encuentran confinados en las jaulas nadan describiendo círculos alrededor de las redes que cierran las jaulas pero sin tocarlas (Nucci *et al.*, 2010; Komeyama *et al.*, 2011). Komeyama *et al.* (2013) nos muestran en su trabajo que las trayectorias descritas por los atunes dentro de la jaula son elípticas y con diferente profundidad en los dos vértices, de esta manera los peces disponen de un mayor recorrido de nado. Por otro lado, Nucci *et al.* (2010) en su trabajo observan que los atunes realizan cambios de dirección de nado espontáneos y aumentan su velocidad de nado cuando los buzos están realizando trabajos dentro de la jaula asociando estos cambios de comportamiento a mecanismos de defensa típicos de la especie. El trabajo de Sarà *et al.* (2007) añade además la idea de que los peces se agrupan en bancos como cuando se encuentran en libertad aunque a veces no con una forma definida (en estado salvaje se agrupan en bancos con forma de bola o cuña). En libertad, se han documentado patrones de comportamiento diferenciados para el día y la noche, con excursiones verticales asociadas a la alimentación. Este comportamiento no se ha reflejado en los estudios de diferentes especies de atún en cautividad, seguramente por no tener que buscar alimento que se les proporciona diariamente, y por las condiciones del confinamiento en jaulas que permiten una cantidad de movimientos restringida. Todos los estudios hacen hincapié en la necesidad de conocer cómo se comportan los atunes en cautividad para mejorar sus condiciones durante el proceso de engorde, y que este se produzca sin estrés para los animales y con la mayor eficiencia posible, para garantizar el bienestar de los animales durante el proceso de engorde y obtener el mejor precio en el mercado por cada espécimen.

En la presente tesis doctoral, se marca como objetivo conocer cuál es el comportamiento de los atunes que están siendo engordados en las instalaciones que el *Grup Balfegó* tiene frente a las costas de l'Ametlla de Mar (Tarragona). Se pretende evaluar cuál es el grado de adaptación a la vida en cautividad y cómo responden a los diferentes estímulos que conlleva el trabajo en una granja (buzos, barcos, procesos de alimentación...) así como a otros estímulos sonoros de carácter antropogénico (a los que pueden enfrentarse en libertad). Es necesario saber cómo se comportan para poder llevar a cabo posteriores experimentos en los que se les expondrá a ruidos que no forman parte de la "cotidianidad" en las instalaciones en las que se les aloja hasta su sacrificio.

4.1.2. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1.2.1. LUGAR DE MEDIDA

La campaña de medidas del comportamiento de los atunes en cautividad se llevó a cabo en las instalaciones que el *Grup Balfegó* tiene en la población de l'Ametlla de Mar en la

provincia de Tarragona. Las instalaciones se encuentran a 2.5 millas de la costa y pueden verse desde tierra (Lat. 4°052'11.7'' N Long. 0°48'15.2'' E). La duración de las medidas se extendió desde finales de noviembre de 2012 hasta principios de febrero de 2013. Los ensayos se realizaron en una jaula flotante de la piscifactoría (J6, Figura 4.1) en la que se alojaban alrededor de 1000 atunes capturados en la campaña de pesca de 2012. La jaula tenía un diámetro de 50 metros y una profundidad máxima aproximada de 35 metros en el copo. Dentro de la jaula se encontraban atunes de diferentes tamaños, que eran alimentados a saciedad siguiendo una estrategia de engorde predefinida, que empezaba proporcionando alimento diariamente y espaciando en el tiempo al final del proceso. Hay que tener en cuenta la localización de las instalaciones, en una zona cercana al Delta del Ebro en la que la climatología posee peculiaridades debidas a la situación geografía y la orografía del terreno. Por ello, los trabajos en la granja y la alimentación se vieron limitados ocasionalmente por los temporales que se produjeron durante los meses de medida.



Fuente: Grup Balfegó

Figura 4.1. Fotografía por satélite de la granja del *Grup Balfegó*, en la que se señala en amarillo la jaula (J6) donde se realizan las medidas.

4.1.2.2. EQUIPO UTILIZADO DURANTE LAS MEDIDAS

Para la monitorización del comportamiento en continuo del atún rojo en la jaula se utilizó una ecosonda ROVER de Knudsen Engineering junto con un transductor single-beam modelo SS264W de Airmar (Figura 4.2), que posee una haz con una apertura de 25° (@-3dB), una frecuencia de trabajo de 200 kHz, y una longitud de cable de 56 m. La ecosonda lleva integrado un procesador con el sistema operativo Windows. Se elige esta ecosonda, que es usada normalmente para batimetrías, por su tamaño compacto y por ser autocontenida, es decir, el transceptor y el ordenador que la controlan están integrados. En este experimento no se pretendió cuantificar la respuesta acústica de los atunes simplemente observar su comportamiento. Por este motivo se optó por un transductor de gran apertura (25°) para cubrir el mayor volumen posible y poder tener información de

gran parte de la jaula. En otros trabajos (en los que tampoco se pretendía cuantificar la respuesta acústica de los peces), se utiliza para monitorizar las migraciones de diferentes especies de peces (en aguas someras) la tecnología DIDSON (Martignac *et al.*, 2015), en esta tesis se opta por el uso de ecosondas con la finalidad de obtener un sistema de monitorización de bajo coste.



Figura 4.2. A la izquierda ecosonda ROVER de Knudsen Engineering usada y a la derecha transductor SS264W de Airmar.

Para poder interpretar los datos acústicos de manera correcta, se instaló junto con el transductor una cámara de video IP SNC-CH210 de Sony (Figura 4.3) encapsulada y preparada para poder sumergirse. Dicha cámara tenía 90 metros de cable IP submarino y podía ser controlada mediante un ordenador. Se eligió este modelo, con un tipo de encapsulado hecho expresamente para dicha cámara y cable submarino Felmat Xtreme-Net porque ya había sido probada con éxito en acuarios como el de San Diego en Estados Unidos.



Figura 4.3. Detalle de la cámara antes de encapsularse, y de la cámara unida al cable y preparada para sumergirse.

Al tratarse de medidas en continuo, se diseñó un sistema que permitía colocar los equipos dentro de la jaula. Se construyó una plataforma de acero inoxidable donde se anclaron el transductor y la cámara prácticamente pegados (Figura 4.4) y que los mantenía anclados de manera estable.



Figura 4.4. Detalle de la plataforma donde se colocaron los equipos a la izquierda vista desde arriba a la derecha vista frontal.

Como los dispositivos debían permanecer una larga temporada en la jaula bajo estudio se diseñó un sistema de cajas estancas. El sistema constaba de dos cajas estancas ancladas a un armazón de acero inoxidable que se colocó encima de uno de los candeleros de la jaula (Figura 4.5). En una de las cajas se alojaron los equipos que no podían sumergirse y en la otra dos baterías de gel unidas a un conmutador. Para alargar la duración de las baterías se proveyó al sistema de dos módulos solares de 85 W (que no proporcionaban autonomía total al sistema). Dentro de la caja que albergaba los dispositivos se colocaron la ecosonda ROVER, el alimentador PoE para la cámara IP, un switch preparado para trabajar en ambientes extremos y un sistema de relés que permitía encender y apagar los equipos de manera separada, para no consumir energía con la cámara por las noches cuando no existía visibilidad. Para poder tener un control total de los equipos a distancia, se dotó al sistema de una antena para crear un radioenlace con tierra. Para ello se instaló una antena NanoStation M5 de Ubiquiti que emitía en la banda de 5.4 GHz, con una velocidad de transferencia de 150 Mbps. Se situó también dentro de la caja estanca el alimentador de la antena, de manera que tuviese siempre alimentación. A su vez, en tierra, se ubicó una antena idéntica a la colocada en el mar y se integró en la red de la empresa (Grup Balfegó), en cuyas instalaciones se conectó un ordenador que sirvió de enlace con los equipos en el mar (ya que formaban una red de área local). Dicho ordenador era accesible por internet vía VPN y nos permitió manejar los equipos desde las instalaciones de la Universitat Politècnica de València (UPV) en Gandia. Se realizaron pruebas de duración de las baterías en las instalaciones de la UPV (recreando el modo de funcionamiento que se iba a usar en la configuración en el mar); y pruebas de resistencia de los equipos a la temperatura, ya que; se preveía que aumentara dentro de la caja por efecto del sol y del funcionamiento de los equipos en condiciones de baja ventilación debido a la

estanqueidad requerida por la caja contenedora. Fruto de estas pruebas se comprobó que las baterías permitían el funcionamiento de los equipos durante dos días completos, por eso, se proporcionó a la empresa 4 pares de baterías iguales para que estas fueran reemplazadas por los operarios de la granja cada dos días (siempre que la climatología lo permitiera) y se configuraron los equipos con un autoarranque para que se pusieran en funcionamiento cuando recuperaran la tensión sin necesidad de que lo hiciese un operador.



Figura 4.5. Sistema de cajas estancas que alojaban los equipos en tierra y el sistema de alimentación (arriba). Detalle de los equipos que quedaron en la caja que no tiene módulos solares (abajo izquierda) y de la caja que contiene las baterías y las placas solares (abajo derecha).

Con los equipos y el sistema de alimentación colocados en la barandilla se sumergió el transductor y la cámara montados en la plataforma de acero (Figura 4.4) y se amarraron colocando un peso de 200 kg en el fondo con un cabo que atravesaba la red. Para que la plataforma obtuviera flotabilidad positiva se colocó bajo la misma unas boyas llenas de aire y con el fin de proporcionarle estabilidad se ataron unos vientos a la plataforma y a los nervios de la red de la jaula que permitieron que todo se moviera de manera solidaria. Durante el mes de noviembre y el de diciembre los equipos estuvieron amarrados en el

centro de la jaula y a una profundidad de 29 metros. Los dos últimos meses de medida, la plataforma se colocó a la mitad del radio de la jaula, a una profundidad un poco menor (23 metros), ya que, la red formaba un copo que permitía obtener mayor profundidad en el centro y menor según se acercaba a las paredes de la jaula (Figura 4.6 y 4.7).

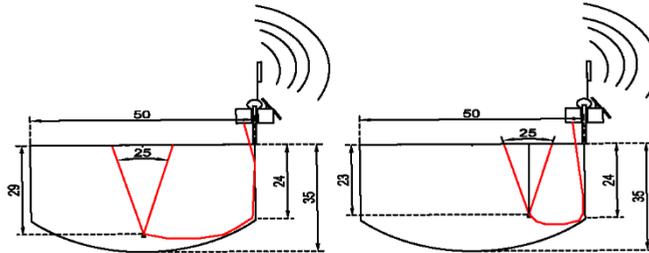


Figura 4.6. Esquema de la configuración de noviembre y diciembre (izquierda) y de la configuración enero y febrero (derecha). En rojo el tamaño del haz del transductor y el cable de señal.



Figura 4.7. Detalle de las cajas que contienen los equipos, los módulos solares y la antena (izquierda) y de la plataforma utilizada para montar el transductor y la cámara (arriba derecha y abajo).

En la Tabla 4.1 se resumen las características del transductor single-beam SS264W ofrecidas por Airmar en su hoja de especificaciones: frecuencia de operación, sensibilidad en emisión definida en tensión, sensibilidad en recepción, índice de directividad en la dirección de máxima radiación, apertura del haz a -3dB, módulo $|Z_T|$ de la impedancia eléctrica del transductor a la frecuencia de trabajo, y potencia máxima que se puede emplear funcionando en modo pulsado $W_{Tx,máx}$. En la misma tabla, se añade una columna con los datos obtenidos en una calibración realizada al recibir el transductor. Al tratarse de un transductor con un ancho de haz a -3dB bastante grande, se opta por la realización de las medidas en el Centro de Tecnología Naval (CTN) de Murcia (Fuente Álamo, Murcia), ya que, el tanque de calibración del laboratorio de la UPV en Gandía no ofrecía espacio suficiente para una calibración con garantías. EL CTN dispone de un tanque de 20 metros de diámetro y 10 metros de profundidad, con dos sistemas de posicionamiento de alta precisión con 4 grados de libertad (X, Z, azimut y elevación). La importancia de la calibración en este caso radica en la posibilidad de comprobar como varían las especificaciones del fabricante cuando se le añade una gran cantidad de cable al transductor (que pasa de 10 metros a 56 metros de cable). Se puede comprobar en la Tabla 4.1 que los valores no son muy diferentes a los ofrecidos por el fabricante.

Tabla 4.1. Especificaciones y calibración del transductor single-beam SS264W de Airmar

<i>Parámetro</i>	<i>Valor especificaciones</i>	<i>Valor calibración</i>
<i>Tipo</i>	Single-beam	Single-beam
<i>Nº serie</i>	20-687-01	20-687-01
<i>f (kHz)</i>	200	200
<i>S_{Tx,v} (dB ref. 1 μPa/V)</i>	163	158.94
<i>S_{Rx} (dB ref. 1 V/ μPa)</i>	-194	-214.7
<i>ID_{máx} (dB)</i>	15	--
<i>θ_{-3dB} (°)</i>	25	24.9
<i> Z (Ω)</i>	90	82.6
<i>W_{Tx,máx} (W)</i> ¹	1000	1000

Como ya se ha indicado anteriormente la ecosonda ROVER de Knudsen Engineering es usada habitualmente para batimetrías, pero por su versatilidad y por su arquitectura

¹ Dato procedente de la hoja de especificaciones del transductor. No es un dato de calibración

integrada se eligió para monitorizar el comportamiento de los atunes dentro de la jaula. Como el sistema no puede ser calibrado “in situ” como las ecosondas científicas, los datos que se extrajeron se utilizaron de manera cualitativa no cuantitativa. Para la realización de las medidas se empleó una potencia de transmisión 4 (la más alta que ofrece la ecosonda) para asegurar que podríamos cruzar todo el banco de peces y que éste no absorbería la energía acústica de tal modo que fuese posible detectar la superficie, que debería mantenerse visible en todo momento como referencia. Esta potencia aseguraba una buena relación señal a ruido, de forma que los ecos presentaban un nivel muy por encima del nivel de fondo, aunque no podía asegurarse que no apareciesen efectos no lineales o reverberación, no obstante como no se pretendía cuantificar el nivel de eco devuelto por los peces no se consideraron dichos efectos como un obstáculo (Tichy *et al.*, 2003; Pedersen, 2006). Se usó una longitud de pulso de 62 μ s y un intervalo entre pings de 50 ms. La duración del pulso empleada era la menor que permitía seleccionar la ecosonda, y se comprobó que era capaz de resolver dos peces próximos de la menor talla existente en la jaula. Según Simmonds & MacLennan (2005) dos blancos han de estar separados al menos una distancia correspondiente a media longitud de pulso ($c \cdot \tau/2$) para poder producir ecos separados, de forma que un pulso de 62 μ s sería capaz de resolver dos peces espaciados al menos una distancia de 4.7 cm, calculado para una velocidad de propagación del sonido de 1500 m/s. Algunos autores indican que la distancia entre peces que nadan cercanos en el mismo banco, es característica para cada especie y está íntimamente relacionada con el tamaño de los peces (siendo en la mayoría de los casos la tercera parte de la longitud de los peces (Partridge, 1982)). La resolución que nos ofrece un pulso de τ es $c \cdot \tau/2$, así que, los más pequeños que se encontraban en la jaula superaban 1.4 metros de longitud. Se optó por el mayor intervalo entre pings de 50 ms (el máximo que nos permitía la ecosonda) para así disponer de la mayor cantidad de ecos consecutivos procedentes de un mismo pez, habiendo realizado un estudio sobre la capacidad de almacenamiento de los datos previamente. Además, la disponibilidad de un enlace con tierra permitía el volcado diario de datos. Los datos fueron grabados sin aplicar la corrección TVG (time variation gain), pero con una ganancia analógica de 40 dB como recomendó el fabricante para asegurar el tránsito de la onda acústica a través del banco de peces y poder mantener la referencia de la superficie como se comentó anteriormente.

4.1.2.3. DIARIO DE OPERACIONES EN LA GRANJA

Con el objetivo de poder comprender los datos que se obtuvieran de las medidas, se solicitó al personal que opera en las instalaciones de engorde de los atunes que anotara los trabajos que se realizaban en la granja, la hora de llegada y salida de los barcos de las instalaciones, la hora en que se alimentaba la jaula bajo estudio (J6), y si existía alguna incidencia destacable que provocase algún trabajo extraordinario o la falta de ellos por efecto de la meteorología.

Del mismo modo se requirió datos ambientales de los días de medida que la empresa toma de manera habitual, temperatura en la columna de agua, pH, salinidad, la dirección y fuerza de la corriente y del viento.

Se extrajeron del servicio estatal de meteorología los datos de salida y puesta del sol de todos los días del periodo bajo estudio.

4.1.2.4. RECOGIDA, TRATAMIENTO Y ANÁLISIS DE LOS DATOS

La campaña de medidas acústicas se extendió desde noviembre de 2012 hasta febrero de 2013, con interrupciones debidas al mal tiempo y la imposibilidad del cambio de las baterías debido a ello. Se tomaron registros de ecos de los atunes en las jaulas de manera ininterrumpida (excepto por falta de alimentación del sistema) tanto de día como de noche; los datos ópticos se tomaban solo durante dos horas en el periodo diurno y se apagaba la cámara para economizar el consumo de batería y asegurar alimentación a los equipos en el periodo entre cambios de batería. Los datos acústicos se guardaban en formato KEB comprimido para economizar espacio y facilitar el traspaso de los datos por la red inalámbrica. Los datos ópticos se guardaron en formato AVI con compresión H264 con la misma finalidad de reducir espacio y mejorar la transmisión de datos.

En la Tabla 4.2 se muestra un resumen total de las horas de grabaciones tanto acústicas como ópticas.

Tabla 4.2. Resumen de los datos acústicos (horas de ecograma) y ópticos (horas de vídeo) grabados durante el experimento.

<i>Mes</i>	<i>Horas de vídeo</i>	<i>Horas ecograma</i>
Noviembre	13	79
Diciembre	42	380
Enero	46	202
Febrero	17	100
Total	118	761

Los datos registrados con la ecosonda ROVER fueron procesados mediante el programa Matlab®, para ello los datos binarios procedentes del archivo KEB tuvieron que ser convertidos a un fichero de texto. Por ello, la primera parte del análisis consistió en crear un lector de archivos KEB que los convirtiera a ficheros .txt. Dicho lector fue cedido al creador del software de análisis Sonar5-Pro y fue incluido en el paquete de dicho software como resultado de la colaboración continua entre el autor y la UPV, permitiendo el análisis

de datos provenientes de las ecosondas de Knudsen Engineering con el citado software (Balk & Lindem, 2011).

Una vez convertidos a un fichero de texto los datos fueron procesados en Matlab®, para poder introducir el valor la compensación de TVG, que pretende compensar las pérdidas por propagación de la onda acústica debidas a la divergencia geométrica del haz y a la absorción del medio de propagación, de este modo, se elimina la dependencia del nivel de eco con la distancia al transductor. Se corrige la velocidad del sonido que se introduce de manera manual durante las medidas y se mantiene fija durante todo el tiempo de medidas a partir de los datos ambientales que nos proporciona la empresa, y se calcula el coeficiente de absorción exacto para cada día atendiendo a dichos datos ambientales. Para el cálculo del coeficiente de absorción emplea la expresión de Francois & Garrison (1982), que presenta una precisión del 5% para temperaturas entre 1.8 y 30°C, salinidades entre 30 y 35 ppm, y frecuencias desde 400 Hz hasta 1 MHz.

Una vez se dispuso de ecogramas compensados, se agruparon por horas de tal manera que cada ecograma representase una hora completa, y en caso que por fallos de los equipos o de la alimentación no existieran datos de la hora completa, los datos con la misma hora y fecha formasen un único ecograma. Puesto que no se ha realizado un análisis del *TS*, tanto la función $20\log$ como la función $40\log$ ha sido empleada en la conversión de los archivos, a pesar de las consideraciones ya realizadas en el capítulo 3 sobre las medidas en campo cercano, los errores cometidos a cortas distancias, el efecto del tamaño finito de los peces, etc. Se ha convertido todo el rango de distancias almacenado en los archivos de la ecosonda, que se extiende de 0 a 30 m desde el transductor.

Puesto que se trata de un análisis cualitativo se estudió toda la columna de agua desde el fondo a la superficie, se implementó un detector de fondos para detectar el comienzo y el final del banco en cada caso, y se calculó para cada ecograma el centro de masas para cada ping. De este modo se obtuvo un promedio horario de la distancia al transductor máxima y mínima del banco, y del centro de masas del mismo. Se trazaron gráficas a partir de estos tres puntos para cada hora y se analizaron los puntos en los que aparecían variaciones bruscas o discontinuidades, a partir del cotejo de las gráficas obtenidas con los datos ambientales, climatológicos y de operaciones ofrecidos por la empresa y de los obtenidos del servicio español de meteorología. Además, para las horas en las que existía coincidencia entre variaciones en los datos y la toma de imágenes, se realizó el visionado de las mismas para poder entender a que eran debidas dichas variaciones con la mayor cantidad de datos posible.

En la Figura 4.8 se muestra un ecograma tomado con la configuración usada durante los meses de noviembre y diciembre y un ecograma con la configuración usada en los meses de enero y febrero.

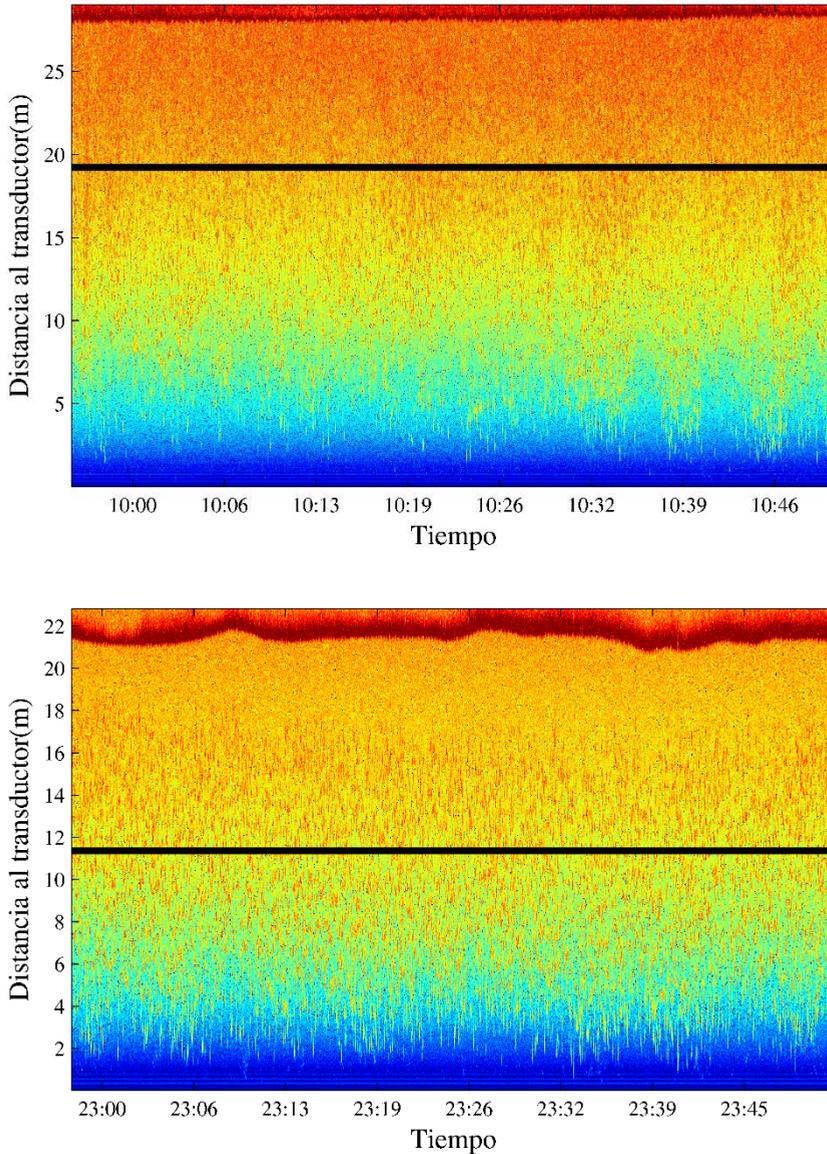


Figura 4.8. Ejemplo de ecograma registrado durante el mes de diciembre, configuración con los equipos en el centro de la jaula (arriba) y ecograma grabado durante el mes de enero con los equipos colocados a la mitad del radio de la jaula (abajo). La línea negra representa el valor medio del centro de masas para todo el tiempo representado en cada ecograma, la detección fuerte en color rojo en la parte superior de cada ecograma se corresponde con la superficie.

4.1.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En primer lugar, se representan los resultados para la configuración utilizada durante los meses de noviembre y diciembre. En esos meses los equipos se colocan en el centro de la jaula a una profundidad aproximada de 29 metros. Después se presentan los resultados para la configuración utilizada durante los meses de enero y febrero, en la que los equipos se colocan en la mitad de uno de los radios de la jaula y a una profundidad de 24 metros. Para finalizar se presenta un caso particular, el momento de la alimentación para estudiarlo de manera más detallada.

4.1.3.1. RESULTADOS CONFIGURACIÓN I

Como se ha comentado anteriormente, esta configuración se utiliza durante los meses de noviembre y diciembre, con la finalidad de observar la mayor parte de la jaula. Para ello, se colocan los equipos en el centro de la jaula a una profundidad de 29 metros. Este hecho proporciona alrededor de 13 metros de cobertura cerca de la superficie, teniendo en cuenta el haz del transductor a -3 dB.

Las observaciones de estos tres meses (para ambas configuraciones) constata que los atunes describen un patrón de nado circular alrededor de las paredes de la jaula sin llegar a tocarlas (Nucci *et al.*, 2010; Sarà *et al.*, 2007; Komeyama *et al.*, 2013). En cuanto a la distribución de los peces dentro de la jaula, lo representado en los ecogramas nos indica que se ocupa gran parte de la columna de agua tanto durante el día como durante la noche. No obstante, cuando se promedia el centro de masas del banco, sí se aprecian pequeñas diferencias en momentos determinados del día, bien cuando se produce algún trabajo dentro o cerca de la jaula, o bien cuando llega el ocaso y la noche. Para ilustrar este hecho nos vamos a fijar en las siguientes figuras.

En la Tabla 4.3 se presentan los datos medioambientales y los proporcionados por la empresa para un día en concreto (8/12/2012). En la Figura 4.9, se aprecia la distancia mínima (amarillo) y máxima (azul) del banco al transductor durante todo el día (desde las 0:00 a las 23:59). Del mismo modo, se puede ver en rojo la evolución del centro de masas del banco durante todo el día. En una elipse negra se marca el momento de la alimentación, se aprecia una bajada del centro de masas que se convierte en mínimo cerca de las 8:00 horas, momento en el que la empresa nos indica que se procede a la alimentación de los atunes en la jaula. El valor del centro de masas vuelve a los valores anteriores cerca de las 10:00 de la mañana, momento en el que vuelve a fluctuar para mantenerse estable desde la 1 hasta las 17:00 horas. Se marca en una elipse verde el momento del ocaso, en dicho momento el centro de masas del banco experimenta una bajada brusca que dura alrededor de dos horas y que vuelve a estabilizarse a partir de las 20:00 horas. En este caso si se aprecia valores medios del centro de masas menores durante las horas nocturnas que en las diurnas, con diferencias del centro de masas de hasta 3.2 metros. Como los límites

inferior y superior del banco se mantienen estables los resultados obtenidos indican que la densidad de peces en la columna de agua sí varía, manteniéndose algunos individuos nadando por encima y por debajo del banco.

Tabla 4.3. Parámetros del día 8/12/2012.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Temperatura exterior (°C)	14.3	Fuerza viento (*)	3
Temperatura superficie (°C)	15.5	Estado de la mar	marejadilla
Temperatura media (°C)	15.5	Dirección de la corriente	SE
Temperatura fondo(°C)	15.5	Fuerza de la corriente	0.1
Oxígeno (mg/l)	7.44	Hora de entrada de los barcos	SD
Visibilidad (m)	3	/Hora de alimentación	08:00
pH	8.1	Hora de salida del barco	SD
Salinidad(‰)	38.81	Hora salida del sol	08:06
Dirección viento	NW	Hora puesta del sol	17:26

SD: Sin datos (no fueron proporcionados por la empresa). (*) Escala de Beaufort.

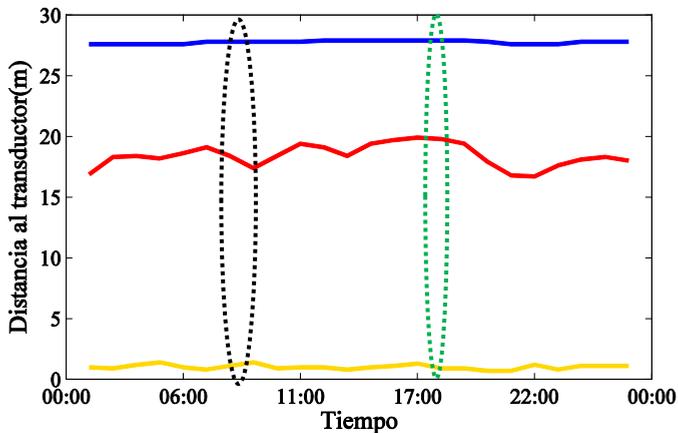


Figura 4.9. Representación de los datos registrados durante el día 8/12/2012. En azul límite superior del banco, en rojo el centro de masas y en amarillo el límite inferior del banco. La elipse negra representa el momento de la alimentación, y la elipse verde el del ocaso.

Pero es importante comprobar la repetitividad de este comportamiento, para ello es necesaria la observación de más días de este periodo. Nos fijamos ahora en el día 12 de diciembre de 2012. Se presentan los datos para ese día en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4. Parámetros del día 12/12/2012.

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>	<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
<i>Temperatura exterior (°C)</i>	19.5	<i>Fuerza viento (*)</i>	0
<i>Temperatura superficie (°C)</i>	14.71	<i>Estado de la mar</i>	marejadilla
<i>Temperatura media (°C)</i>	14.69	<i>Dirección de la corriente</i>	E
<i>Temperatura fondo(°C)</i>	14.68	<i>Fuerza de la corriente</i>	0.1
<i>Oxígeno (mg/l)</i>	7.73	<i>Hora de entrada de los barcos</i>	08:00
<i>Visibilidad (m)</i>	7	<i> Hora de alimentación</i>	08:34
<i>pH</i>	8.2	<i>Hora de salida del barco</i>	12.55
<i>Salinidad(‰)</i>	39.15	<i>Hora salida del sol</i>	08:10
<i>Dirección viento</i>	SW	<i>Hora puesta del sol</i>	17:27

(*) Escala de Beaufort.

En la Figura 4.10, se puede observar un comportamiento de los atunes parecido al descrito para el día 8 de diciembre. El banco mantiene sus límites superior e inferior bastante estables, no obstante, el centro de masas se mantiene estable en las horas previas a la llegada de los barcos a la granja y al proceso de alimentación (marcado con una elipse negra), experimentando variaciones durante dicho proceso. Aunque el barco continúa en las instalaciones de engorde, la empresa nos indica que alrededor de las 9:00 dicho barco se aleja de la jaula para realizar trabajo lejos de los atunes bajo estudio. El banco parece mantenerse estable hasta que pasadas las 17:30, el centro de masas vuelve a descender de manera brusca coincidiendo con la hora de la puesta del sol. Para volver a ser estable a partir de las 20:00. En este caso la diferencia máxima día/noche del centro de masas es de 3.6 metros. Queda reflejado en el día 12 un comportamiento similar al del día 8 de diciembre. En ambos casos la alimentación (los dos días) y la entrada de los barcos en la instalación (el día 12/12/2012) coincide con el momento de la salida del sol, por ello no se conoce cómo afecta la salida del sol al banco, si provoca alguna reacción parecida a la de la puesta del sol.

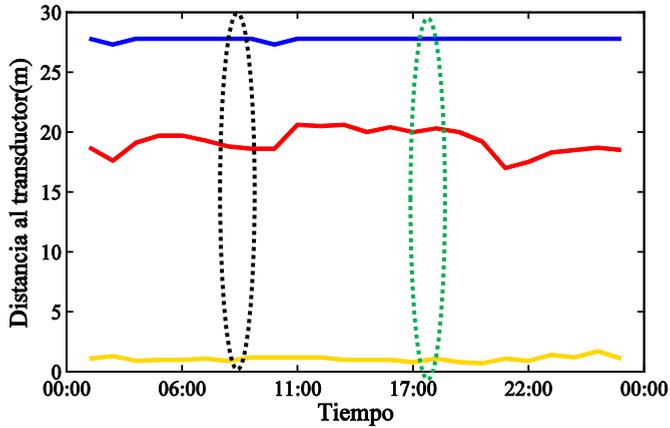


Figura 4.10. Representación de los datos registrados durante el día 12/12/2012. En azul límite superior del banco, en rojo el centro de masas y en amarillo el límite inferior del banco. La elipse negra representa el momento de la alimentación, y la elipse verde el del ocaso.

Para finalizar con el análisis de esta configuración se analiza una situación diferente, viendo lo que ocurre desde la 13:00 horas del día 24 de diciembre a las 12:00 hora del día 25 de diciembre. En la Tabla 4.5 aparecen los datos para este caso que se ilustra en la Figura 4.11.

Tabla 4.5. Parámetros del día 24-25/12/2012.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Temperatura exterior (°C)	13	Fuerza viento (*)	3
Temperatura superficie (°C)	14.5	Estado de la mar	rizada
Temperatura media (°C)	14.54	Dirección de la corriente	SW
Temperatura fondo(°C)	14.57	Fuerza de la corriente	0.0
Oxígeno (mg/l)	6.9	Hora de entrada de los barcos	07:56
Visibilidad (m)	7	/Hora de alimentación	SD
pH	8.1	Hora de salida del barco	12:55
Salinidad(‰)	39.04	Hora salida del sol	08:18
Dirección viento	NW	Hora puesta del sol	17:32

SD: Sin datos (no fueron proporcionados por la empresa). (*) Escala de Beaufort.

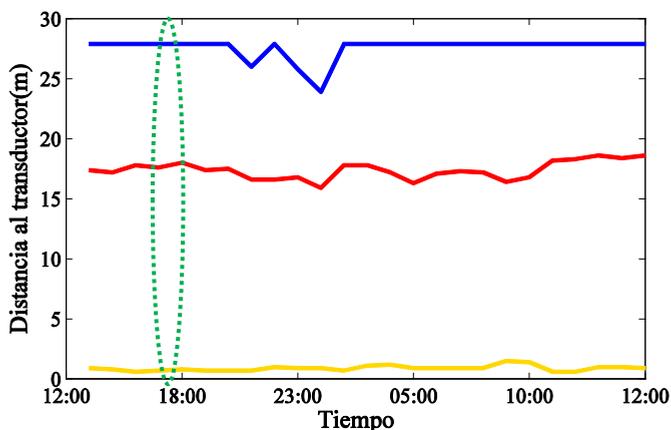


Figura 4.11. Representación de los datos registrados durante el día 24 -25/12/2012. En azul límite superior del banco, en rojo el centro de masas y en amarillo el límite inferior del banco. La elipse verde representa el momento del ocaso.

Se ha elegido este ejemplo por diferentes motivos, el primero de ellos es que ni el día 24 ni el día 25 se produjeron maniobras de alimentación de los peces, ese hecho queda totalmente reflejado en el gráfico que no presenta ningún tipo de bajada brusca en las horas diurnas. Cerca de las 18:00 del día 24 de diciembre se produce un leve descenso coincidiendo nuevamente con la puesta del sol. Como los trabajos en las instalaciones terminan el día 24 antes de las 12, no existen fluctuaciones acusadas durante las horas de sol de dicho día. Del mismo modo ocurre en las horas diurnas del día 25, en las que los barcos no trabajan en la granja. Si nos fijamos en la franja entre las 21:00 horas del día 24 y las 2:00 del día 25 si se puede apreciar fluctuaciones tanto en el centro de masas pero más acusadas en el límite superior del banco, este hecho es debido al estado del mar, con un fuerte oleaje, que posiblemente incitaba a los atunes a alejarse de la superficie. Según nos indicó la empresa el día 25 el mar presentaba un estado más tranquilo (que posiblemente empezó durante la madrugada), lo que permitió al banco volver a estabilizarse. También en este caso existe una diferencia entre la posición del centro de masas durante el día y la noche llegando a una diferencia máxima de 2.7 metros.

4.1.3.2. RESULTADOS CONFIGURACIÓN 2

Esta configuración fue utilizada durante los meses de enero y febrero. Se pidió a los buzos que trasladasen los equipos a la mitad de uno de los radios de la jaula (a 12.5 metros de la pared de la jaula). Tras realizar operaciones para salvar la forma del copo de la jaula en su fondo, la profundidad a la que pudieron ser colocados los equipos disminuyó hasta los 23 metros, cubriéndose un área circular de 10.2 metros de diámetro cerca de la superficie.

Al igual que para la configuración anterior se realizó el estudio de todos los datos y se muestra a continuación dichos resultados. En la Tabla 4.6 se muestran los datos del día 12 de enero de 2013, y en la Figura 4.12 los resultados obtenidos. El tipo de representación coincide con el de la configuración anterior.

Tabla 4.6. Parámetros del día 12/01/2013.

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>	<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
<i>Temperatura exterior (°C)</i>	13	<i>Fuerza viento (*)</i>	4
<i>Temperatura superficie (°C)</i>	13.9	<i>Estado de la mar</i>	marejadilla
<i>Temperatura media (°C)</i>	13.9	<i>Dirección de la corriente</i>	SE
<i>Temperatura fondo(°C)</i>	13.9	<i>Fuerza de la corriente</i>	0.2
<i>Oxígeno (mg/l)</i>	7.55	<i>Hora de entrada de los barcos</i>	SD
<i>Visibilidad (m)</i>	7	<i>/Hora de alimentación</i>	08:30
<i>pH</i>	8.2	<i>Hora de salida del barco</i>	SD
<i>Salinidad(‰)</i>	38.57	<i>Hora salida del sol</i>	08:20
<i>Dirección viento</i>	N	<i>Hora puesta del sol</i>	17:45

SD: Sin datos (no fueron proporcionados por la empresa). (*) Escala de Beaufort.

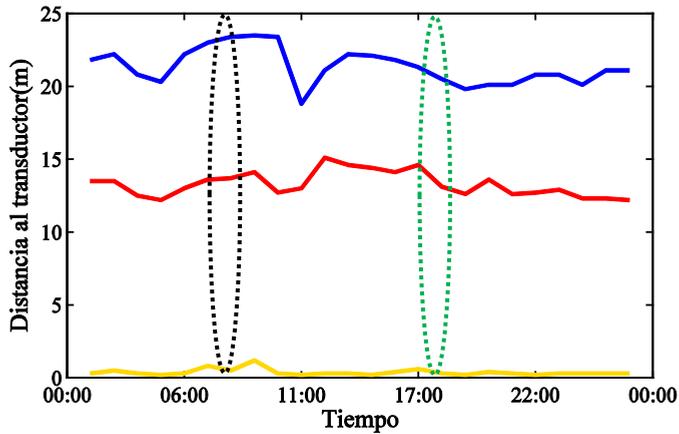


Figura 4.12. Representación de los datos registrados durante el día 12/01/2013. En azul límite superior del banco, en rojo el centro de masas y en amarillo el límite inferior del banco. La elipse negra representa el momento de la alimentación, y la elipse verde el del ocaso.

Como ocurría en la configuración 1, puede apreciarse que el banco reacciona a la presencia del barco y a los trabajos que se realizan en la jaula durante el proceso de alimentación (elipse negra en la Figura 4.12). No obstante, a la vista de los datos, los peces comienzan a agruparse según va avanzando el día y se acerca el ocaso (elipse verde) para pasar a mantenerse estables después de la puesta del sol. La variación en el límite superior del banco sugiere además que el banco se repliega ante cualquier estímulo (como el caso de la alimentación), y que lo hace también mientras la luz del sol desaparece. Además, estas variaciones en el límite superior del banco pueden estar relacionadas con la forma que adquiere el banco dentro de la jaula, que suele asimilarse a una cuña o a una bola (Sarà et al. 2007). También existe diferencia entre el mínimo centro de masas diurno y nocturno de 2.9 metros, que confirma el cambio de comportamiento día/noche.

Al igual que en el punto anterior es necesario conocer si el comportamiento se repite en días sucesivos con esta configuración. Para ello nos fijamos ahora en los resultados obtenidos para el día 15 de enero de 2013 mostrados en la Tabla 4.7 y la Figura 4.13.

Tabla 4.7. Parámetros del día 15/01/2013.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Temperatura exterior (°C)	13	Fuerza viento (*)	3
Temperatura superficie (°C)	13.6	Estado de la mar	marejadilla
Temperatura media (°C)	13.6	Dirección de la corriente	NE
Temperatura fondo (°C)	13.9	Fuerza de la corriente	0.2
Oxígeno (mg/l)	7.58	Hora de entrada de los barcos	07:30
Visibilidad (m)	9	Hora de alimentación	07:50
pH	8.1	Hora de salida del barco	11:30
Salinidad (‰)	38.01	Hora salida del sol	08:19
Dirección viento	SW	Hora puesta del sol	17:49

(*) Escala de Beaufort

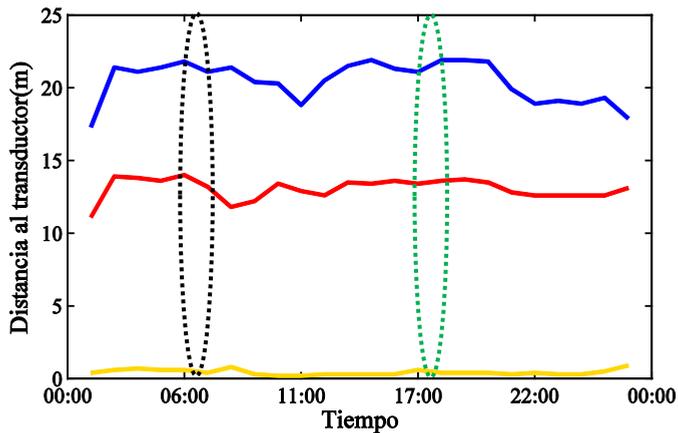


Figura 4.13. Representación de los datos registrados durante el día 15/01/2013. En azul límite superior del banco, en rojo el centro de masas y en amarillo el límite inferior del banco. La elipse negra representa el momento de la alimentación, y la elipse verde el del ocaso.

Los datos del día 15 confirman lo visto hasta el momento. Los peces reaccionan cuando se realizan trabajos en la jaula, y en los momentos previos y posteriores mantienen el cambio de comportamiento generado hasta que vuelve a estabilizarse. Del mismo modo, se confirma un replegamiento del banco en las horas nocturnas (que para este caso concreto existe una diferencia día/noche de 2.6 metros). Nos indicó la empresa que durante este día se produjo la llegada de un nuevo barco a las 10:00 de la mañana, que como puede apreciarse coincide con una bajada leve del centro de masas, pero más acusada del límite superior del banco.

Para finalizar se presenta un último caso, con el comportamiento de los peces desde las 13:00 horas del día 18 a las 12:00 horas del día 19 de enero de 2013. Como se espera se aprecia un ligero descenso del centro de masas en el momento de la puesta del sol del día 18, y un movimiento tanto del centro de masas como del límite superior del banco cuando se acerca el barco y se realiza la alimentación de los atunes. Existe una diferencia entre el valor del centro de masas entre el día y la noche de alrededor de 2.2 metros. En este caso se puede apreciar (como ya se hizo en la Figura 4.11), que el banco se estabiliza en ausencia de estímulos externos, sobre todo, los procedentes de trabajos realizados dentro de las instalaciones, aunque no sean en la jaula bajo estudio, que alargan el tiempo que tarda el banco en volver a su estado normal. Por otro lado, las variaciones en el límite superior del banco, pueden asociarse a la forma de éste y a la posición en la que se localizan los equipos en esta configuración.

Tabla 4.8. Parámetros del día 18-19/01/2013.

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>	<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
<i>Temperatura exterior (°C)</i>	14.5	<i>Fuerza viento (*)</i>	1
<i>Temperatura superficie (°C)</i>	13.5	<i>Estado de la mar</i>	marejadilla
<i>Temperatura media (°C)</i>	13.5	<i>Dirección de la corriente</i>	SE
<i>Temperatura fondo(°C)</i>	13.4	<i>Fuerza de la corriente</i>	0.1
<i>Oxígeno (mg/l)</i>	7.8	<i>Hora de entrada de los barcos</i>	08:05
<i>Visibilidad (m)</i>	7	<i>¡Hora de alimentación</i>	09:00
<i>pH</i>	8.2	<i>Hora de salida del barco</i>	17:30
<i>Salinidad(‰)</i>	38.52	<i>Hora salida del sol</i>	08:18
<i>Dirección viento</i>	N	<i>Hora puesta del sol</i>	17:54

(*)Escala de Beaufort

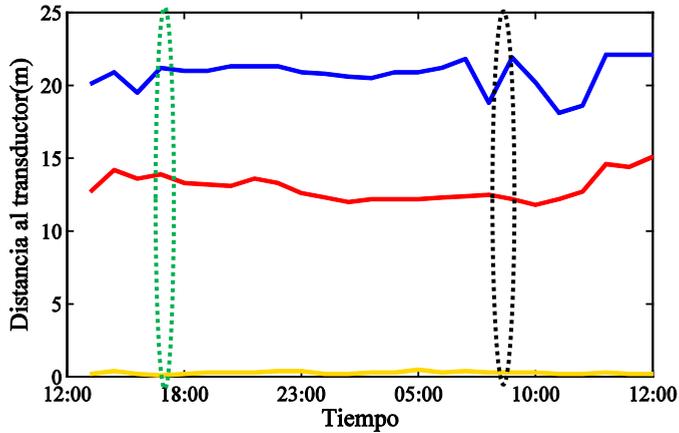


Figura 4.14. Representación de los datos registrados durante el día 18-19/01/2013. En azul límite superior del banco, en rojo el centro de masas y en amarillo el límite inferior del banco. La elipse negra representa el momento de la alimentación, y la elipse verde el del ocaso.

4.1.3.3. ALIMENTACIÓN DE LOS ATUNES

Durante toda esta sección se ha hecho referencia al momento de la alimentación, debido a que los atunes presentan cambios de comportamiento en el momento que se producen los trabajos para proporcionarles alimento a los peces alojados en la jaula bajo estudio.

Existen dos procedimientos de alimentación diferenciados, y dependiendo de la jaula se aplica uno u otro según los mecanismos de los que esté dotada la jaula. El primero de los procedimientos de alimentación consiste en proporcionar carnada congelada a los atunes a través de un tubo de grandes dimensiones. Dicho tubo se une al barco cuando este se encuentra amarrado al aro de superficie de la jaula y llega hasta el centro de la misma. Una vez conectado el tubo al barco se empuja la carnada mediante un chorro de agua a presión para que se deslice por el tubo hasta el centro de la jaula donde cae al agua y puede ser consumido por los atunes. El agua a presión, además, ayuda a que el pescado se descongele de manera más rápida. El segundo de los procedimientos de alimentación usado por la empresa consiste en colocar varios bloques de pescado congelado sobre una plataforma flotante en el centro de la jaula. La plataforma está formada por tubos del mismo calibre que los del aro de superficie de la jaula formando un rectángulo y cuya base está formada por una red de gran resistencia, pero con una luz lo suficientemente grande para que pueda pasar a través de ella la carnada. Dicha plataforma que se encuentra

normalmente vacía en el centro de la jaula se acerca hasta cerca del barco, que coloca los bloques de carnada congelada con ayuda de una grúa y vuelve a colocarse en el centro de la jaula. Con el tiempo y el contacto del agua del mar, el pescado congelado comienza a descongelarse y a caer a través de la base de red al agua donde los peces pueden comerlos.

En la jaula bajo estudio (J6), en la que están instalados los equipos, se utiliza el segundo procedimiento para alimentar a los atunes. Para profundizar un poco en el comportamiento de los atunes durante la alimentación se estudian detenidamente los ecogramas grabados el día 15 de enero de 2013. En la Figura 4.15 se muestra un resumen del procedimiento en cuatro ecogramas que representan de manera exacta el comportamiento que se repite cuando se procede a la alimentación de la jaula. La empresa nos indica que la alimentación se produce alrededor de las 07:50 horas del día 15 de enero. Como se puede apreciar en la imagen superior izquierda de la Figura 4.15 los peces reaccionan cuando el barco que los alimenta se acerca. Es conocido que los atunes reaccionan cuando son expuestos a ruido de embarcaciones como demostraron Sarà et al. (2007) en su estudio con atunes en régimen de semi-cautividad. En este experimento se concluyó que los atunes permanecían calmados, nadando a una profundidad media constante en ausencia de estímulos sonoros procedentes de embarcaciones, pero cuando se veían sometidos al ruido de una embarcación pequeña parecida a la usada para la alimentación de los atunes en la granja del *Grup Balfegó*, el comportamiento de los peces variaba aumentando la velocidad de nado y produciéndose movimientos verticales del banco. Este hecho se observa en las dos imágenes superiores del ecograma en las que el banco desciende cambiando su centro de masa de 11.6 a 9.7 metros y aumentando la velocidad de nado, ya que para una cantidad de ping por segundo constante las trazas se hacen más cortas como se aprecia en la imagen superior derecha.

Mientras la plataforma situada en el centro de la jaula es arrastrada hasta el punto donde el barco está amarrado y los operarios colocan los bloques de pescado congelado sobre dicha plataforma con ayuda de una grúa, el motor del barco permanece encendido, por lo que los atunes continúan nadando a mayor velocidad y lejos de la superficie. Dicha plataforma es colocada finalmente en el centro de la jaula desde uno de los laterales. En la imagen inferior derecha de la Figura 4.14 puede apreciarse el momento en el que dicha plataforma atraviesa la zona de cobertura de la ecosonda. Este trabajo lo realizan buzos mientras el barco se dirige a otra de las jaulas. Los peces comienzan a acercarse a la superficie de nuevo, de manera que el banco eleva su centro de masas hasta los 10.1 metros a la espera que los buzos terminen la maniobra de colocación de la plataforma en el centro de la jaula. Finalmente, como se aprecia en la imagen inferior de la derecha, cuando los buzos abandonan la jaula y el barco se aleja de la misma, los atunes vuelven a ocupar casi la totalidad de la columna de agua. El pescado colocado en los bloques comienza a descongelarse y a caer al interior de la jaula y los atunes proceden a alimentarse.

El análisis de estos datos junto con las imágenes nos lleva a confirmar el cambio de dirección de nado que se produce en los atunes cuando son estimulados por el ruido de la embarcación. En el diario que confeccionó la empresa, se indicaba que la embarcación abandonó las instalaciones a las 11:30 pasando a velocidad moderada cerca de la jaula (J6) donde teníamos instalados los equipos. En la Figura 4.16 se puede apreciar que los atunes cambian de dirección de nado, y vuelven a la dirección inicial una vez que el barco se ha alejado de la instalación (y por tanto de la jaula). No se conoce con exactitud a que se debe estos cambios de dirección de nado; aunque algunos autores lo asocian a maniobras de evasión frente a situaciones de peligro (Sarà *et al.*, 2007; Nucci *et al.*, 2010). En la imagen de la izquierda tomada por las cámaras a las 11:18 los peces nadan de arriba hacia debajo de la imagen. Los equipos están anclados y fijos en el fondo de la jaula a la mitad de uno de los radios cuando el barco pasa cerca de la jaula y los peces cambian de dirección de nado como se aprecia en la imagen central tomada por las cámaras el mismo día las 11:30. Finalmente cuando el barco está lo suficientemente lejos para que el ruido que produce deje de parecer una “amenaza” para los peces estos retornan a la dirección de nado original, como parece sugerirnos la imagen de la derecha tomada a las 11:34.

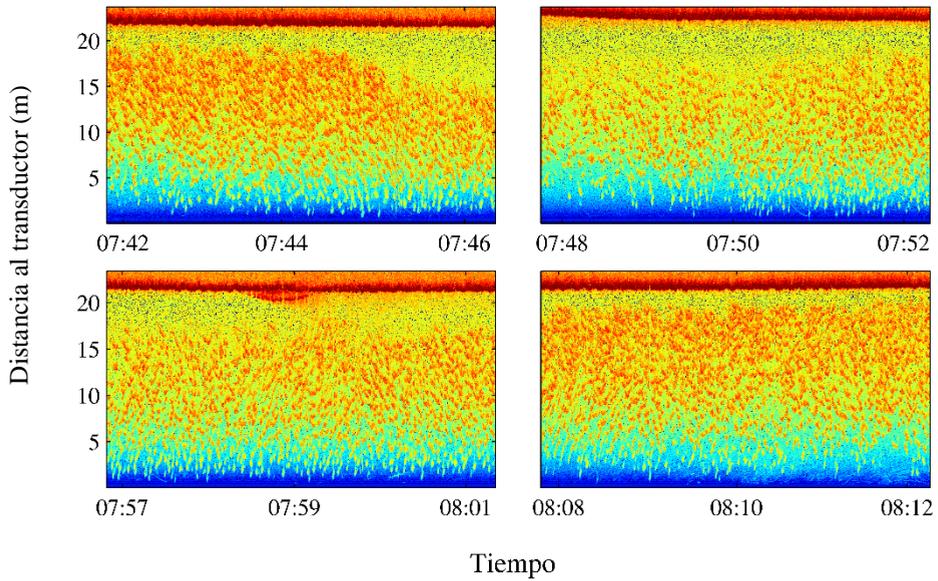


Figura 4.15. Ecogramas correspondientes al proceso de alimentación del día 15-01-2013. En la imagen de arriba a la izquierda el barco se aproxima y el banco baja, en la imagen de arriba a la derecha el barco ya amarrado en la jaula carga los bloques de pescado congelado sobre la plataforma, en la imagen de abajo a la izquierda la plataforma junto con los bloques se coloca en el centro de la jaula y finalmente en la imagen de abajo a la derecha el barco se aleja y los atunes comienzan a subir de nuevo.



Figura 4.16. Imagen que confirma el cambio de dirección de nado de los atunes. A la izquierda dirección de nado original. En el centro momento del cambio de dirección y a la derecha momento en el que recobran la dirección de nado original.

4.1.4. CONCLUSIONES

Tras el estudio de los datos recogidos durante los tres meses de monitorización se ha demostrado que los atunes nadan describiendo trayectorias circulares alrededor de las paredes de la jaula.

Para ambas configuraciones usadas, y en ausencia de estímulos externos los atunes nadan ocupando toda la columna de agua, sin grandes variaciones en el centro de masas ni en los límites superior ni inferior del banco.

Cuando los peces son sometidos a algún estímulo por presencia de embarcaciones o trabajos en la jaula, se produce una reacción asociada que se materializa en movimientos verticales y cambios de velocidad y dirección de nado como se muestra en ambas configuraciones y más detalladamente en el estudio del proceso de alimentación de la jaula bajo estudio.

Se ha observado que existe una variación entre el comportamiento asociado al día y a la noche. En todos los casos estudiados durante las horas sin luz solar el centro de masas del banco desciende, como ocurre en libertad. Se ha podido advertir, además, que el descenso del banco coincide aproximadamente con la hora de la puesta del sol, no obstante, no existen evidencias claras de que la elevación del mismo coincida con la hora de salida del sol, parece siempre que se produzca al menos una o dos horas antes del alba. Este hecho se ha constatado en ambas configuraciones.

El uso de un sistema combinado acústico y óptico, ha permitido entender con mayor exactitud alguno de los eventos presentados en los ecogramas, además, el uso de un sistema autónomo controlado por tecnología wifi a través de internet, ha permitido el control de los equipos de manera remota y la transmisión de datos a tierra sin necesidad de desplazarse a las instalaciones de engorde de los atunes aumentando la eficiencia del sistema a la vez que se minimizan costes.

La situación de la granja y la época del año en la que se ha realizado el estudio, ha aumentado el número de días en los que las condiciones meteorológicas dificultaban el trabajo en las jaulas, y por tanto la sustitución de las baterías. Es importante en un sistema de monitorización la autonomía energética, que en este caso no ha sido posible conseguir con los módulos solares implantados.

4.2. RESPUESTA A RUIDOS ANTROPOGÉNICOS DEL ATÚN ROJO EN CAUTIVIDAD

En esta sección se presenta un experimento realizado para conocer cuál es la respuesta del atún rojo (cuando se encuentra en cautividad) a diferentes ruidos antropogénicos: tonos puros, ruido de banda ancha y especialmente a una grabación de un aerogenerador marino realizada bajo el agua en condiciones de funcionamiento. Se pretendía evaluar si la exposición a estos ruidos que no existen en la naturaleza provocaba algún tipo de respuesta en los atunes bajo estudio.

El estudio realizado en colaboración con el Instituto Español de Oceanografía, se enmarca dentro de los estudios orientados a evaluar el impacto ambiental de los aerogeneradores marinos; tarea encomendada al IEO por la empresa Acciona Energía dentro de los trabajos del proyecto AZIMUT, del gran subprograma de apoyo a consorcios estratégicos nacionales de investigación técnica CENIT del Ministerio de Economía y competitividad,

4.2.1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, los parques eólicos marinos son una de las más prometedoras fuentes de energía renovable, por ello su expansión está siendo rápida en las zonas costeras de muchos países. Sin embargo, todavía no ha sido evaluado con exactitud el impacto medioambiental que produce la construcción y la operación de estas infraestructuras en el mar.

En los últimos años se han llevado a cabo algunos estudios cuyo objetivo era solucionar el problema de la falta de conocimientos sobre el impacto producido por este tipo de parques eólicos (Wilson *et al.*, 2010; Bailey *et al.*, 2014). Entre los impactos ambientales asociados a la construcción de estos parques eólicos destaca el aumento del nivel de ruido. Los niveles más altos se alcanzarían durante las fases de pre-construcción, construcción y desmantelamiento (fases de corta duración). Las características de dicho ruido (frecuencias e intensidades) dependerán de los medios empleados en las prospecciones, los tipos de cimentación empleados para los aerogeneradores, la subestación transformadora y la torre de medición eólica; así como la colocación del cableado y el tráfico marítimo originado. Existen estudios realizados sobre cómo afecta la perforación del fondo marino para la instalación de estas estructuras al entorno biológico: bentos y bivalvos (Mann *et al.*, 2013); mamíferos marinos o peces (Thomsen *et al.*, 2006; Popper & Hastings, 2009). En estos estudios se investiga el efecto que estos trabajos tienen sobre las especies más importante que habitan en el entorno donde se ubican estas infraestructuras, obteniéndose una amplia variedad de resultados, que varían desde la falta de evidencia de reacciones al ruido provocado por las perforaciones (Nedwell *et al.*,

2003); hasta la muerte inmediata de los especímenes de alguna de las especies bajo estudio (Oakland Bay Bridge East Span Seismic Safety Project, 2001). Sin embargo, la mayoría de estos trabajos aplican metodologías de estudio difíciles de reproducir en algunos casos por su falta de parametrización y por su dependencia con la especie estudiada y el tipo de perforación usada para cada caso (que definirá, como ya se ha indicado, las características del ruido generado) (Popper & Hastings, 2009).

El interés sobre el impacto de los ruidos antropogénicos en la vida marina está creciendo, sin embargo, existen pocos estudios sobre cómo afectan los ruidos de este tipo al atún rojo (Sarà *et al.*, 2007). Además, no existe información sobre el rango de frecuencias al que el atún rojo es más sensible. Se conoce que se trata de una especie generalista (en lo que a la percepción acústica se refiere), ya que; posee vejiga natatoria pero sin conexión entre ésta y el oído interno (Popper & Schilt, 2008). No obstante, si se ha publicado algún trabajo sobre los umbrales de audición de una especie de túnidos similar, el *Thunnus orientalis* (Popper *et al.*, 2013).

Está documentado que el atún rojo es una especie migratoria que forma grandes bancos que viajan desde el océano Atlántico hasta el mar Mediterráneo a través del estrecho de Gibraltar (De la Serna *et al.*, 2004). Sus migraciones (relacionadas con la alimentación y la reproducción) cubren rutas que pasan cerca de la costa. Son estas zonas costeras las principales candidatas para albergar los parques eólicos marinos, sobre todo en la zona del golfo de Cádiz cerca de Gibraltar donde las condiciones del viento son perfectas para este tipo de instalaciones. Por este hecho, el Instituto Español de Oceanografía (IEO), se marcó como objetivo contribuir al conocimiento de los efectos potenciales del ruido provocado por las turbinas eólicas marinas (cuando operan normalmente) sobre el comportamiento del atún rojo; y si podrían influir en su comportamiento durante las migraciones. Ante la imposibilidad de realizar este tipo de estudios en el medio natural, se optó por llevar a cabo la exposición del ruido operacional de las turbinas en atunes cautivos en una jaula de engorde situada en el mar Mediterráneo. Este estudio se apoya en los datos presentados en la primera parte de este capítulo, en el que atunes enjaulados son monitorizados con la finalidad de conocer su comportamiento cuando se encuentran en estas condiciones.

Es importante constatar que, los experimentos sobre comportamiento realizados en cautividad no son extrapolables a atunes en estado de libertad, por ello, sería importante poder reproducir algunos experimentos realizados con pequeños pelágicos en libertad (Hawkins *et al.*, 2014). Sin embargo, el trabajo con el atún rojo es extremadamente difícil y delicado en libertad, por este hecho se realiza el estudio con atunes en régimen de cautividad, con la ayuda de la empresa que los engorda. No se puede olvidar que la presencia o ausencia de reacción de un animal a un determinado estímulo (ruido en este

caso) depende de muchos factores, como el estrés, sus características fisiológicas, su experiencia previa a este tipo de estímulos, la presencia o no de depredadores...

4.2.2. MATERIALES Y MÉTODOS

4.2.2.1. LUGAR DE MEDIDA

El estudio para conocer cómo reaccionan los atunes en cautividad frente a ruidos antropogénicos se llevó a cabo en las instalaciones que el *Grup Balfegó* tiene en la población de l'Ametlla de Mar en la provincia de Tarragona. Las instalaciones se encuentran a 2.5 millas de la costa y pueden verse desde tierra (Lat. 4°052'11.7'' N Long. 0°48'15.2'' E). Los peces fueron capturados mediante el método del cerco frente a la costa de las Islas Baleares y seguidamente se transfirieron a una jaula flotante para su transporte. Dicha jaula fue remolcada por un barco arrastrero (a un nudo de velocidad para que no sufrieran ningún daño) durante 15 días hasta las instalaciones del *Grup Balfegó*. Finalmente los atunes fueron transferidos a una jaula fija dentro de la granja de engorde. Dicha jaula (J2 Figura 4.17) tenía un tamaño de 50 metros de diámetro y una profundidad máxima aproximada de 35 metros en la parte más profunda del copo. Dentro de la jaula se encontraban 900 atunes de 200 kg de peso medio. El experimento se realizó durante los días 23, 24 y 25 de julio de 2013 por lo que los atunes llevaban poco tiempo en las instalaciones y estaban comenzando a ser alimentados por los métodos descritos en la sección anterior de este capítulo y acostumbrándose a la cautividad.

Durante el tiempo que estuvieron en las jaulas (tanto de transporte como de la instalación de engorde), antes de la realización de los experimentos, los atunes estuvieron expuestos a todos los ruidos generados por los trabajos habituales que se realizaban en la granja; incluidos los barcos de trabajo y los que proporcionan alimento a los peces. Del mismo modo, durante el transporte desde la costa balear hasta la granja, estuvieron expuestos al ruido del barco que arrastraba la jaula.



Fuente: Grup Balfegó

Figura 4.17. Fotografía por satélite de la granja del Grup Balfegó, en la que se señala en amarillo la jaula (J2) donde se realizan las medidas.

4.2.2.2. EQUIPO UTILIZADO DURANTE EL EXPERIMENTO

Se utilizó el mismo equipo que para la monitorización del comportamiento en continuo del atún rojo: una ecosonda ROVER de Knudsen Engineering junto con un transductor single-beam modelo SS264W de Airmar, que posee una haz con una apertura de 25° (@-3dB), una frecuencia de trabajo de 200 kHz. Dicha ecosonda trabajaba con una cámara de video IP SNC-CH210 de Sony preparada para poder sumergirse, colocada junto con el transductor de esta ecosonda. Todas las características de estos equipos pueden consultarse en la sección 4.1.2.2 de este capítulo. Para sumergirlos en la jaula se usó la plataforma construida y que se muestra en la Figura 4.4, colocada a la mitad de uno de los radios de la jaula y a 26 metros de profundidad. Para la realización de las medidas se empleó una potencia de transmisión 4 (la más alta que ofrece la ecosonda). Se usó una longitud de pulso de $62 \mu\text{s}$ y un intervalo entre pings de 50 ms. para así disponer de la mayor cantidad de ecos consecutivos procedentes de un mismo pez. Los datos fueron grabados sin aplicar la corrección TVG (time varied gain), pero con una ganancia analógica de 40 dB como nos recomendó el fabricante (como se explicó en el apartado 4.1.2.2).

Para este experimento se hizo uso, además, de otro transductor single-beam de 20° de apertura (@-3dB) DT4 de Biosonics, con una frecuencia de trabajo de 201 kHz, controlado por una ecosonda DT-X de Biosonics. Este transductor se colocó, sobre una tabla de madera, a la mitad del radio opuesto al que tenía instalado el transductor SS264W de Airmar junto con la cámara. De éste modo se tuvo monitorizada gran parte de la jaula durante el experimento. El equipo Biosonics fue utilizado de manera dorsal los dos primeros días del experimento y de manera ventral el último de ellos. En la Figura 4.18 puede verse un detalle de este transductor montado en la plataforma de madera donde se colocó tanto de manera dorsal como de manera ventral. Las características de este

transductor pueden consultarse en la Tabla 4.9. Este tipo de ecosondas requiere de un cable especial, por lo que se dispone de 106 metros de cable y debe calibrarse la ecosonda con esta longitud de cable; este trabajo fue realizado por el fabricante. Esta ecosonda se utilizó con nivel de fuente de 199.3 dB ref 1 μ Pa/1m, una duración de pulso de 0.1 ms y un intervalo entre pings de 50 ms.



Figura 4.18. Imagen del transductor DT4 single-beam de Biosonics montado en la plataforma antes de ser colocado de manera dorsal.

Tabla 4.9. Valores de la hoja de especificaciones del transductor single-beam DT4 de Biosonics.

<i>Parámetro</i>	<i>Valor calibración</i>
<i>Tipo</i>	Single-beam
<i>Nº serie</i>	DT4-44-200-1025-001
<i>f (kHz)</i>	201
<i>S_{Tx,v} (dB ref. 1 μPa/V)</i>	146.89
<i>S_{Rx} (dB ref. 1 V/μPa)</i>	-202.24
<i>NL (dB ref. 1 μPa)</i>	199.25
<i>θ_{3dB} (°)</i>	20

Para reproducir sonidos debajo del agua es necesario disponer de un proyector submarino con un ancho de banda lo suficientemente amplio para emitir las señales deseadas debajo del agua. Por esta razón, se solicitó a la Armada Española el préstamo de un proyector acústico que se utiliza para el adiestramiento de los buques de superficie, submarinos y helicópteros de lucha anti-submarina. Se trata de un proyector acústico GW155 MK.2 de Gearing & Watson Electronics, capaz de reproducir señales entre los 3 y los 9999 Hz y cuyo nivel puede variarse entre 90 y 168 dB ref. $1\mu\text{Pa}/1\text{m}$. El equipo se alimenta con una corriente alterna de 115 V, 60 Hz monofásica y consume una potencia de 715 W. El fabricante indica que el nivel máximo de salida es de 173 dB ref. $1\mu\text{Pa}/1\text{m}$. El proyector está formado por un generador digital de señales, un amplificador de potencia protegido contra sobrecargas, un transductor y compensadores para equilibrar la presión hidrostática y así mantener su rendimiento independientemente de la profundidad a la que se encuentre. El equipo puede trabajar con uno o dos compensadores, según la profundidad de trabajo. En nuestro caso fue suficiente con el uso de uno de ellos, ya que se trabajó a una profundidad aproximada de 10 metros. Se usó un bastidor de acero inoxidable para poder sumergir el sistema como se muestra en la Figura 4.19. Para poder utilizarlo en este experimento, fue necesaria la adaptación del sistema. Se desarrolló una aplicación informática que controlaba el sistema en sustitución del generador digital de señales. Para ello se implementó un nuevo generador de señales con ayuda de un ordenador, un generador de forma de onda arbitraria NI PXI-5412 de National Instruments de 14 bits de resolución y un rango de muestreo de 1000 MS/s. La adaptación del sistema requirió también una modificación de las conexiones para que tanto el emisor como dos hidrófonos fueran controlados desde la aplicación. De este modo fue posible reproducir señales de diferente tipo, tonos puros, señales de banda ancha y una grabación submarina del ruido generado por una turbina eólica y al mismo tiempo recoger la señal emitida a diferentes distancias.

El sistema, junto con el nuevo software que los controlaba y las adaptaciones de las conexiones realizadas para poder utilizarlo en este experimento fueron caracterizados en las instalaciones del Centro Tecnológico Naval y del Mar de Murcia (en el Parque Tecnológico de Fuente Álamo) durante los días 16 y 17 de julio de 2013. En dichas pruebas se analizó la directividad del transductor y su respuesta en frecuencia. Tras el análisis de los datos se concluyó que el equipo tenía un comportamiento omnidireccional por debajo de los 1000 Hz, haciéndose cada vez más directivo con el aumento de la frecuencia (Figura 4.20). El análisis de la respuesta en frecuencia demostró que se disponía de un rango de trabajo óptimo entre los 30 y los 8000 Hz, por encima de dicha frecuencia el rendimiento disminuía considerablemente (Figura 4.21). Se comprobó, además, que, aunque el sistema presentaba una respuesta óptima en frecuencia (plana en el rango de interés), cuando se emitían tonos puros.



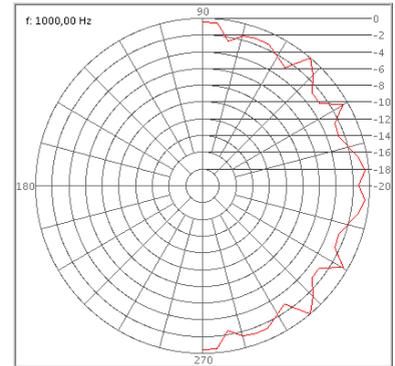
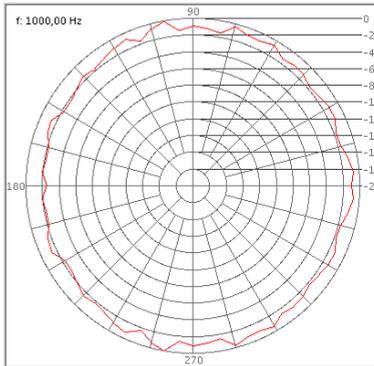
Figura 4.19. Imagen del proyector acústico submarino GW155 MK.2 de Gearing & Watson Electronics montado sobre el bastidor de acero. En la parte de abajo el transductor unido por un cable a uno de los compensadores colocado en la parte superior del bastidor.

Frec. (Hz)

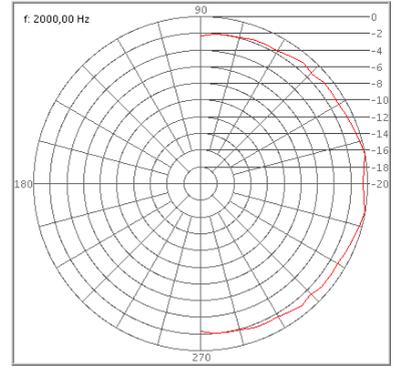
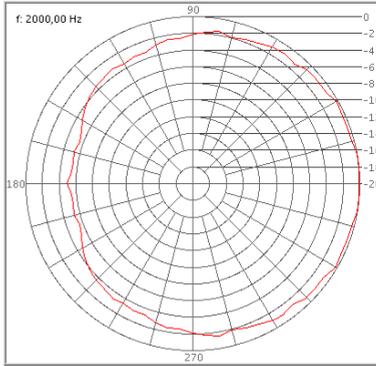
Distancia: 2m

Distancia: 4m

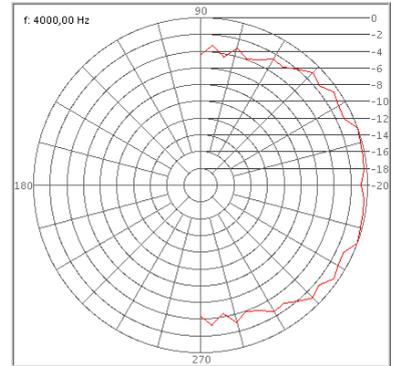
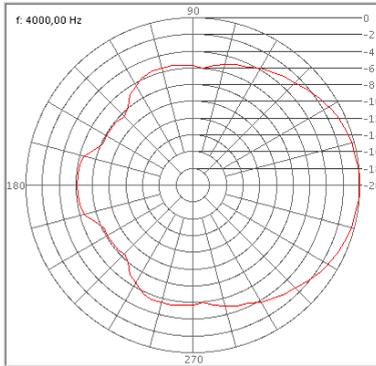
1000 Hz



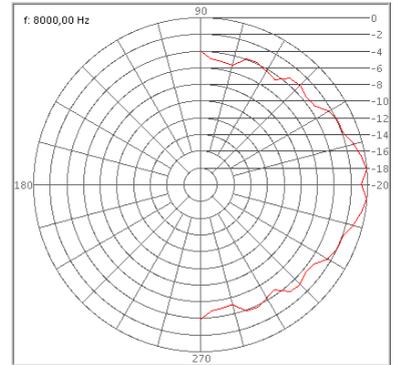
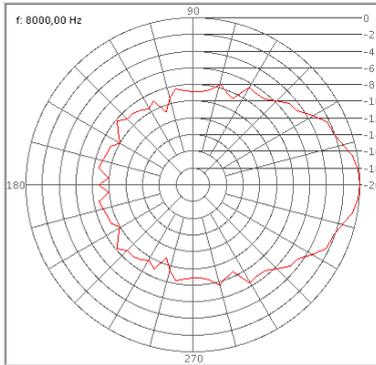
2000 Hz



4000 Hz



8000 Hz



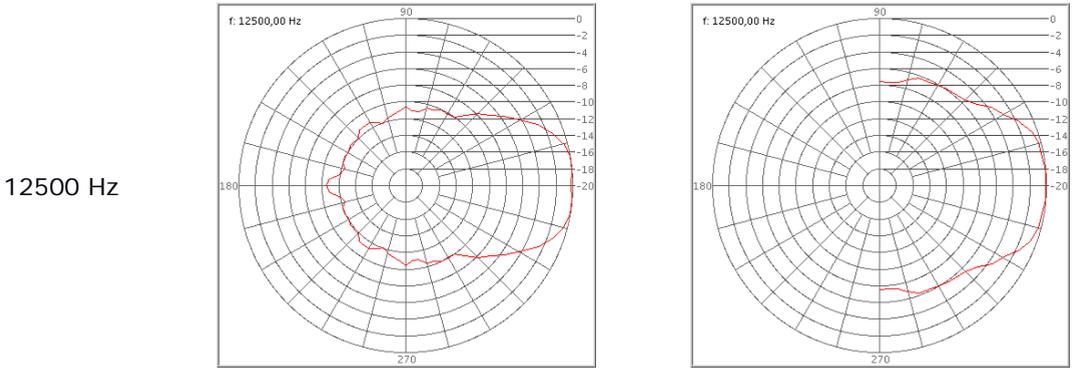
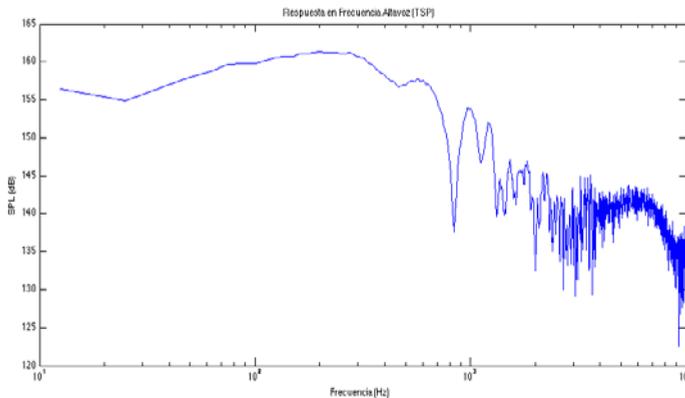


Figura 4.20. Representación de la directividad obtenida para el transductor del proyector acústico submarino GW155 MK.2 desde 1000 Hz (por debajo es omnidireccional) hasta los 12500 Hz, medida a 2 y a 4 metros.



Figura

4.21. Respuesta en frecuencia del proyector acústico submarino GW155 MK.2.

Se utilizaron dos hidrófonos calibrados para registrar la señal emitida a diferentes distancias, con la finalidad de controlar el nivel de las emisiones para que estas no pudieran perjudicar a los animales bajo estudio, y para tener una mayor comprensión de los resultados del experimento. Se utilizó un hidrófono ITC1032 (con una sensibilidad de -194 dB ref. 1V/ μ Pa con un rango de frecuencia entre los 10 Hz y los 50 kHz) y un hidrófono B&K 8103 (con una sensibilidad de -211 dB ref. 1V/ μ Pa con un rango de frecuencia entre los 0.1 Hz y los 180 kHz). El hidrófono ITC fue colocado a 25 metros de la fuente de ruido per a la misma profundidad, y el hidrófono B&K se colocó a 10 metros de la fuente. La señal de los hidrófonos fue amplificada usando un acondicionador de señal Nexus Signal Conditioner Type 2693 de B&K y se digitalizaron con un osciloscopio

NI PXI5102 de National Instruments con una frecuencia de muestreo de 44100 y 96000 muestras por segundo, todo ello controlado por el mismo ordenador que generaba las señales enviadas a la fuente de ruido. El nivel de presión (SPL) fue calculado como un promedio del nivel RMS de la señal capturada expresado en dB ref. 1V/ μ Pa para cada frecuencia.



Fuente: web de los fabricantes

Figura 4.22. Hidrófono B&K 8103 a la izquierda e hidrófono ITC-1032 a la derecha.

Para finalizar este punto hay que indicar que toda la tensión que necesitaba el sistema fue proporcionada por el sistema de baterías de la embarcación desde donde se controlaban todos los equipos, que permaneció amarrada a la jaula bajo estudio con los motores apagados durante todas las pruebas.

4.2.2.3. CONFIGURACIONES DE MEDIDA UTILIZADAS

Dos configuraciones fueron utilizadas durante el experimento. En la primera de ellas (Figura 4.23), se colocó la fuente de ruido fuera de la jaula colgada de la grúa del barco montada en su bastidor junto con compensador y se sumergió a 10 metros de profundidad, muy cerca de la red de la jaula. El barco se mantuvo amarrado al aro de superficie de la jaula J2 con los motores apagados. A 10 metros de la fuente y a la misma profundidad se colocó el hidrófono B&K 8103 y a 25 metros de la fuente y también a 10 metros de profundidad el hidrófono ITC-1032. Dentro de la jaula y en uno de los radios cercanos a la embarcación se sumergió el transductor SS264W de Airmar (controlado por la ecosonda ROVer de Knudsen) junto con la cámara Sony, justo en el radio opuesto se colocó en la superficie orientado hacia el fondo el transductor DT4 de Biosonics que sería controlado por la ecosonda DT-X de Biosonics.

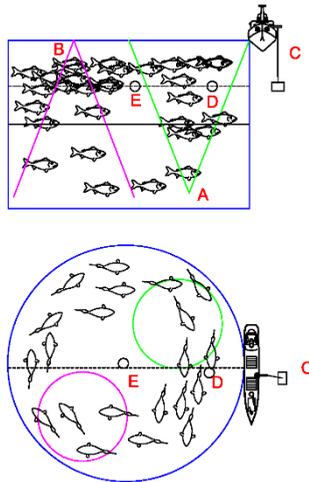


Figura 4.23. Esquema de la configuración 1. A: Transductor de Airmar (conectado a la ecosonda ROVer). B: transductor DT4 conectado a la ecosonda DTX de Biosonics. C: Proyector de ruido de la armada y barco desde donde se controla todos los equipos. D: Hidrófono B&K 8103 a 10 metros de la fuente y 10 metros de profundidad. E: Hidrófono ITC-1032 a 25 metros de la fuente y 10 metros de profundidad.

En la segunda configuración (Figura 4.24), todos los elementos se mantuvieron en el mismo punto excepto el transductor DT4 controlado por la ecosonda DT-X de Biosonics que se colocó a 26 metros de profundidad mirando hacia la superficie (como en el transductor de Aimar controlado por la ecosonda ROVer) en el mismo lugar donde antes estaba colocado en la superficie.

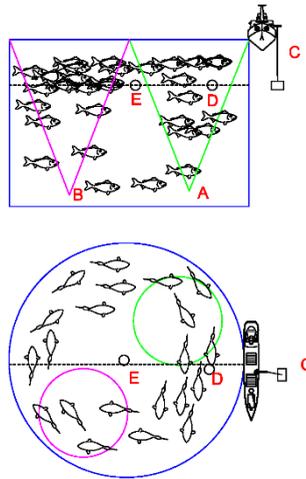


Figura 4.24. Esquema de la configuración 2. A: Transductor de Airmar (conectado a la ecosonda ROVer). B: transductor DT4 conectado a la ecosonda DTX de Biosonics. C: Proyector de ruido de la armada y barco desde donde se controla todos los equipos. D: Hidrófono B&K 8103 a 10 metros de la fuente y 10 metros de profundidad. E: Hidrófono ITC-1032 a 25 metros de la fuente y 10 metros de profundidad.



Figura 4.25. A la izquierda detalle del emisor siendo sumergido. El proyector en el bastidor sumergido a 10 metros (a la derecha).

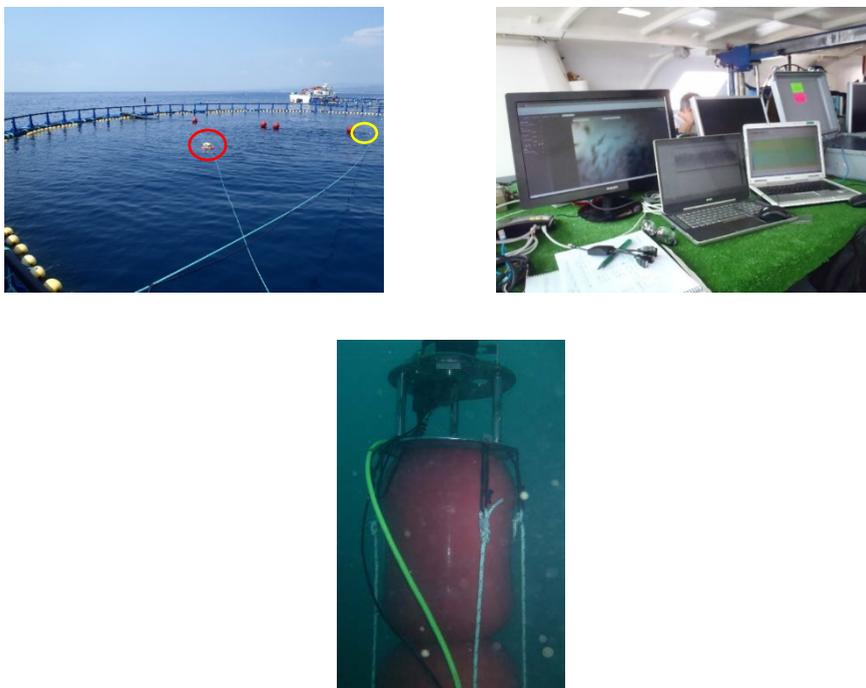
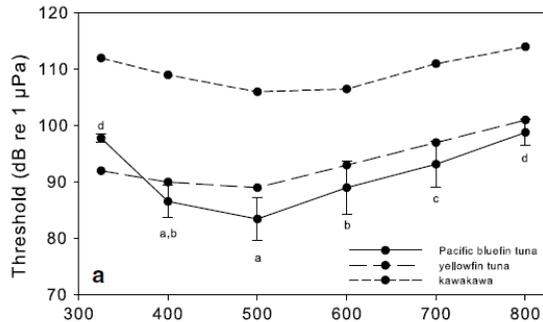


Figura 4.26. A la izquierda arriba detalle de del transductor Biosonics colocado en la superficie (rojo) y del hidrófono ITC colocada a 25 metros (amarillo). Arriba a la derecha imagen del barco de control y abajo imagen submarina del transductor Airmar y la cámara colocados a 26 metros de profundidad.

4.2.2.4. SEÑALES EMITIDAS DURANTE EL EXPERIMENTO

Este experimento se planteó para evaluar si el atún rojo (en estado de cautividad) presentaba algún tipo de reacción ante estímulos sonoros de baja frecuencia y en particular frente a una grabación submarina de un aerogenerador en modo de funcionamiento. Los sonidos antropogénicos (entre ellos los de un aerogenerador), tienden a ser de banda ancha y de baja frecuencia, en el rango de 10 Hz a 1 kHz, por lo que se solapan con los umbrales de sensibilidad de muchos peces. Algunos estudios demuestran que este tipo de infraestructuras generan altos niveles por debajo de los 10 Hz (Lindell, 2003; Tougaard *et al.*, 2009; Norro *et al.*, 2009).

En Junio de 2003 se llevó a cabo por el Georgia Institute of Technology un trabajo para determinar el umbral de audición del *Thunnus orientalis*, una especie muy similar al atún rojo (Popper *et al.*, 2013). En dicho estudio se evaluaron los umbrales de audición de 6 ejemplares de esta especie de un metro de longitud concluyéndose que para estos ejemplares de pequeño tamaño los umbrales de audición en términos de presión acústica y de aceleración de las partículas son las mostradas en la Figura 4.27.



Fuente: Popper et al. 2013

Figura 4.27. Umbrales medios de audición por frecuencias para el *Thunnus orientalis*. Los umbrales corresponden al nivel de presión sonora, los resultados se dibujan junto con los valores para el Yellowfin tuna (Iversen 1967) y para el Kawakawa (Iversen 1967).

Sarà *et al.* (2007) en sus estudios sobre cómo se comportan los atunes frente al ruido de algunos barcos mostraron que el atún rojo era sensible a estos sonidos de baja frecuencia emitidos por los barcos. Por ello, aunque el experimento fue concebido originalmente para evaluar el efecto producido en el comportamiento del atún rojo cuando se somete al ruido de una turbina de un aerogenerador marino, se decidió que fueran reproducidos durante el experimento otros tipos de ruidos para tener una mayor comprensión de las posibles reacciones de los atunes. El ruido del aerogenerador marino proporcionado previamente por los técnicos el IEO: dicha grabación fue realizada mediante un hidrófono sumergido a una distancia de 50 metros de la fuente. Tenía una duración de 30 segundos. El aerogenerador produce un ruido de banda ancha con niveles cercanos a los 120 dB ref. 1µPa desde los 30 a los 10000 kHz. El máximo nivel se encuentra a los 50 Hz (142 dB ref. 1µPa) como se puede apreciar en la figura 4.28.

Considerando los niveles de audición mostrados en la Figura 4.27 y los niveles generados por la fuente, se esperaba que los atunes pudieran presentar reacciones al ruido emitido,

sobre todo cuanto mayor fueran los niveles emitidos y más cercanos estuvieran al rangode frecuencias generadas por el atún, como una consecuencia probable de la contracción de la vejiga natatoria (Allen & Demer, 2003).

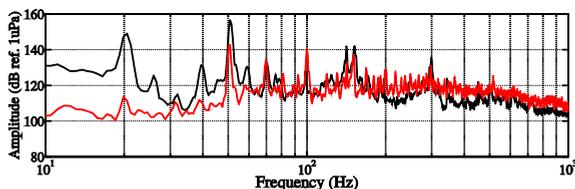


Figura 4.28. Emisión de la turbina grabado (en negro) y en rojo el nivel reproducido durante el experimento.

Las señales emitidas se clasifican en tres grupos: tonos puros, señales sintéticas de banda ancha y grabación del aerogenerador marino. El primer grupo estaba compuesto por tonos puros detallados en la Tabla 4.10, emitidos a una amplitud máxima (*SPL*) detallada en la misma tabla

Tabla 4.10. Frecuencias de tonos puros emitidas y niveles de las amplitudes máximas emitidas para cada uno de ellos.

Frecuencia (Hz)	30	50	100	150	200	300	500	1000	4000
Amplitud max (dB ref. 1V/µPa)	137	150	162	160	155	158	152	155	150

El segundo grupo está compuesto por señales sintéticas de banda ancha. Se conoce como ruido de banda ancha a una señal de ruido, cuya anchura de banda está limitada por medio de un filtro, que tiene una respuesta en amplitud/frecuencia definida y cuya anchura de banda es conocida. La descripción de las señales emitidas y su amplitud máxima es la siguiente:

- *MLS*: Maximum Length Sequence (MLS), secuencia de máxima longitud. Señal digital pseudo aleatoria en la que se producen todas las combinaciones posibles de bits durante un ciclo de repetición. Si se alimenta con esta señal un dispositivo y se calcula una correlación cruzada entre la salida y la entrada, el resultado es la respuesta impulso del dispositivo, lo que nos permite calcular el contenido de frecuencia. Se utiliza a menudo en medidas quasi-anechoicas. Se emitió con un nivel máximo de 125 dB.
- *TSP*: Time Stretched Pulse (TSP), es una de las señales tradicionales para la medida de la respuesta al impulso. Se la conoce también como “Barrido

sinusoidal”. Se trata de un barrido lineal en frecuencia a medida que aumenta el tiempo. Con emisiones de nivel máximo 150 dB.

- **CHIRP**: es una señal en la que la frecuencia crece (o decrece) con el tiempo. Comúnmente usada en sonar y radar. Con un nivel máximo de 140 dB.

El tercer y último grupo de señales se corresponde con la grabación del aerogenerador marino (Figura 4.28), la grabación del ruido de fondo existente en las instalaciones de engorde en ausencia de trabajo y del ruido generado por el barco durante la alimentación (Figura 4.29). A estas grabaciones se añade la del utensilio utilizado para el sacrificio de los atunes conocido como lupara. Se trata de una especie de fusil submarino que produce un ruido impulsivo de muy alto nivel (Figura 4.30) (Mylonas *et al.*, 2010).

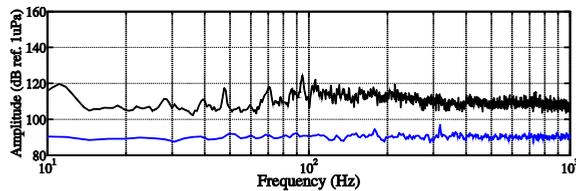


Figura 4.29. Ruido de fondo existente en la granja. En ausencia de trabajos (azul), y durante las maniobras de alimentación (negro).

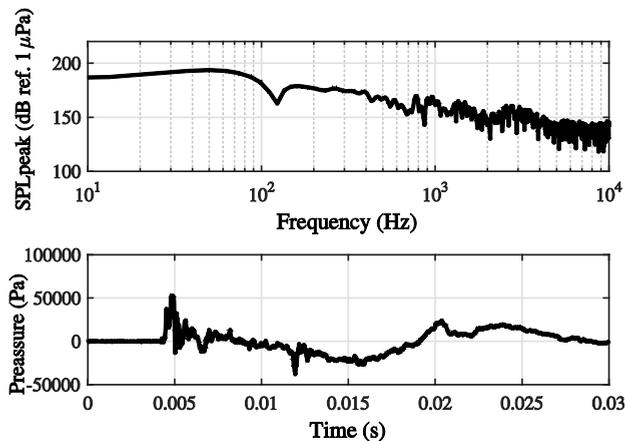


Figura 4.30. Ruido impulsivo de la Lupara usada para el sacrificio de los atunes (abajo) y su contenido espectral (arriba).

4.2.2.5. RECOGIDA, TRATAMIENTO Y ANÁLISIS DE LOS DATOS

El experimento se realizó durante los días 23, 24 y 25 de julio de 2013. Durante dichos días se sometió a los atunes a diferentes eventos sonoros como se detalla en las Tablas 4.11, 4.12 y 4.13. Se tomaron registros ventrales junto con imágenes con la ecosonda ROVer de Knudsen (formato KEB comprimido) y la cámara submarina Sony (formato AVI con compresión H264) durante los tres días. Con la ecosonda DT-X de Biosonics se tomaron medidas dorsales los días 23 y 24 y ventrales el día 25 que se guardaron en formato DT4. Durante la recogida de datos los motores del barco desde el que se manejaban los equipos estaban parados haciéndose uso de baterías como fuente de alimentación.

Tabla 4.11. Resumen de los eventos acústicos emitidos el día 23/7/2013. La duración de las emisiones fue de entre 10 y 15 segundos. Los niveles emitidos entre 140 y 165 dB ref. 1µPa.

<i>Evento</i>	<i>Señal emitida/Tensión de salida</i>	<i>Evento</i>	<i>Señal emitida/Tensión de salida</i>
1	1000 Hz / 0,1 V	19	250 Hz / 1 V
2	1000 Hz / 0,3 V	20	500 Hz / 0,1 V
3	1000 Hz / 0,5 V	21	500 Hz / 0,5 V
4	20 Hz / 0,1 V	22	500 Hz / 0,7 V
5	20 Hz / 0,5 V	23	500 Hz / 0,9 V
6	20 Hz / 0,7 V	24	1000 Hz / 0,1 V
7	20 Hz / 0,8 V	25	1000 Hz / 0,5 V
8	20 Hz / 0,9 V	26	1000 Hz / 0,7 V
9	50 Hz / 0,1 V	27	1000 Hz / 0,9 V
10	50 Hz / 0,5 V	28	1200 Hz / 0,9 V
11	50 Hz / 0,7 V	29	1200 Hz / 1,2 V
12	100 Hz / 0,1 V	30	aerogenerador /0,5 V
13	100 Hz / 0,5 V	31	aerogenerador /1,5 V
14	100 Hz / 0,7 V	32	aerogenerador /1,8 V
15	250 Hz / 0,1 V	33	aerogenerador /2 V
16	250 Hz / 0,5 V	34	aerogenerador /2 V
17	250 Hz / 0,7 V	35	1000 Hz / 1,2 V
18	250 Hz / 0,9 V		

Tabla 4.12. Resumen de los eventos acústicos emitidos el día 24/7/2013. La duración de las emisiones fue de entre 10 y 15 segundos. Los niveles emitidos entre 140 y 165 dB ref. 1µPa.

<i>Evento</i>	<i>Señal emitida/Tensión de salida</i>	<i>Evento</i>	<i>Señal emitida/Tensión de salida</i>
1	molino/1,5 V	22	6000
2	molino/1,3 V	23	500
3	19 Hz/1,2 V	24	aerogenerador /1,12 V
4	19 Hz/1,2 V	25	fondo
5	19 Hz/1,2 V	26	aerogenerador /1,12 V
6	50 Hz/1,2 V	27	aerogenerador /1,12 V
7	50 Hz/1,1 V	28	100 Hz/1,2 V
8	50 Hz/1,1 V	29	300-700/1V
9	300 Hz/1,1 V	30	300-700/2V
10	300 Hz/1,1 V	31	300-700/3V
11	300 Hz/1,1 V	32	300-700/5V
12	lupara	33	100 Hz/1,2 V
13	lupara	34	100-300 / 2V
14	TSP	35	100-300 / 2,5V
15	MLS	36	100 Hz/1,2 V
16	6000	37	300 Hz/1,2 V
17	400	38	50 Hz/1,2 V
18	6000	39	50 Hz/1,2 V
19	2000	40	50 Hz/1,2 V
20	chirp	41	50 Hz/1 V
21	chirp		

Tabla 4.13. Resumen de los eventos acústicos emitidos el día 25/7/2013. La duración de las emisiones fue de entre 10 y 15 segundos. Los niveles emitidos entre 140 y 165 dB ref. 1 μ Pa , excepto para el caso de las señales marcadas (*) que la duración fue de 15 minutos y el nivel emitido de 150 a 182 dB ref. 1 μ Pa.

<i>Evento</i>	<i>Señal emitida/Tensión de salida</i>	<i>Evento</i>	<i>Señal emitida/Tensión de salida</i>
1	50 Hz/1,2 V	15	50 Hz/2 V
2	50 Hz/1,5 V	16	50 Hz/2 V
3	100 Hz/1,8 V	17	1000 Hz/2,7 V
4	100 Hz/2 V	18	100 Hz/2 V
5	300 Hz/2 V	19	500 Hz/2,2 V
6	300 Hz/1,5 V	20	150 Hz/2 V
7	30 Hz/1,5 V	21	300 Hz/2,2 V
8	50 Hz/1,5 V	22	200 Hz/2,1 V
9	150 Hz/1,8 V	23	aerogenerador/2 V
10	4000 Hz/2,5 V	24	aerogenerador /3,3 V(*)
11	aerogenerador /1,5 V	25	aerogenerador /4V(*)
12	500 Hz/2 V	26	fondo
13	1000 Hz/2,5 V	27	aerogenerador /4V(*)
14	50 Hz/1,5 V		

Los datos registrados por ambas ecosondas fueron procesados mediante un programa en Matlab®, para ello los datos binarios procedentes de los archivos KEB y DT4 tuvieron que ser convertidos a un fichero de texto.

Una vez convertidos a un fichero de texto se aislaron los ecogramas relativos a cada uno de los eventos emitidos y se analizaron extrayendo los siguientes datos: la longitud media de las trazas, su inclinación y la relación entre la longitud media y el tiempo que dura la traza (que nos pueden facilitar información sobre la velocidad de nado), el centro de gravedad del banco, su profundidad máxima y mínima (que dan información sobre movimientos verticales del banco). Al igual que en el caso anterior (sección 4.1) se abordó el análisis desde un punto de vista cualitativo y no cuantitativo en lo que a los parámetros acústicos se refiere, no obstante, se aplicó el *TVG*, para compensar las pérdidas por propagación de la onda acústica debidas a la divergencia geométrica del haz y a la absorción del medio de propagación, de este modo, se eliminó la dependencia del nivel

de eco con la distancia al transductor. Se corrigió la velocidad del sonido que se introdujo de manera manual durante las medidas y se mantuvo fija durante todo el tiempo que duraron las medidas a partir de los datos ambientales que nos proporcionó la empresa, y se calculó el coeficiente de absorción exacto para cada día atendiendo a dichos datos ambientales.

El análisis de los resultados se afrontó desde las siguientes premisas:

- Los atunes se encontraban en estado de confinamiento y, por lo tanto, sus movimientos estaban limitados.
- La adaptabilidad de los peces a la cautividad. Ya que como se explica en la sección 4.1 de este capítulo los atunes presentaban reacciones asociadas al momento de la alimentación.
- La existencia en la granja de un elevado ruido ambiente derivado de los trabajos habituales en la misma. Los atunes se veían sometidos a estos estímulos sonoros día tras día desde su llegada a las instalaciones (incluso durante el proceso de transporte a las mismas desde el cerco), por lo que existía la posibilidad de que se hubiesen acostumbrado a determinados estímulos, en cuanto a lo que a frecuencia y nivel sonoro se refiere.

En la Figura 4.31 se muestran un par de ecogramas correspondientes a cada una de las ecosondas utilizadas junto con una imagen tomada con la cámara submarina en el mismo instante.

Por último, se analizaron los registros realizados con los dos hidrófonos (B&K 8103 y ITC-1032), para poder tener una referencia del nivel emitido en cada caso. Para ello se hizo uso de la señal registrada con los equipos descritos en el punto 4.2.2.2 y se realizó un análisis mediante Matlab ®.

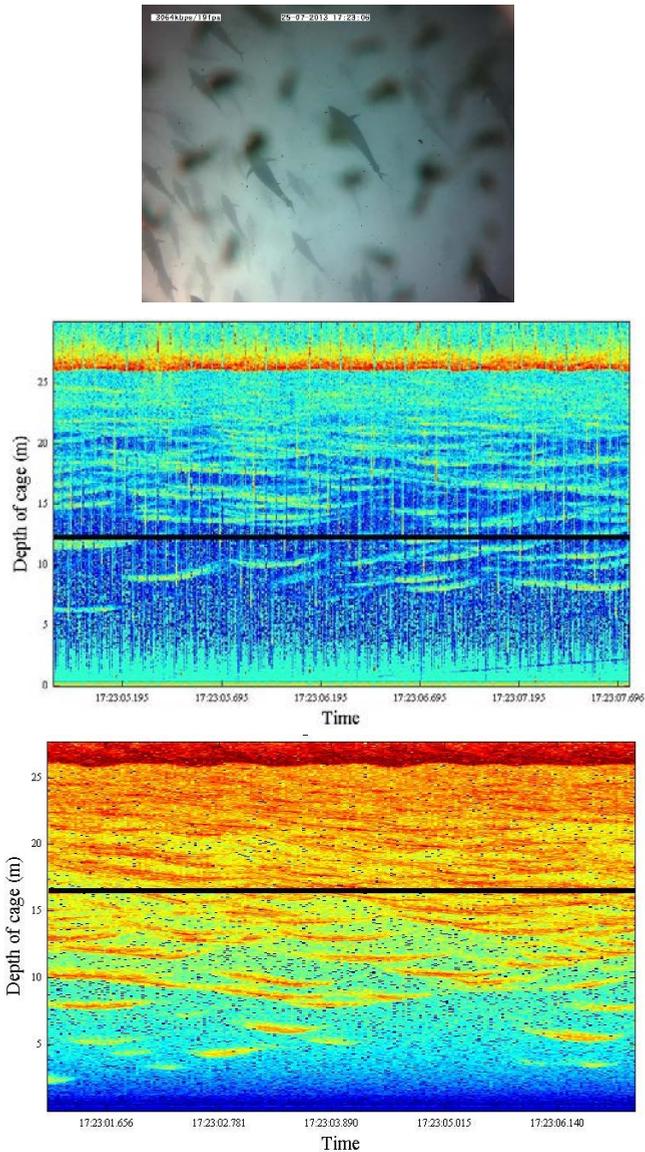


Figura 4.31. Ejemplo de imagen grabada con la cámara submarina Sony (arriba), un ecograma registrado con la ecosonda Biosonics (centro) y un ecograma de la ecosonda Knudsen (abajo). Datos del día 25/7/2013 con la configuración de medida 2 en la que se realizan grabaciones desde el punto de vista ventral, por ello la detección roja intensa de la parte superior de los ecogramas se corresponde con la superficie.

4.2.3. RESULTADOS

En la sección 4.1 del presente capítulo se detalla cómo se comporta el atún rojo cuando está confinado en jaulas de engorde. Para caracterizar dicho comportamiento, se analizaron tres variables: el patrón de nado, los cambios en la dirección de nado y por último el centro de masas del banco (así como la profundidad mínima y máxima del mismo). Como se indica en el apartado 4.1.3, el banco nada formando un patrón circular cerca de las paredes de la jaula. Como se había observado en trabajos anteriores (*Sarà et al.*, 2007), la profundidad del banco presenta variaciones entre el día y la noche. Este comportamiento se observa repetidamente durante los meses que dura el estudio, encontrándose una diferencia media de 2.9 metros entre la profundidad diurna y nocturna. Se pudo constatar también, que los atunes reaccionaban de una manera determinada durante el proceso de alimentación (llegada del barco que los alimenta, maniobras para colocar la carnada en la jaula y momento en el que se aleja la embarcación (Figura 4.15)). Es conocido que esta especie presenta reacción frente al ruido de embarcaciones como explican *Sarà et al.* en su trabajo sobre el comportamiento del atún rojo frente a ruidos de barcos; este hecho sugiere la posibilidad de reacciones (similares o distintas a las encontradas por dichos autores) cuando los atunes sean sometidos a diferentes estímulos sonoros que no les son familiares.

Se presentan a continuación los resultados obtenidos al someter a atunes enjaulados en una instalación de engorde a diferentes estímulos sonoros: tonos puros, ruidos de banda ancha, grabaciones de ruidos impulsivos y del estado operacional de un aerogenerador marino. En el momento de las medidas la empresa propietaria de las instalaciones nos autorizó a realizar el experimento si se cumplían dos premisas: que éste no durara más de tres días, y que no se excedieran los niveles sonoros máximos a los que los peces son sometidos con los trabajos que se desarrollan habitualmente en la granja. Con estas condiciones se pretendía evitar un posible estrés acumulativo que pudiera afectar a la calidad de la carne del atún, y en caso que esto ocurriese y fuese confirmado por los indicadores fisiológicos que testan la calidad de la carne de los atunes, existiese suficiente tiempo de recuperación para los peces, de tal modo que en el momento del sacrificio su calidad para la venta fuera la óptima.

Para poder asegurar que los niveles sonoros máximos no serían superados, se realizaron grabaciones del ruido del barco mientras alimentaba los atunes (Figura 4.29) y del ruido impulsivo generado por la lupara durante el sacrificio (Figura 4.30). Dichos niveles fueron tomados como referencia de nivel máximo para las emisiones de los diferentes eventos sonoros del experimento.

Los primeros ensayos con tonos puros tenían como objetivo evaluar si existía algún tipo de reacción de pánico que pudiera comprometer la seguridad de los animales, y al mismo tiempo investigar si existía algún tipo de cambio de comportamiento asociado a

frecuencias relevantes en la curva de audición presentada para especies similares (Popper *et al.*, 2013), cuyo máximo se encuentra alrededor de los 500 Hz.

Durante el primer día de ensayos (23-07-2013), se emitieron los eventos sonoros detallados en la Tabla 4.11. La duración de dichas emisiones fue de 10 segundos para los tonos puros y de 15 segundos para los ruidos de banda ancha incluidas las grabaciones del aerogenerador marcadas en la tabla. En la Figura 4.32 se puede apreciar la variación de los límites superior e inferior del banco, así como la del centro de masas durante las emisiones de los diferentes eventos.

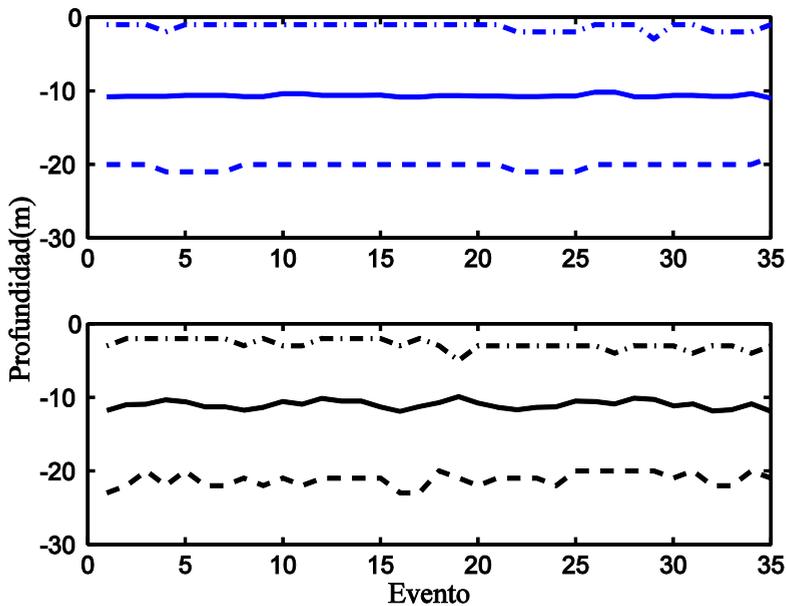


Figura 4.32. Variación de los límites inferior, superior y del centro de masas durante las emisiones del día 23/7/2013. Arriba valores registrados por la ecosonda Knudsen desde el punto de vista ventral. Abajo valores registrados por la ecosonda Biosonics desde el punto de vista dorsal.

Se puede apreciar en la Figura 4.32 que desde el punto de vista ventral (ecosonda Knudsen, grafica superior) apenas existen variaciones en los límites inferior y superior del banco. No obstante, se aprecian algunas variaciones para el evento 4 (tono puro de 20 Hz, cuyo nivel de emisión aumenta en los eventos 5 al 8). Se observa un pequeño cambio en el límite superior para el evento 4 y en el límite inferior desde el evento 4 al 8. Estos ligeros cambios vuelven a observarse para el evento 21 al 25, que se corresponde con la emisión de tonos de 500 y 1000 Hz aumentando de nivel en cada evento, el banco desciende en este caso y asciende de nuevo tras la emisión de estos tonos. A partir del evento 29 (tono 1200 Hz, nivel alto) se produce una contracción del banco alejándose de la superficie y la inestabilidad se mantiene durante la emisión del resto de eventos del 30 al 34 en los que se reproduce la grabación del aerogenerador durante intervalos de 15 segundos aumentando el nivel. Si nos fijamos en la gráfica inferior de la misma figura, que representa los registros desde el punto de vista dorsal de la ecosonda Biosonics, se aprecia mayor inestabilidad en el banco durante todo el ensayo. Durante los primeros eventos el límite inferior se acerca a la superficie de manera progresiva durante la emisión de los primeros eventos (tonos de 1000 Hz), provocando un movimiento contracción y dilatación del banco durante la emisión de tonos de 20 y 50 Hz. El banco vuelve a mostrar variaciones con la emisión de tonos de 250 Hz de nivel suficiente (evento 16) y se contrae hasta 3 metros durante las emisiones de los tonos de 500 y 1000 Hz (eventos del 20 al 29). Como en el caso de las medidas de ventrales, durante las emisiones de la grabación del aerogenerador a intervalos de 15 segundos el banco presenta mucha inestabilidad contrayéndose y expandiéndose.

Para disponer de más información se evalúan además para cada intervalo la longitud media de las trazas su ángulo de inclinación y se estima la velocidad de nado a partir de longitud y de la duración de las trazas. Las trazas se aíslan de manera manual, y se detecta para cada una de ellas el perfil de máximos. Dicho perfil de máximos es ajustado mediante un polinomio de grado 5 para obtener la longitud de la traza. Después, el mismo perfil de máximos es ajustado linealmente para obtener la inclinación de la misma. Finalmente se relaciona la longitud de la traza con el tiempo que dura la misma, esta relación nos ofrece una estima de la velocidad. Dicha estimación no atiende a parámetros exactos, ni puede cuantificarse como se hace en el sistema internacional (m/s), se trata únicamente de una aproximación cualitativa ante la imposibilidad de mediciones más exactas por las características de los equipos y las condiciones del experimento. Además, no pretende aportar información sobre el aumento o descenso de la velocidad, sino constatar cambios en la misma. Todos estos cálculos se realizan con los datos que nos proporciona la ecosonda DT-X de Biosonics, ya que, se trata de un equipo científico calibrado por el fabricante antes de su uso.

En la Figura 4.33 se puede apreciar una traza aislada, en negro sobre ella el ajuste polinómico que nos ayuda a obtener la longitud de la traza, y en blanco el ajuste lineal a partir del cual se calcula la inclinación de la misma. Solo en ángulo de inclinación tendrá

dimensiones en grados, tanto la longitud como la relación utilizada para estimar la velocidad serán adimensionales.

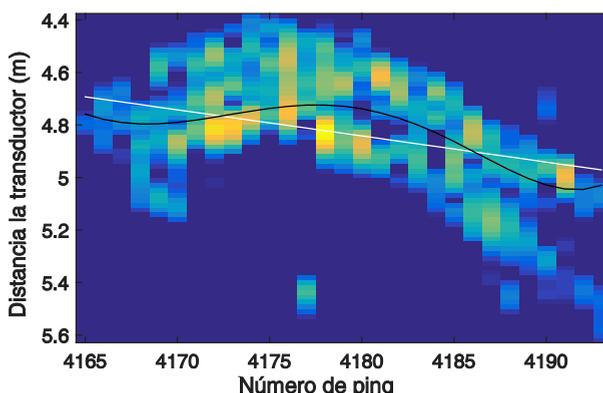


Figura 4.33. Ejemplo de traza aislada. En negro el ajuste usado para el cálculo de la longitud (103.2). En blanco el ajuste lineal que nos da la inclinación de la traza (4.8°). La relación longitud de la traza frente a la duración de la misma nos da un factor 19.2.

Atendiendo a estos parámetros y fijándonos en la Figura 4.32, podemos indicar que, como se muestra en la Tabla 4.14 se produce un cambio en la inclinación de las trazas aumentando su duración, coincidiendo en el momento en el que el banco se vuelve inestable. En los eventos del 12 al 14, atendiendo a la gráfica inferior de la Figura 4.32 el banco se eleva hacia la superficie y se estabiliza por un tiempo, como se aprecia en la tabla el valor negativo de la inclinación nos confirma dicho movimiento vertical hacia la superficie, y la disminución de la relación entre la longitud de la traza y el tiempo que dura la misma confirman un nado a menor velocidad. En los eventos del 15 al 19 la longitud de las trazas disminuye y la velocidad varía, la inclinación media indica un descenso del banco hacia el fondo de la jaula. Del mismo modo ocurre con las emisiones de 500 Hz. Sin embargo, durante las emisiones de tonos de 1000 el banco vuelve a subir, para volver a descender y volverse inestable durante las emisiones de la grabación del aerogenerador. Estos parámetros, aunque con valor únicamente cualitativo, confirman lo mostrado por las gráficas de la Figura 4.32.

Tabla 4.14. Resumen de los parámetros medios para los eventos acústicos emitidos el día 23/7/2013.

<i>Evento</i>	<i>Señal emitida</i>	<i>Longitud media</i>	<i>Inclinación media</i>	<i>Velocidad media</i>
<i>1 al 3</i>	1000 Hz	55.9	0.98	47.3
<i>4 al 8</i>	20 Hz	73.9	0.75	39.7
<i>9 al 11</i>	50 Hz	84.6	0.4	34.9
<i>12 al 14</i>	100 Hz	78.1	-0.5	33
<i>15 al 19</i>	250 Hz	69.2	1.6	38.8
<i>20 al 23</i>	500 Hz	83.5	3.4	36.9
<i>24 al 27</i>	1000 Hz	76	- 2.8	38.6
<i>28 al 29</i>	1200 Hz	89.4	3	33.8
<i>30 al 34</i>	aerogenerador	101.2	3.8	30.5

En el segundo de los días se emitieron los eventos mostrados en la Tabla 4.12 (24-07-2013). Al igual que durante el día anterior dichas emisiones fueron de corta duración (10 segundos para los tonos puros y de 15 segundos para los ruidos de banda ancha y la grabación del aerogenerador).

En la Figura 4.34, se puede observar que, desde el punto de vista ventral (ecosonda Knudsen, grafica superior) los atunes presentan ligera inestabilidad desde el comienzo de las emisiones, pero es a partir del evento 6 (tono de 50 Hz) cuando el banco desciende como se aprecia en los límites superior e inferior para dichas emisiones. El banco parece recuperarse, pero vuelve a alejarse de la superficie al reproducir el ruido de la lupara (usada en el sacrificio, evento 12). A partir de ese momento el banco se vuelve muy inestable con continuas expansiones y contracciones, mientras se emiten diferentes ruidos de banda ancha alternados con tonos de alta y baja frecuencia. Se produce una cierta relajación del banco desde el evento 29 en el que se emiten ruidos de banda limitada. La inestabilidad aparece de nuevo con la emisión de tonos de baja frecuencia y se hace máxima con tonos de 50 Hz y alto nivel. Si nos fijamos en la gráfica inferior (grabaciones dorsales), se repite la tendencia, el banco se vuelve inestable desde el comienzo de las emisiones siéndolo mucho más desde el evento 6 y alcanzando máxima inestabilidad con la reproducción de la lupara (evento 12). A partir de ese momento el banco continúa expandiéndose y contrayéndose de tal manera que con la emisión de los tonos de baja frecuencia (evento 36 en adelante) el banco se repliega al máximo pasando de ocupar 19 metros en la vertical a ocupar solo 13.

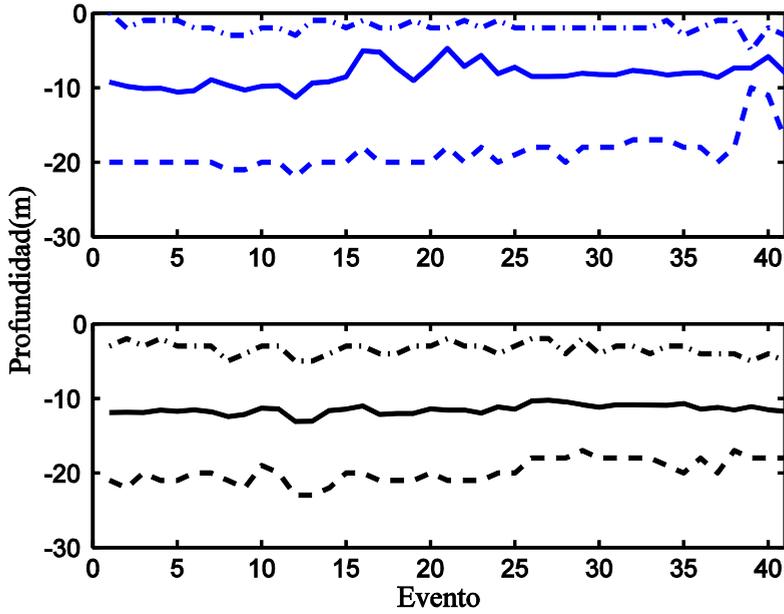


Figura 4.34. Variación de los límites inferior, superior y del centro de masas durante las emisiones del día 24/7/2013. Arriba valores registrados por la ecosonda Knudsen desde el punto de vista ventral. Abajo valores registrados por la ecosonda Biosonics desde el punto de vista dorsal.

Tabla 4.15. Resumen de los parámetros medios para los eventos acústicos emitidos el día 24/7/2013.

<i>Evento</i>	<i>Señal emitida</i>	<i>Longitud media</i>	<i>Inclinación media</i>	<i>Velocidad media</i>
1 al 2	aerogenerador	96	1.9	34.7
3 al 5	19 Hz	105	2.8	32.9
6 al 8	50 Hz	104.8	2.5	32.6
9 al 11	300 Hz	96.5	3	36.6
12 al 13	lupara	91.8	4.8	35.5
14 al 15	TSP/MLS	81.6	-5.1	40
16 al 19	6000/400/2000 Hz	98	3.6	34.4
20 al 21	CHIRP	93.7	4.5	33.9
22 al 23	6000/500 Hz	98.3	4.4	32.8
25	fondo	100	- 4.1	30.8
26 al 27	aerogenerador	96.5	3.6	30.6
29 al 35	300-700/100-300 Hz	101.9	3.1	29.1
36 al 37	100/300 Hz	99.8	4.4	30.1
38 al 41	50 Hz	94.6	3.5	31.4

Comparando los valores mostrados en la Tabla 4.15 y con lo observado en la Figura 4.34 (gráfica inferior), se constata que existe inestabilidad en el banco por los cambios de inclinación y duración de las trazas. Esa inclinación se vuelve muy alta en el evento 12 (lupara) cuando el banco presenta el máximo descenso y se torna máxima coincidiendo con el evento 14 (ruido de banda ancha) cuando el banco se eleva hacia la superficie bruscamente (por eso el valor negativo de la inclinación). El banco parece relajarse y volver a elevarse hacia la superficie mientras se realiza un descanso en el que no se reproduce ningún sonido (evento 25), se puede apreciar de nuevo una pendiente elevada y negativa, y un aumento de la duración de las trazas que nos indica que los peces permanecen durante más tiempo dentro de la zona de cobertura del haz debido al nado inclinado, de ahí una aparente disminución de la velocidad. Seguidamente el banco parece volverse de nuevo inestable con cambios de más de un grado de pendiente que evidencian contracciones y expansiones del banco. No puede inferirse de los datos mostrados en la Tabla 4.15 que el banco se contrae más de 6 metros desde el evento 25 y no vuelve a recuperar su máxima extensión en la vertical, no obstante, estos datos nos ayudan a corroborar lo mostrado en la Figura 4.34.

Finalmente se muestran los datos tomados durante el tercer y último día de experimentos (25-07-2013). Las medidas realizadas este día cuentan con dos particularidades, la primera es que se hace uso de la configuración 2, en la que el transductor Biosonics se coloca en el fondo de la jaula (tomando medidas ventrales de los atunes) como ha estado durante el resto de día el transductor Airmar. La segunda, es que se realizan emisiones de la grabación del aerogenerador de larga duración (15 minutos) y mayor nivel. En la Figura 5.35 podemos ver los gráficos de ambas ecosondas donde se muestran las variaciones de los límites inferior y superior del banco y de su centro de masas.

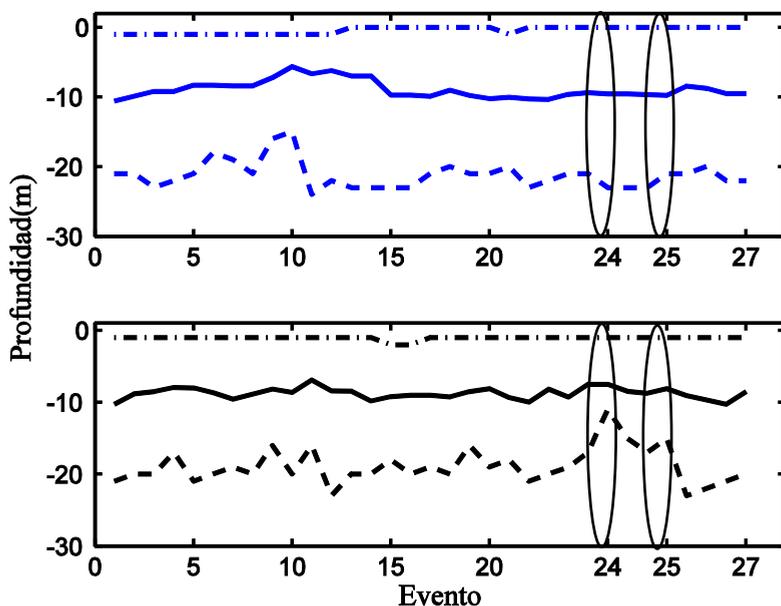


Figura 4.35. Variación de los límites inferior, superior y del centro de masas durante las emisiones del día 25/7/2013. Arriba valores registrados por la ecosonda Knudsen desde el punto de vista ventral. Abajo valores registrados por la ecosonda Biosonics desde el punto de vista ventral. Las elipses negras se refieren a los eventos 24 y 25 respectivamente.

Si nos fijamos en la Figura 4.35, ahora ambas gráficas representan grabaciones ventrales del comportamiento de los atunes, con la salvedad que el transductor Airmar controlado por la ecosonda Kundsén está más cerca de la fuente de ruido, mientras que el transductor Biosonics está en el radio opuesto. Observando la gráfica superior de la Figura 4.35, podemos ver que el banco parece contraerse y expandirse desde el comienzo de las emisiones, como ya ocurría en los días anteriores. Los movimientos más bruscos coinciden con el evento 3 (tono de 100 Hz), el evento 6 (300 Hz), el 8 (50 Hz) el 10 (4000 Hz) y el 11 (reproducción del aerogenerador de 15 segundos). A partir de ese momento el banco se estabiliza ligeramente hasta el evento 18 que comienza con emisiones de tonos de baja frecuencia (100 Hz). Los últimos eventos emitidos se corresponden con emisiones de larga duración de la grabación del aerogenerador (15 minutos), que en la ecosonda Knudsen se registran como ligeras inestabilidades del banco (zonas marcadas en la gráfica con elipses negras). La ecosonda Biosonics ofrece datos más claros para los mismos eventos, el evento 4 (tono de 100 Hz), el evento 9 (150 Hz), el evento 11 (reproducción del aerogenerador de 15 segundos) y el evento 12 (500 Hz) ofrecen los puntos de mayor contracción o expansión del banco con diferencias de hasta 7 metros. Las inestabilidades no cesan durante la emisión de los siguientes eventos pero se hacen muy pronunciadas para los eventos 24 y 25 cuando se reproduce la grabación del aerogenerador durante 15 minutos, en este caso el banco se contrae al máximo (hasta de 12 metros), para pasar a ocupar toda la vertical de nuevo durante el tiempo de descanso en el que no se emite ningún estímulo sonoro (fondo); replegándose ya mínimamente con la última emisión de larga duración del aerogenerador, lo que puede indicar que, o bien se han acostumbrado a dicho sonido, o bien es necesario un estímulo más prolongado tras el descanso de una hora para generar la misma respuesta. No obstante las emisiones del aerogenerador (tanto de larga como de corta duración) serán abordadas en los siguientes puntos de esta sección.

Para completar el estudio de los datos recogidos el día 25-07-2013, debemos fijarnos en la Tabla 4.16. Al encontrarnos en el punto de vista opuesto las inclinaciones negativas nos indicaran descensos del banco y las positivas subidas hacia la superficie. El evento 4 muestra una subida del banco como se aprecia en la gráfica inferior de la Figura 4.35. Los eventos 5 y 6 muestran una contracción del banco pero más ligera, esta crece con el evento 9, el banco se expande en el evento 10 (inclinación negativa) y vuelve a contraerse en el 11 y a expandirse en el 12 como muestran sus valores de inclinación media. Durante todas estas emisiones la longitud media de las trazas y su relación con el tiempo que tardan en atravesar la zona de cobertura del haz acústico no deja de variar, lo que contribuye a confirmar la inestabilidad del banco durante los ensayos. Es relevante lo que ocurre para el evento 24 y 25 donde se producen contracciones del banco muy elevadas, y también para el evento 26 que provoca una expansión del mismo frente a la ausencia de estímulos.

Tabla 4.16. Resumen de los parámetros medios para los eventos acústicos emitidos el día 25/7/2013.

<i>Evento</i>	<i>Señal emitida</i>	<i>Longitud media</i>	<i>Inclinación media</i>	<i>Velocidad media</i>
1 al 2	50 Hz	45.9	-0.05	23.6
3 al 4	100 Hz	40.5	1.1	24.8
5 al 6	300 Hz	124	0.25	14.6
7 al 8	30/ 50 Hz	63.2	-0.9	19.5
9	150 Hz	36.1	0.6	26.4
10	4000 Hz	43.5	-0.9	21.3
11	aerogenerador 15''	34.2	1.13	28.4
12	500 Hz	29.3	-1.5	32
13 al 22	1000/50/100/500/150 200/300 Hz	44.6	0.06	23.4
24	aerogenerador 15'	32	4.6	34
25	aerogenerador 15'	33.4	-0.4	29
26	fondo	54.1	-4.7	20.5
27	aerogenerador 15'	41.9	0.5	24.5

4.2.3.1. REACCIÓN A LAS GRABACIONES DEL AEROGENERADOR DE CORTA DURACIÓN

A la vista de los resultados mostrados, se puede deducir que los peces reaccionan a los diferentes estímulos sonoros mostrando comportamientos de “evitación” de la fuente de ruido, con desplazamientos verticales que alejan a los atunes de la fuente (Popper *et al.*, 2009; Thomsen *et al.*, 2006).

Para ilustrar como les afecta el ruido de un aerogenerador marino en estado operacional se realizaron emisiones de corta y de larga duración del mismo. Estas emisiones de corta duración durante los dos primeros días no mostraron particularidades respecto al resto de eventos emitidos, tal vez por el poco tiempo de descanso entre los sucesivos estímulos. El tercer día del experimento, se realizó una de estas emisiones de corta duración con un tiempo de descanso precedente (evento 11 de la Tabla 4.16), encontrándose cambios cualitativos frente a lo que se había observado en los días anteriores. El resultado se representa en la Figura 4.36, los atunes son sometidos a la grabación del aerogenerador y se desplazan hacia la superficie contrayéndose el banco, con una maniobra clara de

evitación de la fuente sonora. Cuando el ruido cesa, el banco recupera la distribución original en la jaula ocupando gran parte de la vertical.

El último día de los experimentos, tras comprobarse por parte de la empresa que no se estaba produciendo ningún cambio en los indicadores fisiológicos de los atunes por estar sometidos a los continuos estímulos sonoros, se nos autorizó a elevar el nivel de emisión, para poder constatar si se repetía esta reacción al ruido del aerogenerador de corta duración. De este modo, pasamos de emisiones de niveles de entre 140-165 dB a emisiones entre 150-182 dB; pero en ningún caso se encontraron reacciones tan claras al ruido del aerogenerador como la descrita en este punto. No obstante, a la vista de las figuras anteriores si se puede apreciar que la reacción al estímulo existe.

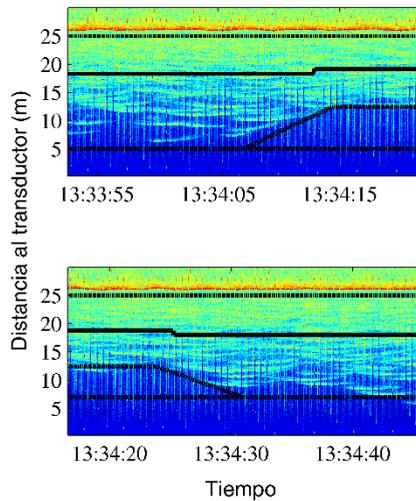


Figura 4.36. Ecograma correspondiente a la reacción mostrada con la emisión de la grabación del aerogenerador durante 15 segundos, con niveles de presión sonora entre los 110 y los 145 dB. Los atunes se mueven hacia la superficie (arriba) y recuperan la distribución original (debajo). Los ecogramas se toman desde el punto de vista ventral, por lo que la detección fuerte en color rojo de la parte superior de ambos ecogramas se corresponde con la superficie.

4.2.3.2. REACCIÓN A LAS GRABACIONES DEL AEROGENERADOR DE LARGA DURACIÓN

Durante el día 25 de julio, se realizaron emisiones de la grabación del aerogenerador de 15 minutos de duración, tras obtener el beneplácito de la empresa, dichas emisiones se realizaron con niveles de presión sonora entre 150 y 182 dB ref. $1\mu\text{Pa}$. Durante la primera

de las emisiones (evento 24 del día 25-07-2013), el comportamiento de los atunes comenzó a alterarse a partir de los 8 minutos de emisión del ruido en continuo; mostrando los peces dicho comportamiento hasta el fin de la emisión. La reacción puede ser descrita atendiendo a tres variables:

- La profundidad máxima del banco: pocos minutos después de comenzar con la emisión del ruido, el banco se desplaza hacia la superficie, contrayéndose el banco, cuando el ruido cesa el banco recupera su distribución original (Figura 4.37).
- La forma del patrón de nado y su posición: los atunes se agrupan y nadan muy cerca los unos de los otros formando un banco que describe un patrón circular pero con un radio más pequeño, que solo ocupa la mitad de la jaula (Figura 4.38). Se observó desde el barco de control (donde se manejaban los equipos) que pocos atunes cruzaban una de las ecosondas que tenía operando junto a ella una cámara de video (ecosonda Kundsén) y que se encontraba más cerca de la fuente de ruido que la otra (Figura 4.39).
- Dirección de nado: durante los minutos posteriores a la emisión del ruido, algunos atunes nadan en dirección opuesta al resto del banco. Se analizan intervalos de cinco minutos antes y después de la emisión del ruido. Durante los intervalos analizados antes de la emisión del ruido ningún atún cambia la dirección de nado respecto a la del banco. Sin embargo, durante la emisión de la grabación del aerogenerador, al menos 15 atunes son detectados nadando en dirección opuesta a la del resto, con una gran velocidad, según se puede apreciar en las imágenes de video.

Tras 30 minutos de descanso, los atunes han recuperado su comportamiento habitual y son expuestos a nueva emisión de 15 minutos de la grabación del aerogenerador. En este caso los atunes muestran la misma reacción descrita anteriormente, pero tardan un poco más en reaccionar al ruido (alrededor de 11 minutos). Tras más de una hora de descanso para que los peces se recuperen, se vuelve a repetir la emisión por tercera vez, pero tras los 15 minutos de exposición los atunes no muestran una reacción tan acusada, aunque sí puede apreciarse una contracción del banco.

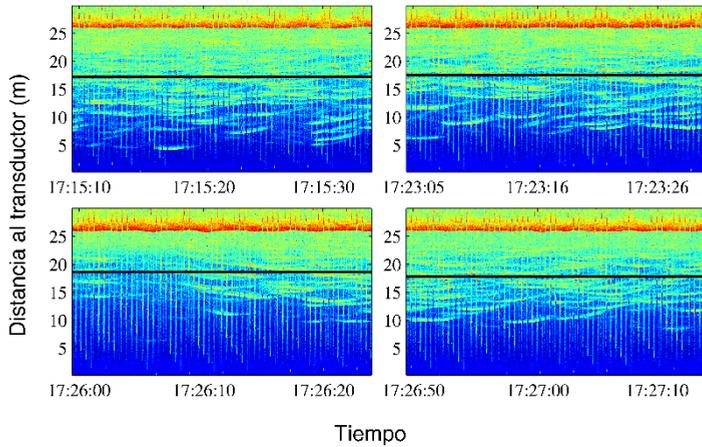


Figura 4.37. Ecogramas que muestran la evolución de la profundidad media del banco y de sus límites inferior y superior, durante la emisión de larga duración del ruido del aerogenerador. Hay que destacar la ausencia de trazas de atunes en la imagen de abajo a la izquierda.

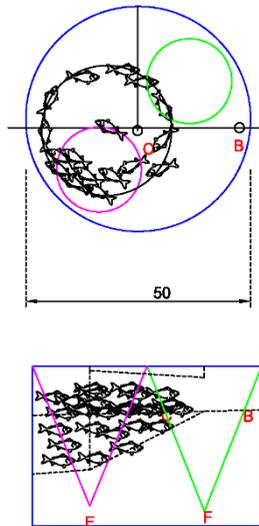


Figura 4.38. Imagen que ilustra la reducción del patrón de nado de los atunes y su acercamiento a la superficie. Se corresponde con la configuración 2. F: Transductor de Airmar (ROVer). E: Transductor DT4 (DTX de Biosonics). B: Hidrófono B&K 8103. O: Hidrófono ITC-1032.

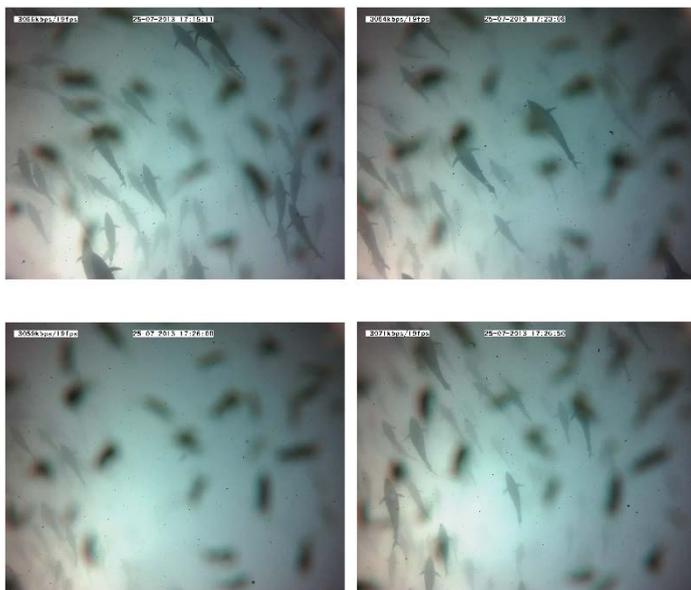


Figura 4.39. Imágenes grabadas durante una emisión de larga duración. La ausencia de atunes puede comprobarse en la imagen de abajo a la izquierda. Los atunes están parcialmente enmascarados por la presencia de copépodos en la lente de la cámara.

4.2.4. CONCLUSIONES

Los atunes han sido expuestos a diferentes estímulos sonoros que han provocado en ellos reacciones parecidas con diferente grado de afectación. Durante los dos primeros días se ha constatado como los atunes reaccionan a los tonos de diferentes frecuencias con cambios en su posición vertical y variaciones de su velocidad de nado. Los niveles de emisión máximos durante estos dos días (140-165 dB ref. 1 μ Pa) han permitido verificar una reacción asociada a estímulos de origen antropogénico. El comportamiento en este caso se corresponde con lo que describen algunos autores como un estado de alarma, en el que la actividad del banco aumenta y el banco se cierra y se expande de manera repetida (Wahlberg, 1999; Popper & Schilt, 2008).

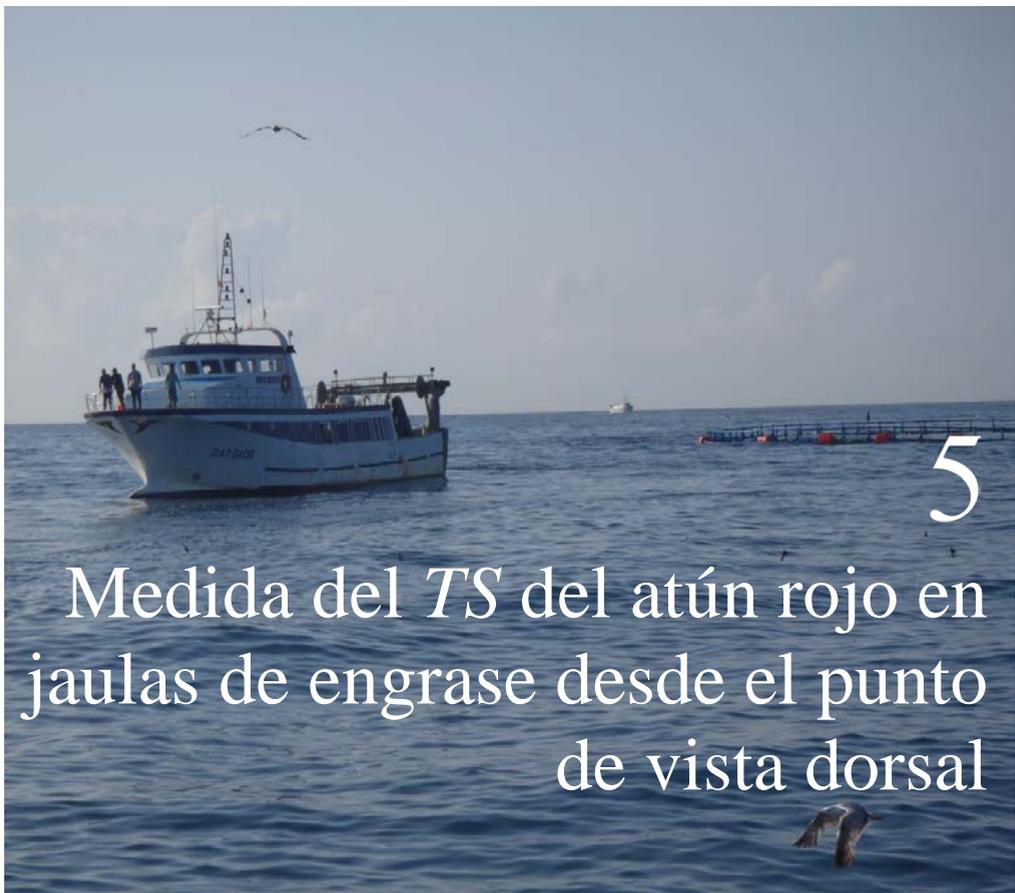
En cuanto a la exposición al ruido de banda ancha de la turbina de un aerogenerador, la respuesta a la misma es proporcional a la duración de dicha emisión y al nivel de presión sonora emitido. Las reacciones observadas pueden resumirse en cambios de posición en la columna de agua, contracción del banco para evitar la fuente de ruido, cambio en la

dirección de nado de algunos de los especímenes tras la emisión que puede ser interpretada como una desorientación temporal y variación de la velocidad de nado. Estas reacciones se manifiestan de manera más clara para las emisiones de larga duración y de alto nivel (150-182 dB ref. $1\mu\text{Pa}$). En este caso, la reacción de evitación de la fuente es más intensa con movimientos horizontales que alejan al pez de la fuente de ruido y desplazamiento vertical del banco. Teniendo en cuenta lo observado tanto en las emisiones de corta duración como en las de larga duración, los atunes en cautividad parecen mostrar un alto grado de adaptabilidad al ruido. No obstante, como muestra el estudio, la reacción del atún rojo a la grabación de la turbina de un aerogenerador marino no es totalmente clara, ya que, este experimento está limitado por varias razones (confinamiento de los peces, límites de niveles de emisión y de duración de los ensayos impuestos por la empresa). Para poder obtener conclusiones inequívocas se deberían realizar experimentos más exhaustivos que permitieran caracterizar la respuesta de los atunes a este estímulo de manera completa. Estas emisiones deberían repetirse durante diferentes días con largos intervalos de descanso entre emisiones para evaluar la adaptabilidad de la especie frente al ruido o al estrés acumulativo que genera este tipo de estudios para los peces. Hay que destacar de nuevo, que los peces se encontraban en estado de cautividad y su comportamiento estaba limitado por el espacio y por las condiciones del cautiverio: los peces no tenían necesidad de buscar alimento, nadaban dentro de un espacio limitado y conocido y se habían acostumbrado a diferentes estímulos sonoros no existentes en la naturaleza y que forman parte de la cotidianeidad de la granja.

El efecto de las nuevas actividades humanas en los ecosistemas oceánicos solo puede ser medido con estudios específicos para las especies o zonas geográficas sensibles. Es necesario mejorar el conocimiento sobre la fisiología y el comportamiento de los atunes en libertad para desarrollar herramientas y metodologías de estudio y monitorización de la especie. Ya que, en el caso de especies migratorias, como lo es el atún rojo, los cambios de comportamiento asociados a las actividades humanas pueden ser altamente relevantes.

El atún rojo es una especie delicada desde el punto de vista biológico y económico. Observar su comportamiento es un trabajo extremadamente difícil, aún más por las restricciones de captura impuestas en el mar Mediterráneo ante un posible colapso de la especie. Por este hecho, estudios como el mostrado en este capítulo son un primer avance hacia la solución de los problemas que conlleva la instalación de aerogeneradores marinos, ya que, constatan reacciones al ruido provocados por dichas infraestructuras.

Equation Chapter (Next) Section 1



5.1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, se está desarrollando una incipiente industria acuícola del atún rojo (*Thunnus thynnus*) que implica la obtención de huevos fértiles a partir de reproductores ubicados en jaulas flotantes, el cultivo larvario y la producción de juveniles en instalaciones en tierra y el posterior engorde de los mismos nuevamente en las jaulas. A este respecto, el IEO lleva varios años produciendo juveniles de esta especie con el objetivo de cerrar su ciclo biológico y contribuir al desarrollo de la producción de atún rojo mediante técnicas de acuicultura integral y no basada en la captura (Ortega *et al.*, 2013; de la Gándara, 2013)

Existen diferentes métodos para estimar el tamaño medio de los peces alojados en las jaulas de engrase. El más extendido es la realización de muestreos manuales, para ello se extrae algunos ejemplares de la jaula, que se pesan y se miden tras, normalmente, aplicarles algún método anestésico. Para el caso del atún rojo, este tipo de biometrías es muy complicada, ya que, necesitan de gran cantidad de medios y personal, además; pueden provocar estrés a los animales disminuyendo el valor de venta de los mismos en el mercado. Por este hecho en este tipo de producciones se ha extendido el uso de sistemas de cámaras estereoscópicas para la realización de biometrías. Las técnicas estereoscópicas (cuyos sistemas comerciales más extendidos son Vicass de AkvaSmart y el sistema

AM100 de AQ1 Systems), permiten la adquisición de imágenes y la medida de la longitud de los peces sobre las imágenes con la ayuda de un operador especializado (marcando la longitud furcal en cada par de imágenes). El sistema está formado por dos cámaras iguales, encapsuladas y separadas una distancia fija. Estos sistemas disponen de un alto grado de precisión en la medida de la longitud, pero están condicionados por el nivel de turbidez del agua, el rango de medida (que está normalmente entre 2 y 6 metros de las cámaras) y la necesidad de un operador para la obtención de resultados (Aguado, 2006).

Las técnicas acústicas se han revelado como una tecnología versátil y prometedora para la monitorización del crecimiento de peces en jaulas. Para poder controlar el proceso de crecimiento de manera adecuada, es necesario establecer una relación precisa entre el tamaño del pez y la potencia acústica retropropagada por el mismo, también llamada potencia del blanco o target strength (*TS*). Algunos estudios realizados con salmones (Knudsen *et al.*, 2004) han mostrado la posibilidad de establecer una correlación entre la longitud de los peces y el *TS* de los mismos, abriendo las puertas a estudios similares con otras especies. Se han desarrollado más recientemente otros trabajos con especies como la dorada o la lubina (Soliveres, 2015; Soliveres *et al.*, 2017), de alto impacto económico por su elevado consumo a nivel mundial. La producción de estas especies en piscifactorías ha aumentado de manera notable en los últimos años, superando incluso en toneladas a las capturas, por ello, el uso de herramientas de control de la producción se hace cada vez más indispensable.

Para el caso del atún rojo no se conocen estudios de estas características (realizados “*ex situ*” en jaulas marinas), sin embargo si se han realizado trabajos en pequeños tanques en tierra para especies similares, como el atún de aleta amarilla (*Thunnus albacares*), en los que se ha intentado establecer una relación entre el *TS* y la longitud de los peces (Hsueh-Jung *et al.*, 2011). Del mismo modo, se han publicado investigaciones basadas en campañas de medida del *TS* para el bigeye tuna o patudo (*Thunnus obesus*) o el atún de aleta amarilla o yellowfin tuna (*Thunnus albacares*). En estas publicaciones se establece una relación entre la longitud de los peces y el *TS* medido “*in situ*” desde el aspecto dorsal (Bertrand *et al.*, 1999; Bertrand and Josse, 2000), estos estudios están realizados a una frecuencia 38 kHz y se realizan con los peces nadando en libertad hasta profundidades de 500 metros. No obstante, en ningún caso se conocen medidas realizadas en jaulas de engorde para ninguna de estas especies ni para el atún rojo.

Por otro lado, existe una demanda de técnicas acústicas para la determinación de los recursos pesqueros de atún en libertad. Se espera, además, sean capaces de discriminar especies cuando son usados en boyas satelitarias. Este tipo de boyas se utilizan en la pesca de túnidos, colocándose cerca de los dispositivos agregadores de peces *FADs* (Fish Aggregating Devices). Las boyas incorporan una ecosonda que detecta los atunes cuando se encuentran en el área de influencia de su haz acústico y alertan de la detección de los túnidos en la zona en la que se encuentra la boya. Para poder transformar estas boyas en

sistemas de ayuda a la pesca más eficaces es necesario el conocimiento de la respuesta acústica de las diferentes especies de túnidos en todos sus estadios de crecimiento.

En este trabajo se pretende estudiar si es posible establecer una relación entre el tamaño de los atunes y el TS, realizando medidas desde la superficie (aspecto dorsal). Los trabajos realizados en jaulas de engorde sugieren un mejor comportamiento de esta técnica desde el punto de vista ventral (Knudsen *et al.*, 2004; Soliveres, 2015), no obstante, los estudios presentados por Soliveres (2015) presentan buenos resultados desde el punto de vista dorsal para peces de menor tamaño.

5.2. MATERIALES Y MÉTODOS

5.2.1. LUGAR DE MEDIDA

Las mediciones se llevaron a cabo durante los días 13 y 14 de mayo de 2015 en jaulas gestionadas por la empresa Fortuna Mare, situadas frente a la costa de El Gorguel (Murcia). En dichas jaulas (Figura 5.1) se encuentran atunes separados por año de nacimiento; todos los atunes han nacido en cautividad en el centro que el Instituto Español de Oceanografía (IEO) tiene en el puerto de Mazarrón (Murcia) y fueron trasladados a las jaulas en el mar posteriormente. Los atunes forman parte de los estudios que el IEO lleva a cabo con la finalidad de cerrar el ciclo vital de la especie en cautividad.



Fuente: IEO (2016)

Figura 5.1. Fotografía de las instalaciones de El Gorguel en (Murcia).

Se realizaron ensayos en tres jaulas (J2, J3 y J5), que contenían atunes con diferente tamaño, estando los de mayor tamaño en la jaula J2, los de tamaño intermedio en la jaula J3 y los de menor tamaño en la jaula J5. En la Tabla 5.1 se detalla el número de peces

alojado den cada jaula y su año de nacimiento. Las jaulas J2 y J3 tenían 25 metros de diámetro y 18 metros de profundidad, sin embargo, la jaula J5 tenía 25 metros de diámetro pero solo 10 metros de profundidad. Las jaulas presentaban una forma aproximadamente cilíndrica desde la superficie hasta el fondo.

Para completar el experimento se realizan, además, medidas en una jaula de atunes adultos capturados y engordados en las instalaciones del *Grup Balfegó* en la costa de l’Ametlla de Mar (Tarragona). Los atunes provienen de la campaña de pesca de 2015 realizada a finales de mayo de dicho año. La recogida de datos en esta jaula se realiza durante el mes de octubre de 2015. Dichas instalaciones son descritas en el apartado 4.1.2.1 (Figura 4.1). Las medidas se realizaron en la jaula J20, que tenía 50 metros de diámetro y alrededor de 35 metros profundidad máxima en el copo. La toma de datos en esta jaula se realizó mediante el mismo procedimiento que en las anteriores.

Tabla 5.1. Año de nacimiento de los peces de cada una de las jaulas donde se realizaron medidas

<i>Jaula</i>	<i>Lugar de medida</i>	<i>Nº de peces</i>	<i>Año de nacimiento</i>
J2	El Gorguel	240	2011-2012
J3	El Gorguel	100-200	2013
J5	El Gorguel	<100	2014

5.2.2. EQUIPO UTILIZADO DURANTE LAS MEDIDAS

Se emplearon dos ecosondas científicas *EK60* de Simrad junto a un transductor split-beam de 120 kHz (modelo *ES120-7C*) y otro de 200 kHz (modelo *ES200-7C*), controladas por un único ordenador mediante el puerto Ethernet y con la ayuda de un switch, de manera que trabajaran de forma síncrona. Los dos transductores empleados eran de haz estrecho, con una apertura a -3 dB de 7° para ambos transductores. Las medidas se realizaron desde una embarcación amarrada al aro de flotación de la jaula durante todo el tiempo de medida, los registros de datos se realizaron con los transductores montados en una plataforma colocada en la superficie dejando la mínima separación posible entre ellos, con los transductores orientados hacia el fondo de la jaula para tomar medidas acústicas de los atunes desde el punto de vista dorsal. Dicha plataforma se amarró al aro de flotación de la jaula de manera que quedara a la mitad de uno de los radios de la misma (Figura 5.4). La potencia transmitida es de 90 W para la frecuencia de 200 kHz y de 100 W para la de 120 kHz, la duración del pulso transmitido es de 64 μ s a las dos frecuencias, así como el intervalo entre pings que es de 0.1 s a ambas frecuencias. Las medidas cada jaula se realizan durante una hora y media. Esta configuración de medida fue utilizada tanto en las medidas realizadas durante el mes de mayo, como en la medida en la jaula de atunes

adultos realizada durante el mes de octubre. Se solicitó a los buzos de la empresa Fortuna Mare información sobre las condiciones ambientales (estado del mar, meteorología, temperatura del agua, etc.).



Figura 5.2. Detalle del montaje del transductor sobre una plataforma de madera fijada a la jaula por cuatro cabos.

En las Tablas 5.2 y 5.3 se recogen las especificaciones de los dos transductores split-beam empleados en las mediciones, procedentes de la hoja de especificaciones del fabricante. Cada ecosonda fue alimentada mediante una batería de gel resistente a la corrosión, de 12 V y 55 Ah. Se utilizó un conversor de 12 V a 220 V para alimentar el ordenador portátil. Se usó además un switch capaz de trabajar a 12 V (esquema de conexiones en la Figura 5.3). Para disponer de ellos, se solicitó a los buzos de la empresa Fortuna Mare información sobre las condiciones ambientales (estado del mar, meteorología, temperatura del agua, etc.).

Tabla 5.2. Datos del transductor ES120-7C de Simrad.

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>	<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
Tipo	<i>Split-beam</i>	$\theta_{-3dB,\beta1}$ (°)	7.26
Nº serie	666	$\theta_{-3dB,\beta2}$ (°)	7.24
f (kHz)	120	ψ	0.0091
$S_{Tx,v}$ (dB ref. 1 μ Pa/V)	171.5	Ψ (dB)	-20.4
$S_{Tx,i}$ (dB ref. 1 μ Pa/A)	209.3	η	0.75
S_{Rx} (dB ref. 1 V/ μ Pa)	-186.4	$ Z $	19.6
$Q_{m\acute{a}x}$	650	$\theta(Z)$ (°)	-8.7
$ID_{m\acute{a}x}$ (dB)	28.41	$W_{Tx,m\acute{a}x}$ (W)	1000

Tabla 5.3. Datos del transductor ES200-7C de Simrad.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Tipo	Split-beam	$\theta_{-3dB,\beta 1}$ (°)	7.2
Nº serie	420	$\theta_{-3dB,\beta 2}$ (°)	7.0
f (kHz)	200	ψ	0.0087
$S_{Tx,v}$ (dB ref. 1 μ Pa/V)	185.1	Ψ (dB)	-20.6
$S_{Tx,i}$ (dB ref. 1 μ Pa/A)	210.1	η	0.75
S_{Rx} (dB ref. 1 V/ μ Pa)	-190.0	$ Z $	17.9
$Q_{m\acute{a}x}$	660.7	$\theta(Z)$ (°)	-8.7
$ID_{m\acute{a}x}$ (dB)	28.2	$W_{Tx,m\acute{a}x}$ (W)	1000

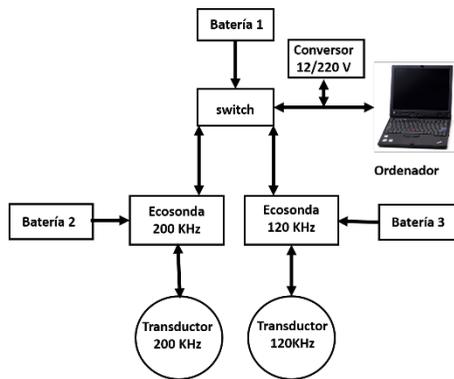


Figura 5.3. Esquema de conexión de los equipos utilizados durante las medidas

Ante la imposibilidad de realizar la calibración de los transductores “in situ”, debido a la dificultad para calibrar de manera adecuada en el momento de las medidas, se realizó la calibración en las instalaciones que el IEO tiene en el Puerto de Mazarrón. En estas instalaciones, llamadas Infraestructura para el Control de la Reproducción del Atún Rojo del Atlántico (ICRA), el IEO dispone de un tanque de 3500 m³ con 22 metros de diámetro y 10 metros de profundidad. Dicho tanque se llenó de agua del mar a la misma temperatura a la que se realizaron las medidas, y se colocaron los equipos en el fondo para realizar la calibración en las mismas condiciones ambientales y a una profundidad similar a la de medida, pero en un ambiente más controlado y con un mecanismo de posicionamiento de

la esfera de calibración. Se siguió el procedimiento de calibración descrito por el fabricante en el manual de la ecosonda, haciéndose uso del método del blanco estándar (Simrad, 2008). Se usaron dos esferas diferentes una de 13.7 mm de diámetro para el transductor de 200 kHz y una de cobre de 23mm para el transductor de 120 kHz proporcionadas por Simrad al adquirir los equipos. El software proporcionado por el fabricante dispone de un módulo de calibración que fue usado para realizar dichas calibraciones. El proceso de calibración consiste básicamente en registrar ecos procedentes de la esfera de calibración a través de toda la sección transversal del haz del transductor definida por una apertura angular debida a una caída de -6dB en el patrón de radiación, y comparar el valor del TS medido con el valor del TS teórico del blanco estándar. A partir del registro de ecos procedentes de dicho blanco estándar se estiman la ganancia del transductor en las dos direcciones, el factor de corrección $S_{a,corr}$, y los cuatro parámetros angulares necesarios para compensar el efecto del patrón de radiación (la apertura del haz a -3 dB en las direcciones longitudinal y transversal, y la desviación del eje respecto a la normal en ambas direcciones). El ángulo equivalente y la sensibilidad angular no se determinan en el proceso de calibración.

En la Tabla 5.4 se resumen los parámetros obtenidos durante la calibración de las dos ecosondas, cada una trabajando con uno de los transductores ($ES120-7C$ y $ES200-7C$). Durante la calibración de la ecosonda $EK60$ junto con el transductor $ES120-7C$ de 120 KHz se usó una duración de pulso de 64 μs ; una potencia de transmisión de 100 W, para la ecosonda $EK60$ y el transductor $ES200-7C$ (200 KHz) se utilizó también 64 μs de duración del pulso pero una potencia de transmisión de 90 W. El intervalo entre pings en ambos casos fue de 1 segundo, como recomienda el fabricante en el proceso de calibración. Para el cálculo de la velocidad del sonido se utilizaron los parámetros ambientales medidos en el tanque de calibración (24.2°C de temperatura. 36 ppm de salinidad y un pH de 8.14).

Para una mejor comprensión de la Tabla 5.4, es necesario explicar que el programa de calibración después de registrar los datos realiza ajustes a dos modelos diferentes: el modelo polinómico y el modelo del haz. Si la forma del modelo polinómico es muy diferente a la forma del modelo del haz, indica que no se han registrado suficientes detecciones. Se ajustan los parámetros del modelo del haz de forma que se minimice el error cuadrático medio (RMS) de las detecciones registradas. Los valores obtenidos se utilizan para corregir los parámetros de calibración del sistema. La desviación del modelo respecto a los datos puede utilizarse para validar el proceso de calibración. Se recomiendan valores RMS inferiores a 0.2 dB, aunque son aceptables valores de hasta 0.4 dB. Las calibraciones con valores RMS superiores a 0.4 dB deben repetirse.

Tabla 5.4. Resultados obtenidos de la calibración de la EK60 junto con el transductor ES120-7C y de la EK60 junto con el transductor ES200-7C, duración del pulso 64 μ s.

<i>Transductor</i>		<i>ES120-7C</i>	<i>ES200-7C</i>
	T_{ping} (s)	1	1
	c (m/s)	1537.5	1537.5
	α (dB/km)	47.4	84.0
<i>Blanco estándar</i>	$TS_{teór}$ (dB)	-40.3	-45.3
	TS_{desv} (dB)	5.0	5.0
	R_m (m)	5	5
	R_M (m)	8	8
<i>Parámetros Detección</i>	TS_{min} (dB)	-50.0	-60.0
	mLE	0.8	0.8
<i>Ecos Individuales</i>	MLE	1.8	1.8
	MDF	12.2	8.0
	MCG (dB)	6.0	6.0
	EE_{min}	1.0	1.0
<i>Nº detecciones</i>		345	323
<i>Error RMS</i>		0.16	0.24
<i>Parámetros Transductor</i>	G_{TS} (dB)	23.86	24.48
	Sa_{corr} (dB)	0.44	-0.37
	$\theta_{-3dB,\beta1}$ (°)	6.25	6.41
	$\theta_{-3dB,\beta2}$ (°)	6.20	6.35
	$Offset_{\beta1}$ (°)	-0.01	0.08
	$Offset_{\beta2}$ (°)	-0.04	-0.01
	Ψ (dB)	-20.7	-20.7
	$\Psi_{calculado}$ (dB) ²	-21.74	-20.6
	$SensAng_{\beta1}$	23.0	23.0
	$SensAng_{\beta2}$	23.0	23.0

² Calculado según la ecuación empleada por Simrad (Simrad, 1997) para estimar el valor de Ψ a partir de la medida de la apertura del haz a -3 dB.

Para disponer de información biométrica de los atunes de cada jaula, se realizan fotografías con un sistema de cámaras estereoscópicas (Vicass System de AkvaSmart). Este sistema ha sido diseñado para realizar mediciones de la longitud de los peces en jaulas, y se usa normalmente por los productores para conocer el tamaño promedio dentro de las jaulas. El sistema óptico está compuesto por dos cámaras idénticas montadas en una caja de metal estanca y con sus ejes ópticos alineados y separados 15 pulgadas. Dicho sistema dispone además de un ordenador de campo que permite la manipulación de las cámaras y la obtención de imágenes de manera manual o automática. Como se ha comentado anteriormente, este tipo de sistemas son usados habitualmente para realizar muestreos dentro de las jaulas (Aguado, 2006).

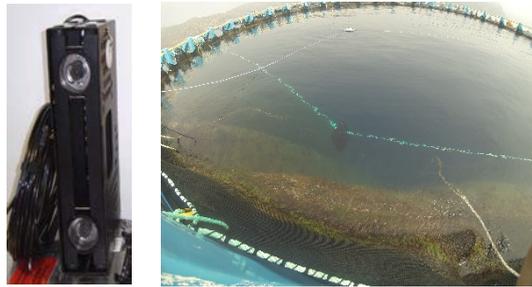
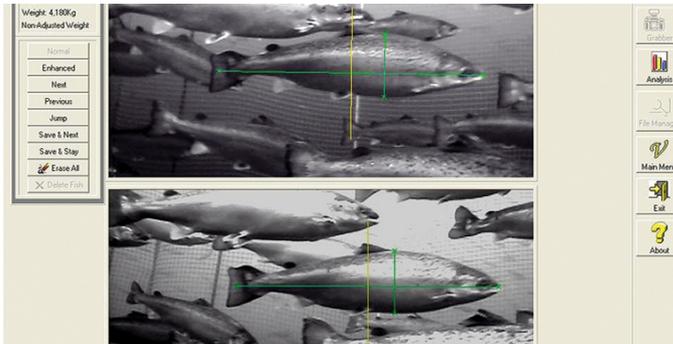


Figura 5.4. Imagen del sistema estereoscópico antes de sumergirlo (izquierda). Imagen del sistema de cámaras estereoscópicas realizando mediciones en una de las jaulas (derecha).

5.2.3. RECOGIDA Y ANÁLISIS DE LOS DATOS

Los datos fueron recogidos durante dos días del mes de mayo de 2015. Los datos ópticos se registraron con el ordenador de campo que maneja el sistema estereoscópico Vicass y posteriormente fueron exportados para ser analizados en un ordenador externo. Las imágenes capturadas se almacenaron en ficheros comprimidos donde se encontraban pares de imágenes en formato *.tiff*. Cada par de imágenes se nombró con el mismo número y el índice BOTT o TOP dependiendo de la cámara por la que fue captada. Cada par de imágenes se analizó de manera conjunta para obtener la longitud de los peces que aparecían en ellas. El análisis de estos datos se realizó con un software específico que facilitó el fabricante. El procedimiento de medida consistía en marcar la nariz y la cola de un mismo atún en un par de imágenes (obteniendo así la conocida como longitud furcal), y la altura máxima del pez (que también debía ser marcada en ambas imágenes). Dicho software permitía exportar las distribuciones de longitud de los peces de cada jaula analizada.



Fuente: Akva group

Figura 5.5. Imagen del software de medida del sistema estereoscópico. En la imagen se aprecia cómo se mide la longitud de los peces en un par de imágenes estereoscópicas

Los datos acústicos se recopilaban en un ordenador personal que controlaba de manera síncrona la ecosonda *EK60* de 120 kHz y la ecosonda *EK60* de 200 kHz. Estos datos se analizaron en dos pasos. En el primer paso, los datos fueron tratados con ayuda del software Sonar5 Pro, ya que, se detectaron en los ecogramas varias especies: atunes, lachas y obladas. Por ello, los ecogramas debían ser limpiados para su correcto procesado. Finalmente, los datos de los ecogramas limpios, se exportaron en formato de texto para su posterior tratamiento en Matlab®.

En el segundo paso, se implementó una herramienta en Matlab® que permite la detección de trazas individuales. Una vez aisladas, dicha herramienta, permitía la extracción de diferentes parámetros de las mismas. Para poder realizar el análisis que se presenta en el presente capítulo se extrajo el valor del *TS* máximo del ecograma limpio, la distancia al transductor de cada ping que compone la traza, los números de pings que componen la traza y su correspondiente intervalo temporal. Durante el análisis, para eliminar detecciones de bajo nivel se eligió un umbral de -60 dB, y se eliminó el primer metro desde la superficie del transductor y las detecciones pegadas al fondo de la jaula.

La herramienta que se utilizó para aislar las trazas hace uso de aplicaciones para el tratamiento digital de imágenes, aplicándolas al ecograma como si se tratase de una imagen. Para ello, se realizan diferentes transformaciones del ecograma que se convierte a escala de grises y después se transforma en una imagen binaria. A partir de dicha imagen binaria se aplica la morfología matemática aplicada al tratamiento digital de imágenes. Cuando hablamos de morfología matemática, se hace referencia a un instrumento que extrae las componentes de la imagen que se utilizan para la representación y descripción

de regiones dentro de la imagen. Por ello, antes de la aplicación de las técnicas morfológicas se debe diferenciar las regiones dentro de la imagen. Se considera una región, dentro de una imagen, a un subconjunto de píxeles dentro de dicha imagen que están conectados entre ellos (Sonka *et al.*, 2008). La conectividad entre píxeles es un concepto empleado para establecer los límites de los objetos y los componentes de áreas en una imagen. Para determinar si dos puntos (píxeles) están conectados se debe determinar si son adyacentes en algún sentido (por ejemplo, ser 4-vecinos) y si sus niveles de gris satisfacen algún criterio especificado de similitud (como por ejemplo ser iguales). En el caso de una imagen binaria dos píxeles pueden ser 4-vecinos, pero no estarían conectados si no tienen el mismo valor (Harada, 2008). A partir de las regiones encontradas dentro de la imagen, se aplica la morfología matemática con la finalidad de describir las propiedades de cada región.

Entre los descriptores de las regiones existentes, se usa para aislar las trazas principalmente (The MathWorks Inc., 2014; Gonzalez and Woods, 2008):

- El tamaño de la región o área que puede definirse como el número de píxeles que pertenecen a una región. Considerando una imagen como una matriz, el cálculo del área se reduce a una cuenta de píxeles como se indica en la ecuación 5.1:

$$\text{Area}(pixels) = \sum_{y=0}^{R-1} \sum_{x=0}^{C-1} p(x,y) \quad (5.1)$$

donde $p(x,y)$ es el valor del píxel, R es el número de filas y C es el número de columnas.

- Lo compacta que es la región (o la traza) se evalúa a partir de la solidez. Este parámetro nos informa del porcentaje de la región que está dentro del cerco convexo de la misma (siendo el cerco convexo es la mínima región convexa que contiene a la región).
- Las relaciones entre las dimensiones de la región (alto-ancho).
- El número de Euler de una imagen binaria se define como el número de componentes conexas menos el número de agujeros.

El proceso comienza con la detección y segmentación de regiones atendiendo a criterios de tamaño de la traza o región (área) y de nivel acústico mínimo. Como resultado de este primer paso se obtiene una relación de todas las regiones candidatas a ser atún, estas regiones son analizadas y filtradas mediante un algoritmo que evalúa sus características acústicas y morfológicas (como región). Se discrimina las regiones atendiendo a su nivel

acústico mínimo y máximo, la distancia al transductor, el número de ping máximo, el tamaño de la región (máximo y mínimo), lo compacta que es la región, la relación entre las dimensiones de la misma (alto-ancho) y el valor del número de Euler. En la Figura 5.6 puede observarse una traza aislada como resultado de este proceso.

Se elige el *TS* máximo como valor representante de la traza por diferentes motivos. Las medidas han sido realizadas con transductores split-beam (trabajando a 120 y 200 kHz), pero por las condiciones de medida, realizadas en una jaula de engorde, se deben tener en cuenta varias consideraciones debido al uso de este tipo de equipos científicos a cortas distancias. Los transductores split-beam son capaces de ofrecer valores del *TS* en los que se compensa dicho valor cuando procede de cualquier punto fuera del eje acústico del transductor, compensado su fase. Este proceso se realiza haciendo uso de la conocida “celda” que se corresponde con la mínima unidad de superficie perpendicular al eje acústico que es capaz de discriminar el transductor a una distancia dada. El tamaño de esta celda determina la resolución espacial en el plano perpendicular al eje acústico, siendo de menor tamaño a distancias cercanas al transductor. Por esta razón, a cortas distancias, un blanco puntual puede tener un tamaño mayor al tamaño de la celda. Cuando el blanco es un pez, éste puede llegar a ocupar gran parte de la sección del haz e incluso abarcar un diámetro mayor que el diámetro definido por el haz cuando éste decae -3 dB. En estos casos, el blanco deja de ser puntual y puede llegar a cometerse un error significativo en la estimación de la posición angular (Ona *et al.*, 1996; Dawson *et al.*, 2000).

5. Medida del TS del atún rojo en jaulas de engrase desde el punto de vista dorsal

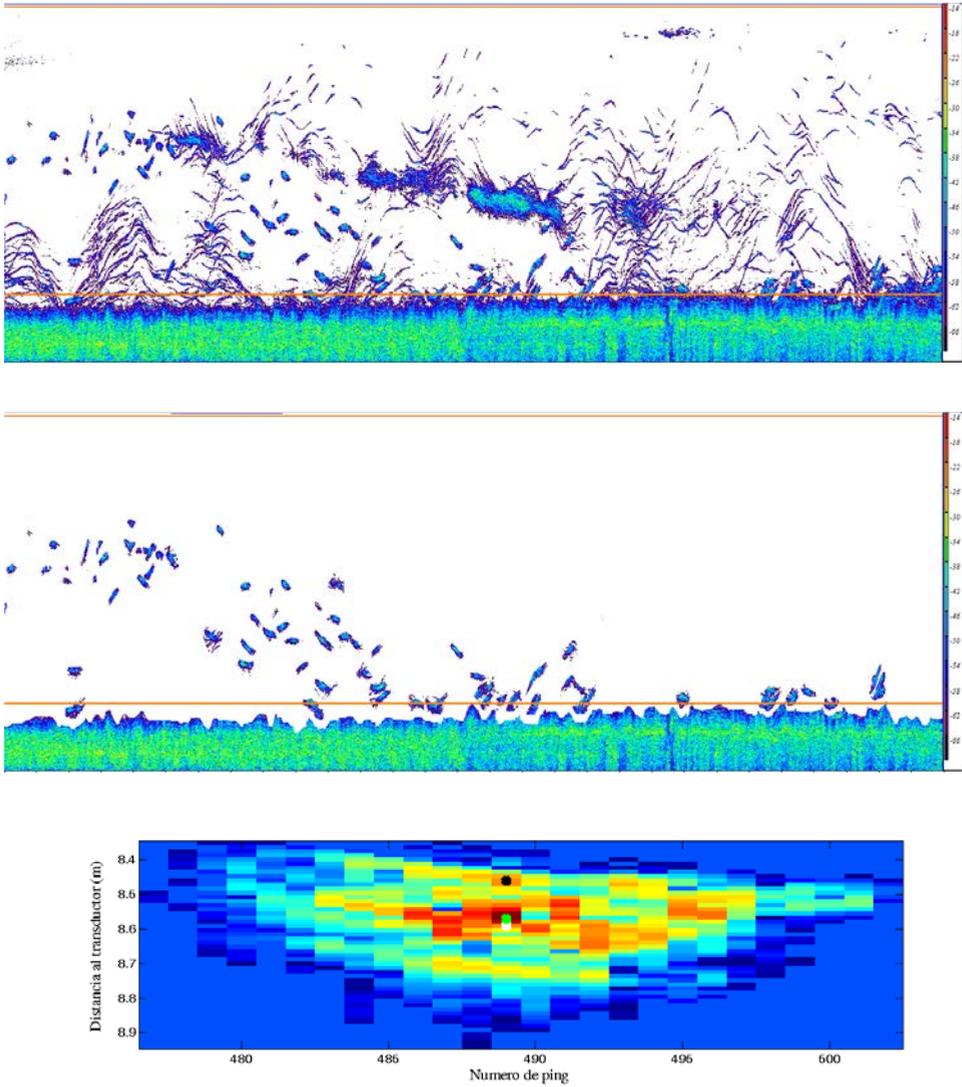


Figura 5.6. Procedimiento de análisis acústico, ecograma original en la parte superior, ecograma limpio en el centro y traza aislada mediante tratamiento digital de la imagen en la parte inferior. En ambos ecogramas la zona gruesa que aparece en la parte inferior se corresponde con el fondo de la jaula.

Una ecosonda preparada para trabajar con un transductor split-beam, cuando el blanco ocupa más de una celda, aplicaría un único valor de ganancia al corregir el valor del *TS* para compensar el efecto del patrón de radiación, por lo que no podríamos asegurar que dicho valor del *TS* haya sido compensado de manera correcta. Por este hecho, en este punto se presentan las distribuciones de probabilidad del *TS* máximo sin compensar y del *TS* máximo compensado.

Para obtener el *TS* máximo compensado se aplica un detector de ecos individuales (Single Echo Detector, *SED*) con ayuda del software Sonar5-Pro. Este software implementa esta detección de ecos procedentes de un blanco individual atendiendo a criterios de amplitud, duración y fase. Los criterios que tiene en cuenta se resumen en los siguientes:

- Longitud del eco (*LE*): se trata de la distancia entre las muestras que se encuentran a -6dB del máximo (antes y después de éste). Se toman dos parámetros, la mínima longitud del eco (minLE) y la máxima longitud del eco (maxLE) ambas referidas a la duración del pulso transmitido.
- *TS*min: es el umbral que ha de superar el valor máximo de todas las muestras una vez aplicado el criterio de la longitud del eco.
- Supresión de ecos múltiples (*EM*): este criterio hace que se acepten o rechacen ecos en función de las relaciones entre los máximos y mínimos locales dentro de un eco. El criterio utilizado en nuestro caso (médium) solo permite que se acepten ecos con relaciones entre máximos y mínimos locales inferiores a 1.5 dB.
- Máxima desviación de fase (*MDF*): hace referencia a la desviación estándar de los valores angulares de las muestras que forman el eco. Este criterio establece un valor que no se puede superar ni en la dirección longitudinal ni en la transversal.
- Máxima compensación de ganancia (*MCG*): determina el rango de ángulos de detección de blancos, expresado como la caída en dB del patrón de directividad respecto al eje (está definida en una dirección).

En la Tabla 5.5 se muestran los parámetros elegidos para el análisis presentado en este punto.

Las medidas, a ambas frecuencias, se realizan con una duración de pulso de 64 μ s. Este hecho, provoca que las trazas obtenidas tengan una forma compleja con detecciones de las diferentes estructuras que forman el atún (Figura 5.6 inferior). Como se ha explicado ya, el pez, en este caso, deja de ser un blanco puntual debido a que el rango de medidas se ve limitado por las dimensiones de la jaula que aloja los atunes. Además, como se detalla en el capítulo 3, realizar medidas a distancias cortas, provoca errores en la compensación de las pérdidas por propagación de la onda acústica, no permite asegurar que no nos encontremos en el campo cercano del pez debido a sus grandes dimensiones, por lo que el campo dispersado por el pez se vuelve complejo (Dawson *et al.*, 2000). En otros trabajos se propone reducir el tamaño del pez al de su vejiga (Soliveres, 2015) ya que este órgano

es el responsable de la mayor cantidad de energía dispersada por el pez. Para el caso del atún rojo no se ha documentado el tamaño de la vejiga, su inclinación y su forma; pero si existe dicha información para especies similares de atunes como el atún de aleta amarilla (Kurt & Oliver, 1998). A partir de la descripción de la morfología interna del atún de aleta amarilla, se puede suponer que la vejiga del atún rojo tendrá una longitud cercana a la quinta parte de la longitud total del atún, aunque no se conoce su inclinación ni su forma exacta (que para el caso del atún de aleta amarilla es compleja). Debido a su gran tamaño, el uso de una longitud de pulso que pudiera abarcar toda la vejiga (1024 μ s), impediría la selección automática de trazas, ya que a partir de una determinada distancia (de pocos metros) dichas trazas se superpondrían imposibilitando separarlas automáticamente. Por este hecho, se elige una duración del pulso de 64 μ s, que facilita la separación de trazas y permite detectar el cambio de interfaz (y de impedancia acústica) al pasar de la carne del atún a la vejiga rellena de gas. Como se puede observar en la Figura 5.6 inferior, dentro de la traza compleja que obtenemos en las medidas realizadas con la configuración elegida; el valor de la energía dispersada por el cambio de interfaz cuerpo del atún-vejiga se corresponderá con el máximo. Por esta razón, se toma como representante de cada traza el valor máximo (compensado y sin compensar).

Tabla 5.5. Parámetros del detector de ecos individuales (SED) utilizados.

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
minLE	0.4
maxLE	4
TSmin (dB)	-70
EM	medium
MDF (°)	3.0
MCG (dB)	12

5.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.3.1. LONGITUD MEDIA DE LOS ATUNES EN CADA JAULA

Los datos ópticos tomados en las jaulas de juveniles (El Gorguel) fueron analizados haciendo uso del software que la empresa Akvasmart facilita junto con el sistema Vicass. Como ya se ha indicado, en cada par de imágenes se marcó la nariz y la cola del mismo pez de tal modo que es software nos proporcionó un valor de la longitud furcal en centímetros, las distribuciones de longitudes obtenidas para las tres jaulas de juveniles se muestran en la Figura 5.7 y sus valores medios en la Tabla 5.6. Para la jaula de peces adultos medidos en las instalaciones del Grup Balfegó en l’Ametlla de Mar (Tarragona), se dispone de la longitud media proporcionada por los inspectores en el momento de la transferencia de los atunes desde la jaula de transporte a la jaula de engorde en las instalaciones frente a la costa tarraconense.

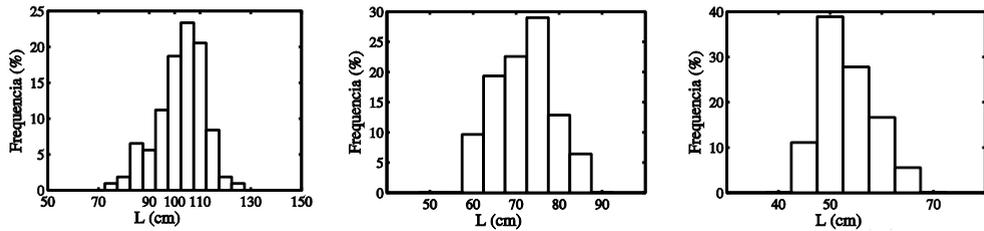


Figura 5.7. Distribución de longitudes medidas en cada una de las jaulas de atunes juveniles medidos en el Gorguel (Murcia). A la izquierda para la jaula J2, en el centro para la jaula J3 y a la derecha para la jaula J5.

Tabla 5.6. Longitud media de cada una de las jaulas donde se realizaron medidas

Jaula	Lugar de medida	Nº de peces	Longitud media (cm)
J20	Ametlla de Mar	700	225
J2	El Gorguel	240	102.3
J3	El Gorguel	100-200	71.7
J5	El Gorguel	<100	53.3

5.3.2. ESTIMACIÓN DEL TS DESDE EL PUNTO DE VISTA DORSAL

En este punto se presentan los resultados del TS de las detecciones de atunes individuales obtenidas en cada una de las jaulas bajo estudio, siempre desde el punto de vista dorsal. Como se ha descrito en el apartado anterior de cada traza de atún aislada se extraen todos los datos de interés: TS máximo de la traza, número de pings que forman la traza, distancia al transductor de cada uno de los pings que forman la traza y valor del área de la traza.

En la Figura 5.8 se muestran las distribuciones de probabilidad del TS máximo sin compensar (TS_{max}) para las dos frecuencias estudiadas 120 y 200 kHz. Del mismo modo en la Figura 5.9 se representan las distribuciones de probabilidad del TS máximo compensado (TS_{cmax}) a ambas frecuencias. En ambas gráficas, y para cada frecuencia, se presentan las distribuciones obtenidas para cada una de las jaulas medidas, cada una de ellas con un tamaño medio de los atunes diferente. Además, en las Tabla 5.7 y 5.8 podemos ver los valores medios, las desviaciones típicas, número de trazas aisladas para cada jaula.

Tanto las distribuciones del TS_{max} (Figura 5.8) como las del TS_{cmax} (Figura 5.9) tienen carácter unimodal para todas las tallas. Knudsen *et al.* (2004) en su trabajo realizado con salmones en jaulas de piscifactoría, también encontraron distribuciones unimodales para los peces de mayor tamaño (78 cm), pero las distribuciones que obtuvieron para peces más pequeños tenían un marcado carácter multimodal. Otros trabajos realizados con doradas, mostraban un comportamiento similar al de los salmones desde el punto de vista dorsal (Soliveres, 2015). Para el caso de atunes, existen pocos trabajos realizados a cortas distancias. Hsueh-Jung *et al.* (2011) presentaron medidas para el atún de aleta amarilla (*Thunnus albacares*), en su estudio realizado a muy cortas distancias en un tanque en tierra, se obtienen distribuciones multimodales que los autores atribuyen a la inclusión de peces de tallas muy variadas en el estudio (entre 25 y 80 cm).

Se describen las distribuciones de probabilidad mediante la media y la desviación típica, para el TS_{max} y el TS_{cmax} a cada frecuencia. Se espera que la media disminuya con el tamaño de los peces, al igual que la desviación típica. Los datos muestran esta tendencia que se interrumpe en la J5, en la que los atunes de menor tamaño muestran valores medios del TS mayores de los esperados (comparables o superiores a los de los atunes de la J3 que tienen un tamaño medio 20 cm superior). Esto puede ser debido a las condiciones de medida, ya que la jaula permitía un menor rango de distancias debido a su tipología (solo 10 metros de profundidad frente a los 16 metros de la jaula de los peces de la J3). También puede atribuirse a la escasez de detecciones (casi 5 veces menos que en el resto de los casos), todo ello sumado a un comportamiento anómalo de los atunes de menor tamaño que nadaban del fondo de la jaula a la superficie y descendían de nuevo, presentando mayor inestabilidad durante la medida.

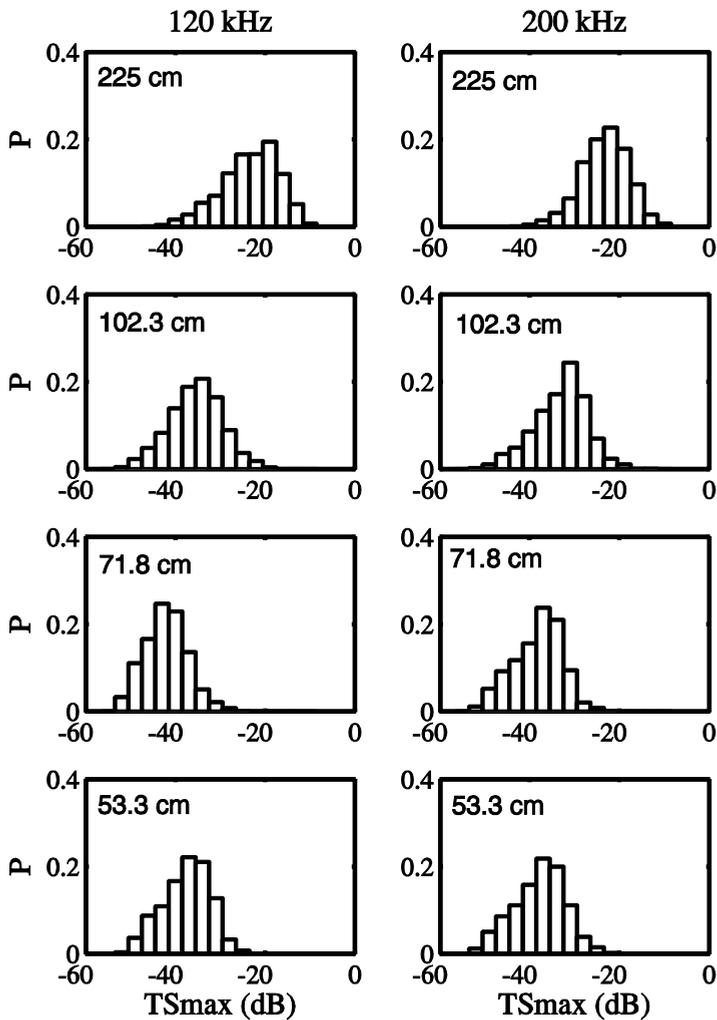


Figura 5.8. Densidad de probabilidad del *TS* máximo de las trazas aisladas. A la izquierda para 120 kHz a la derecha para 200 kHz. Se presentan ordenadas por el tamaño medio de los atunes de manera decreciente (la correspondencia de las jaulas desde arriba a hacia abajo sería J20, J2, J3 y J5). El número de muestras considerado se presenta en la Tabla 5.7 (para 120 kHz) y Tabla 5.8 (para 200 kHz).

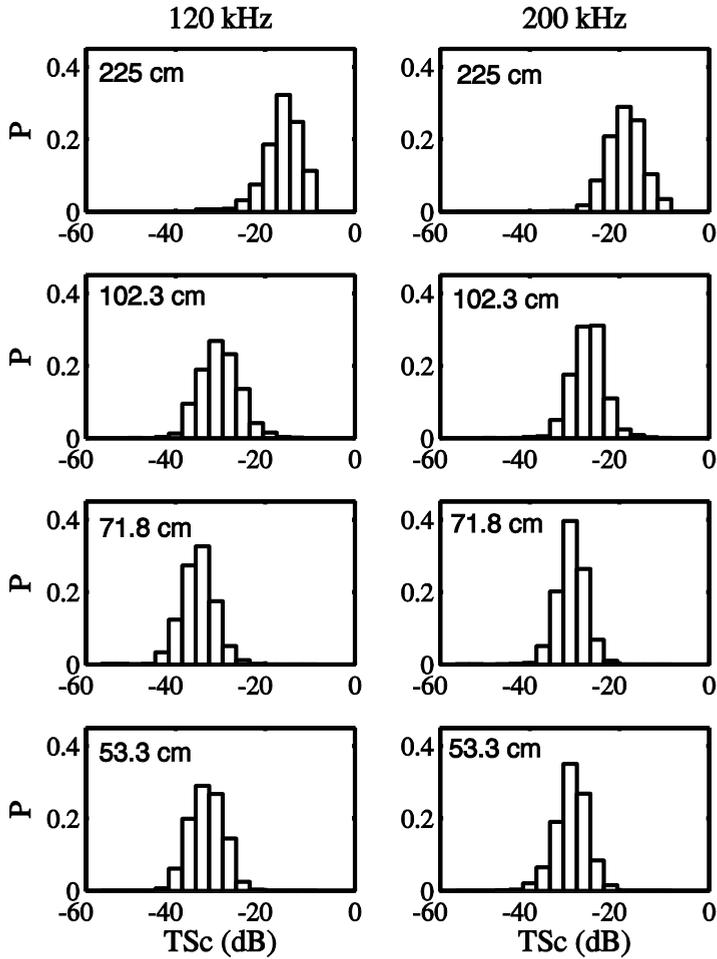


Figura 5.9. Densidad de probabilidad del TS máximo compensado de las trazas aisladas. A la izquierda para 120 kHz a la derecha para 200 kHz. Se presentan ordenadas por el tamaño medio de los atunes de manera decreciente (la correspondencia de las jaulas desde arriba a hacia abajo sería J20, J2, J3 y J5). El número de muestras considerado se presenta en la Tabla 5.7 (para 120 kHz) y Tabla 5.8 (para 200 kHz).

Tabla 5.7. Valores de la longitud media, numero de trazas, media y desviación típica del *TS* máximo compensado y sin compensar para las medidas dorsales realizadas a 120 kHz en todas las jaulas bajo estudio.

Jaula	<i>f=120 kHz</i>			<i>TSmax</i>		<i>TSmax</i>	
	<i>L media (cm)</i>	<i>Nº de trazas</i>	<i>Distancia máx (m)</i>	μ (dB)	σ (dB)	μ (dB)	σ (dB)
J20	225	2013	18	-19.83	6.41	-14.43	4.29
J2	102.3	1312	18	-31.81	5.84	-27.73	4.42
J3	71.8	1543	18	-39.39	4.73	-33.49	3.70
J5	53.3	276	10	-34.93	5.24	-31.52	3.73

Tabla 5.8. Valores de la longitud media, numero de trazas, media y desviación típica del *TS* máximo compensado y sin compensar para las medidas dorsales realizadas a 200 kHz en todas las jaulas bajo estudio.

Jaula	<i>f=200 kHz</i>			<i>TSmax</i>		<i>TSmax</i>	
	<i>L media (cm)</i>	<i>Nº de trazas</i>	<i>Distancia máx (m)</i>	μ (dB)	σ (dB)	μ (dB)	σ (dB)
J20	225	1748	18	-20.41	5.28	-16.95	4.02
J2	102.3	1453	18	-29.61	5.88	-25.31	3.66
J3	71.8	1586	18	-35.34	5.44	-29.64	3.17
J5	53.3	292	10	-34.57	5.70	-29.41	3.56

No existen medidas del *TS* desde el punto de vista ventral para el atún rojo, y tampoco se han realizado estudios en jaulas de engrase para esta especie. Si existen estudios alrededor de los FADs para atunes de aleta amarilla y patudo. Aunque no se trata de la misma especie, presentan algunas similitudes fisiológicas por lo que se compara los resultados obtenidos con trabajos realizados para estas especies en las inmediaciones de los FADs. La comparación se realiza partiendo de la premisa de que los valores del *TS* presentados en esta tesis se ven afectados por las condiciones de medida impuestas por el tamaño de las jaulas utilizadas para el engrase de esta especie en cautividad. Moreno *et al.* (2007) en sus estudios indican que las estructuras acústicas encontradas entre los 20 y los 80 metros de la superficie cerca de un FAD tienen un *TS* medio compensado de -35.1 dB, mientras que dichas estructuras a profundidades entre 80 y 100 metros aumentan su *TS* hasta los -29.9 dB (a una frecuencia de estudio de 120 kHz). Los trabajos realizados sobre la

distribución de los peces cerca de los FAD indican que en la mayoría de los casos los atunes de menor talla (atunes de aleta amarilla y patudo de alrededor de 50 cm) nadan más cerca de la superficie mientras que los atunes de mayor tamaño de estas dos especies lo hacen en capas inferiores (Doray *et al.*, 2007; Josse *et al.*, 2000b). Lopez *et al.* (2016) desarrollan modelos para estimar la biomasa de las especies encontradas en los FAD, para ello asimilan los valores de las estructuras acústica encontradas en Moreno *et al.* (2007) a atunes de aleta amarilla y patudo (yellowfin tuna y bigeye tuna) de 50 cm de longitud nadando a profundidades entre 25 y 80 metros asignándoles un *TS*(compensado) de -35.1 dB. Del mismo modo, a los atunes de 100 a 110 cm de longitud nadando a profundidades un poco mayores (de 80 a 115 m) se les asigna un *TS* compensado de -29.9 dB. Comparando los valores del *TS* asignado a atunes de 50 cm medidos a 120 kHz con los mostrados en las Tablas 5.8 y 5.9, se aprecia que los valores del *TS* compensado para peces de 53 cm es de -31.52 dB a 120 kHz mientras que dicho valor sube hasta los -29.41 dB para las medidas de 200 kHz, este valor difiere de los -35.1 dB medidos en los FADs. Esta variación del *TS* puede ser debida en gran medida a la distancia, ya que, como indican Bertrand *et al.* (2009) en su trabajo el *TS* del patudo (bigeye tuna) es dependiente de la profundidad. Esta dependencia se debe entre otros factores a que las condiciones de la vejiga que cambian con las variaciones de profundidad por las necesidades de flotabilidad y el aumento de presión. Para el caso del *TS* sin compensar los valores medidos se acercan más a los obtenidos por los trabajos citados, estando cerca de -35 dB para ambas frecuencias. Para el caso de atunes de entre 100 y 110 cm los valores del *TS* que se citan son de -29.9 dB (a profundidades medias de 100 m). Los resultados obtenidos en nuestro estudio rondan entre los -27.73 (para el *TS*_{max}) y los -31.81 dB (para el *TS*_{max}) a una frecuencia de 120 kHz y suben a valores que oscilan entre los -25.31 y los -29.61 dB a 200 kHz (considerando el *TS* compensado y sin compensar respectivamente). Se repite para este tamaño las diferencias encontradas para peces de menor tamaño.

5.3.3. RELACIÓN DEL TS DESDE EL PUNTO DE VISTA DORSAL CON LA LONGITUD

En este punto se realiza un estudio de la dependencia lineal del *TS*_{max} y el *TS*_{comp} con el logaritmo en base 10 de la longitud del atún rojo. Se elige este tipo de ajuste lineal por ser el más usado en la estimación de biomasa con herramientas acústicas (Ecuación 5.2).

$$TS(dB) = a \cdot \log_{10} L(cm) + b \quad (5.2)$$

Para evaluar la bondad del ajuste se hace uso del coeficiente de determinación, del p-valor del análisis de la varianza y del error absoluto medio cometido en la estimación del *TS* a partir de la longitud. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 5.10, Figura 5.11 y la Tabla 5.9.

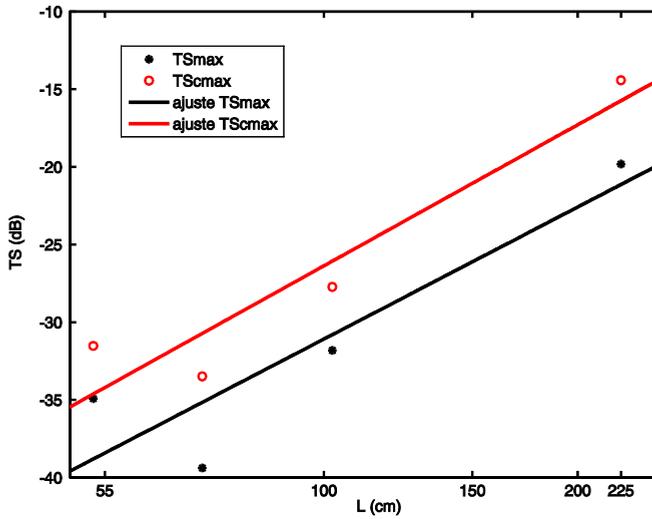


Figura 5.10. Relación lineal entre el TS máximo con y sin compensar de las trazas y el logaritmo de la longitud para una frecuencia de 120 kHz. En rojo TS máximo compensado y en negro TS máximo sin compensar.

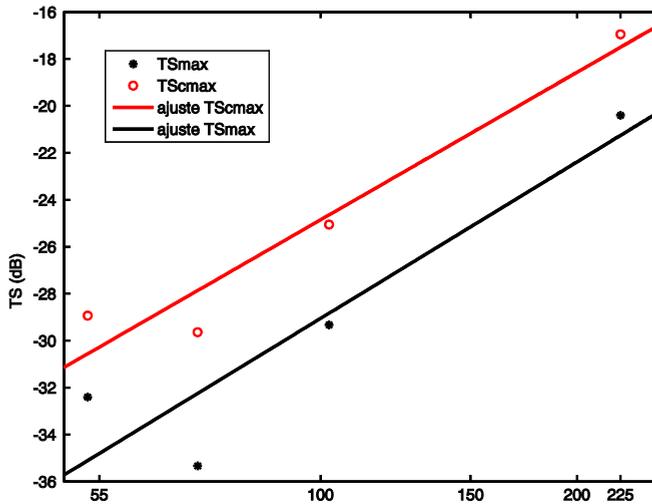


Figura 5.11. Relación lineal entre el TS máximo con y sin compensar de las trazas y el logaritmo de la longitud para una frecuencia de 200 kHz. En rojo TS máximo compensado y en negro TS máximo sin compensar.

Tabla 5.9. Resultados del ajuste lineal del TS máximo de las trazas (compensado y sin compensar) para las dos frecuencias bajo estudio.

$TS(\text{dB})=a \cdot \log_{10} L(\text{cm})+b$	TS_{max}		TS_{cmax}	
	120 kHz	200 kHz	120 kHz	200 kHz
a	28.25	22.15	30.18	20.88
b	-87.59	-73.35	-86.74	-66.62
R ²	0.83	0.86	0.90	0.94
p-valor	0.09	0.07	0.05	0.03
EAM (dB)	2.6	1.8	2.2	1.1

Como se indicó se realiza el ajuste para el TS máximo sin compensar y compensado, sin saber si la compensación aplicada por la ecosonda es adecuada por los problemas provocados por realizar medidas a cortas distancias explicados anteriormente. A la vista de los datos de la Tabla 5.9, se puede afirmar que los valores del coeficiente de determinación mejoran cuando se evalúan los ajustes realizados a partir del TS_{cmax} , en este caso el p-valor también mejora disminuyendo el error cometido en la estimación de TS a partir de la longitud. Para el caso del TS_{max} a ambas frecuencias y del TS_{cmax} a 120 kHz, podemos asegurar que la relación entre el TS y el logaritmo de la longitud es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 90%. Este nivel de confianza aumenta hasta el 95 % o más para el ajuste realizado con el TS_{cmax} a 200 kHz.

La pendiente obtenida para los ajustes a 200 kHz toma valores próximos a 20 y la ordenada varía entre -66 y -73. Para el caso de la frecuencia de 120 kHz, la pendiente está más cercana a 30 y la ordenada en el origen disminuye hasta valores cercanos a -87.

Si se comparan los valores de la pendiente y la constante obtenidos por otros autores se puede observar que no difieren mucho de los obtenidos para estudios de especies de atunes similares. Bertrand *et al.* (1999) realizaron medidas de atunes de aleta amarilla (yellowfin tuna) y de patudo (bigeye tuna). Dichas medidas fueron realizadas “*in situ*” y a grandes distancias. Se evaluaron atunes de longitudes entre 60 y 120 cm con una ecosonda split-beam de Simrad trabajando a 38 kHz, obteniendo expresiones como la que se muestra en la ecuación 5.3.

$$TS(\text{dB}) = 25.26 \cdot \log_{10} L(\text{cm}) - 80.62 \quad (5.3)$$

Del mismo modo, otros autores (Hsueh-Jung *et al.*, 2011) realizan medidas de atunes de aleta amarilla a corta distancia y a una frecuencia de 200 kHz. Se miden a distancias entre 2.6 y 3.4 metros atunes de longitudes que varían entre 25 y 80 cm. En este caso los valores del ajuste que se obtiene con un coeficiente de determinación de 0.45 se muestra en la Ecuación 5.4.

$$TS(dB) = 27.06 \cdot \log_{10} L(cm) - 85.04 \quad (5.4)$$

No obstante, no existen datos de ajustes realizados para el atún rojo en jaulas de engorde. Este último dato es importante, ya que el estado de los peces en este tipo de instalaciones difiere del que tienen en estado salvaje, ya que se les proporciona alimento a saciedad sin que deban realizar esfuerzos para alimentarse. Del mismo modo, su confinamiento en las jaulas provoca que adapten su velocidad de nado y movilidad a su nuevo estado, lo que facilita su engorde en menos tiempo. Estas nuevas condiciones de vida modifican los parámetros biométricos respecto a los de los peces que viven en estado salvaje, puede modificar también los valores de la pendiente y la constante obtenidas en los ajustes presentados.

En la literatura se habla habitualmente de fijar la pendiente a un valor de 20, ya que, para una longitud de onda dada, existe una relación entre la sección transversal equivalente y la longitud de la sección transversal a la cual es proporcional a L^2 (Foote, 1979; Love, 1971). Por ello se realiza el ajuste de los datos fijando el valor de la pendiente como se muestra en la Tabla 5.10. Fijar la pendiente garantiza un nivel de confianza superior al 95% en todos los casos, manteniéndose los valores del coeficiente de correlación para la frecuencia de 200 kHz y disminuyendo para los ajustes de 120 kHz.

Tabla 5.10. Resultados del ajuste lineal del TS máximo de las trazas (compensado y sin compensar) para las dos frecuencias bajo estudio fijando la pendiente a 20.

$TS(dB)=20 \cdot \log_{10} L(cm)+b$	TS_{max}		TS_{cmax}	
	120 kHz	200 kHz	120 kHz	200 kHz
a	20	20	20	20
b	-71.21	-69.09	-65.52	-64.87
R ²	0.76	0.85	0.80	0.94
p-valor	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05
EAM (dB)	3.0	1.9	2.8	1.3

Hsueh *et al.* (2011), en su experimento en un tanque, también realizan el ajuste de los datos forzando la pendiente a un valor de 20. En este caso obtienen un valor para la ordenada en el origen de -73.69 (con un coeficiente de correlación de 0.39). Para las medidas presentadas en esta tesis, a la frecuencia de 200 kHz (la misma que utilizaron Hsueh y sus colegas en su trabajo); se obtienen valores para la ordenada en el origen entre 5 y 10 unidades mayores (para el TS_{max} y el TS_{cmax} respectivamente), del mismo modo también son mayores los valores de los coeficientes de correlación que se sitúan en 0.86 para los valores del TS sin compensar y 0.94 para los valores del TS compensado.

En otros trabajos se contempla la necesidad de disponer de un ajuste que permita calcular la longitud a partir de las medidas del TS obtenido experimentalmente (Soliveres, 2015). Partiendo de la expresión clásica para calcular el TS a partir de la longitud (Ecuación 5.2); se busca una relación entre la longitud del atún y el TS , utilizando en este caso como variable dependiente la longitud:

$$L(cm) = a \cdot 10^{b \cdot TS (dB)} \quad (5.5)$$

Al igual que en el caso inverso se linealiza la ecuación 5.5 y se realiza un ajuste mediante el método de los mínimos cuadrados. La bondad del ajuste obtenido se caracteriza por el coeficiente de determinación, el p-valor y el error absoluto medio, como se hizo para la expresión ajustada para el cálculo del TS a partir de la longitud.

En la Tabla 5.11 se presentan los valores de los coeficientes a y b de los ajustes obtenidos, así como los parámetros que describen la bondad de los ajustes en cada caso. Del mismo modo, en las Figuras 5.11 y 5.12 se pueden ver los ajustes realizados para estimar la longitud a partir del TS máximo de las trazas (compensado y sin compensar) a las dos frecuencias de trabajo.

Tabla 5.11. Resultados del ajuste lineal de la longitud a partir del TS máximo de las trazas (compensado y sin compensar) para las dos frecuencias bajo estudio.

$L(cm) = a \cdot 10^{b \cdot TS (dB)}$	TS_{max}		TS_{cmax}	
	120 kHz	200 kHz	120 kHz	200 kHz
a	638.6163	995.6576	493.7533	988.1889
b	0.0264332	0.0349095	0.0268946	0.0406386
R ²	0.81	0.84	0.88	0.92
p-valor	0.1	0.08	0.06	0.04
EAM (cm)	0.07	0.07	0.06	0.05

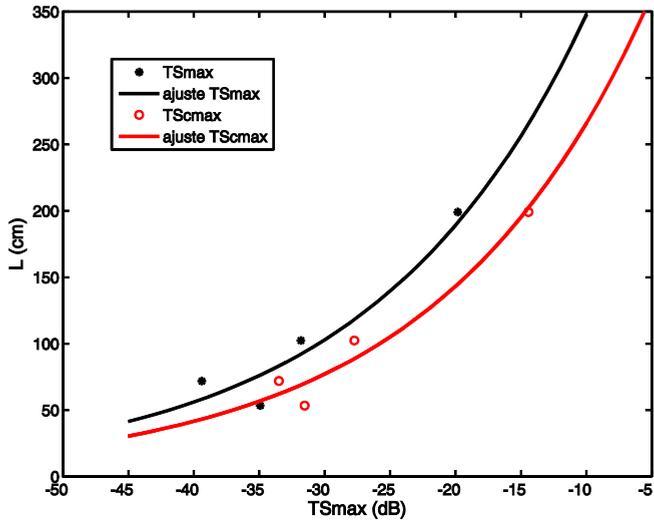


Figura 5.12. Relación lineal entre la longitud y el TS máximo con y sin compensar de las trazas para una frecuencia de 120 kHz. En rojo TS máximo compensado y en negro TS máximo sin compensar.

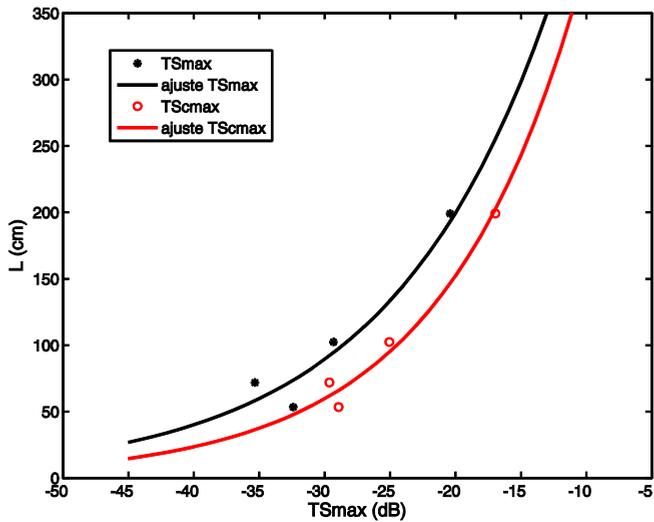


Figura 5.13. Relación lineal entre la longitud y el TS máximo con y sin compensar de las trazas para una frecuencia de 200 kHz. En rojo TS máximo compensado y en negro TS máximo sin compensar.

A la vista de los parámetros que definen la bondad de los ajustes (Tabla 5.11), la bondad de los ajustes es similar en ambos casos (tanto al estimar la longitud a partir del *TS* como en el caso contrario). Los p-valores nos indican que solo en el caso del *TS* máximo compensado a 200 kHz se puede asegurar que la relación entre la longitud y el *TS* es estadísticamente significativa con un nivel de confianza del 95 % o mayor. En el resto de los casos dicha relación disminuye su nivel de confianza hasta el 90 % en el peor de los casos. No obstante, en los ajustes se cometen errores aceptables del 6.5 % para el *TS* sin compensar a 200 kHz y del 5% para el *TS* compensado a esa misma frecuencia. Para el caso de las medidas a 120 kHz los errores crecen hasta el 9% tanto para el *TS* compensado como para el que no lo está.

Como ya se ha indicado en párrafos anteriores, las medidas de la jaula J5 que contenía los atunes de menor tamaño, ofrecen valores del *TS* mayores de lo esperado, esta desviación, puede ser debida a la distancia de medida (menor que en el resto de los casos por las características de la jaula); al comportamiento de los peces durante las medidas (que realizan excursiones verticales continuas dentro de la jaula) o a una suma de ambos factores. Este hecho, afecta a la calidad de los ajustes presentados en este punto. Hay que tener en cuenta, además, que para esta jaula la cantidad de trazas aisladas es mucho menor que para el resto, factor que también influye en la precisión de los ajustes.

5.3.4. DEPENDENCIA DEL *TS* CON LA DISTANCIA AL TRANSDUCTOR

Es importante conocer cómo se comporta el *TS* a medida que nos alejamos del transductor. Para evaluar si existe algún tipo de dependencia del valor del *TS* con la distancia en el rango de medida, se calculó el *TS* medio en capas de 1 metro.

En la Figura 5.14 podemos observar que a la frecuencia de 120 kHz el *TS* apenas se ve afectado por la distancia para la J20 (tamaño medio de los atunes 199 cm), para las jaulas J2 y J3 existe diferencia entre el *TS* compensado que apenas se ve afectado por la distancia y el *TS* sin compensar que sí presenta pequeñas variaciones a partir de los 15 metros. Este hecho puede deberse a que a partir de esa distancia el número de detecciones por capa disminuye pasando de ser más de 100 a estar por debajo de 50. Finalmente se observa el caso especial de la jaula J5 (tamaño medio 53.3 cm), que como se ha indicado se mide en condiciones especiales (jaula menos profunda y comportamiento de los atunes anómalo). Para el caso de las medidas realizadas a 200 kHz (Figura 5.15) el comportamiento del *TS* con la distancia al transductor se repite, siendo bastante estable para el *TS* compensado (excepto para la J5), y presentando variaciones del *TS* sin compensar para las jaulas J2 y J3 a partir de los 15 metros; seguramente debido a la disminución de detecciones por capa, y repitiéndose el comportamiento de la jaula J5 que contiene los peces de menor tamaño.

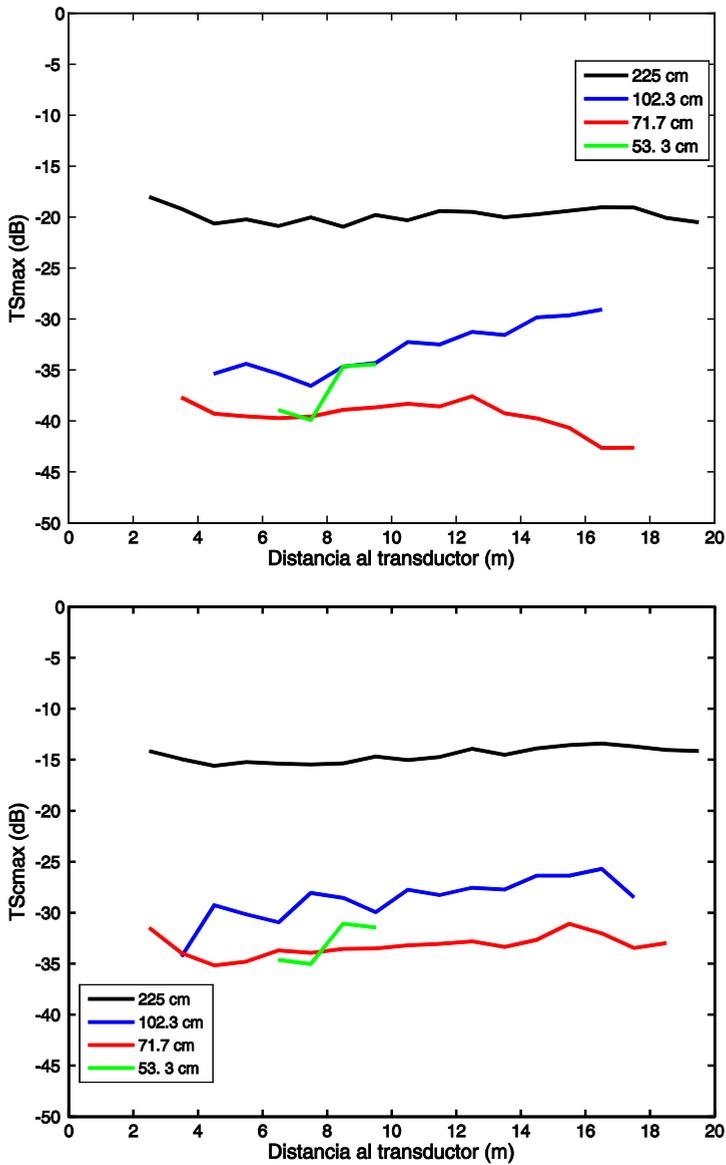


Figura 5.14. Dependencia del TS con la distancia al transductor para una frecuencia de 120 kHz. En la parte superior para el TS máximo sin compensar y en la parte inferior para el TS compensado. Se representa en cada gráfico la evolución del TS con la distancia para las 4 jaulas bajo estudio. En negro J20, en azul J2, en rojo J3 y en verde J5.

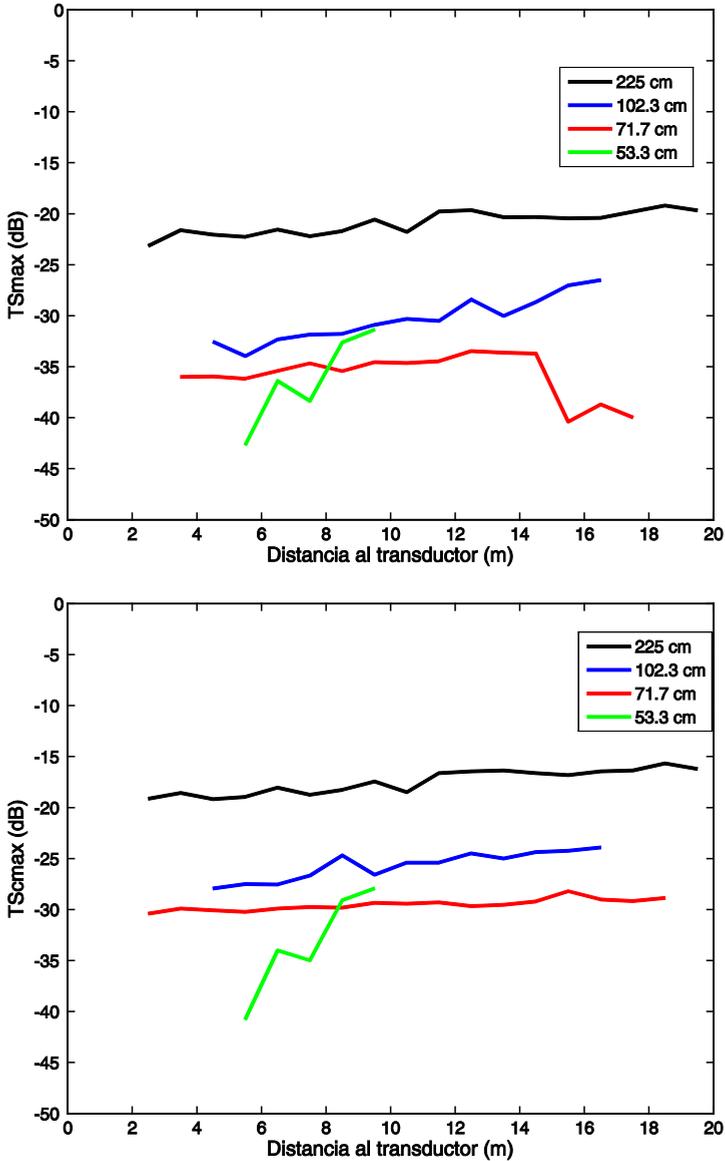


Figura 5.15. Dependencia del TS con la distancia al transductor para una frecuencia de 200 kHz. En la parte superior para el TS máximo sin compensar y en la parte inferior para el TS compensado. Se representa en cada gráfico la evolución del TS con la distancia para las 4 jaulas bajo estudio. En negro J20, en azul J2, en rojo J3 y en verde J5.

A la vista de estas gráficas, se puede pensar que el *TS* compensado necesita de un menos número de detecciones para mantenerse estable, mientras que dicho número de detecciones debe aumentar para que el *TS* sin compensar se mantenga estable con la distancia.

Para el caso de la J5, parece que la variación del *TS* es más acusada a 200 kHz con diferencias mayores a 10 dB entre el *TS* medio de las diferentes capas. Para ilustrar el comportamiento anómalo de los peces en dicha jaula se muestra un ecograma en la Figura 5.16 donde se puede apreciar las excursiones verticales que se producen dentro de la jaula durante las medidas.

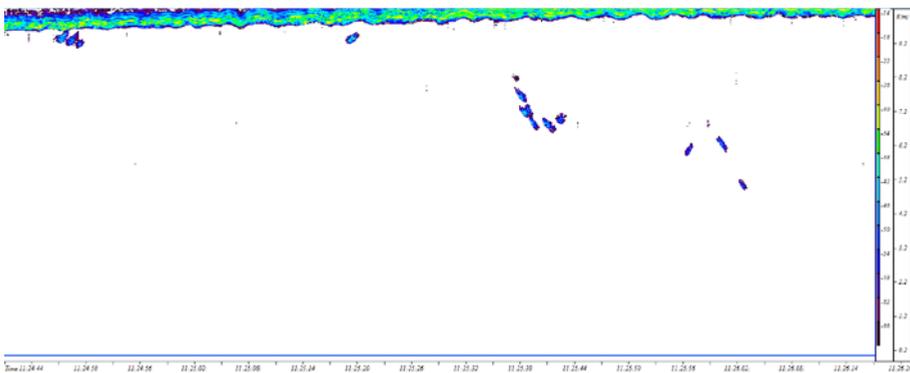


Figura 5.16. Ecograma obtenido de la jaula J5 durante las medidas, se observa en la parte superior una detección continua que se corresponde con el fondo de la jaula. El ecograma ya ha sido limpiado de y se presentan únicamente detecciones de atunes. Se observa como nadan pegados al fondo y después comienzan a ascender en grupo hacia la superficie.

5.3.5. RELACIÓN DEL *TS* DESDE EL PUNTO DE VISTA DORSAL CON EL ÁREA

Para finalizar la presentación de resultados, se presenta la relación del *TS* con el área de las trazas aisladas. Como se explica en el punto 5.2, se implementó un proceso automático que permitía separar las trazas haciendo uso del tratamiento digital de imágenes. El principal criterio (aunque no el único) para separar las trazas es el área de las mismas (definida en la Ecuación 5.1).

En los puntos anteriores se han presentado diferentes expresiones que permiten relacionar la longitud media de los peces con el *TS* medio de los valores de *TS* máximos obtenidos de las trazas aisladas en cada jaula. Siguiendo esta filosofía se propone en este punto una serie de relaciones entre el área de las trazas aisladas y el valor del *TS*.

La realización de medidas biométricas cuando se trata de explotaciones de atún rojo es muy complicada por las características fisiológicas de los peces y su tamaño. Por ello, este tipo de tomas de datos siempre se realizan tras el sacrificio, o con la ayuda de sistemas de visión estereoscópica. Este tipo de trabajos, es costoso tanto en la toma de datos como en el análisis de los mismos que requiere de un operador experto que debe marcar la nariz y la cola de los peces que desea medir en cada par de imágenes.

El objetivo por el cual se desea establecer una relación entre el área de las trazas aisladas y el *TS*, es principalmente poder disponer de información sobre el tamaño de los peces tomando datos con un único instrumento (en este caso una ecosonda) y que permite un procesado que es susceptible de automatización de manera sencilla y sin necesidad de operador que influya en los resultados.

Se abordan estos ajustes de manera sencilla con la intención de evaluar su idoneidad. Se repite el procedimiento clásico presentado en los puntos anteriores para la longitud de los peces, estableciendo un valor medio del área para cada una de las jaulas y buscando una relación entre dicho valor medio y el valor medio del *TS* máximo (compensado y sin compensar) de cada una de las jaulas. Se parte de la Ecuación 5.6 y se buscan ajustes mediante la linealización de dicha ecuación haciendo uso del método de mínimos cuadrados. Al igual que en los casos anteriores se hace uso de los parámetros que definen la bondad de los ajustes: coeficiente de determinación, p-valor y error relativo medio. Se ajustan los datos para las dos frecuencias bajo estudio y se presentan los resultados en la Tabla 5.12.

$$TS(dB) = a \cdot \log_{10} Area + b \quad (5.6)$$

Tabla 5.12. Resultados del ajuste lineal del *TS* máximo de las trazas (compensado y sin compensar) para las dos frecuencias bajo estudio. En este caso se usa el área media de las trazas aisladas en cada jaula en lugar de la longitud media de los atunes.

$TS(dB)=a \cdot \log_{10} Area + b$	<i>TS</i> _{max}		<i>TS</i> _{cmax}	
	120 kHz	200 kHz	120 kHz	200 kHz
a	21.76	17.18	22.05	15.78
b	-86.24	-72.71	-82.28	-64.95
R ²	0.92	0.91	0.89	0.95
p-valor	0.04	0.04	0.05	0.03
EAM (dB)	1.8	1.6	2.0	0.9

La Tabla 5.12 ofrece valores de ajustes con un alto nivel de confianza (del 95% o superior) para los ajustes entre el *TS* máximo y el logaritmo del área de las trazas detectadas, con pendientes cercanas a 20, como dicta la ortodoxia en el caso de relaciones entre el *TS* y la longitud de los peces. Se obtienen coeficientes de determinación del 90% o mayores.

Pero si se establece una relación lineal ente el área de las trazas y el *TS* máximo, eliminado el logaritmo de la Ecuación 5.6 obtenemos los ajustes que se muestran en la Tabla 5.13.

Tabla 5.13. Resultados del ajuste lineal del *TS* máximo de las trazas (compensado y sin compensar) para las dos frecuencias bajo estudio. En este caso se usa el área media de las trazas aisladas en cada jaula en lugar de la longitud media de los atunes. Se realiza ajuste sin usar el logaritmo del área.

<i>TS</i> (dB)= <i>a</i> · <i>Area</i> + <i>b</i>	<i>TS</i> max		<i>TS</i> cmax	
	120 kHz	200 kHz	120 kHz	200 kHz
a	0.0228271	0.0174041	0.0236173	0.0159518
b	-41.30	-36.89	-36.94	-32.04
R ²	0.97	0.96	0.98	0.99
p-valor	0.02	0.02	0.007	0.001
EAM (dB)	1.1	0.8	0.7	0.2

En la Tabla 5.13 podemos ver que retirando el logaritmo de la ecuación se obtienen ajuste con un alto nivel de confianza a ambas frecuencias y con el *TS* compensado y sin compensar. Los valores del coeficiente de determinación están siempre por encima del 96% que indica que existe una relación muy fuerte entre las variables. Además, el error absoluto medio (calculado como el valor medio de los residuos) disminuye de manera significativa.

5.4. CONCLUSIONES

Se han encontrado expresiones que relacionan el *TS* máximo medido de forma dorsal con la longitud del atún rojo para las frecuencias de 120 y 200 kHz. Todas las medidas se han realizado en jaulas de engorde; este hecho, introduce limitaciones en las medidas, ya que, dichas medidas del *TS* se realizan a cortas distancias. Se observa que todas las distribuciones halladas tienen carácter unimodal, al contrario de lo presentado en otros trabajos realizados con otras especies (Knudsen *et al.*, 2004; Soliveres, 2015). Los valores obtenidos a 120 kHz son menores que los obtenidos a 200 kHz excepto para el caso de la jaula que contiene los peces de mayor tamaño (J20, tamaño medio 225 cm). El valor de la pendiente en las expresiones que relacionan el *TS* y el logaritmo de la longitud para 120 kHz son similares a las obtenidas en otros trabajos en los que se realizan medidas “in situ” y a grandes distancias (Bertrand *et al.*, 1999) de especies de atunes similares; así como para trabajos en los que se realizan medidas “ex situ” de atunes de aleta amarilla de longitud menor a un metro, realizadas a corta distancia a 200 kHz como frecuencia de trabajo. Por otro lado, las medidas a 200 kHz poseen una pendiente más cercana a 20. Se realiza el ajuste fijando la pendiente a un valor de 20, los valores del coeficiente de correlación y el error absoluto medio para la frecuencia de 200 kHz se mantienen, mientras que para 120 kHz los coeficientes de correlación bajan, aumentando el error absoluto medio. Este hecho es debido a que, para el caso de 200 kHz, las pendientes son cercanas a 20 mientras que para 120 kHz las pendientes obtenidas están por cerca de 30. Hay que destacar, además, que para los ajustes en los que la pendiente se fuerza, los p-valores se mantienen en todo caso por debajo de 0.05 (siendo el nivel de confianza del 95%).

Se ha elegido la utilización del valor máximo del *TS* en cada traza, entendiendo que se referirá, en la mayoría de los casos, a la energía acústica devuelta por la vejiga del atún, ya que, está demostrado que es este órgano el responsable de la mayor cantidad de energía devuelta por los peces que disponen de ella. Teniendo en cuenta la dificultad de la compensación del *TS* por las características de los blancos evaluados, que por su tamaño no pueden considerarse puntuales; se ha realizado un estudio entre las relaciones del *TS* máximo compensado y sin compensar con la longitud media de los peces. Los resultados obtenidos, permiten observar una ligera mejora de la bondad de los ajustes obtenidos al hacer uso del *TS* máximo compensado. Se ha establecido la relación inversa, que permite calcular la longitud de los peces a partir del valor máximo del *TS*. Este hecho, ya presentado en trabajos anteriores (Soliveres, 2015); permitiría poder obtener datos biométricos a partir de los valores acústicos.

Se ha realizado un estudio de la evolución del *TS* máximo con la distancia al transductor en el rango de trabajo, circunscrito al tamaño de las jaulas que se utilizan para engordar atunes. Los resultados muestran una baja dependencia del *TS* con la distancia cuando se evalúa el *TS* máximo compensado (tanto a 120 como a 200 kHz). Sin embargo, cuando se usa el *TS* máximo sin compensar, el *TS* se vuelve menos estable a partir de los 15 metros, seguramente debido por el descenso del número de detecciones por capa a partir de dicha

distancia. Además, si se tiene en cuenta la frecuencia de trabajo, los datos a 120 kHz parecen menos dependientes de la distancia que los obtenidos a 200 kHz. Por las diferencias expuestas entre el *TS* compensado y sin compensar, puede inferirse que el *TS* compensado necesita de una menor cantidad de detecciones para mantenerse estable con la distancia frente al *TS* sin compensar que se mantiene más estable si al menos existen 100 detecciones por capa evaluada.

Como se ha indicado en la presentación de los resultados, los datos recogidos en la jaula J5, donde estaban los atunes de menor tamaño, ofrecen valores del *TS* máximo mayores a lo esperado, ya que, superan o son comparables a los obtenidos en la jaula J3 (de tamaño medio 20 cm mayor). Este hecho puede deberse a diferentes factores, la distancia de medida es menor (10 metros como máximo) debido a las características de la jaula donde estaban alojados. Por otro lado, los atunes durante las medidas realizaban excursiones verticales de subida y bajada de manera continuada, produciéndose un comportamiento anómalo, debido posiblemente a la presencia de los equipos de medida acústica y óptica en la jaula, así como a la embarcación desde donde se realizaron las medidas y las que realizaban trabajos en las instalaciones (ya que como se demostró en el capítulo 4 la especie es sensible a este tipo de estímulos sonoros). La suma de estos dos factores provocó que el número de detecciones fuera más bajo que en el resto de las jaulas.

Se ha presentado un método de selección automático de las trazas de atunes mediante tratamiento digital de imágenes. Por la configuración elegida para las medidas, las trazas que se obtienen tienen una forma compleja, de tal manera que se puede establecer un área para cada una de las trazas aisladas. Aprovechando que se dispone de este dato, se ha presentado como técnica alternativa, la relación entre el área de las trazas aisladas y el *TS*. Haciendo uso de la misma filosofía que se utiliza para relacionar la longitud de los peces y el *TS*, se han obtenido ajustes con parámetros de bondad que proporcionan niveles de confianza por encima del 95 % y coeficientes de determinación cercanos por encima del 96%. Teniendo en cuenta los resultados obtenidos con esta técnica, parece viable poder obtener estimaciones del tamaño a partir de las expresiones obtenidas. No obstante, es necesario establecer relaciones entre la longitud de los peces y el área de las trazas aisladas.



6.1. INTRODUCCIÓN

El atún rojo (*Thunnus thynnus*) es una especie altamente migratoria, que se distribuye a lo largo del Atlántico norte y el mar Mediterráneo. Se han definido dos poblaciones separadas. Por una parte, se tiene la población del Este, que incluye el mar Mediterráneo y el océano Atlántico hasta el meridiano 45° W. Por otra parte, está la población del Oeste, que abarca el océano atlántico oeste desde el citado meridiano. Esta separación se basa en características biológicas, zonas de reproducción, diferenciación genética y diferente edad de madurez sexual (Fromentin and Powers, 2005).

Conocer el tamaño de los peces es biológicamente relevante, puesto que, muchos factores fisiológicos y biológicos dependen del tamaño. Por ello, las relaciones entre el peso y la longitud son importantes en los estudios del medio marino, y en gestión de las diferentes pesquerías, ya que, dichas relaciones permiten realizar estimaciones de la biomasa a partir de la longitud de los peces, estimar las capturas y calcular el factor de condición de los peces (Rodríguez-Marin *et al.*, 2015).

Ante el incipiente desarrollo de la acuicultura del atún rojo (basada en la captura), es necesario disponer de una relación entre el peso y la longitud para poder controlar el engorde de los peces durante el proceso de engrase que se produce en las granjas (De la Gándara, F. *et al.*, 2016). Habitualmente, en las granjas de acuicultura se realizan muestreos manuales para disponer de datos de peso medio. Sin embargo, en el caso del atún rojo, estos muestreos son muy costosos y requieren de maniobras de bastante dificultad que generan un fuerte estrés a los peces y mortalidades no deseadas. Por ello,

se suelen efectuar muestreos mediante sistemas de cámaras estereoscópicas que proporcionan, de forma no invasiva, grabaciones de los peces desde una vista lateral. Dichas grabaciones permiten evaluar la longitud de los peces midiéndola en cada par de imágenes provenientes del sistema estereoscópico. Algunos de estos sistemas, además de la longitud permiten usar la altura máxima de los peces para estimar el peso (Aguado, 2006 ; Katavi et al., 2016).

Puig *et al.*, (2012) propusieron en su trabajo la medida el atún rojo desde el punto de vista ventral con el objetivo de estudiar la correlación entre la longitud y el *TS* desde el punto de vista ventral. Para ello se utilizó una ecosonda sincronizada con un sistema de cámaras estereoscópicas colocadas en el fondo de la jaula y orientadas hacia la superficie, a diferencia de la configuración habitual en la que se toman las imágenes lateralmente. Esta configuración con las cámaras mirando hacia la superficie facilita la obtención de imágenes de mayor calidad cuando las condiciones de visibilidad son bajas, y además permite tomar medidas de dos de las dimensiones de los atunes apreciables desde este punto de vista, la longitud y la anchura máxima. Disponer de estas nuevas relaciones biométricas permitirá profundizar en el conocimiento del proceso de engrase de los atunes en las granjas después de ser capturados.

En este trabajo se estudian las relaciones entre el peso y diferentes medidas biométricas: la longitud, la altura máxima y la anchura máxima de los atunes mediante ajustes estadísticamente significativos y con claro poder predictivo. Con los resultados obtenidos se pretende completar los estudios ya existentes, centrados en relacionar el peso de los atunes con su longitud, que no consideran en ningún caso otra dimensión de los peces.

6.2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se dispone de biometrías realizadas en la granja de engorde de atunes que el *Grup Balfegó* tiene frente a la costa de l'Ametlla de Mar en Tarragona. Dichas biometrías fueron realizadas los años 2012 y 2013 y aportan información de un total de 2911 individuos. La información obtenida incluye datos de longitud, peso bruto, altura y sexo de los atunes tomados después del sacrificio tras el periodo de engorde. Además, para 1261 de esos peces se conoce la anchura máxima.

Con el objetivo de obtener una muestra representativa y realista sobre la que trabajar, evitando efectos indeseables sobre los resultados finales debidos a la existencia de outliers evidentes, antes de realizar el análisis estadístico de los datos se optó por filtrar las muestras atendiendo al tamaño máximo de los atunes. Los últimos trabajos publicados fijan la talla máxima del atún rojo (*Atlantic bluefin tuna*) alrededor de los 331.2 cm ($L_{max}=319.93\pm 11.3$ cm) como indican en su trabajo Cort *et al.* (2013). Por ello, se realizó

un filtrado de los datos en el que se eliminaron los individuos cuya longitud excedía de dicho valor (330 cm).

Con los datos filtrados, se ensayó el ajuste minimocuadrático para diversos modelos matemáticos, cuyas expresiones consideran como variables predictoras diferentes dimensiones de los peces. El objetivo es verificar la validez de expresiones matemáticas que permitan relacionar dichas dimensiones con el peso de los atunes para, de esta forma, obtener modelos para la predicción del peso del atún, atendiendo a sus dimensiones. Concretamente, se han obtenido expresiones que relacionan el peso con una o varias dimensiones considerando la altura, la longitud y la anchura máxima. Por otra parte, de cara a conocer y verificar relaciones entre las dimensiones de los atunes, también se han estudiado expresiones que relacionan altura con longitud y anchura máxima con longitud.

Para validar los modelos obtenidos de los ajustes, se reservaron 500 individuos elegidos aleatoriamente al inicio del estudio. Los ajustes se realizaron con los datos correspondientes al resto de individuos.

Es importante tener en cuenta que todos los modelos considerados se pueden linealizar y para evitar problemas computacionales los ajustes se han realizado con los modelos linealizados. De cara a valorar si cada uno de los modelos considerados es estadísticamente significativo, se calcula el estadístico F , que permite contrastar la hipótesis de que el coeficiente de determinación es no nulo, y por lo tanto el modelo explica de forma estadísticamente significativa (p -valor <0.05) la relación entre variables. El coeficiente de terminación ajustado a grados de libertad (R^2 (df)) ofrece una idea de la cantidad de variabilidad correspondiente a la variable dependiente explicada por el modelo.

Como se ha indicado anteriormente, se han probado nuevos procedimientos experimentales durante las transferencias a partir de los estudios realizados por Puig *et al.* (2012). En ellos se realizan grabaciones desde el punto de vista ventral de los atunes, tanto acústica como ópticamente. Esta metodología permite obtener medidas de la longitud y de la anchura máxima de los peces que son transferidos desde las jaulas de transporte a las de engrase. Para explorar la posibilidad de obtener de manera indirecta la altura de los peces a partir de la longitud y la anchura máxima, se ha ensayado un ajuste con los datos proporcionados por la empresa *Grup Balfegó* (M14) además la ecuación M15 será de utilidad en la validación de los datos biométricos obtenidos mediante el nuevo procedimiento experimental probado en las transferencias, ya que relaciona la anchura máxima y la longitud (Tabla 6.1).

En la Tabla 6.2 se muestran los modelos considerados (M1-M13) para describir el peso (W) en función de las variables independientes longitud (L), altura (H) y anchura máxima (A), la linealización de cada uno de ellos y los parámetros de ajuste a calcular. Los modelos M1 y M2 establecen relaciones entre el peso y la longitud (L) y la altura (H) de los peces. Los modelos M3, M4, M5 y M6 relacionan el peso con la longitud y la anchura máxima (A). Los modelos M7, M8, M9, M10, y M11 relacionan el peso con las tres dimensiones

de los peces: longitud (L), altura (H) y anchura máxima (A). Finalmente, los modelos M12 y M13 sólo relacionan el peso con la longitud del pez y su anchura máxima respectivamente, tal y como suele realizarse habitualmente.

Tabla 6.1. Modelos propuestos para el cálculo de la altura a partir de la longitud y la anchura, y la relación entre la longitud y la anchura máxima. Se presenta su ecuación linealizada para realizar el ajuste lineal por el método de mínimos cuadrados.

Identificador del Modelo	Ecuación	Ecuación linealizada	Parámetros
M14	$H = (L \cdot A)^b$	$\log_e(H) = b \cdot \log_e(L \cdot A)$	b
M15	$A = a \cdot L$	--	a

Tabla 6.2. Identificador de los modelos, ecuación de los modelos propuestos, y ecuación del modelo linealizado y parámetros a calcular.

Identificador del Modelo	Ecuación	Ecuación linealizada	Parámetros
M1	$W = a \cdot L^2 \cdot H$	--	a
M2	$W = a \cdot (L + H)^b$	$\log_e(W) = \alpha + b \log_e(L + H)$	a, b
M3	$W = a \cdot L^b \cdot A$	$\log_e(W) - \log_e(A) = \alpha + b \cdot \log_e(L)$	a, b
M4	$W = a \cdot L \cdot A^b$	$\log_e(W) - \log_e(L) = \alpha + b \log_e(A)$	a, b
M5	$W = a \cdot (L + A)^b$	$\log_e(W) = \alpha + b \cdot \log_e(L + A)$	a, b
M6	$W = a \cdot L^{2.06} \cdot A$	--	a
M7	$W = a \cdot L \cdot H \cdot A$	--	a
M8	$W = a \cdot (L \cdot H \cdot A)^b$	$\log_e(W) = \alpha + b \cdot \log_e(L \cdot H \cdot A)$	a, b
M9	$W = a \cdot (L + H + A)^b$	$\log_e(W) = \alpha + b \cdot \log_e(L + H + A)$	a, b
M10	$W = a \cdot L \cdot H^b \cdot A^c$	$\log_e(W) - \log_e(L) = \alpha + b \log_e(H) + c \log_e(A)$	a, b, c
M11	$W = a \cdot L^b \cdot H^c \cdot A^d$	$\log_e(W) = \alpha + b \log_e(L) + c \log_e(H) + d \log_e(A)$	a, b, c, d
M12	$W = a \cdot L^b$	$\log_e(W) = \alpha + b \log_e(L)$	a, b
M13	$W = a \cdot A^3$	--	a

En todos los casos $\alpha = \log_e(a)$

Para la validación, se considerarán los datos correspondientes a los 500 individuos reservados inicialmente. Se estimará el peso con las diferentes expresiones consideradas y se evalúa la validez del modelo en base al análisis de la diferencia entre el valor real de peso y el valor de peso estimado por cada una de las expresiones evaluadas. Para ello, se analizará la bondad del ajuste en base al coeficiente de determinación no lineal, R^2 (d.f.):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (pr_i - pm_i)^2}{\sum_i (pr_i - \overline{pr})^2} \quad (6.1)$$

$$R^2(d.f.) = R^2 - (1 - R^2) \frac{p-1}{n-p} \quad (6.2)$$

donde pr es el peso real, pm es el peso estimado, \overline{pr} es el peso real medio, p es el número de variables explicativas y n es el tamaño de la muestra.

Además, se calcula la media de los errores absolutos (EAM):

$$EAM = \frac{\sum |pr_i - pm_i|}{n} \text{ Kg} \quad (6.3)$$

el error estándar de los errores absolutos (e_{Ea}):

$$e_{Ea} = \frac{\text{desviación estandar de los errores absolutos}}{\sqrt{n}} \quad (6.4)$$

la media de los errores relativos (ERM):

$$ERM = \frac{\sum \frac{|pr_i - pm_i|}{pm_i}}{n} \quad (6.5)$$

y el error estándar de los errores relativos (e_{Er})

$$e_{Er} = \frac{\text{desviación estandar de los errores relativos}}{\sqrt{n}} \quad (6.6)$$

Para evaluar si las predicciones de las expresiones obtenidas y las utilizadas para peces salvajes subestiman o sobreestiman el peso se calcula también el valor medio de los residuos ($resm$):

$$resm = \frac{\sum pr - pm}{n} \quad (6.7)$$

A la hora de validar los modelos, se ha considerado también, como referencia, la expresión de Deguara *et al.* (2016) que se usa para estimar el peso a partir de la longitud en peces salvajes justo antes o durante la puesta. Este modelo es una concreción de la ecuación 6.8, con $a=0.0000287$ y $b=2.9076$.

$$W = a \cdot L^b \quad (kg) \quad (6.8)$$

Para establecer si existen diferencias estadísticamente significativas entre el poder predictor de los distintos modelos, se realizan análisis ANOVA sobre la media del error absoluto, la media del error relativo y la media de los residuos, considerando en los tres casos como factor el modelo. El test de rangos múltiples permitirá establecer entre qué modelos se detectan diferencias estadísticamente significativas (p -valor <0.05).

6.3. RESULTADOS

La Tabla 6.3, contiene los valores de los parámetros calculados para cada modelo. El ajuste a los modelos linealizados se ha realizado con ayuda del software Statgraphics CENTURION XVI (StatPoint Technologies, Inc; 2013). Los valores de $R^2(df)$ corresponden a los modelos linealizados por lo que no son comparables entre sí. La tabla también incluye los grados de libertad de cada modelo y el valor del estadístico F que se utiliza para calcular el p -valor asociado al contraste de que el modelo es estadísticamente significativo ($R^2(df)$). Los resultados indican que, en todos los casos los modelos son estadísticamente significativos a un nivel de confianza del 95%.

Tabla 6.3. Coeficientes y valores de R^2 (ajustados a grados de libertad de cada uno de los ajustes). Todos con un p -valor por debajo de 0.05

<i>Modelo</i>	$R^2(df)$	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>df</i>	<i>F</i>
M1	99.73	$8.05636 \cdot 10^{-5}$	--	--	--	1	215961.39
M2	95.14	$4.56 \cdot 10^{-6}$	3.15114	--	--	1	11102.06
M3	97.24	$7.21719 \cdot 10^{-5}$	2.07092	--	--	1	2086.06
M4	62.40	$7.57888 \cdot 10^{-5}$	1.28121	--	--	1	937.82
M5	89.19	$1.45985 \cdot 10^{-5}$	2.96853	--	--	1	4662.33
M6	97.25	$7.45313 \cdot 10^{-5}$	--	--	--	1	20047.43
M7	97.23	$3.7313 \cdot 10^{-4}$	--	--	--	1	19909.76
M8	90.74	$1.56057 \cdot 10^{-4}$	0.916383	--	--	1	5555.33
M9	92.05	$7.8085 \cdot 10^{-6}$	2.97397	--	--	1	6558.30
M10	91.08	$4.9584 \cdot 10^{-5}$	1.74506	0.133815	--	2	2892.20
M11	95.99	$1.0775 \cdot 10^{-5}$	1.67757	1.26742	0.091396	3	4515.77
M12	92.70	$7.21679 \cdot 10^{-6}$	3.20805	--	--	1	7178.54
M13	99.00	$2.512961 \cdot 10^{-3}$	--	--	--	1	4857921.92
M14	99.98	--	0.443762	--	--	1	56262.90
M15	97.28	0.209187	--	--	--	1	20362.75

La validación de los modelos, que se ha efectuado con los datos de 500 individuos, se realiza a partir del cálculo de diversos indicadores: el coeficiente de determinación no lineal ajustado a grados de libertad, el error absoluto medio, el error relativo medio, y sus correspondientes errores estándar, y por último el valor medio de los residuos. Este último

indicador permite establecer si los valores estimados se adaptan a los valores observados o, por el contrario, subestiman o sobreestiman dichos valores (Tabla 6.4). La Tabla 6.4 se completa con los resultados que se obtienen para un modelo de referencia para las relaciones entre la longitud y el peso de los atunes publicadas recientemente. Se trata del propuesto por Deguara *et al.* (2016).

En la Tabla 6.4 se muestran los valores de indicadores de la bondad de los ajustes que relacionan el peso con una o más de una dimensión de los atunes. Los resultados indican que disponer de la altura o la anchura de los atunes engordados mejora el poder predictivo del modelo dado que aumentan los valores del coeficiente de determinación al tiempo que se reduce tanto el error absoluto medio como el error relativo medio. Lo mismo ocurre considerando las tres dimensiones (longitud, altura y anchura). En el caso de considerar la anchura máxima y la longitud los valores del coeficiente de determinación son ligeramente menores, pero se aprecia un descenso en los valores de error absoluto medio y del error relativo medio, respecto a los obtenidos cuando se utiliza solo una dimensión en el modelo. El modelo 13 (M13) nos muestra un ajuste entre el peso de los atunes y su anchura máxima. Revisando los valores obtenidos del ajuste, se aprecian bajos errores absolutos y relativos comparables a los obtenidos al considerar como única dimensión en el ajuste la longitud.

En la Figura 6.1 se representan los valores observados frente a los predichos para todos los ajustes que consideran una única dimensión para estimar el peso: el modelo presentado por Deguara *et al.* (2016) y los modelos M12 y M13 presentados en este trabajo.

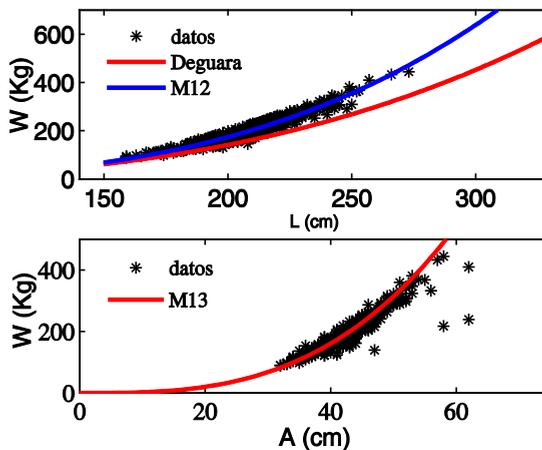


Figura 6.1. Gráfico del modelo ajustado M12, y el modelo de referencia de Deguara *et al.* (2016). Gráfico del modelo Ajustado M13 abajo.

Tabla 6.4. Valores de los parámetros que definen la bondad de los ajustes, que relacionan el peso las dimensiones de los atunes; calculados a partir de los datos reservados para la validación.

<i>Ajuste</i>	$R^2(d.f.)$	<i>EAM (kg)</i>	$e_{Ea} (kg)$	<i>ERM (%)</i>	$e_{Er} (%)$	<i>resm (Kg)</i>
Deguará	24.31	42.30	0.91	25.68	0.43	42.1
M1	95.17	8.77	0.36	4.57	0.21	0.16
M2	94.94	9.41	0.34	4.85	0.19	0.95
M3	94.98	9.36	0.34	4.88	0.18	1.88
M4	88.04	14.84	0.51	7.43	0.23	4.73
M5	93.19	11.47	0.37	5.99	0.19	7.08
M6	93.66	10.84	0.37	5.51	0.19	2.49
M7	93.19	10.88	0.40	5.93	0.25	7.76
M8	95.21	9.23	0.33	4.74	0.17	2.04
M9	94.58	9.11	0.39	4.70	0.22	2.36
M10	94.16	8.44	0.44	4.56	0.32	1.04
M11	95.26	8.24	0.38	4.36	0.24	0.92
M12	86.27	15.19	0.58	7.17	0.26	-13.05
M13	87.60	13.31	0.61	6.36	0.30	-4.24

En la Figura 6.2 se muestran los valores observados frente a los valores calculados con el ajuste realizado para todos los modelos que relacionan el peso y al menos dos dimensiones de los atunes (L , H y A).

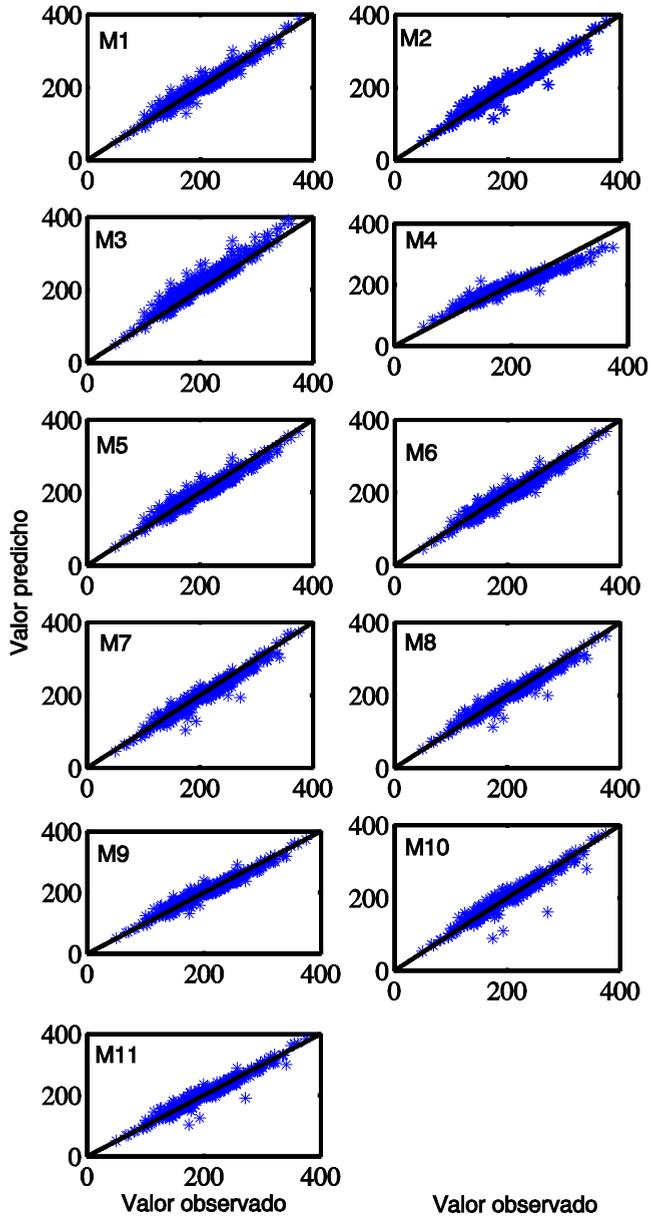


Figura 6.2. Gráficos de valores de peso observados frente a los predichos para los modelos del 1 al 11.

El análisis comparativo entre modelos que relacionan el peso con dimensiones del pez se completa con los resultados del ANOVA realizado sobre el error absoluto medio, el error relativo medio y la media de los residuos, correspondiente a los distintos modelos analizados (Tabla 6.5). Para establecer la homogeneidad de los grupos se ha utilizado el método LSD de Fisher, con un nivel de confianza del 95%

Tabla 6.5. Resultados de aplicar el test de múltiples rangos para las medias de los errores absolutos. El valor F es el correspondiente al ANOVA que contrasta la igualdad de todas medias. También se indica la media del error absoluto (en orden creciente) para cada modelo. La última columna indica las variables predictoras y cuando entre dos filas coincide alguna letra, esto indica que no hay diferencias estadísticamente significativas (95%) entre las medias.

$F=299.64, p<0.000$ MODELO	Media	Variables Predictoras
<i>M11</i>	8,23629	LHA (a)
<i>M10</i>	8,43998	LHA (a)
<i>M1</i>	8,76972	LH (a)
<i>M8</i>	9,11387	LHA (a)
<i>M9</i>	9,22796	LHA (a)
<i>M3</i>	9,35717	LA (a)
<i>M2</i>	9,40722	LH (a)
<i>M5</i>	10,8446	LA (b)
<i>M7</i>	10,8837	LHA (b)
<i>M6</i>	11,466	LA (b)
<i>M13</i>	13,3114	A (c)
<i>M4</i>	14,8372	LA (d)
<i>M12</i>	15,1931	L (d)
<i>Deguara</i>	42,1138	L (e)

Tabla 6.6. Resultados de aplicar el test de múltiples rangos para las medias de los errores relativos El valor F es el correspondiente al ANOVA que contrasta la igualdad de todas medias. También se indica la media del error relativo (en orden creciente) para cada modelo. La última columna indica las variables predictoras y cuando entre dos filas coincide alguna letra, esto indica que no hay diferencias estadísticamente significativas (95%) entre las medias.

$F=690.45, p<0.000$ MODELO	Media	Variables predictoras
<i>M11</i>	4,35771	LHA (a)
<i>M10</i>	4,55862	LHA (ab)
<i>M1</i>	4,56925	LH (ab)
<i>M8</i>	4,70279	LHA (ab)
<i>M9</i>	4,74283	LHA (ab)
<i>M2</i>	4,85382	LH (ab)
<i>M3</i>	4,8763	LA (ab)
<i>M5</i>	5,5126	LA (bc)
<i>M7</i>	5,9294	LHA (c)
<i>M6</i>	5,9944	LA (c)
<i>M12</i>	7,17349	L (d)
<i>M4</i>	7,42609	LA (d)
<i>M13</i>	13,3114	A (f)
<i>Deguara</i>	25,6784	A (g)

Tabla 6.7. Resultados de aplicar el test de múltiples rangos para las medias de los residuos El valor F es el correspondiente al ANOVA que contrasta la igualdad de todas medias. También se indica la media de los residuos para cada modelo. La última columna indica las variables predictoras y cuando entre dos filas coincide alguna letra, esto indica que no hay diferencias estadísticamente significativas (95%) entre las medias.

$F=346.06, p<0.000$ MODELO	Media	Variables Predictoras
<i>M12</i>	-13,0472	L (a)
<i>M13</i>	-4,25704	A (b)
<i>M1</i>	0,1596	LH (c)
<i>M11</i>	0,92156	LHA (cd)
<i>M2</i>	0,95214	LH (cd)
<i>M10</i>	1,03688	LHA (cd)
<i>M3</i>	1,88382	LA (cd)
<i>M9</i>	2,03888	LHA (d)
<i>M8</i>	2,36122	LHA (d)
<i>M5</i>	2,48826	LA (d)
<i>M4</i>	4,7283	LA (e)
<i>M6</i>	7,08378	LA (f)
<i>M7</i>	7,75778	LHA (f)
<i>Deguara</i>	42,1138	L (h)

Si nos fijamos en la Tabla 6.5, en la que se representa el análisis ANOVA sobre los valores medios del error absoluto para todos los modelos ajustados y el modelo de referencia (Deguara *et al.* (2016)); se puede observar que la introducción de más de una dimensión en el ajuste disminuye el valor del error absoluto medio. Queda claro que la introducción de tres dimensiones proporciona los errores absolutos menores (como es el caso de los M10 y M11). En dicha tabla se muestra como los modelos M11, M10, M1, M8, M9, M3 y M2 proporcionan errores absolutos inferiores a los 10 Kg. Si nos fijamos en la Tabla 6.6, en la que se representan los valores del análisis ANOVA realizado a los errores relativos, se puede observar que estos mismos ajustes (M11, M10, M1, M8, M9, M3 y M2) proporcionan estimaciones del peso con errores por debajo del 5%, valores aceptables y en el mismo rango que los ofrecidos por sistemas de estimación de la talla de manera indirecta como los formados por cámaras estereoscópicas (Aguado 2006). Tanto en esta tabla como en la anterior se constata además que utilizar una sola dimensión aumenta el error en la predicción del peso. Aunque es reseñable que, utilizar la anchura máxima en lugar de la longitud no aumenta de manera significativa el error, como se desprende de los valores del error medio absoluto y relativo de los M12, M13 y el modelo de referencia de Deguara. Sin embargo, es muy importante recordar que el modelo de referencia (Deguara *et al.*, 2016), se ha obtenido para estimar el peso de peces salvajes, habitualmente antes o durante la puesta, no siendo su objetivo los peces capturados y engordados en cautividad posteriormente. Además, es más que plausible suponer que, en el caso de peces salvajes, la longitud sea la dimensión más determinante para la predicción del peso. Por otra parte, en los peces engordados en cautividad, las dimensiones se ven afectadas por las condiciones de vida, de tal modo que el resto de dimensiones, en especial la anchura, ganan relevancia como variables predictoras del peso.

Del mismo modo, en la Tabla 6.7, queda reflejado el resultado del análisis ANOVA del valor medio de los residuos. En este caso como en los anteriores las mínimas desviaciones se producen para los ajustes M1, M11, M2, M10, M3, M9, M2 y M5, todos ellos con valores menores que 3, siendo excepcionalmente bajos y menores que 1 para los ajustes M1, M11 y M2. Este hecho viene a confirmar, que aumentar el número de dimensiones en la determinación del peso mejora las predicciones que ofrecen los ajustes. Del mismo modo deja entrever que, el uso de las expresiones más extendidas para la estimación de los peces en estado salvaje necesitan una adaptación para ajustarse a los valores obtenidos con peces engordados en cautividad, ya que; tienden a sobreestimar los valores del peso. Por el contrario, cuando se ajustan los datos con una única dimensión (longitud (L) o anchura (A)) como muestran M12 y M13, se tiende a subestimar el peso medio en las predicciones.

Obtener los datos biométricos de los atunes es complicado en estado salvaje. Sin embargo, cuando los peces se hallan recluidos en jaulas para su engorde, es posible disponer de estos datos haciendo uso de diferentes técnicas. Algunas de estas técnicas están testadas y validadas para esta especie, como por ejemplo los sistemas de visión estereoscópica

(Aguado, 2006). Otras técnicas, que se encuentran en fase de desarrollo, permiten obtener estos datos de manera indirecta. Este sería el caso de las técnicas acústicas (Soliveres, 2015). Además, nuevos procedimientos para la estimación del número y la talla de los atunes durante los procesos de transferencia entre jaulas están siendo testados (dentro del proyecto BIACOP" (ES/13/41) financiado por la Comisión de la UE mediante la decisión ejecutiva de la Comisión de la UE de 10 de julio de 2013 (2013/410/UE)). En la Tabla 6.8 se resumen los indicadores de bondad de ajuste utilizados para la validación de los modelos que relacionan la altura con la longitud y la anchura máxima y la longitud con la anchura máxima.

Tabla 6.8. Valores de los parámetros que definen la bondad de los ajustes (Modelos 14 y 15) calculados a partir de los datos reservados para la validación.

<i>Ajuste</i>	$R^2(d.f.)$	<i>EAM (kg)</i>	e_{Ea} (kg)	<i>ERM (%)</i>	e_{Er} (%)	<i>Resm (kg)</i>
M14	86.06	1.55	0.07	2.73	0.12	0.21
M15	84.94	1.24	0.05	2.89	0.11	-0.40

En las tablas 6.4 y 6.8 se incluye además el valor medio de los residuos. Como ya se ha indicado, del análisis de valores medios de los residuos se infiere que la mayoría de los modelos sobreestiman el peso de los atunes, no obstante, dicha sobreestimación disminuye al incluir más de una dimensión del atún, siendo cercana a cero para el M1 que incluye solo la altura. Los modelos 12 y 13 subestiman el peso. El primero hace uso sólo de la longitud como variable independiente y el segundo hace uso sólo de la anchura. Que el valor medio de los residuos esté cercano a cero nos indica la fiabilidad de la predicción ofrecida por el ajuste. Para el caso de la determinación de la altura a partir de la longitud y la anchura (M14), el valor medio de los residuos es prácticamente cero, que junto con los valores de los errores menores del 3%, indican la posibilidad de obtener esta dimensión de manera indirecta a partir de las otras dos. Del mismo modo el modelo 15 nos indica que existe una relación entre la longitud y la anchura de los peces engordados, que se comprueba con los bajos errores que se cometen en la predicción y sus residuos cercanos a cero.

Para completar la representación de los resultados se muestra en la Figura 6.1 los modelos ajustados solo con una dimensión. En la parte superior la longitud (L) y en la parte inferior la anchura. En este gráfico se aprecia la necesidad de una revisión de las expresiones utilizadas con peces en libertad para adaptarlas a los peces engordados en jaulas. En este mismo gráfico y en la Tabla 6.4 se observa que, el uso de la anchura como única variable para predecir el peso ofrece buenos resultados con errores por debajo del 10 %. Las figuras

6.2 y 6.3 muestran los gráficos de los valores observados frente a los predichos para cada uno de los modelos considerados en la validación.

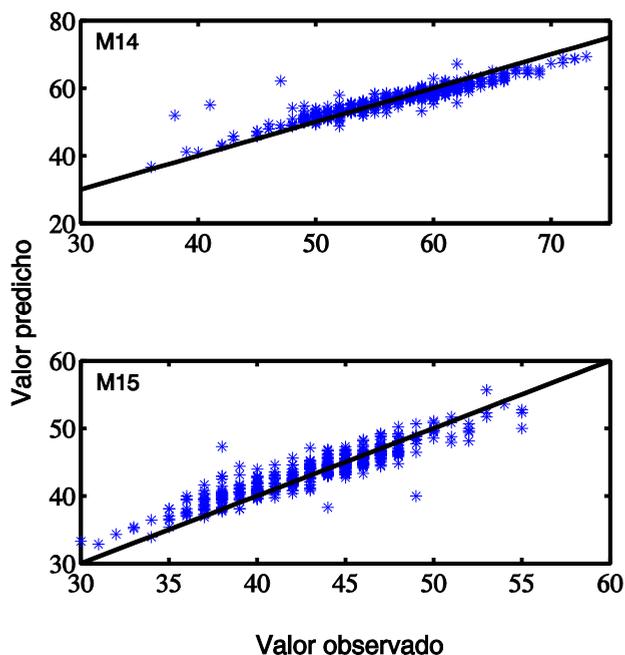


Figura 6.3. Gráficos de valores observados frente a los predichos para los modelos 14 y 15. Para el modelo M14 se representa el valore predicho frente al observado de la altura (arriba) mientras que para el M15 se representa el valor observado frente al predicho para la anchura (abajo).

6.4. CONCLUSIONES

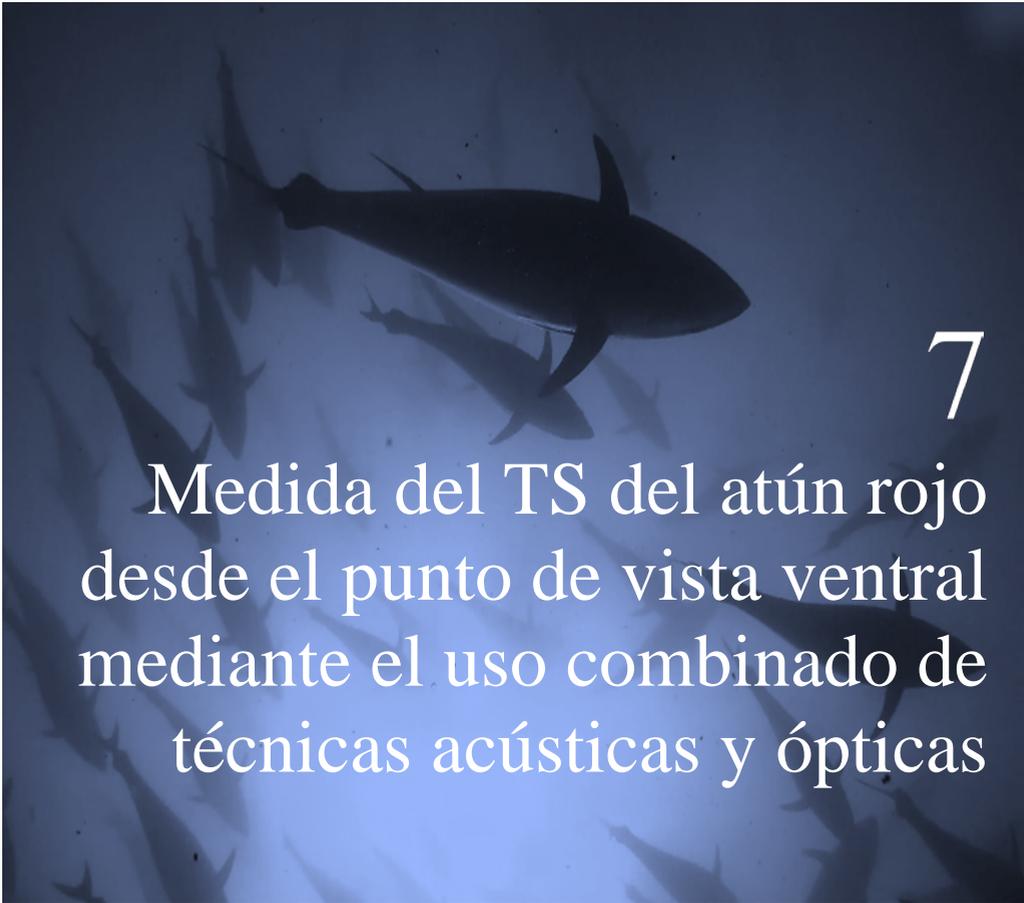
Habitualmente se han realizado ajustes para determinar el peso de los atunes a partir de la longitud. En este estudio se constata que el uso de más de una dimensión mejora la estimación del peso cuando éste ha sido engordado durante meses en cautividad. El uso de la altura es más común en la realización de biometrías, sobre todo si estas se realizan de manera indirecta (mediante sistemas de visión estereoscópica) pero, a partir del análisis ANOVA realizado, se demuestra que la anchura máxima de los atunes puede utilizarse

como parámetro para la determinación del peso junto con la longitud. El uso de la anchura máxima ofrece buenos coeficientes de determinación y valores de los errores medios similares a los que se pueden conseguir usando la altura, como se desprende de la comparación de los modelos presentados (M1 y M3).

Cuando se usan las tres dimensiones del pez (longitud, altura y anchura máxima), la bondad del ajuste mejora disminuyendo el error absoluto por debajo del os 9 Kg y obteniéndose errores relativos menores del 5%. Los valores de los residuos medios menores que 1, nos indican el alto grado de predicción obtenido al hacer uso de las tres dimensiones del atún para estimar el peso. Estos resultados, parecen indicar que deberían realizarse medidas de las tres dimensiones en los animales recién capturados para mejorar la estimación del estado de los mismos según el lugar geográfico y época del año.

Se presenta, además, un ajuste que permite determinar de manera indirecta la altura (H) a partir de la longitud (L) y la anchura (A), de aplicación en las técnicas de conteo durante las transferencias que se desarrollan dentro el proyecto BIACOP.

Del mismo modo se realiza un ajuste que permite conocer la relación existente entre la longitud de los peces y su anchura máxima, los resultados obtenidos de este ajuste, presentan una relación clara entre la anchura y la longitud, de tal manera que se producen errores absolutos medios de 1.25 cm en la estimación de la anchura a partir de la longitud, lo que supone errores en la predicción por debajo del 3%. Estos errores tan bajos unidos al valor medio de los residuos (cercano a cero), indican que entre ambas dimensiones existe una fuerte relación que puede ser utilizada para la eliminación de datos aberrantes en los estudios futuros desarrollados dentro el mencionado proyecto BIACOP.



7

Medida del TS del atún rojo desde el punto de vista ventral mediante el uso combinado de técnicas acústicas y ópticas

7.1. INTRODUCCIÓN

Como se explicó en el capítulo 5 de la presente tesis, el desarrollo de la industria acuícola entorno al atún rojo ha generado la demanda de herramientas de control del proceso de engrase de los peces en las jaulas, de tal modo que éste pueda realizarse de una forma más eficiente. Tras los buenos resultados obtenidos en estudios llevados a cabo en jaulas de cría de salmones (Knudsen *et al.*, 2004) y los trabajos elaborados para doradas (Soliveres, 2015), las técnicas acústicas se presentan como una herramienta de gran versatilidad para alcanzar dicho objetivo.

Por ello, es necesario el estudio de la respuesta acústica de los peces en las jaulas cuando son insonificados acústicamente, así como establecer una relación entre los parámetros biométricos de los peces y la potencia acústica retrodispersada por los mismos (*TS*). Este tipo de relaciones ya han sido establecidas para atunes de otras especies en libertad (Bertrand *et al.*, 1999; Josse and Bertrand, 2000) y se han realizado experimentos en pequeños tanques (Hsueh-Jung *et al.*, 2011), sin embargo, nunca se han llevado a cabo para atún rojo (ni en libertad ni en cautividad), y para ninguna especie de atún en jaulas de engrase.

En el presente trabajo, se ha realizado un estudio de la respuesta acústica de los atunes desde el punto de vista dorsal (capítulo 5). Dicho estudio se efectuó con atunes nacidos en cautividad y distribuidos por tallas. Pero esta situación no es la habitual en instalaciones de engrase de atún rojo. En estas instalaciones, las jaulas albergan ejemplares de diferentes tamaños que pueden variar desde la talla mínima permitida de captura (115 cm o 30 Kg) hasta los 331 cm que se ha establecido como la talla máxima alcanzada por la especie (Cort *et al.*, 2013).

En los citados trabajos de Knudsen *et al.* (2004) y Soliveres (2015), los resultados obtenidos al relacionar el *target strength* (*TS*) desde el punto de vista ventral con la longitud de los peces ofrece mejores resultados que las relaciones entre la longitud y el *TS* desde el punto de vista dorsal cuando se realizan las medidas a cortas distancias. En ambos estudios el tamaño de los peces era superior al diámetro del haz acústico teniéndose en cuenta una caída de -3dB en el patrón de directividad. Debido a la cercanía entre el transductor y los peces, la vejiga natatoria ocupaba en muchos casos gran parte de la sección transversal del haz acústico a la distancia de medida.

En este capítulo de la tesis, se realiza un estudio de la relación existente entre el *TS* del atún rojo y su tamaño desde el punto de vista ventral, con la finalidad de evaluar la viabilidad del uso de las técnicas acústicas para monitorizar el engrase de esta especie en jaulas marinas. Como se explica en el capítulo 3, el uso de esta tecnología a cortas distancias y más aun con peces de gran tamaño introduce incertidumbres asociadas a la determinación del *TS*. En el punto 3.3 se detallan los factores asociados a la medida del *TS* a cortas distancias, entre las que cabe destacar el campo cercano del pez, el error en la determinación de la distancia al blanco, la exactitud en el cálculo de las pérdidas por propagación de la onda acústica y la correcta deducción de la posición angular del blanco dentro del haz. Todos estos factores de incertidumbre se asumen como inevitables, ya que, las condiciones de medida imposibilitan la detección de blancos a grandes distancias.

Para poder establecer un valor biométrico asociado a un determinado valor del *TS*, se utiliza (de manera sincronizada con el sistema acústico) un sistema de cámaras estereoscópico de tal manera que; se pueden conocer diferentes parámetros biométricos de un atún al mismo tiempo que es insonificado por la onda acústica. A partir de todos los pares de valores *TS*-longitud (por ejemplo) se buscarán relaciones que permitan la estimación de la talla a partir de los valores acústicos, haciendo uso de la ecuación (3.37), del mismo modo que se hizo en el capítulo 5 para las medidas dorsales.

Gracias a los estudios sobre la relación entre el peso de los atunes y sus dimensiones (longitud, anchura y altura) presentados en el capítulo 6, se puede obtener expresiones que relacionen el *TS* con el peso de los atunes engrasados a partir de los valores de su anchura, de su altura o, de la forma más clásica, con su longitud.

7.2. MATERIALES Y MÉTODOS

7.2.1. LUGAR DE MEDIDA

Las medidas se llevaron a cabo durante los meses de julio, agosto, septiembre, octubre y noviembre de 2015 en las instalaciones del *Grup Balfegó* en la población de l'Ametlla de Mar (Tarragona) cuyas instalaciones ya fueron descritas en el apartado 4.1.2.1 (Figura 4.1). Para este experimento las medidas se realizaron en las jaulas J16, J18 y J20. Todas las jaulas tenían un diámetro de 50 metros y una profundidad máxima en el copo de alrededor de 35 metros. Durante los meses que duró el experimento se realizaron medidas en las jaulas una vez al mes como se detalla en la Tabla 7.1. La jaula J16 contenía 646 atunes, la jaula J18 tenía 647 atunes y la jaula J20 albergaba 647 atunes también. Todos los atunes procedían de la campaña de pesca de 2015.

Tabla 7.1. Días de medida en cada una de las jaulas durante el tiempo que duró el experimento, y temperatura media de la columna de agua durante las medidas.

<i>Mes</i>	<i>Jaula</i>	<i>Fecha de medida</i>	<i>Temperatura media de la columna de agua</i>
<i>Julio</i>	J16	3/7/2015	25° C
	J18	2/7/2015	
	J20	1/7/2015	
<i>Agosto</i>	J16	5/8/2015	22°C
	J18	6/8/2015	
	J20	7/8/2015	
<i>Septiembre</i>	J16	18/9/2015	22°C
	J18	17/9/2015	
	J20	16/9/2015	
<i>Octubre</i>	J16	9/10/2015	21°C
	J18	8/10/2015	
	J20	7/10/2015	
<i>Noviembre</i>	J16	6/11/2015	18.5°C
	J18	5/11/2015	
	J20	4/11/2015	

7.2.2. EQUIPO UTILIZADO DURANTE LAS MEDIDAS

Se emplearon dos ecosondas científicas EK-60 de Simrad, una junto a un transductor split-beam de 120 kHz (modelo ES120-7C cuyas características ya se mostraron en la Tabla 5.2) y otro de 200 kHz (modelo ES200-7C cuyos datos pueden consultarse en la Tabla 5.3). Ambas ecosondas fueron controladas por un único ordenador mediante el puerto Ethernet y con la ayuda de un switch, de manera que trabajaran de forma síncrona. Los dos transductores empleados tenían una apertura a -3 dB de alrededor de 7°. Las medidas se realizaron desde una embarcación amarrada al aro de flotación de la jaula durante todo el tiempo de medida, los registros de datos se realizaron con los transductores montados en una plataforma colocada en el fondo de la jaula (a unos 20 metros de profundidad). La plataforma se fijó a la mitad de uno de los radios de la jaula con los transductores orientados hacia la superficie para tomar medidas acústicas de los atunes desde el punto de vista ventral. La posición de los transductores en la plataforma era conocida (Figura 7.1). Para aprovechar las medidas se montaron en la plataforma un transductor de gran ancho de haz (de haz simple) a -3 dB (31°) emitiendo a 200 kHz y un transductor sonar de barrido lateral (side scan sonar) emitiendo también a 200 kHz. Las medidas realizadas con estos dos transductores no se han utilizado para los resultados presentados en esta tesis. La potencia transmitida es de 90 W para la frecuencia de 200 kHz y de 100 W para la de 120 kHz, la duración del pulso transmitido es de 64 μ s a las dos frecuencias, así como el intervalo entre pings que es el mínimo que permite la ecosonda a ambas frecuencias (varía entre 15 y 20 pings por segundo). Se realizaron medidas en cada jaula durante dos horas. Esta configuración fue utilizada en todas las jaulas durante todos los meses de medida. Como se muestra en la Tabla 7.1 se pidió a los buzos del *Grup Balfegó* que nos facilitaran información sobre las condiciones ambientales del mar en cada uno de los días de medida.

Como las medidas presentadas en el capítulo 5 y las mostradas en el presente capítulo se realizaron en un corto espacio de tiempo, y puesto que las ecosondas utilizadas y los transductores eran los mismos; se recurrió a los datos de calibración mostrados en la Tabla 5.3 para corregir los datos obtenidos en la campaña de medidas descrita. Hay que destacar que, como ya se esgrimió en el capítulo 5, la configuración de medida hace que la calibración “*in situ*” sea difícil, por ello, como ya se argumentó, se optó por calibración a posteriori recreando las condiciones de medida como queda reflejado en el capítulo 5.

En la Figura 7.1 puede apreciarse además de los dos transductores split-beam de color naranja (el más grande correspondiente a la frecuencia de 120 kHz y el más pequeño a la de 200 kHz), el transductor de sonar de barrido lateral en el centro, el transductor single-beam de haz ancho en blanco, una cámara submarina y dos sistemas estereoscópicos, uno centrado en la plataforma (sistema AM100 Stereo Camera Unit de AQ1Systems Pty Ltd.) que se utilizó para los resultados presentados en este capítulo y otro sistema diseñado por

el Instituto Universitario de Automática e Informática Industrial (Instituto ai2) para el proyecto “BIACOP”. Dicho proyecto pretende la medición y el conteo de los ejemplares durante los procesos de transferencia entre jaulas (BIACOP (ES/13/41), es un proyecto financiado por la Comisión de la UE mediante la decisión ejecutiva de la Comisión de la UE de 10 de julio de 2013 (2013/410/UE)). Este prototipo diseñado por el Instituto ai2 fue instalado para poder validar los resultados que su sistema ofrece por comparación con los resultados obtenidos del sistema AM100.

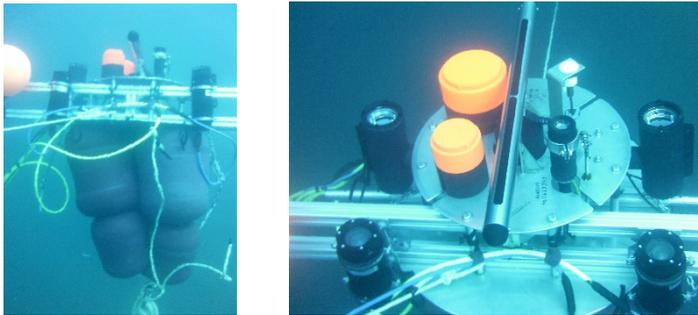


Figura 7.1. Imagen de la plataforma donde se montaron los equipos estando ya sumergida y colocada en el fondo de la jaula (20 metros de profundidad) y a la mitad de uno de sus radios.

Para poder disponer de información biométrica de los atunes al mismo tiempo que son insonificados por el haz acústico, se utilizó el sistema de cámaras estereoscópico AM100 colocado en la misma plataforma que los transductores acústicos de tal manera que ofrecía una imagen “desde abajo” de los peces. El sistema AM100 de AQ1Systems está compuesto por dos cámaras a color de alta resolución y alta sensibilidad de 1.4 megapíxeles con interfaz Gigabit Ethernet (GigE Ethernet digital) separadas 80 cm y ligeramente inclinadas (alrededor de 5°). Las cámaras están montadas en una carcasa subacuática de aluminio con acabado anodizado que permite su inmersión hasta 40 metros de profundidad. De la carcasa de las cámaras sale un cable submarino que se conecta a la caja receptora en la superficie y ésta al ordenador. Para poder realizar las medidas de manera sincronizada con las ecosondas, se utilizó el mismo ordenador para gobernar todos los equipos, conectándose todos al ordenador por medio de un switch (Figura 7.2). Se realizaron grabaciones a 12 frames por segundo y se generaron dos videos en formato .avi, uno correspondiente a cada cámara.

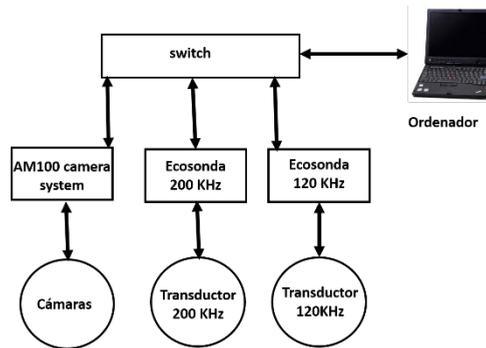


Figura 7.2. Esquema de la conexión de los equipos durante las medidas.

7.2.3. RECOGIDA Y ANÁLISIS DE LOS DATOS

Los datos fueron recogidos durante los meses de julio a noviembre de 2015 en los días que se indica en la Tabla 7.1. Todos los meses se realizaron grabaciones simultáneas de videos con el sistema estereoscópico AM100 y acústicas con las ecosondas de EK60 trabajando a 120 y 200 kHz. Existen datos acústicos de todos los meses, sin embargo, debido a diferentes problemas durante la recogida de datos en el mes de agosto, los videos pertenecientes a la jaula 18 están dañados y no se puede realizar el análisis. Los videos del mes de octubre presentan dificultad para el análisis debido a la turbiedad del agua, y los videos del mes de noviembre no permiten dicho análisis ya que la turbiedad del agua es muy elevada y no permite la medición.

El análisis de los datos ópticos se realizó de manera automática con un software implementado por el grupo de Visión por Computador (VxC) del Instituto ai2 dentro del citado proyecto BIACOP. Dicha aplicación permite la segmentación de objetos dentro de la imagen, el filtrado de dichos objetos por características geométricas, el ajuste a un modelo dinámico en dos dimensiones de las siluetas del atún (Figura 7.3), la correspondencia entre peces del par de imágenes por geometría epipolar y finalmente el cálculo de la longitud y la anchura real del pez a partir de las medidas de la imagen (Atienza-Vanacloig *et al.*, 2016). Todo el proceso se basa en la calibración previa del sistema. Dicha calibración fue llevada a cabo en las instalaciones que la Universitat Politècnica de València tiene en el puerto de Gandía con el uso de un patrón bidimensional de calibración tipo “*checkboard 2D*”. Para la calibración se realizaron grabaciones del patrón a distintas distancias y orientaciones respecto de las cámaras. Dichas grabaciones

fueron analizadas con el algoritmo de calibración estéreo “Stereo Calibration App” de Matlab ® (The MathWorks Inc., 2014).

La segmentación se realiza frame a frame utilizando técnicas basadas en regiones o “blobs” (grandes objetos binarios) que ofrecen como resultado del proceso una serie de regiones candidatas a ser atunes. Debido a la configuración de medida, las imágenes pueden presentar zonas en las que el pez se cruza con un punto de luz solar provocando una luminosidad no uniforme en la escena. Además, las cámaras sufren ligeros movimientos debido a las corrientes submarinas a pesar de los anclajes utilizados para fijar los equipos durante la toma de datos. Estas peculiaridades en la adquisición de las imágenes provocan el uso de umbrales locales para la detección de contornos y la aplicación de operaciones morfológicas para poder detectar las regiones candidatas a ser atún.

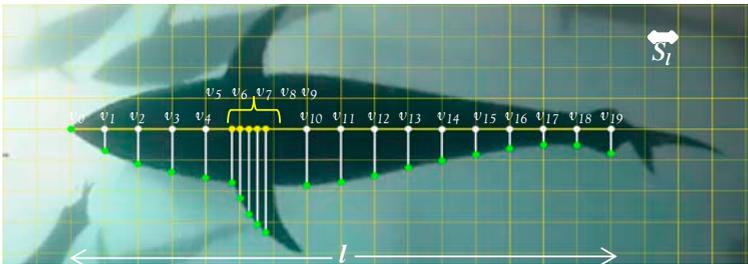


Figura 7.3. Modelo de contorno del atún utilizado para inferir el modelo 2D. Blanco y amarillo corresponden a puntos de referencia a lo largo de la columna vertebral, los puntos verdes corresponden al extremo del cuerpo del atún. S_l representa una unidad de medida utilizada de referencia en nuestro modelo.

Tras la segmentación se obtiene un conjunto de características de cada una de las regiones candidatas y se procesan mediante filtros basados en la forma y la dimensión de los objetos. El objetivo del proceso de adaptación es obtener los valores óptimos para los parámetros del modelo 2D que mejor se ajustan a una región candidata a ser atún. Se trata ajustar el modelo para minimizar una medida de discrepancia de modelo a la imagen sobre la base de los límites del candidato en la imagen. Este ajuste debe minimizar la medida de discrepancia entre los bordes del modelo y los bordes de la región segmentada en la imagen. Los parámetros del modelo se inicializan teniendo en cuenta parámetros de la región obtenidos tras la segmentación y se van ajustando y volviendo a calcular hasta que ya no se consigue un mejor ajuste. Se define un índice de error de ajuste (FEI) basado en la distancia cuadrática que ocurre entre los puntos característicos del modelo y los de la región segmentada (Atienza-Vanacloig *et al.*, 2016). La Figura 7.4 ilustra un ejemplo real

llevado a cabo con imágenes adquiridas por el sistema. Dado que la posición relativa entre las dos cámaras del par estereoscópico es conocida gracias al paso previo de calibración, se utiliza la siguiente propiedad de la geometría epipolar para examinar la correspondencia entre peces del par de imágenes: los puntos de las imágenes se proyectan en la otra imagen sobre una línea epipolar. Esto significa que, conocidos dos puntos característicos del modelo en una de las imágenes, por ejemplo, el inicio y fin del pez, los mismos puntos en la otra imagen deben estar sobre la línea epipolar definida por la calibración del par estereoscópico. Sólo existe correspondencia entre pares de imagen si se cumple esta condición. La Figura 7.5, muestra gráficamente como se obtiene la correspondencia.

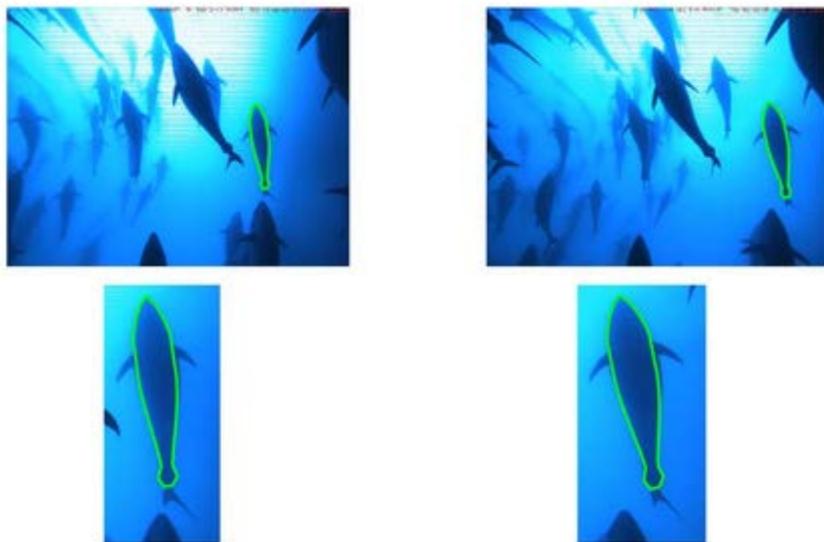


Figura 7.4. Esta figura muestra un ejemplo real de nuestros procesos, en este caso se está utilizando un modelo de atún sin aletas laterales y que incluye el modelado del pedúnculo. Además, la imagen representa el proceso para el par de imágenes estereoscópica y se ha seleccionado automáticamente un atún sin ocultaciones ni solapes con otros para obtener medidas biométricas fiables.

Una vez asegurada la correspondencia de peces entre pares de imágenes se procede al cálculo de las dimensiones reales del pez. Se corrige el efecto de la distorsión de la lente en la imagen y se transforman los pares de puntos de la imagen al punto 3D por triangulación. A partir de los puntos 3D se obtienen las medidas biométricas del atún.

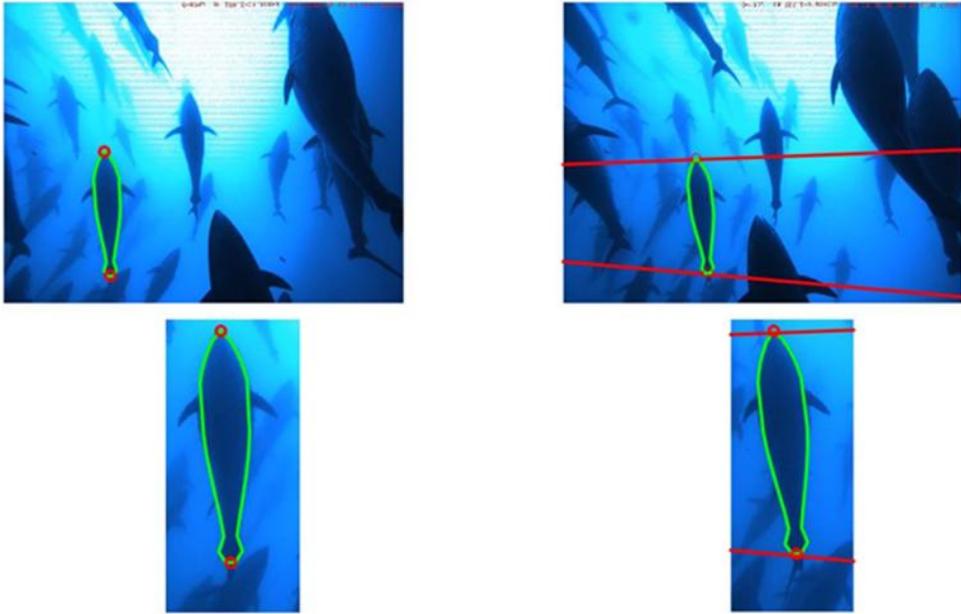


Figura 7.5. Esta figura muestra gráficamente como se calcula la correspondencia entre individuos de pares de imágenes.

Los datos acústicos, al igual que en el capítulo 5; se analizaron en dos pasos. Primero fueron tratados con el software Sonar5-Pro, para poder obtener los valores compensados del TS después de aplicar el detector de ecos individuales (*SED*) del citado software. Los criterios que este software utiliza para definir el *SED* fueron descritos en el punto 5.2.3 del presente documento. En la Tabla 7.2 se muestran los parámetros elegidos para el análisis con el detector de ecos individuales del Sonar5Pro presentado en este capítulo.

En este caso, como en el de las medidas dorsales, se elige una duración del pulso de $64\mu\text{s}$. Como ya se explicó en el capítulo 5, las trazas obtenidas con esta configuración de medida son complejas y en ellas se pueden apreciar las diferentes estructuras internas del atún, en este caso desde el punto de vista ventral (Figura 7.6). Como ya se ha explicado en el capítulo 3, el pez, cuando es insonificado a cortas distancias, deja de ser un blanco puntual y las medidas se ven afectadas por las incertidumbres asociadas a la determinación del *TS* explicadas detalladamente en el punto 3.3. Aunque no se conocen estudios exhaustivos sobre la fisiología interna del atún rojo en los que se describa el tamaño de la vejiga natatoria y se establezcan relaciones entre el tamaño de la vejiga y el tamaño total del pez; sí existen estos trabajos para otras especies como el atún de aleta amarilla. Schaefer & Oliver (1998) indican que, para el atún de aleta amarilla, el tamaño de la vejiga natatoria

está en torno a la quinta parte de la longitud total del pez. En la sección 5.2.3 de la presente tesis, se explicaron las motivaciones para elegir una duración del pulso de $64\mu\text{s}$ que, si bien no permite que la onda acústica cubra toda la vejiga, si nos permite discernir los diferentes cambios de estructura dentro del cuerpo del atún, y entre ellas la más importante desde el punto de vista acústico, el cambio entre el cuerpo del atún y su vejiga. Dado que es este interfaz el que producirá valores máximos en la traza registrada se elegirá el máximo valor del *TS* (tanto compensado como sin compensar) como el representante de la traza. Es importante recordar, que la duración del pulso elegida, nos permite aplicar la una herramienta automática para seleccionar las trazas de atún que será explicada a continuación.

Tabla 7.2. Parámetros del detector de ecos individuales (*SED*) utilizados.

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
minLE	0.4
maxLE	4
TSmin (dB)	-50
EM	medium
MDF (°)	3.0
MCG (dB)	12

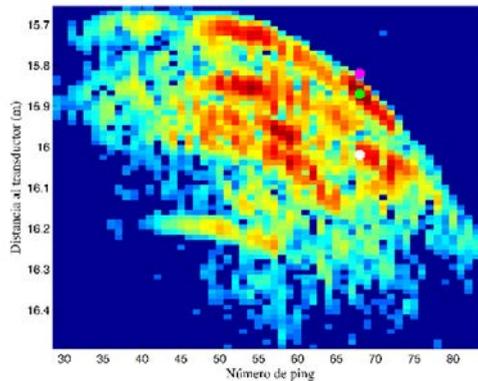


Figura 7.6. Imagen de una traza aislada en la que se puede observar la complejidad de la misma.

En el segundo paso del análisis de los datos acústicos se utilizó una herramienta implementada en Matlab ® que permite la detección automática de trazas individuales. De las diferentes trazas aisladas se extraen los parámetros deseados para poder llevar a cabo el análisis: el TS máximo (compensado y sin compensar), la distancia al transductor de cada ping que compone la traza, el número de pings que componen la traza y el intervalo temporal de la traza detectada. Durante el análisis automático se fija un umbral para el TS de -55 dB y se elimina el primer metro desde la superficie del transductor y las detecciones pegadas a la superficie. Del mismo modo que en la sección 5.2.3 se hace uso del tratamiento digital de imágenes para poder aislar las trazas. El proceso consiste en la detección y segmentación de regiones por criterios de área y nivel acústico mínimo, de tal manera que se genere un listado de regiones susceptibles de ser atún. Estas regiones candidatas son examinadas y sometidas a un filtrado basado en sus características acústicas y morfológicas (como región). Se establecen por lo tanto criterios de nivel acústico máximo y mínimo, distancia al transductor, número de ping máximo, tamaño máximo y mínimo de la región (que se basa en el área), lo compacta que es la región, la relación entre las dimensiones de la región (alto-ancho) y el valor del número de Euler (The MathWorks Inc., 2014; Gonzalez and Woods, 2008).

Los principales motivos para elegir el TS máximo como valor representante de la traza se han explicado en párrafos anteriores de esta sección y extensamente en el capítulo 5. Por dicho motivo se evaluará en este capítulo también la diferencia de resultados entre el TS máximo y el TS máximo una vez que se aplica la corrección (partiendo del conocimiento de que los peces en la configuración de medida dejan de ser puntuales y puede llegar a cometerse un error significativo en la estimación de la posición angular (Ona *et al.*, 1996; Dawson *et al.*, 2000); ya que, cuando el blanco ocupa más de una celda, la ecosonda aplicaría un único valor de ganancia al corregir el valor del TS para compensar el efecto del patrón de radiación, por lo que no podríamos asegurar que dicho valor del TS haya sido compensado de manera correcta).

Finalmente se realizó un análisis conjunto de los datos acústicos y ópticos. Para ello, se buscaron en las imágenes que peces registrados acústicamente podían ser medidos. Se partió de los datos temporales de cada traza acústica aislada e identificada como un atún, seguidamente se buscó en los pares de imágenes estéreo el momento en el que el pez atraviesa el haz acústico y se realizó la medida de tal manera que en el momento de la medida el pez pudiera identificarse en las dos imágenes estéreo, estuviera recto y no distara más de 5 frames (hacia adelante o hacia atrás en el tiempo) del momento en el que se registró el máximo valor acústico por las ecosondas.

Hay que indicar en este punto que el sistema estereoscópico (AM100) solo es capaz de realizar medidas con exactitud entre 2 y 10 metros, por lo que la búsqueda de correspondencia acústico-ópticas debía restringirse a ese rango. Pero, además, para

garantizar que al menos la vejiga natatoria de los atunes estuviera totalmente insonificada, se optó por restringir el rango de búsqueda para las correspondencias acústico-ópticas entre 5 y 10 metros desde la posición de los sensores. Aunque no se conoce exactamente la relación entre la longitud del atún rojo y el tamaño de su vejiga, otros autores establecen que para especies de túnidos similares dicha relación es de cinco a uno, es decir que la longitud de la vejiga es la quinta parte de la longitud total del atún (Kurt & Oliver, 1998). La apertura del patrón de directividad a -3 dB es de alrededor de 7° para los transductores de ambas frecuencias, lo que indica que son capaces de cubrir una sección circular de 0.6 metros de diámetro, pensando que ese valor es el tamaño máximo de vejiga que podría estar totalmente insonificada a una distancia de 5 metros (desde el transductor), se puede deducir que el tamaño máximo de atún que puede ser medido a 5 metros estaría entorno a los 3 metros de longitud total (Figura 7.7). Partiendo de todas estas consideraciones, se aplicaron las limitaciones de rango de búsqueda de las coincidencias acústico-ópticas y de tamaño máximo de los atunes. Del mismo modo, para el análisis solo acústico de los datos se utilizó este límite de distancia mínima al transductor para el análisis, es decir, se analizaron los datos entre 5 metros y 18 metros.

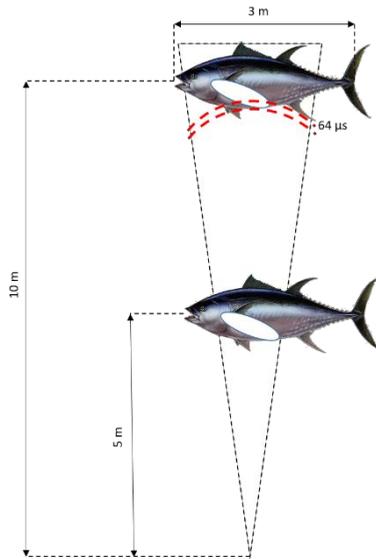


Figura 7.7. Esquema en el que se muestra una vejiga de un atún de 3 metros totalmente insonificada a 5 metros del transductor.

Por tanto, para poder establecer una correspondencia acústico-óptica la grabación debía estar en el rango indicado, el atún debía estar aislado en cada par de imágenes para ser segmentado correctamente, recto en el instante del máximo acústico (5 frames antes o después) y debía poderse establecer una correspondencia entre las dos imágenes del par estéreo. Una vez obtenidas todas las correspondencias, se agrupan los peces por tamaño, en grupos de 10 cm para el caso de la longitud y en grupos de 2.5 cm cuando se considera la anchura. Para dar un grupo por válido, éste debe disponer al menos de 40 muestras de un determinado tamaño.

7.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.3.1. ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS BIOMÉTRICOS AUTOMÁTICAMENTE

Los datos ópticos se registraron de manera simultánea a los datos acústicos, como ya se ha indicado en el punto anterior. En este apartado se realiza el análisis de los datos ópticos haciendo uso de la herramienta automática descrita anteriormente. En la Tabla 7.3 se detalla la cantidad de detecciones realizada para cada jaula y para cada mes con la herramienta automática. En dicha Tabla se puede apreciar que no existen mediciones para el mes de agosto de la jaula J18, debido a que los archivos de las grabaciones se corrompieron durante el proceso quedando inservibles. Tampoco existen mediciones para el mes de noviembre en ninguna de las jaulas, en este caso por la turbidez del agua que no hacía posible el uso del sistema óptico.

Tabla 7.3. Número de medidas ópticas para cada una de las jaulas durante todos los meses del estudio.

<i>Mes</i>	<i>Nº de medidas J16</i>	<i>Nº de medidas J18</i>	<i>Nº de medidas J20</i>	<i>Nº de medidas J16 + J18 + J20</i>
julio	3874	19521	7536	30931
agosto	7598	---	16991	24589
septiembre	4915	14994	11901	31810
octubre	6106	3365	5709	15180

Se realiza el análisis de la evolución de la longitud de los peces en las jaulas por meses. Estos datos son comparados con los datos que se nos facilitó por parte de la inspección de pesca, que se corresponden al momento del enjaulamiento y con los datos cedidos por el *Grup Balfegó* provenientes del momento del sacrificio de los atunes de cada jaula.

En la Tabla 7.4 se muestra un resumen de los datos de la longitud media por jaulas y por meses, así como para todas las jaulas juntas. En la jaula J16 la media baja en agosto 5 cm respecto a la de julio para crecer durante los meses siguientes. En la jaula J20 la media de julio y agosto se mantiene constante y crece en los meses de octubre y noviembre. Para la jaula J18 no se tienen datos del mes de agosto, pero se observa un hecho aislado en septiembre J18, ya que, aparece un número elevado de muestras en longitudes menores, entre 1 y 1.80 metros. Según los datos aportados por el *Grup Balfegó* en J18 hubo muy pocos sacrificios de ejemplares entre grabaciones y no hubo ninguna incorporación, había prácticamente los mismos peces en todos los meses. La explicación a este fenómeno estaría relacionada con el comportamiento de los peces o la situación concreta de los equipos de medida en la jaula.

Si se compara los datos de las medidas automáticas del mes de octubre (por ser el más próximo a los sacrificios) con los datos de sacrificios de las jaulas bajo estudio posteriores a la fecha de las medidas ópticas, se obtienen los resultados que se detallan en la Tabla 7.5. De los datos expuestos en dicha tabla se desprende que las longitudes medias obtenidas con las mediciones automáticas se asemejan mucho a las distribuciones y medias de los sacrificios (Figura 7.8 derecha). Los buenos resultados que se desprenden de esta comparativa validan el procedimiento utilizado para la obtención de distribuciones estadísticas de longitud en jaulas de engorde.

Sin embargo, como se muestra en la Figura 7.8 (izquierda), al comparar los datos de las mediciones automáticas del mes de julio (por ser los más cercanos al enjaulamiento) con los datos cedidos por la inspección durante el enjaulamiento se aprecia una diferencia en el valor medio de la longitud. Los datos se proporcionan para dos jaulas de transporte que se dividen en las tres jaulas de engrase bajo estudio, por ello para realizar la comparativa se unen los atunes de las tres jaulas. Los inspectores analizan 332 muestras obteniendo una longitud media de 1.97 metros mientras que con la aplicación automática se obtiene una \bar{L} de 2.21 m tras analizar 30931 muestras. Esta diferencia, puede atribuirse al operario del software de medición manual (que introduce un error), además puede atribuirse un error asociado al muestreo realizado que depende del operario y que es distinto para una misma grabación dependiendo del operario que realice la medición.

Tabla 7.4. Longitud media para cada una de las jaulas durante todos los meses del estudio. Se especifica la media de la longitud (\bar{L}) el número de muestras analizadas (n) y el número de peces en el momento de la grabación (p).

<i>Mes</i>	\bar{L} J16 (cm)	n J16	p J16	\bar{L} J18 (cm)	n J18	p J18	\bar{L} J20 (cm)	n J20	p J20	\bar{L} J16 + J18 - J20 (cm)	n J16 + J18 + J20	p J16 + J18 + J20
julio	217	3874	646	221	19521	647	222	7536	647	221	30931	1940
agosto	212	7598	636	---	---	---	222	16991	626	219	24589	1893
septiembre	220	4915	538	196	14994	629	224	11901	625	222	26794	1792
octubre	221	6706	326	224	3365	629	225	5709	624	223	15780	1579

Tabla 7.5. Resumen de los datos resultantes de la comparación de las mediciones automáticas del mes de octubre con los sacrificios de cada una de las jaulas.

Mes	J16	J18	J20	J16+J18+J20
Nº de peces en la jaula	326	629	624	1579
Nº de muestras analizadas automáticamente	6706	3365	5709	15780
\bar{L} (cm) medida automática	221	224	225	223
Nº de peces sacrificados	316	511	316	1143
\bar{L} resultante de los sacrificios	221	224	227	224

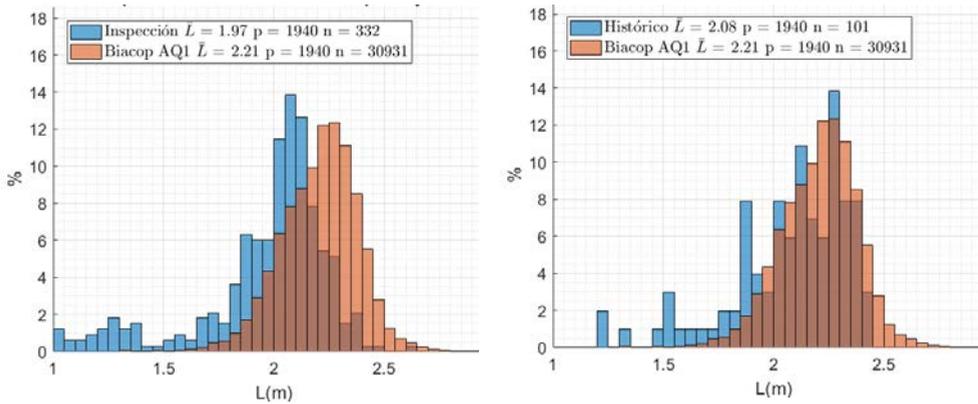


Figura 7.8. Distribución de la longitud (L) para todas las jaulas (J16+J18+J20) en julio, frente a la distribución proporcionada por los inspectores durante el enjaulamiento. (izquierda). Comparativa de longitud L: datos históricos de sacrificios frente a las mediciones automáticas Biacop (derecha). En ambos casos donde \bar{L} es la longitud media, n es el número de muestras analizadas y p es el número de peces en el momento de la grabación.

Por último, se realiza el análisis de la anchura de los atunes con el paso del tiempo. Para conocer si dicha medida puede utilizarse como indicador de cambios biométricos en los atunes asociados al engrase de los mismos. Se establecen cinco puntos de la silueta del pez para estudiar la anchura con los meses, tal y como se muestra en la Figura 7.9. En las Tablas 7.6 a 7.10 se muestra la evolución de la media de los diferentes anchos medidos cada uno de los meses del estudio. En dichas tablas se aprecia que el ancho medido en el punto 1 (A_1), correspondiente con el ancho máximo y los anchos en los puntos 3 y 4 (A_3 y A_4 respectivamente) se incrementan notablemente durante los dos primeros meses, mientras que se incrementa muy poco (menos de 1 cm) en el tercero. En cambio, los anchos en los puntos 2 y 5 no varían.



Figura 7.9. Puntos de estudio de la anchura de los atunes desde el punto de vista ventral.

Tabla 7.6. Anchura media en el punto 1 (A_1) para cada una de las jaulas durante todos los meses del estudio.

<i>Mes</i>	\bar{A} J16 (cm)	\bar{A} J18 (cm)	\bar{A} J20 (cm)	\bar{A} J16 + J18 + J20 (cm)
julio	42	42	43	42
agosto	44	---	46	45
septiembre	49	50	50	50
octubre	49	52	51	50

Tabla 7.7. Anchura media en el punto 2 (A₂) para cada una de las jaulas durante todos los meses del estudio.

<i>Mes</i>	\bar{A} J16 (cm)	\bar{A} J18 (cm)	\bar{A} J20 (cm)	\bar{A} J16 +J18 + J20 (cm)
julio	36	36	37	37
agosto	36	---	37	37
septiembre	38	37	38	38
octubre	37	39	37	37

Tabla 7.8. Anchura media en el punto 3 (A₃) para cada una de las jaulas durante todos los meses del estudio.

<i>Mes</i>	\bar{A} J16 (cm)	\bar{A} J18 (cm)	\bar{A} J20 (cm)	\bar{A} J16 +J18 + J20 (cm)
julio	40	40	41	40
agosto	42	---	44	43
septiembre	47	48	47	47
octubre	47	49	49	48

Tabla 7.9. Anchura media en el punto 4 (A₄) para cada una de las jaulas durante todos los meses del estudio.

<i>Mes</i>	\bar{A} J16 (cm)	\bar{A} J18 (cm)	\bar{A} J20 (cm)	\bar{A} J16 +J18 + J20 (cm)
julio	24	24	25	25
agosto	25	---	27	26
septiembre	29	29	29	29
octubre	29	30	30	30

Tabla 7.10. Anchura media en el punto 5 (A_5) para cada una de las jaulas durante todos los meses del estudio.

<i>Mes</i>	\bar{A} J16 (cm)	\bar{A} J18 (cm)	\bar{A} J20 (cm)	\bar{A} J16 +J18 + J20 (cm)
julio	20	20	21	20
agosto	19	---	21	20
septiembre	21	21	21	21
octubre	20	21	21	21

7.3.2. ESTIMACIÓN DEL TS DESDE EL PUNTO DE VISTA VENTRAL

En este punto se presentan los resultados obtenidos para el TS de detecciones individuales en cada una de las jaulas bajo estudio para cada uno de los meses que duró el experimento.

7.3.2.1. RESULTADOS DE LA JAULA I6 (J16)

En la Figura 7.10 y la 7.11 se muestran las distribuciones de probabilidad para el TSmax (TS máximo sin compensar) y para el TScmax (TS máximo compensado) para las dos frecuencias bajo estudio 120 y 200 kHz para la jaula J16 y representadas para todos los meses que dura el estudio. Las distribuciones del TSmax a 120 kHz tienen carácter unimodal hasta el mes de noviembre, al igual que ocurre para 200 kHz que en noviembre presenta una bimodalidad más acusada que para 120 kHz. Para el caso del TScmax son unimodales en todos los meses presentando colas en los meses de octubre y noviembre para ambas frecuencias y una distribución mucho más ancha para el mes de agosto en el caso de la frecuencia de 200 kHz. Además, en la Tabla 7.11, y la 7.12 se detallan los valores medios del TS máximo compensado y sin compensar para la jaula J16, la desviación típica de las distribuciones del TS, el tamaño medio de los atunes y el número de muestras analizadas para cada una de las frecuencias estudiadas. La bajada de los valores medios del TS en el mes de agosto vienen acompañados por una bajada de la longitud media de los peces medidos, esto nos indica que se muestrearon en este caso peces de menor tamaño que durante el mes de julio. Durante los meses siguientes la longitud media aumenta entre 3 y 4 cm, sin embargo; el TS no aumenta, sino que disminuye. Este hecho puede ir asociado al proceso de engrase de los atunes que aun creciendo en tamaño puede apantallar parte de la energía acústica procedente de su vejiga por el aumento de la grasa en la zona ventral. A este hecho habría que sumar la probable contribución del comportamiento de los atunes dentro de la jaula (velocidad de nado, inclinación respecto a la cara del transductor...) que produce una gran variabilidad en los valores del TS, sobre todo a tan cortas distancias. Sin embargo, si tenemos en cuenta la

desviación típica presentada por las diferentes distribuciones no se puede afirmar que existan variaciones significativas del TS_{max} a ninguna de las dos frecuencias solo observándose variaciones en los valores del TS_{cmax} entre los meses de julio y agosto para ambas frecuencias.

Tabla 7.11. Valores de la longitud media, numero de trazas, media y desviación típica del TS máximo compensado y sin compensar para las medidas dorsales realizadas a 120 kHz en la jaula J16 durante todos los meses del estudio.

<i>Mes</i>	<i>f=120 kHz Jaula J16</i>		<i>Distancia máx (m)</i>	<i>TSmax</i>		<i>TS_{cmax}</i>	
	<i>L̄ (cm)</i>	<i>Nº de trazas</i>		<i>μ (dB)</i>	<i>σ (dB)</i>	<i>μ (dB)</i>	<i>σ (dB)</i>
julio	217	12111	19	-12.15	9.70	-5.74	3.90
agosto	212	2969	19	-14.23	7.66	-9.09	4.59
septiembre	220	8859	19	-13.30	10.12	-7.59	4.92
octubre	221	4726	19	-13.71	6.43	-8.39	4.79
noviembre	---	7395	19	-14.30	7.39	-8.40	5.06

Tabla 7.12. Valores de la longitud media, numero de trazas, media y desviación típica del TS máximo compensado y sin compensar para las medidas dorsales realizadas a 200 kHz en la jaula J16 durante todos los meses del estudio.

<i>Mes</i>	<i>f=200 kHz Jaula J16</i>		<i>Distancia máx (m)</i>	<i>TSmax</i>		<i>TS_{cmax}</i>	
	<i>L̄ (cm)</i>	<i>Nº de trazas</i>		<i>μ (dB)</i>	<i>σ (dB)</i>	<i>μ (dB)</i>	<i>σ (dB)</i>
julio	217	13872	19	-18.14	7.76	-12.52	4.52
agosto	212	2446	19	-28.58	4.45	-24.27	9.40
septiembre	220	7764	19	-19.90	8.77	-12.85	4.73
octubre	221	3444	19	-25.98	10.95	-13.63	5.11
noviembre	---	6411	19	-23.77	11.44	-13.51	7.45

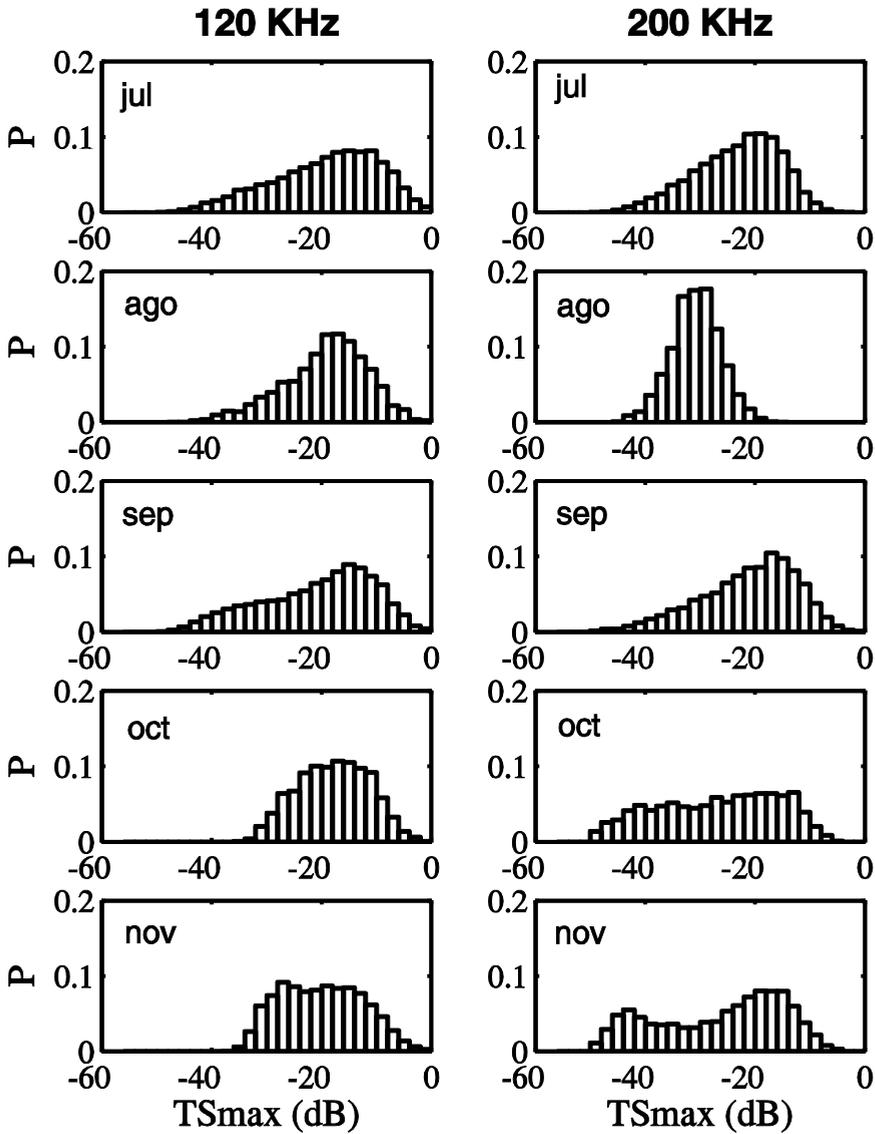


Figura 7.10. Densidad de probabilidad del TS máximo sin compensar de las trazas aisladas de la jaula J16. A la izquierda para 120 kHz y a la derecha para 200 kHz. Se presentan ordenadas por el mes de medida (la correspondencia julio, agosto, septiembre, octubre y noviembre). El número de muestras para 120 kHz se detalla en la Tabla 7.11 y para 200 kHz en la Tabla 7.12.

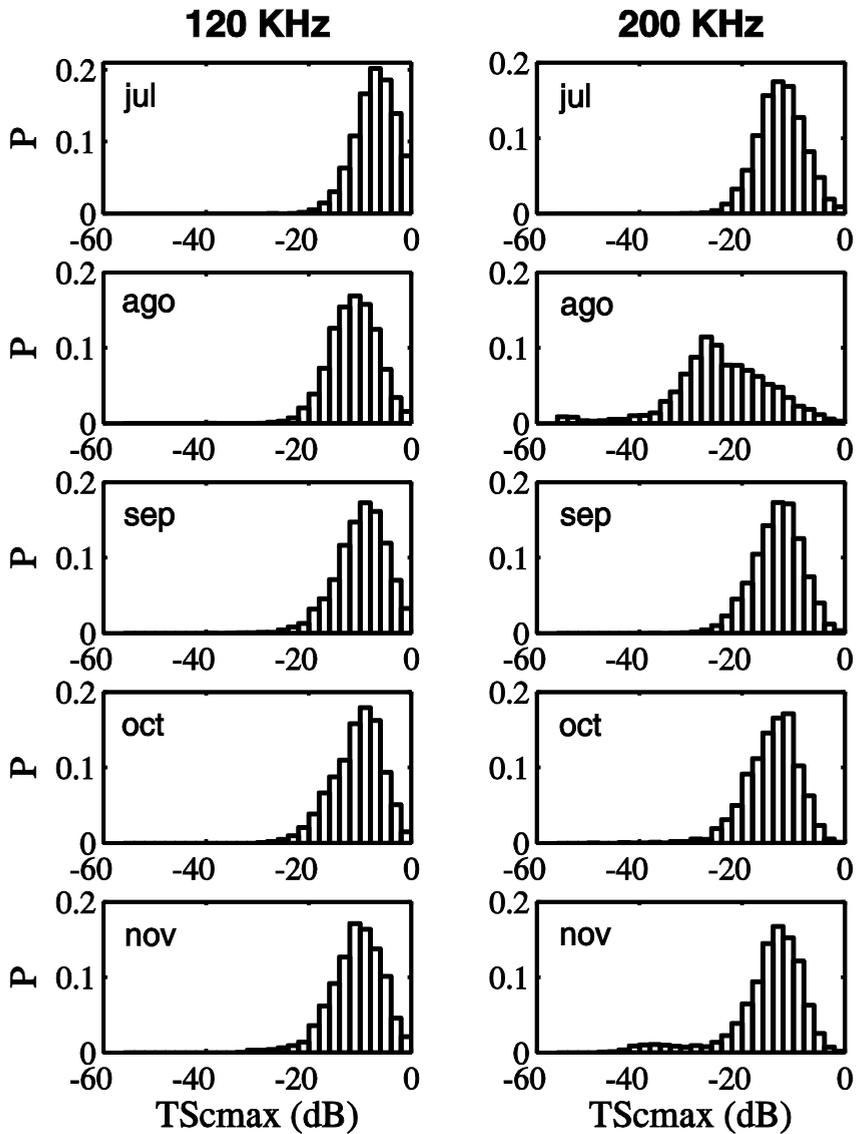


Figura 7.11. Densidad de probabilidad del TS máximo compensado de las trazas aisladas de la jaula J16. A la izquierda para 120 kHz y a la derecha para 200 kHz. Se presentan ordenadas por el mes de medida (la correspondencia julio, agosto, septiembre, octubre y noviembre). El número de muestras para 120 kHz se detalla en la Tabla 7.11 y para 200 kHz en la Tabla 7.12.

7.3.2.2. RESULTADOS DE LA JAULA 18 (J18)

Para la jaula J18 se representan los datos de la misma forma; en la Figura 7.12 y la 7.13 representan las distribuciones de probabilidad para el TSmax y para el TS_{cm} (para las dos frecuencias y para todos los meses que dura el estudio). En este caso las distribuciones del TSmax son más anchas mostrando grandes colas hacia los valores más pequeños. Aunque no se aprecia comportamientos marcadamente unimodales solo se intuyen posible una posible bimodalidad para el caso de la frecuencia más baja durante el mes de noviembre. Sin embargo, si nos fijamos en las distribuciones del TS_{cm} nos encontramos distribuciones marcadamente unimodales para todos los meses (para ambas frecuencias) con un ligero ensanchamiento durante el mes de octubre. En la Tabla 7.13, y la 7.14 se muestran valores medios del TSmax y del TS_{cm} a ambas frecuencias, al igual que en el caso de la jaula J16, la variabilidad del TS puede atribuirse, como ya se ha comentado, a la suma de varios factores, la configuración de medida (que solo permite medir el TS a cortas distancias entre 5 y 18 metros), el comportamiento de los peces dentro de la jaula, al que se une además el hecho del engrase de los atunes que puede aumentar dicha variabilidad.

Tabla 7.13. Valores de la longitud media, numero de trazas, media y desviación típica del TS máximo compensado y sin compensar para las medidas dorsales realizadas a 120 kHz en la jaula J18 durante todos los meses del estudio.

Mes	f=120 kHz		Jaula J18				
	\bar{L} (cm)	Nº de trazas	Distancia máx (m)	TSmax		TS _{cm}	
				μ (dB)	σ (dB)	μ (dB)	σ (dB)
julio	221	4337	18	-12.84	9.95	-7.70	6.79
agosto	---	4530	18	-15.14	8.56	-9.56	4.99
septiembre	196	4736	18	-15.20	9.47	-9.55	5.21
octubre	224	12028	18	-18.30	9.64	-10.63	4.97
noviembre	---	6860	18	-14.46	10.54	-7.50	3.53

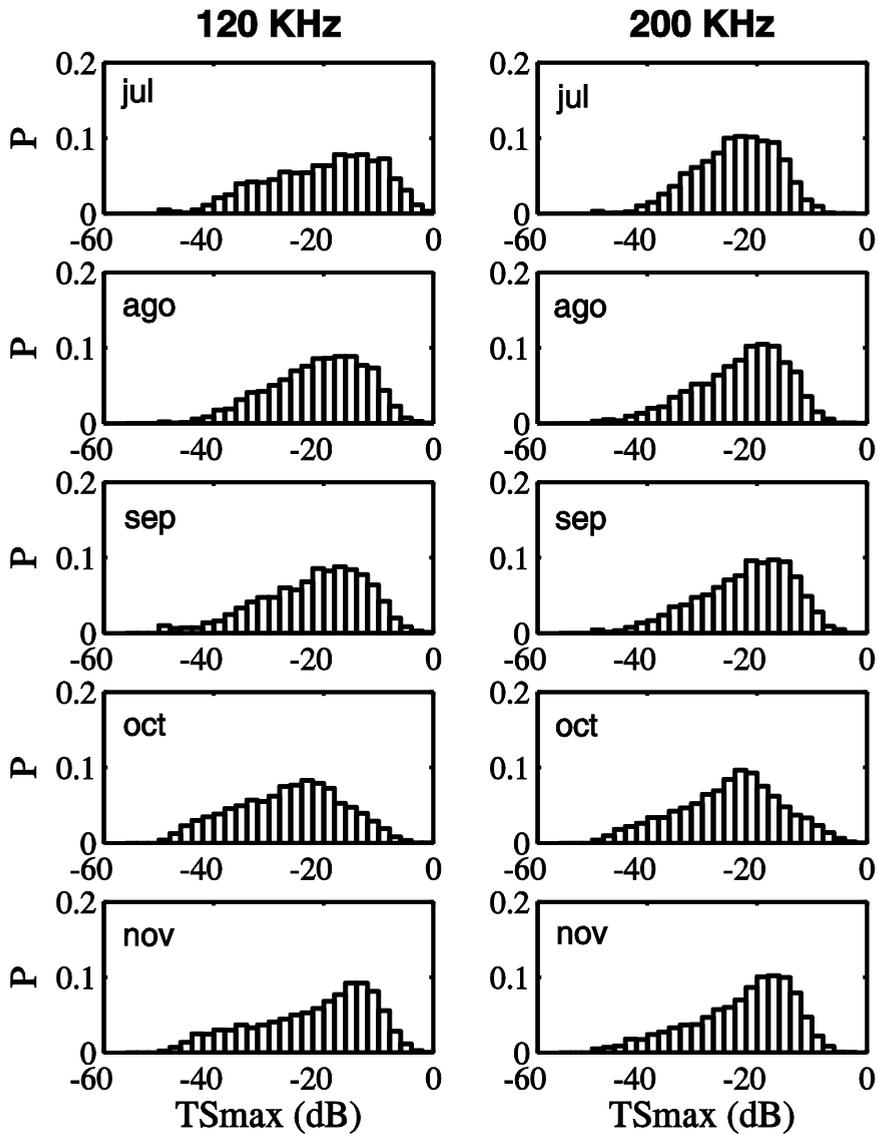


Figura 7.12. Densidad de probabilidad del TS máximo sin compensar de las trazas aisladas de la jaula J18. A la izquierda para 120 kHz y a la derecha para 200 kHz. Se presentan ordenadas por el mes de medida (la correspondencia julio, agosto, septiembre, octubre y noviembre). El número de muestras para 120 kHz se detalla en la Tabla 7.13 y para 200 kHz en la Tabla 7.14.

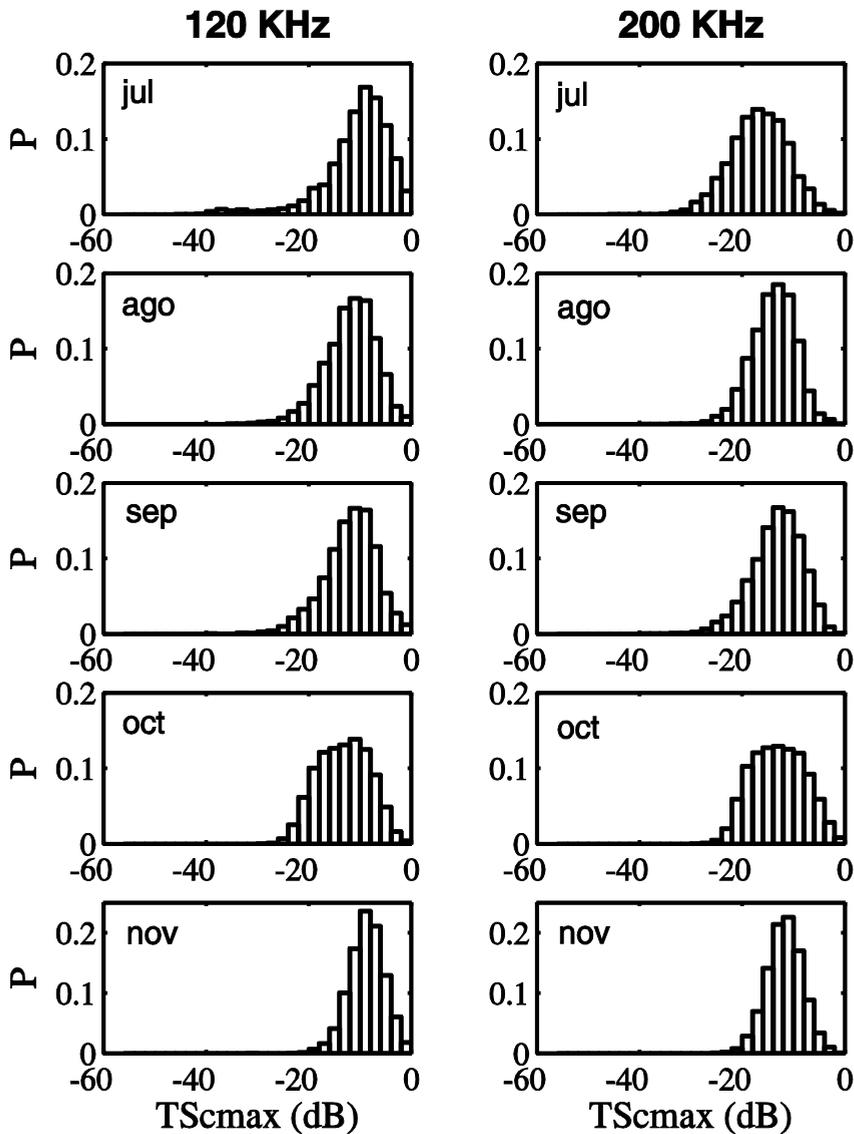


Figura 7.13. Densidad de probabilidad del TS máximo compensado de las trazas aisladas de la jaula J18. A la izquierda para 120 kHz y a la derecha para 200 kHz. Se presentan ordenadas por el mes de medida (la correspondencia julio, agosto, septiembre, octubre y noviembre). El número de muestras para 120 kHz se detalla en la Tabla 7.13 y para 200 kHz en la Tabla 7.14.

Tabla 7.14. Valores de la longitud media, numero de trazas, media y desviación típica del TS máximo compensado y sin compensar para las medidas dorsales realizadas a 200 kHz en la jaula J18 durante todos los meses del estudio.

<i>Mes</i>	<i>f=200 kHz Jaula J18</i>		<i>TSmax</i>		<i>TSmax</i>		
	\bar{L} (cm)	Nº de trazas	Distancia máx (m)	μ (dB)	σ (dB)	μ (dB)	σ (dB)
julio	221	4434	18	-18.96	7.76	-13.43	5.67
agosto	---	4347	18	-17.05	4.45	-12.04	4.34
septiembre	196	4769	18	-16.51	8.77	-12.89	4.98
octubre	224	8794	18	-17.30	10.95	-13.00	5.13
noviembre	---	7003	18	-16.85	11.44	-11.74	3.53

7.3.2.3. RESULTADOS DE LA JAULA 20 (J20)

Ocurre exactamente lo mismo para la jaula J20 que lo descrito para la jaula J18, es decir, las distribuciones del TSmax (Figura 7.14) se muestran unimodales pero con colas más alargadas hacia los valores más pequeños, presentando tendencia a la bimodalidad durante el mes de octubre. Durante el mes de noviembre la distribución a 120 kHz presenta varios modos mientras que a 200 kHz se vuelve claramente unimodal. Si nos fijamos en las distribuciones del TSmax, como ya ocurría para la J18, las distribuciones son marcadamente unimodales (Figura 7.15).

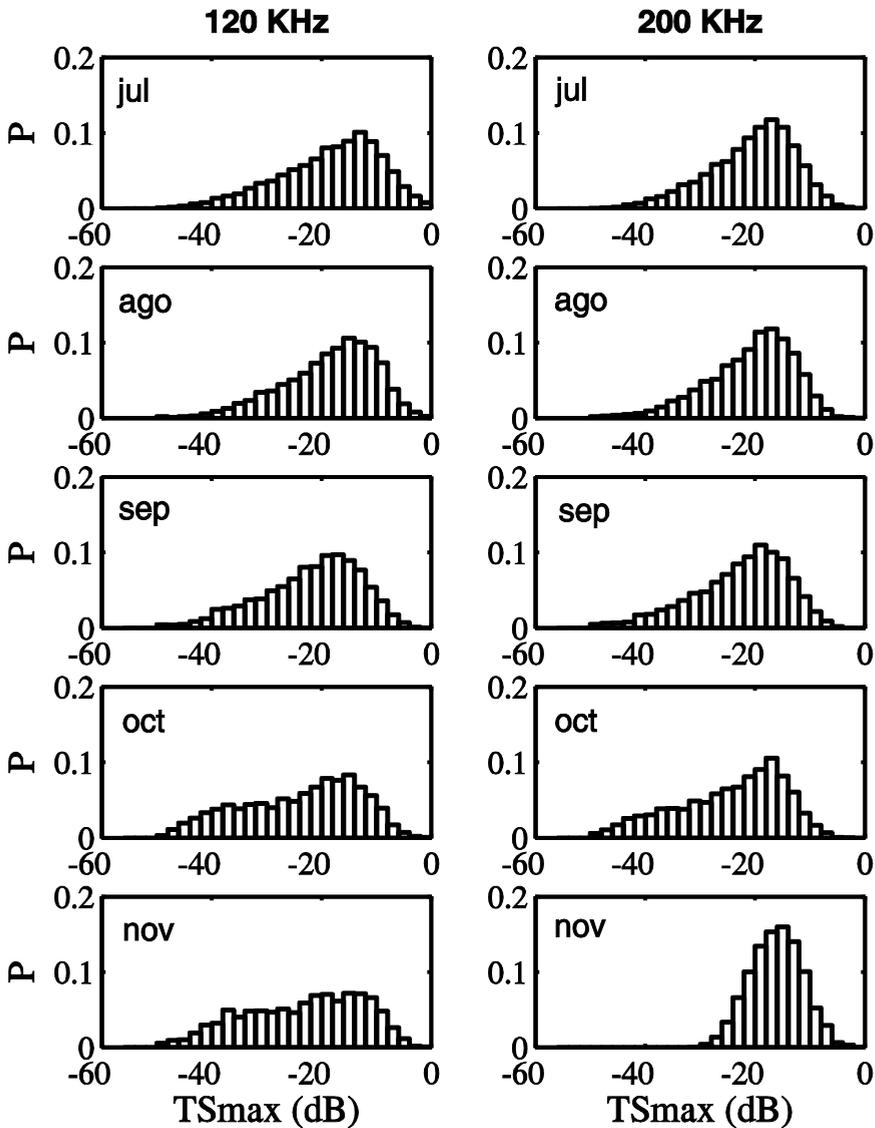


Figura 7.14. Densidad de probabilidad del TS máximo sin compensar de las trazas aisladas de la jaula J20. A la izquierda para 120 kHz y a la derecha para 200 kHz. Se presentan ordenadas por el mes de medida (la correspondencia julio, agosto, septiembre, octubre y noviembre). El número de muestras para 120 kHz se detalla en la Tabla 7.15 y para 200 kHz en la Tabla 7.16.

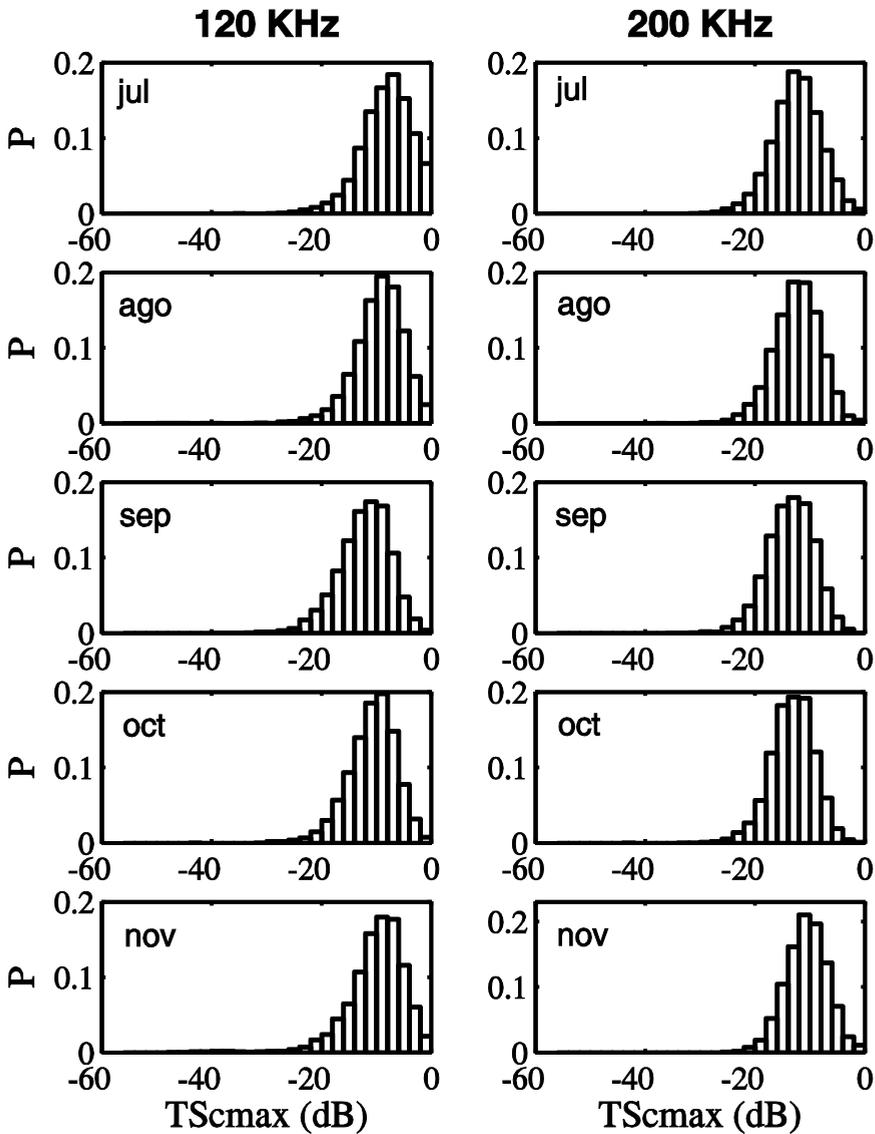


Figura 7.15. Densidad de probabilidad del TS máximo compensado de las trazas aisladas de la jaula J20. A la izquierda para 120 kHz y a la derecha para 200 kHz. Se presentan ordenadas por el mes de medida (la correspondencia julio, agosto, septiembre, octubre y noviembre). El número de muestras para 120 kHz se detalla en la Tabla 7.15 y para 200 kHz en la Tabla 7.16.

Al igual que en los casos anteriores las Tablas 7.15 y 7.16, no permiten observar variaciones significativas del TS_{max} y del TS_{cmax} a ninguna de las dos frecuencias.

Tabla 7.15. Valores de la longitud media, numero de trazas, media y desviación típica del TS máximo compensado y sin compensar para las medidas dorsales realizadas a 120 kHz en la jaula J20 durante todos los meses del estudio.

<i>Mes</i>	<i>f=120 kHz</i>		<i>Jaula J20</i>		<i>TSmax</i>		<i>TS_{cmax}</i>	
	\bar{L} (cm)	<i>Nº de trazas</i>	<i>Distancia máx</i> (m)	μ (dB)	σ (dB)	μ (dB)	σ (dB)	
julio	222	9604	19	-12.14	9.22	-6.39	4.59	
agosto	222	7291	19	-13.10	8.47	-7.64	4.54	
septiembre	224	7399	19	-15.70	8.96	-10.09	4.74	
octubre	225	8633	19	-15.76	10.59	-8.97	4.41	
noviembre	---	1803	19	-15.01	10.61	-9.35	5.62	

Tabla 7.16. Valores de la longitud media, numero de trazas, media y desviación típica del TS máximo compensado y sin compensar para las medidas dorsales realizadas a 200 kHz en la jaula J18 durante todos los meses del estudio.

<i>Mes</i>	<i>f=200 kHz</i>		<i>Jaula J20</i>		<i>TSmax</i>		<i>TS_{cmax}</i>	
	\bar{L} (cm)	<i>Nº de trazas</i>	<i>Distancia máx</i> (m)	μ (dB)	σ (dB)	μ (dB)	σ (dB)	
julio	222	10077	19	-15.65	7.81	-10.37	4.48	
agosto	222	6719	19	-15.99	7.85	-10.49	4.23	
septiembre	224	7299	19	-17.06	8.58	-11.64	4.27	
octubre	225	6624	19	-17.75	9.67	-11.54	4.02	
noviembre	---	3330	19	-13.73	4.74	-9.07	3.81	

7.3.2.4. RESULTADOS AL UNIR TODAS LAS JAULAS (J16+J18+J20)

Se opta finalmente por unir las detecciones de todas las jaulas para cada una de las frecuencias, de tal manera que se disponga de distribuciones por meses de la suma de las tres jaulas. Los resultados se muestran en las Figuras 7.16 y 7.17.

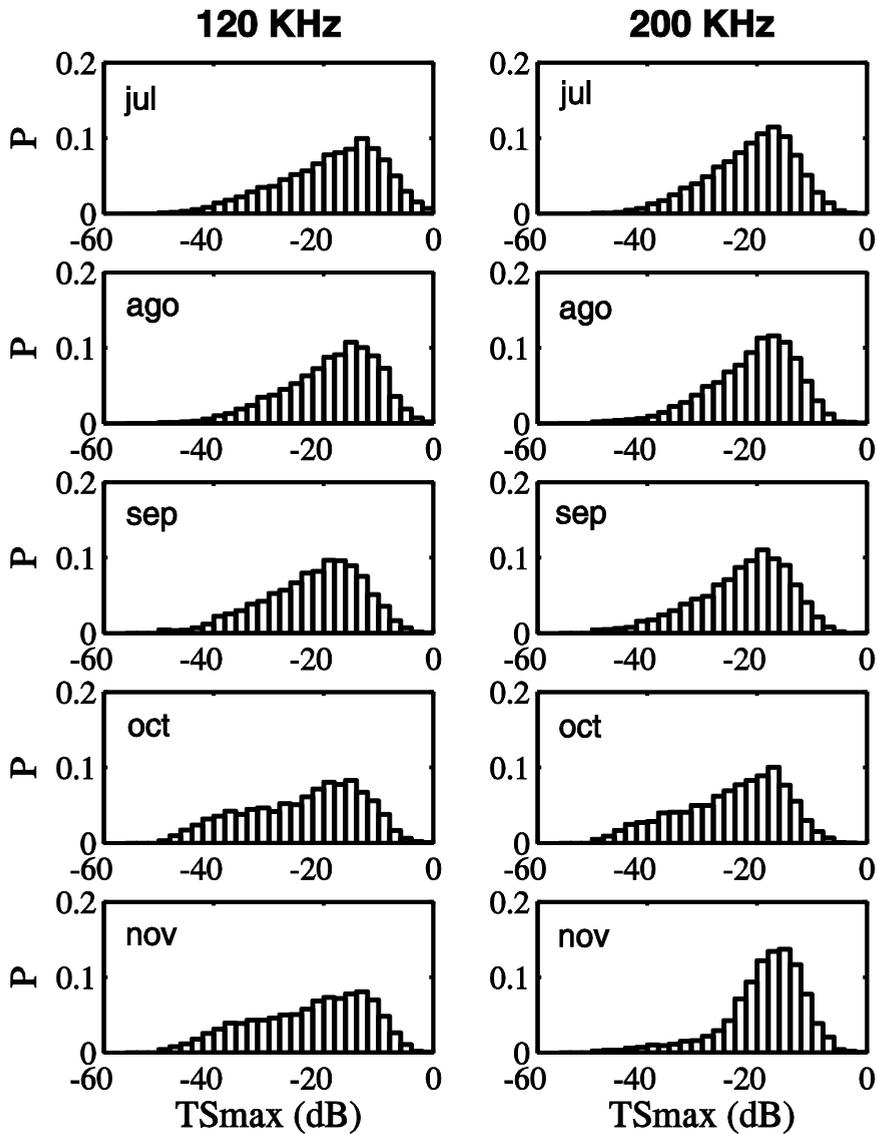


Figura 7.16. Densidad de probabilidad del TS máximo sin compensar de las trazas aisladas de todas las jaulas. A la izquierda para 120 kHz a la derecha para 200 kHz. Se presentan ordenadas por el mes de medida (la correspondencia julio, agosto, septiembre, octubre y noviembre). El número de muestras para 120 kHz se detalla en la Tabla 7.17 y para 200 kHz en la Tabla 7.18.

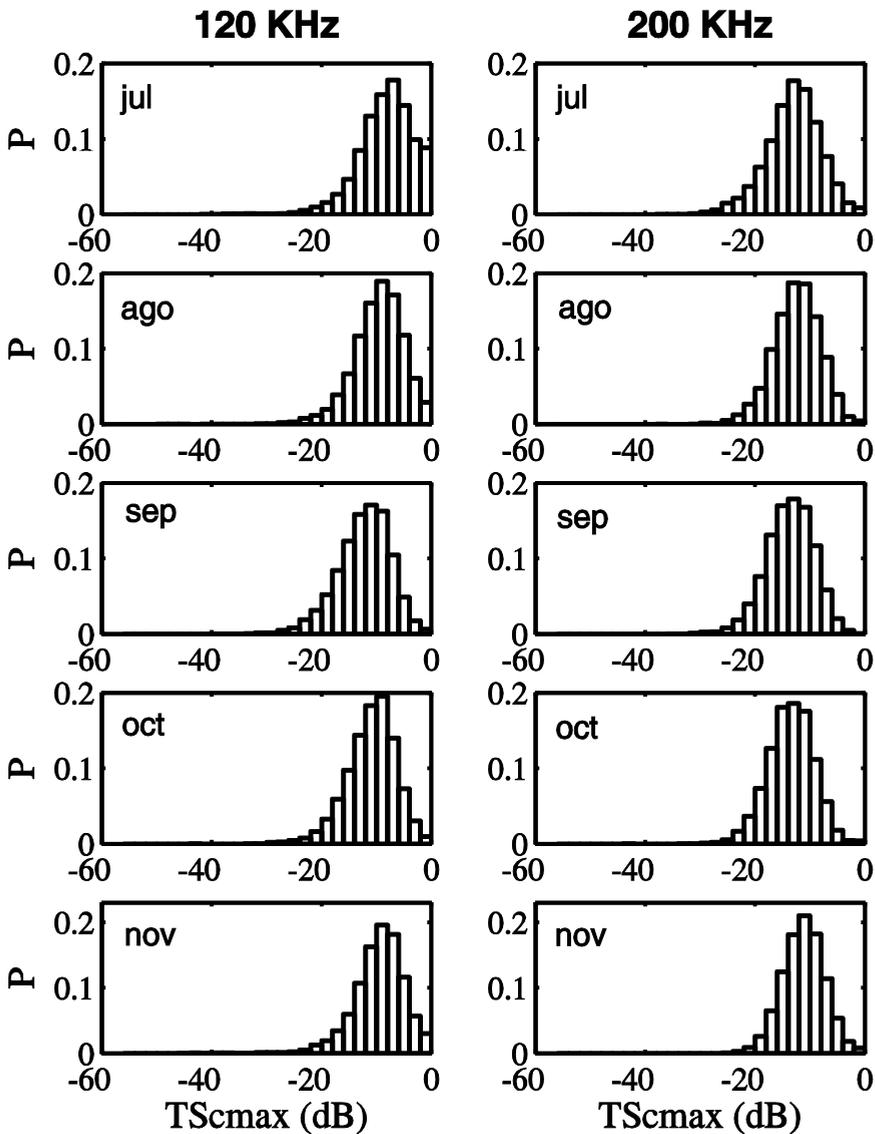


Figura 7.17. Densidad de probabilidad del TS máximo compensado de las trazas aisladas de todas las jaulas. A la izquierda para 120 kHz a la derecha para 200 kHz. Se presentan ordenadas por el mes de medida (la correspondencia julio, agosto, septiembre, octubre y noviembre). El número de muestras para 120 kHz se detalla en la Tabla 7.17 y para 200 kHz en la Tabla 7.18.

Tabla 7.17. Valores de la longitud media, numero de trazas, media y desviación típica del TS máximo compensado y sin compensar para las medidas dorsales realizadas a 120 kHz en la jaula J18 durante todos los meses del estudio.

$f=120\text{ kHz}$		Jaula J16+J18+J20		TSmax		TScmax	
Mes	\bar{L} (cm)	Nº de trazas	Distancia máx (m)	μ (dB)	σ (dB)	μ (dB)	σ (dB)
julio	221	26052	19	-12,22	9,33	-5.69	5.32
agosto	219	14790	19	-13,27	8,42	-7.57	4.70
septiembre	222	20994	19	-15,76	8,84	-10.02	4.90
octubre	223	25387	19	-15,88	10,36	-8.49	4.53
noviembre	---	16058	19	-14,94	10,39	-9.16	5.28

Tabla 7.18. Valores de la longitud media, numero de trazas, media y desviación típica del TS máximo compensado y sin compensar para las medidas dorsales realizadas a 200 kHz en la jaula J18 durante todos los meses del estudio.

$f=200\text{ kHz}$		Jaula J16+J18+J20		TSmax		TScmax	
Mes	\bar{L} (cm)	Nº de trazas	Distancia máx (m)	μ (dB)	σ (dB)	μ (dB)	σ (dB)
julio	221	28383	19	-15,98	7,83	-9,28	5,09
agosto	219	13512	19	-16,00	7,80	-10,53	4,27
septiembre	222	19832	19	-17,14	8,45	-11,72	4,34
octubre	223	18862	19	-18,00	9,44	-11,49	4,20
noviembre	---	16744	19	-14,76	7,54	-9,41	3,87

Para el caso del TSmax unir todos los datos de las tres jaulas no cambia los resultados obtenidos, se siguen mostrando distribuciones unimodales con colas en la parte de los valores más pequeños durante los primeros tres meses apareciendo indicios de bimodalidad en octubre y en noviembre para la frecuencia de 120 kHz, comportándose el mes de noviembre a 200 kHz como los tres primeros meses. El TScmax repite el mismo comportamiento también presentando distribuciones unimodales todos los meses a ambas frecuencias. Finalmente, a la vista de los datos mostrados en las Tablas 7.17 y 7.18 queda patente que no se pueden encontrar variaciones claras del TS con el tiempo,

no obstante, para el caso de 120 kHz parece apreciarse una disminución del *TScmax* los tres primeros meses que se recupera a partir de octubre. El caso de 200 kHz estaría más acorde con los valores de longitud media mostrados para cada mes. Dichos valores parecen mantenerse constantes al igual que los valores del *TScmax* para 200 kHz de frecuencia.

A menudo, y como ya se mencionó en el capítulo 5, dentro de las jaulas de engorde de atunes se pueden encontrar otras especies que crecen dentro de las mismas. Con el fin de discernir si las colas que presentan las distribuciones se deben únicamente a la contribución de los atunes alojados en ellas o, por el contrario, son la suma de las contribuciones de los atunes sumadas a las contribuciones de las otras especies que crecen dentro de la jaula; se representan en la Figura 7.18 y la Figura 7.19 las distribuciones para los meses de julio, septiembre y octubre de los datos acústicos que disponen de una correspondencia óptica. Se representa en la Figura 7.18 los valores del *TScmax* para las dos frecuencias bajo estudio. Del mismo modo, en la Figura 7.19 se representa el *TS* compensado para ambas frecuencias. Como puede apreciarse en dichas figuras no aparecen datos para el mes de agosto, ya que, no se disponen correspondencias para una de las jaulas al no disponer de grabaciones ópticas de dicha jaula.

Comparando las distribuciones mostradas en la Figura 7.16 y en la Figura 7.18 (*TScmax*) se puede observar que al incluir en la distribución solo las trazas que tienen correspondencia óptica (y que por lo tanto provienen inequívocamente de atunes), las colas en los valores más pequeños se mantienen, aunque son menos largas y acusadas, debido seguramente a la cantidad de muestras que es del orden de 20.000 para la Figura 7.16 y del orden de 1000 Para la Figura 7.18.

Si nos fijamos en la Figura 7.17 que representa los valores del *TScmax* para todas las trazas y en la figura 7.19 que representa los valores del *TScmax* solo para las trazas que tienen correspondencia óptica, la tendencia se repite presentando distribuciones unimodales para todos los meses.

Como se ha descrito en el presente apartado, no se puede hablar de una tendencia clara de los valores del *TS* (ni compensado, ni sin compensar) asociado al proceso de engrase. Durante los meses de medida el *TS* cambia, pero no puede establecerse una causa única responsable de dicho cambio, sino que dicha variación se debe a la suma de múltiples factores: el hecho de realizar las medidas a distancias cortas, el comportamiento de los peces al que se suma el proceso de engrase que modifica los parámetros biométricos como, sobre todo la anchura media de los atunes en las jaulas y su factor de condición, manteniéndose la longitud media durante los meses de estudio.

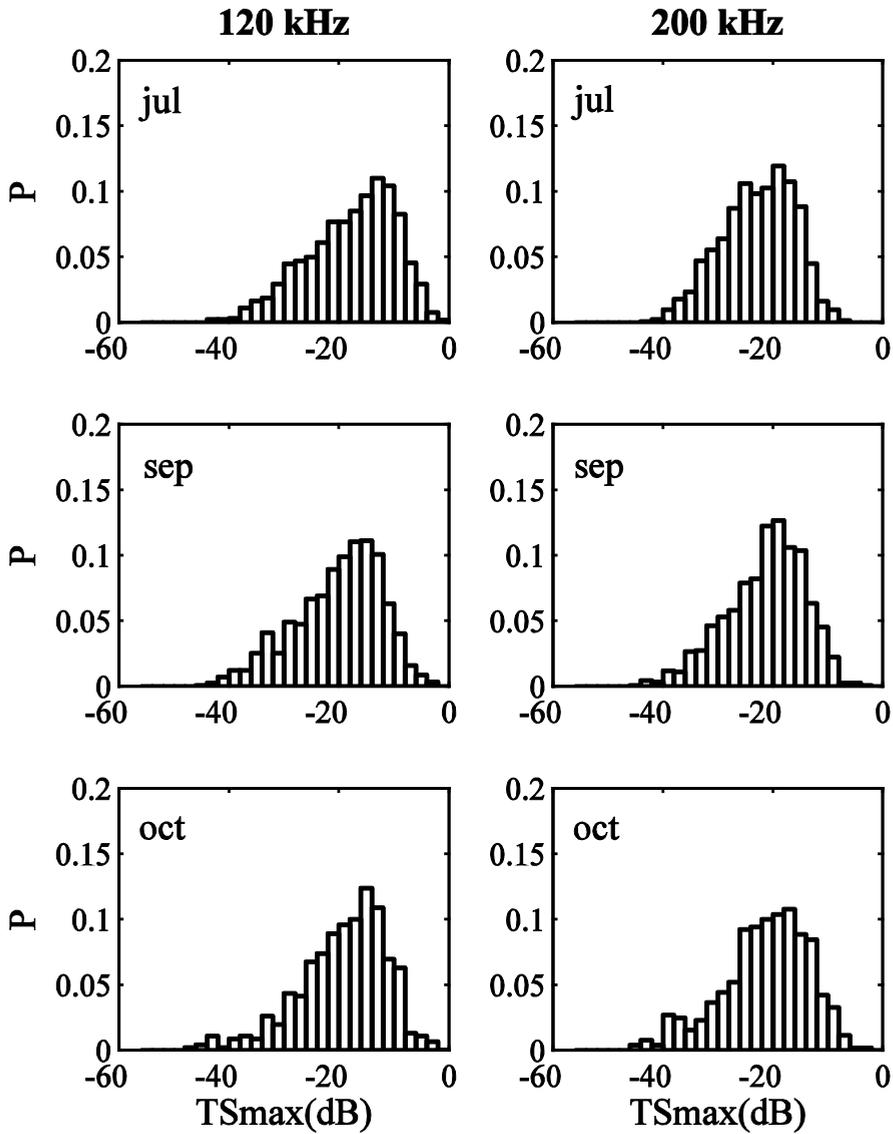


Figura 7.18. Densidad de probabilidad del TS máximo sin compensar de las trazas aisladas de todas las jaulas que tienen correspondencia óptica. A la izquierda para 120 kHz a la derecha para 200 kHz. Se presentan ordenadas por el mes de medida (la correspondencia julio, septiembre y octubre). El número de muestras para 120 kHz es de 1018 en julio, 1203 en septiembre y 984 en octubre. Para 200 kHz es de 1103 en julio, 1261 en septiembre y 997 en octubre.

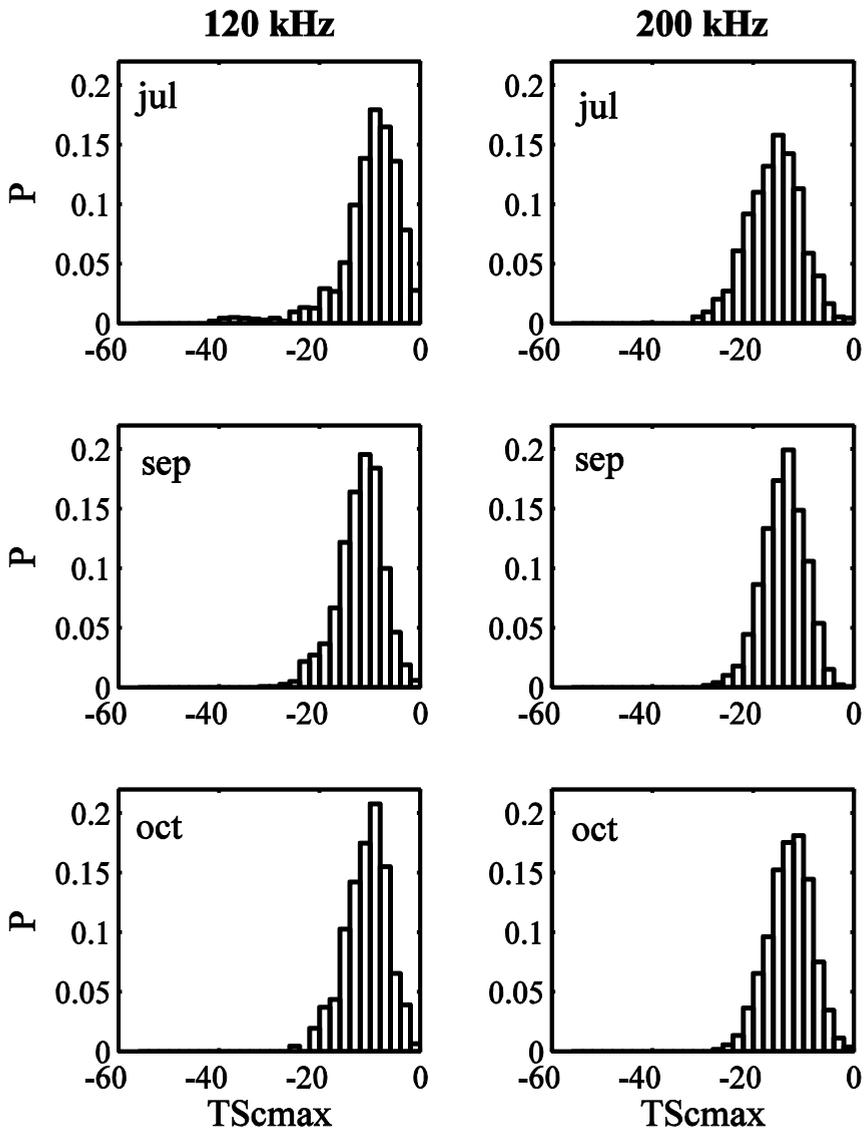


Figura 7.19. Densidad de probabilidad del TS máximo compensado de las trazas aisladas de todas las jaulas que tienen correspondencia óptica. A la izquierda para 120 kHz a la derecha para 200 kHz. Se presentan ordenadas por el mes de medida (la correspondencia julio, septiembre y octubre). El número de muestras para 120 kHz es

de 1018 en julio, 1203 en septiembre y 984 en octubre. Para 200 kHz es de 1103 en julio, 1261 en septiembre y 997 en octubre.

7.3.3. RELACIÓN DEL *TS* DESDE EL PUNTO DE VISTA VENTRAL CON LA LONGITUD

Como ya se hizo en el capítulo 5 con el *TS* desde el punto de vista dorsal, se pretende en este apartado, conseguir una relación del *TS* con la longitud para el aspecto ventral del atún rojo. Para poder conseguir dicho ajuste se parte de pares de datos acústico-ópticos en el que un determinado atún es medido acústicamente y grabado con el sistema de visión estereoscópica simultáneamente de manera que la correspondencia *TS*-Longitud es única.

El estudio de la dependencia del logaritmo de la longitud de los atunes (medida en las imágenes) con los valores del *TS*_{max} y el *TS*_{cmax} se realiza mediante un ajuste lineal por ser el más usado en la estimación de biomasa con herramientas acústicas (Ecuación (5.2)). Para evaluar la bondad del ajuste se hace uso del coeficiente de determinación y el p-valor del análisis de la varianza.

Para poder obtener un par acústico-óptico, el atún, debía estar entre 5 y 10 metros de los sensores, aislado en cada par de imágenes para ser segmentado correctamente, recto en el instante del máximo acústico (5 frames antes o después) y debía poderse establecer una correspondencia entre las dos imágenes del par estéreo. Como consecuencia del cumplimiento de todas estas condiciones la cantidad de coincidencias acústico-ópticas obtenidas para cada mes y cada jaula no fue muy elevada, ya que después los datos registrados fueron ordenados por tamaño de los atunes. Por este hecho se optó por juntar todos los datos de todas las jaulas y todos los meses con la finalidad de estudiar si es posible obtener una relación entre la longitud y el *TS* para peces engrasados en cautividad. Al no conocer al detalle las estrategias de alimentación seguidas por la empresa en cada una de las jaulas, y como no se dispone de medidas ópticas en el mes de agosto para una de ellas, se decide eliminar dicho mes de los datos para no afectar al resultado final. Por lo tanto, se usan las correspondencias acústico-ópticas de los meses de julio, septiembre y octubre. Además, con la finalidad de disponer de los mejores ajustes posibles se realizó un filtrado por la inclinación de los peces, calculada a partir del par de imágenes estéreo. En la Tabla 7.19 se muestran los valores de los ajustes obtenidos para la frecuencia de 120 kHz y en la Tabla 7.20 para 200 kHz. En dichas tablas se presentan ajustes lineales para diferentes inclinaciones de los atunes tanto para el *TS* compensado como para el *TS* sin compensar.

A la vista de los resultados se produce el mejor ajuste cuando los peces están inclinados entre -5° y 5° para la frecuencia de 120 kHz (Figura 7.20). No existen diferencias en la calidad de los ajustes para el *TS*_{max} y el *TS*_{cmax}, siendo las pendientes similares en ambos casos. Para el caso de la frecuencia de 200 kHz los datos varían y se obtienen mejores ajustes para el *TS*_{cmax} que para el *TS* sin compensar. Además, aunque el intervalo angular entre -5° y 5° produce muy buenos ajustes con una gran cantidad de

correspondencias acústico-ópticas, se producen mejores ajustes para el intervalo entre 0° y 5° , con una menor cantidad de coincidencias (el análisis de los datos se realiza con menos de la mitad de muestras). En el caso de 200 kHz la pendiente es baja para el TSmax y mayor para el TS_{comp}, sin poderse establecer un ajuste para el TSmax cuando la inclinación oscila entre -5° y 0° .

Los ajustes son estadísticamente significativos con un nivel de confianza del 95% (como indican los valores de la columna del p-valor) para la frecuencia de 120 kHz tanto para el TSmax como para el TS_{comp}. Sin embargo, para la frecuencia de 200 kHz el nivel de confianza se mantiene en los mismos niveles excepto para el caso del último intervalo en el que baja al 93% para el TS compensado y no encontrándose ajuste cuando el TS no se compensa.

En el intervalo entre -5° y 5° , para el TS_{comp}, (Figura 7.21) la pendiente a 200 kHz está en torno a 20 (21.14) y la ordenada en el origen es -61.28. En este mismo intervalo a la frecuencia de 120 kHz la pendiente también está cerca de 20 (20.97) y la ordenada en el origen es similar a la encontrada en el caso anterior pero un poco mayor (-57.48). Estos valores difieren a la frecuencia más baja de los encontrados para el caso dorsal en el capítulo 5, ya que, en dicho caso la pendiente estaba más cercana a 30.

No existen datos que evalúen el TS del atún rojo desde el punto de vista ventral, ni se conocen de otro tipo de tónidos, como si ocurría para las medidas realizadas dorsalmente. Hsueh-Jung *et al.*, (2011), en su experimento realizado en tanques con atún de aleta amarilla, evalúan el TS frente a la inclinación de los atunes, a 200 kHz aunque desde el punto de vista dorsal. En sus estudios concluyen que las orientaciones más frecuentes de nado están entre -5° y 1° . En el caso del presente experimento las orientaciones más frecuentes están entre -5° y 5° mientras atraviesan el haz acústico (para ambas frecuencias) por este hecho se elige el ajuste de este intervalo como el más representativo. No podemos establecer comparaciones con trabajos realizados para otras especies de atunes similares, ya que, ninguno presenta medidas desde el punto de vista ventral, donde la reflexión de la vejiga natatoria se hace más presente. Dichos trabajos establecen ajustes entre el TS (medido de manera dorsal) y el logaritmo de la longitud con diferentes pendientes para la misma especie de atún. Para el caso del atún de aleta amarilla (*yellowfin tuna*), autores como Manik (2009) indican que la pendiente es 19.80 (usando frecuencias de 38 kHz y hasta 500 metros de profundidad), mientras que otros la sitúan en 25.26 a la misma frecuencia y en el mismo rango de profundidades (Bertrand & Josse, 2000).

En este experimento se pretende establecer si se puede evaluar el TS del atún rojo desde el punto de vista ventral en una jaula de engrase, teniendo en cuenta únicamente las detecciones acústicas encontradas en una pequeña capa de 5 metros (entre 5 y 10 metros del transductor); en la que es posible realizar medidas fiables con el sistema óptico. El hecho del confinamiento de los peces no es trivial, ya que el estado de los peces en este tipo de instalaciones difiere del que tienen en estado salvaje. Los atunes en las jaulas se

ven obligados a adaptar su comportamiento a las condiciones en las que viven, modificando la velocidad de nado y las excursiones en la columna de agua. Algunos de estos efectos ya fueron descritos en el capítulo 4, y en el capítulo 6 se comprobó que estas nuevas condiciones de vida modifican los parámetros biométricos respecto a los de los peces que viven en estado salvaje. La conjunción de todas estas variables junto con las del experimento (frecuencia y distancia de medida principalmente) influyen de manera notable en los valores de las pendientes y las constantes obtenidas en los ajustes presentados.

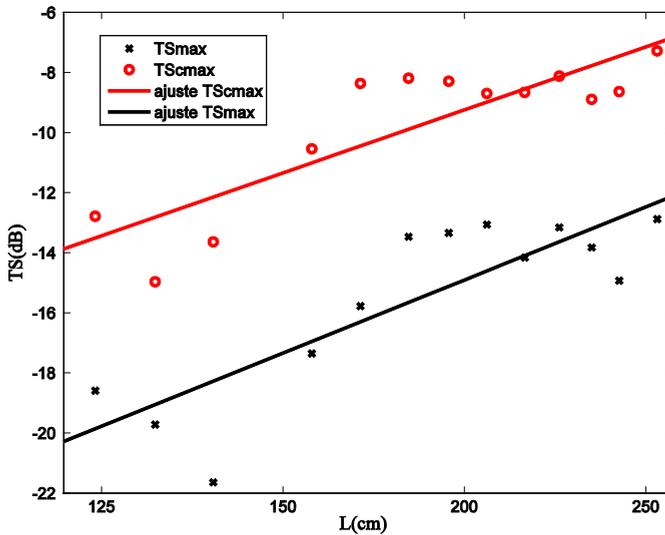


Figura 7.20. Relación lineal entre el TS máximo con y sin compensar de las trazas y el logaritmo de la longitud para una frecuencia de 120 kHz para los peces que nadan con una inclinación entre -5° y 5° . En rojo TS máximo compensado y en negro TS máximo sin compensar.

7.19. Resultados del ajuste lineal del TS máximo de las trazas (compensado y sin compensar) para la frecuencia de 120 kHz

grupo	Número de detecciones	$TS(dB)=a \cdot \log_{10} L(cm)+b$				$f=120 \text{ kHz}$			
		TSmax				TSmax			
		a	b	R ²	p-valor	a	b	R ²	p-valor
-5° a 5°	1236	24.33	-70.87	0.71	0.00	20.97	-57.48	0.74	0.00
-10° a 10°	2092	25.90	-74.47	0.70	0.00	23.68	-63.94	0.60	0.00
20° a 20°	2776	25.56	-73.72	0.64	0.00	24.42	-65.49	0.57	0.00
0° a 5°	467	31.28	-86.52	0.65	0.00	31.95	-81.97	0.62	0.00
-5° a 0°	656	31.94	-87.61	0.65	0.00	31.82	-81.56	0.60	0.00

7.20. Resultados del ajuste lineal del TS máximo de las trazas (compensado y sin compensar) para la frecuencia de 200 KHz.

grupo de detecciones	$TS_{max}(dB)=a \cdot \log_{10} L(cm)+b$					$f=200 \text{ KHz}$				
	TS_{max}					TS_{cmx}				
Número de detecciones	a	b	R ²	p-valor	a	b	R ²	p-valor		
-5° a 5°	1271	12.01	-45.55	0.54	0.05	21.14	-61.28	0.85	0.00	
-10° a 10°	2184	12.69	-47.51	0.67	0.02	19.63	-58.02	0.83	0.00	
20° a 20°	2849	17.11	-57.64	0.62	0.00	11.94	-40.00	0.47	0.01	
0° a 5°	541	34.19	-97.63	0.95	0.00	41.15	-107.88	0.90	0.00	
-5° a 0°	656	NA	NA	NA	NA	9.36	-34.08	0.50	0.07	

NA significa que no se encuentra ajuste

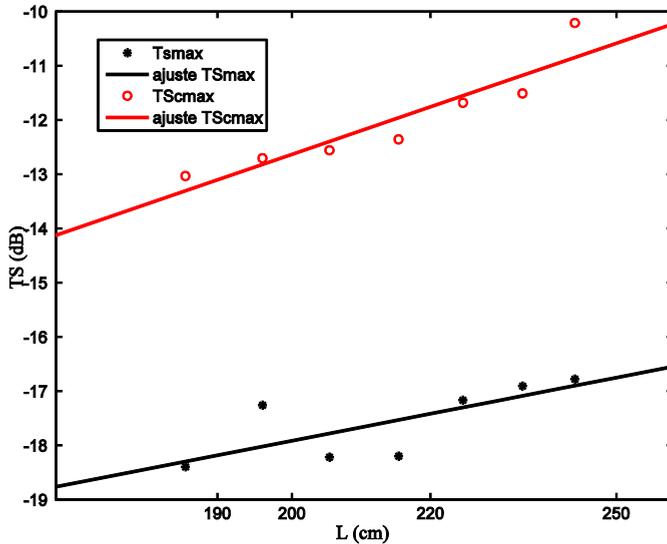


Figura 7.21. Relación lineal entre el TS máximo con y sin compensar de las trazas y el logaritmo de la longitud para una frecuencia de 120 kHz para los peces que nadan con una inclinación entre -5° y 5° . En rojo TS máximo compensado y en negro TS máximo sin compensar.

7.3.4. RELACIÓN DEL TS DESDE EL PUNTO DE VISTA VENTRAL CON LA ANCHURA

De las medidas ópticas se obtuvo la longitud de los peces y su anchura, por ello, se estudia también si existe una relación del TS medido ventralmente con la anchura del atún rojo. El procedimiento para la obtención de resultados es el mismo que para el caso de la longitud y se busca en ajuste entre el TSmax y el TSmax para las dos frecuencias (120 y 200 kHz) como ya se hizo en el apartado anterior. Se recurre a la Ecuación (5.2), variando el logaritmo de la longitud por el de la anchura utilizando los mismos evaluadores de la bondad de los ajustes (coeficiente de determinación y el p-valor del análisis de la varianza). Tras el análisis de los datos, solo se han encontrado correspondencias estadísticamente significativas para el caso de la anchura máxima (A1 en la Figura 7.9).

No se han encontrado ajustes para la frecuencia de 120 kHz. A dicha frecuencia los ajustes entre el TS (tanto compensado como sin compensar) tienen pendientes muy bajas y coeficientes de correlación en torno a 0.1. Si nos fijamos en la Figura 7.22, podemos ver los datos para el intervalo de inclinación entre -5° y 5° . En la dicha Figura se aprecia como para las anchuras intermedias el valor del TS es mayor de lo que lo es para las anchuras mayores donde el TS parece disminuir del mismo modo que ocurre con las anchuras

menores. Este efecto no puede atribuirse a ningún factor en concreto, aunque pueda deberse a la suma de varios de los descritos a lo largo de la presente tesis y que son intrínsecos a las medidas del TS a cortas distancias, al comportamiento de los peces en las jaulas y seguramente, son consecuencia del engrase de los peces dentro de las jaulas. Es indispensable la realización de un estudio mediante técnicas de simulación de la situación descrita para poder averiguar la dependencia de estos resultados con algunos de los factores esmentados, así como la realización de una campaña de medidas que avale los resultados de dichas simulaciones.

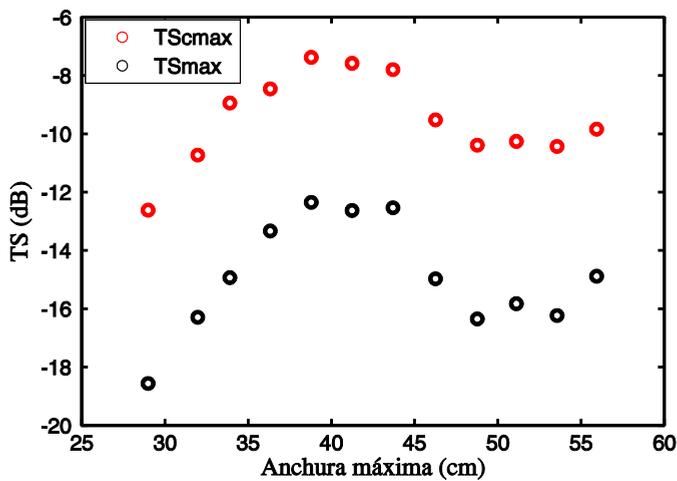


Figura 7.22. Datos para el ajuste el ajuste entre el TS y la anchura máxima a la frecuencia de 120 kHz.

Sin embargo, en la Tabla 7.21 se muestran los valores de los ajustes obtenidos para la frecuencia de 200 kHz en el intervalo de inclinación entre -5° y 5° . En ella se aprecia que los ajustes son buenos tanto para el TS_{max} como para el TS_{cmax} , produciéndose mejores ajustes cuanto más ancho es el intervalo de orientaciones consideradas. La pendiente se mantiene relativamente constante para el TS (sin compensar y compensado) para los tres primeros intervalos, pero no ocurre lo mismo para el intervalo entre 0° y 5° , en el que aumenta la pendiente hasta casi el doble aumentando también el valor del coeficiente de correlación. No obstante, en este caso la cantidad de correspondencias acústico-ópticas consideradas es mucho menor que en el resto de los casos. No se encuentra ajustes válidos

para el caso del último intervalo entre -5° y 0° para ninguno de las dos variantes del TS consideradas.

Los resultados obtenidos al ajustar el TS con el logaritmo de la anchura máxima para 200 kHz, siguen una tendencia similar a la encontrada para la longitud a esa misma frecuencia (Figura 7.23). De manera diferente ocurre con la frecuencia de 120 kHz, a la que la correlación entre la longitud y la energía retrodispersada por los atunes no se repite cuando se utiliza la anchura máxima en los ajustes.

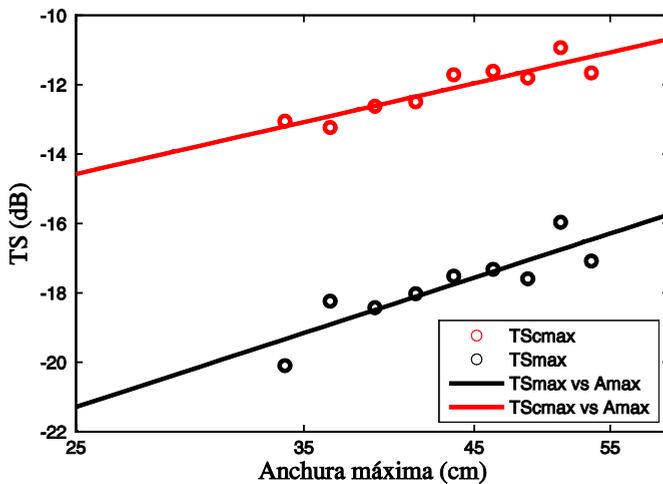


Figura 7.23. Datos para el ajuste el ajuste entre el TS y la anchura máxima a la frecuencia de 200 kHz.

7.21. Resultados del ajuste lineal del TS máximo de las trazas (compensado y sin compensar) para la frecuencia de 200 kHz.

		$TS_{max}(dB) = a \cdot \log_{10} A_{max}(cm) + b$				$f = 200 \text{ KHz}$			
		TS_{max}				TS_{Scmax}			
<i>grupo de detecciones</i>	<i>Número de</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R²</i>	<i>p-valor</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R²</i>	<i>p-valor</i>
-5° a 5°	1236	14.60	-41.70	0.76	0.00	10.24	-28.89	0.82	0.00
-10° a 10°	2092	13.96	-40.91	0.83	0.00	11.67	-31.38	0.90	0.00
20° a 20°	2776	14.08	-41.09	0.82	0.00	9.93	-28.60	0.93	0.00
0° a 5°	467	24.51	-57.78	0.82	0.00	20.47	-45.19	0.95	0.00
-5° a 0°	656	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

NA significa que no se encuentra ajuste

7.3.5. RELACIÓN DEL TS DESDE EL PUNTO DE VISTA VENTRAL CON LA MASA

En el capítulo 6 de este trabajo se han obtenido diferentes expresiones que relacionan las diferentes dimensiones del atún rojo (longitud, anchura máxima y altura) con el peso. La masa (o peso) es el parámetro biométrico que se suele emplear en gestión de las explotaciones acuícolas y por ello se busca en este apartado un procedimiento para obtener dicho parámetro a partir de herramientas acústicas, es decir, a partir del TS.

En los puntos anteriores se han presentado expresiones que relacionan el TS con la longitud y con la anchura. La finalidad de dichas expresiones es evaluar si las técnicas acústicas son aptas para el control del engrase del atún rojo en jaulas marinas. Para ello, como ya se ha explicado, se evalúa una capa de 5 metros (comprendida entre los metros 5 y 10 desde el transductor y el sistema estereoscópico de visión). En dicha capa se puede asegurar medidas de longitud y anchura, y además se puede evaluar la energía máxima retrodispersada por los peces suponiendo que toda la vejiga queda totalmente insonificada.

En el capítulo 5 (Ecuación (5.5)) se muestra el procedimiento para obtener valores de longitud a partir de los valores del TS obtenidos por medida directa. Al igual que en el caso inverso, el valor de la longitud (o de la anchura máxima) a partir del TS puede obtenerse linealizando la Ecuación (5.5) y ajustando mediante el método de los mínimos cuadrados. En la Tabla 7.22 se muestran los resultados de dicho ajuste lineal para el intervalo de orientaciones entre -5° y 5°, para el TS_{max} y el TS_{cmax} a las dos frecuencias de trabajo.

Tabla 7.22. Resultados del ajuste lineal de la longitud a partir del TS máximo de las trazas (compensado y sin compensar) para las dos frecuencias bajo estudio.

$L(cm)=a \cdot 10^{b \cdot TS(dB)}$	TS _{max}		TS _{cmax}	
	120 kHz	200 kHz	120 kHz	200 kHz
a	531.2391	1238.7	414.4480	654.9528
b	0.0290365	0.0451517	0.0350988	0.0404361
R ²	0.71	0.54	0.74	0.86
p-valor	0.00	0.05	0.00	0.00

A partir de los datos de la Tabla 7.22 y sabiendo que el TS promedio en la capa considerada toma los valores que se indican en la Tabla 7.23 se puede calcular la longitud media de los peces. Si nos fijamos en los datos ópticos y en los del sacrificio para las tres jaulas que se muestran en la Tabla 7.5, tenemos los datos resultantes de juntar las tres jaulas cada uno de los meses, tomando el promedio de los meses de julio, septiembre y octubre (ya que los datos de agosto no se incluyeron en el analisis como se indicó en el punto 7.3), tenemos que tras medir 73505 muestras la longitud media es de 223 cm, mientras que del

sacrificio de 1143 atunes la longitud media es de 224 cm. Se calcula el error en la estimación de la longitud media a partir del valor del *TS* obteniéndose en todo caso errores máximos cercanos al 7%. Cuando se considera el *TS* compensado el error de estimación disminuye a ambas frecuencias, siendo muy pequeño a la frecuencia de 200 kHz y cercano al 5 % para la de 120 kHz.

Tabla 7.23. *TS* (compensado y sin compensar) promedio y Longitud resultante de aplicar las expresiones de la Tabla 7.22 en la capa considerada a ambas frecuencias.

	<i>TS</i> _{max}		<i>TS</i> _{cmax}	
	120 kHz	200 kHz	120 kHz	200 kHz
<i>TS</i> (dB)	-14.03	-17.77	-8.32	-11.58
\bar{L} (cm)	207.89	209.46	211.57	222.82
Error respecto a la medida óptica (%)	6.8	6.1	5.1	0.1
Error respecto al sacrificio (%)	7.2	6.5	5.5	0.5

Si realizamos el mismo procedimiento para la estimación de la anchura máxima a partir del *TS*, obtenemos los datos mostrados en la Tabla 7.24. En este caso no se pueden realizar predicciones para la frecuencia de 120 kHz, ya que, ha sido imposible ajustar los valores del ancho de los peces a los valores de la energía acústica retrodispersada por los mismos a dicha frecuencia.

En la Tabla 7.25 se muestran los valores de la anchura máxima promedio calculada a partir de las expresiones mostradas en la Tabla 7.24. En este caso no se dispone de datos sobre la anchura en el sacrificio, únicamente se tienen los datos de la anchura medida ópticamente, que como se muestra en la Tabla 7.6 tras medir 73505 muestras (sin tener en cuenta los datos de agosto como en el caso anterior) la anchura máxima media es de 47.33 cm. Los errores en la estimación de la anchura máxima son menores del 10 % como para el caso de la longitud, disminuyendo, como también ocurría con la longitud, cuando se usa los valores del *TS*_{cmax}.

Tabla 7.24. Resultados del ajuste lineal de la anchura máxima a partir del TS máximo de las trazas (compensado y sin compensar) para 200 kHz.

$A_{max}(cm)=a \cdot 10^{b \cdot TS(dB)}$	TS_{max}		TS_{cmax}	
	120 kHz	200 kHz	120 kHz	200 kHz
a	---	370.3992	---	408.4510
b	---	0.0523516	---	0.0803887
R ²	---	0.76	---	0.82
p-valor	---	0.00	---	0.00

Tabla 7.25. TS (compensado y sin compensar) promedio y Ancho máximo resultante de aplicar las expresiones de la Tabla 7.24 en la capa considerada a 200 kHz.

	TS_{max}	TS_{cmax}
$TS (dB)$	-17.77	-11.58
$\overline{A_{max}} (cm)$	43.49	47.89
<i>Error respecto a la medida óptica (%)</i>	8.1	1.2

Finalmente se evalúa la posibilidad de conocer la masa promedio a partir del valor del TS , aprovechando para ello, las expresiones presentadas en el capítulo 6 y que permiten el cálculo del peso promedio a partir de las dimensiones del atún. Se calcula el valor de la masa con todas las expresiones presentadas en la Tabla 6.1 y se compara con el valor de la masa media de los sacrificios de los atunes proporcionado por la empresa. Los valores de la longitud y la anchura máxima utilizados serán los calculados a partir de los datos acústicos, para el caso de las expresiones que necesiten de la altura de los peces, esta se determinará mediante la expresión M14, presentada en la Tabla 6.2 que relaciona la altura con la longitud y la anchura máxima. Se realiza únicamente estos cálculos para la frecuencia de 200 kHz por disponer de la longitud y la anchura máxima. La masa promedio (\bar{P}) es proporcionada por la empresa a partir de los sacrificios y es de 258.57 kg. Los resultados se muestran en la Tabla 7.26, para evaluar la bondad de las predicciones del peso promedio se calcula el error absoluto medio (E_{am}) de acuerdo con la Ecuación (6.4) y el error relativo medio (E_{rm}) como se indicó en la Ecuación (6.5). En dicha tabla

se puede apreciar que para el TScmax a 200 kHz los errores al predecir la masa a partir del TS no están cerca del 5 %. Aumentan para la M4 y disminuyen de manera sorprendente para la M12 y la M3. Excepcionalmente para la M12 y la M13 se subestima la masa entre 6 y 18 kg, para el caso de estas dos primeras se sobreestima el valor del peso medio entre 4 y 17 kg. Cuando se toman los valores del TSmax crecen colocándose por encima del 17 % y llegando hasta casi el 30 %.

Tabla 7.26. Estimación de la masa promedio a partir de la longitud media y la anchura máxima obtenida por métodos acústicos para una frecuencia de 200 kHz.

$\bar{P}= 258.57 \text{ kg}$		$f= 200 \text{ kHz}$					
		<i>T</i> Smax			<i>T</i> Smax		
<i>Modelo</i>	<i>Peso (Kg)</i>	<i>Eam (kg)</i>	<i>Erm (%)</i>	<i>Peso (kg)</i>	<i>Eam (kg)</i>	<i>Erm (%)</i>	
<i>M1</i>	202,02	56,54	27,98	244,45	14,11	5,77	
<i>M2</i>	201,22	57,35	28,50	245,89	12,68	5,16	
<i>M3</i>	201,18	57,39	28,53	251,79	6,78	2,69	
<i>M4</i>	199,38	59,19	29,69	239,97	18,60	7,75	
<i>M5</i>	200,71	57,86	28,83	245,50	13,07	5,33	
<i>M6</i>	195,97	62,60	31,94	245,11	13,46	5,49	
<i>M7</i>	194,28	64,29	33,09	244,13	14,44	5,91	
<i>M8</i>	200,23	58,34	29,13	246,86	11,71	4,75	
<i>M9</i>	200,56	58,01	28,92	245,73	12,84	5,23	
<i>M10</i>	200,39	58,18	29,03	244,09	14,48	5,93	
<i>M11</i>	200,87	57,70	28,72	245,72	12,85	5,23	
<i>M12</i>	215,85	42,72	19,79	263,42	4,85	1,84	
<i>M13</i>	206,71	51,86	25,09	276,01	17,44	6,32	

Estos resultados indican la posibilidad de obtener valores acertados de la masa promedio de una jaula de atunes de manera indirecta a partir de medidas acústicas. El procedimiento de predicción de la masa desarrollado en este punto puede ser de gran utilidad en las plantas de engrase de atunes, ya que, permite una conversión entre datos acústicos y biomasa en las jaulas mediante una metodología novedosa. Como ya se indicó en el capítulo 6, los errores en la estimación de la masa para peces engrasados haciendo uso de expresiones que solo tienen en cuenta la longitud puede minimizarse añadiendo más

dimensiones en la expresión utilizada para predecir la masa. El procedimiento desarrollado en el presente capítulo abre la posibilidad de obtener los valores medios de la longitud y la anchura de los peces a partir de medidas acústicas, y el cálculo de la altura media de los peces mediante una expresión ajustada para peces engrasados.

No obstante, ante la imposibilidad de establecer relaciones entre el ancho máximo y una de las dos frecuencias bajo estudio, se hace patente la necesidad de profundizar en el análisis de la configuración de medida elegida mediante técnicas de simulación y nuevos experimentos que clarifiquen los fenómenos (tanto físicos como de comportamiento de los animales) que imposibilitan que se repita a 120 kHz las tendencias mostradas por los datos a 200 kHz.

7.3.6. DEPENDENCIA DEL *TS* CON LA DISTANCIA AL TRANSDUCTOR

En este punto, se realiza un estudio de la dependencia del *TS* (compensado y sin compensar) con la distancia al transductor. El estudio se realiza por meses y por jaulas para cada una de las frecuencias. Finalmente se unen los datos de todas las jaulas y se realiza el análisis para ambas frecuencias por meses. Se pretende conocer cómo se comporta el *TS* a medida que nos alejamos del transductor.

Se calcula el valor medio del *TS* máximo desde el punto de vista ventral en capas de un metro, de tal modo que debe haber al menos 50 muestras (500 cuando se consideran los datos de las tres jaulas juntas) en la capa para que la media se considere válida, de este modo, se eliminan valores medios afectados por pocas detecciones que generan valores aberrantes en los extremos (zonas muy cercanas o muy alejadas) donde nadan menos individuos produciéndose menos registros.

En la Figura 7.24 podemos observar cómo se comporta el *TS*_{max} a las dos frecuencias para cada una de las jaulas (de la 16 a la 20 en orden descendente) y finalmente para todas las jaulas juntas. A la vista de las gráficas puede observarse que a 120 kHz la J16 presenta un *TS* que crece con la distancia a la fuente, siendo ese efecto más acusado para julio. En esta jaula se produce un desplome del *TS* para las capas más lejanas del mes de septiembre, seguramente por efecto del comportamiento de los peces en dicha capa. Para la jaula J18 se produce una gran caída del *TS*_{max} durante el mes de octubre asociado al comportamiento de los peces durante la toma de datos, conjugado con un cambio en los parámetros biométricos debidos al engrase. Este efecto no puede apreciarse en noviembre para esta jaula debido a la disminución notable de detecciones. Para la J20 se observa una disminución del *TS*_{max} con los meses, pero no se aprecia ninguna dependencia con la distancia al transductor. Noviembre en esta jaula rompe la tendencia mostrando un mayor valor medio por capa que el mes de octubre. Al unir los datos de todas las jaulas para esta frecuencia puede apreciarse que, para los meses de julio agosto y septiembre existe una dependencia del *TS* con la distancia ya que aumenta con ella, la tendencia se muestra con menos claridad en el mes de noviembre, mientras que en el mes de octubre no parece apreciarse dicha tendencia.

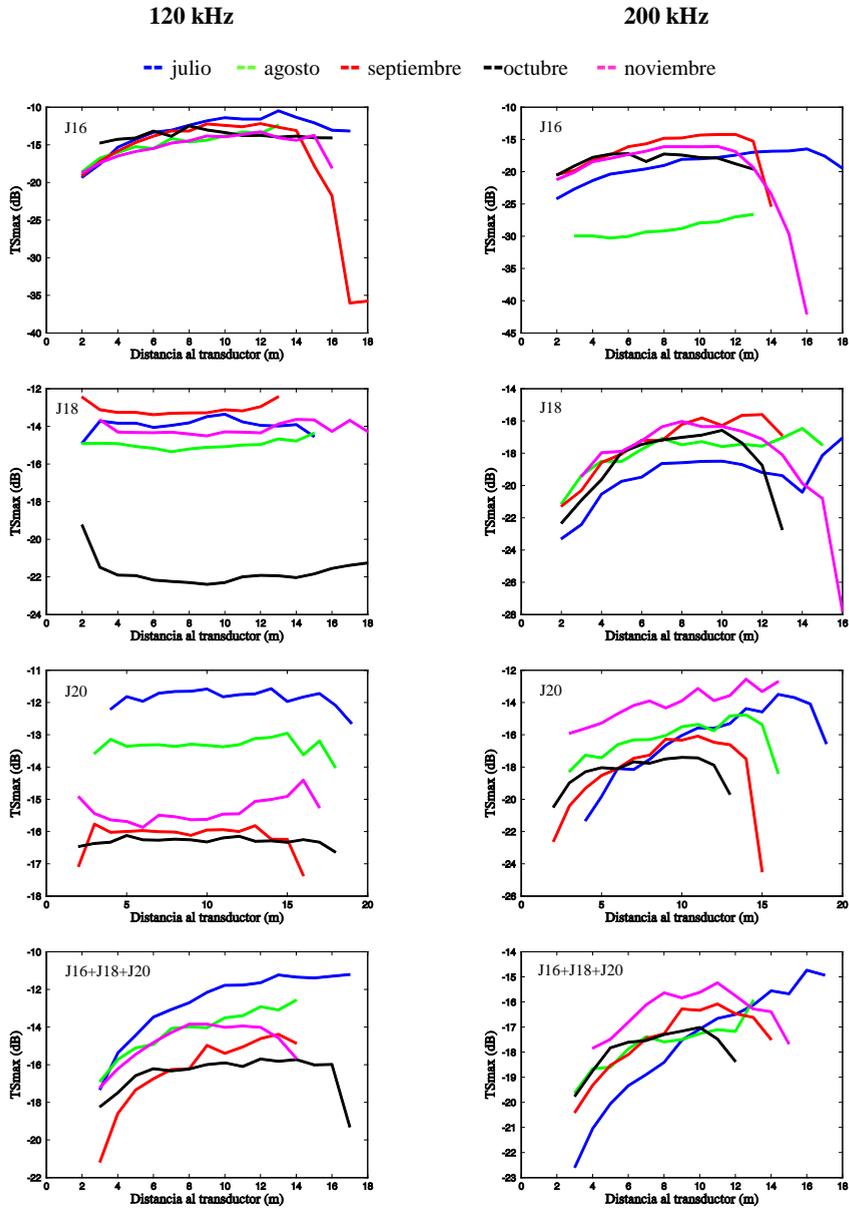


Figura 7.24. Dependencia del TSmax con la distancia al transductor para las dos frecuencias y todas las jaulas por separado y unidas. Aparecen en la parte superior J16, segunda fila J18, después J20 y abajo todas las jaulas juntas. En la columna izquierda datos de 120 kHz mientras que en la derecha datos para 200kHz. Sobre las gráficas la correspondencia de los meses con los colores de las líneas.

Si nos fijamos en la columna derecha de la Figura 7.24 se observa que para la frecuencia de 200 kHz la jaula J16 presenta un aumento del *TS*_{max} a medida que se aleja del transductor produciéndose una caída en las capas superiores debido a la disminución de detecciones que conforman la media. Esta tendencia es menos marcada el mes de agosto que ofrece además valores medios del *TS*_{max} por capas mucho menores. El caso de la J18 es completamente distinto mostrando el aumento del *TS* con la distancia todos los meses y con valores del *TS*_{max} medio por capas más cercano entre meses. Con la jaula J20 ocurre lo mismo el *TS*_{max} aumenta con la distancia excepto para las capas más superficiales en la que la falta de detecciones hace disminuir la media. Existen dos particularidades el mes de octubre tiene un aumento del *TS* con la distancia menor y el mes de noviembre ofrece valores medios por capas ligeramente superiores a los del resto de los meses. Si nos fijamos en la suma de todos los datos, se observa claramente dicha dependencia del *TS*_{max} con la distancia que se va suavizando con los meses de manera que para julio es muy marcada y para los meses de octubre y noviembre lo es menos, presentando estos meses, además, mayores valores medios en las capas más cercanas que el resto de meses y ligeros descensos en las capas superiores creándose una zona de mayor estabilidad entre 5 y 10 metros para octubre y entre 6 y 11 metros para noviembre.

En la Figura 7.25, se repite el mismo esquema de presentación de datos, esta vez con el valor del promedio del *TS* máximo compensado por capas. A la frecuencia de 120 kHz la J16 presenta aumento del *TS*_{max} con la distancia, aunque de manera más suavizada, aparecen dos discordancias, agosto presenta valores del *TS*_{max} medio por capas menor que el resto, y noviembre ofrece valores con una gran variabilidad, en este último caso, asociados seguramente al comportamiento de los peces durante la toma de datos. La jaula J18 a esta frecuencia muestra menos aumento del *TS* con la distancia manteniéndose bastante estable casi todos los meses excepto el mes de octubre que ofrece valores medios del *TS*_{max} muy elevados que van disminuyendo hasta encontrar un mínimo cerca de los 8 metros para volver a crecer de manera extrema hasta llegar a las capas más superficiales. En la J20, a 120kHz, el *TS*_{max} parece no depender de la distancia, pero si muestra variabilidad con los meses de medida, teniendo valores medios muy altos en julio, que decrecen los meses de agosto y septiembre (hasta formar tres líneas casi paralelas, pero que vuelven a crecer los meses de octubre y noviembre, aunque no alcanzan los valores de julio. Si nos fijamos en la suma de todos los datos, se observa una leve crecida del *TS*_{max} a medida que aumenta la distancia al transductor, aunque se suaviza para los meses de octubre y noviembre. En cuanto a la variabilidad por meses, se repite la tendencia mostrada en la jaula J20, en la que parece que el promedio del *TS* compensado máximo por capas disminuye con los meses hasta septiembre para luego aumentar los meses de octubre y noviembre sin llegar a alcanzar los valores del mes de julio.

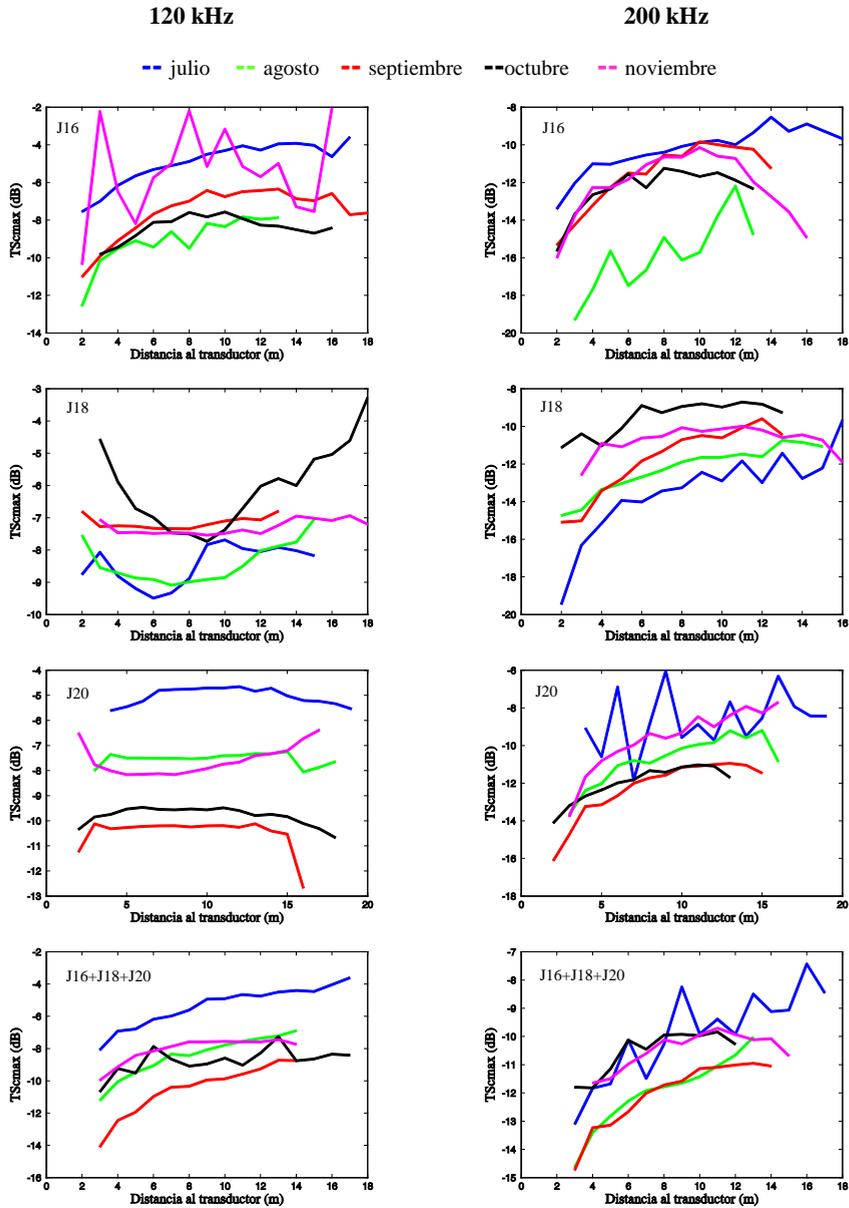


Figura 7.25. Dependencia del TSmax con la distancia al transductor para las dos frecuencias y todas las jaulas por separado y unidas. Aparecen en la parte superior J16, segunda fila J18, después J20 y abajo todas las jaulas juntas. En la columna izquierda datos de 120 kHz mientras que en la derecha datos para 200 kHz. Sobre las gráficas la correspondencia de los meses con los colores de las líneas.

El *TS* compensado a 200 kHz presenta para la jaula 16 dependencia con la distancia aumentando 6 dB entre las capas más cercanas y las más lejanas. En esta jaula se vuelve a repetir el efecto de que los valores del mes de agosto difieran de los del resto al ser marcadamente inferiores que el resto de los meses. La J18, sigue mostrando aumento del *TScmax* con la distancia produciéndose un fenómeno no visto hasta ahora, los valores medios crecen con el tiempo hasta el mes de octubre para disminuir ligeramente el mes de noviembre. La jaula J20, muestra el efecto temporal ya comentado, en el que los valores medios por capas decrecen hasta el mes de septiembre para recuperarse los meses de octubre y noviembre, con la salvedad de que en este caso el mes de noviembre casi alcanza los valores medios del mes de julio. En cuanto a la tendencia mostrada por el *TScmax* con la distancia, se aprecia un aumento a medida que se aleja del transductor, excepto para el mes de julio en el que la oscilación de los valores es muy abrupta entre capas. Este efecto ya mostrado durante otros meses en otras jaulas puede asociarse al comportamiento de los atunes durante el tiempo de medida. Finalmente, viendo todos los datos juntos, se aprecia de manera más acusada el aumento del *TScmax* con la distancia, del mismo modo que se aprecia el efecto de los diferentes meses de medida, disminuyendo los valores medios por capas entre julio y agosto, manteniéndose en septiembre al mismo nivel que en agosto para después recuperarse en octubre y noviembre hasta valores similares a los de julio, pero suavizándose el efecto de la distancia en el *TScmax* sobre todo a partir de los 8 metros.

A la vista de estas gráficas, se puede pensar que el *TS* (compensado y sin compensar) muestran dependencia con la distancia a ambas frecuencias, este fenómeno se observa mejor cuando se incluyen todos los datos de las tres jaulas en una misma gráfica, lo que nos lleva a pensar que es necesaria una gran cantidad de detecciones por capa para obtener valores representativos del *TS* en la misma (se requerían al menos 500 detecciones para considerar la media). Para el *TSmax* la dependencia parece mayor a 200 kHz, y este fenómeno se repite cuando el valor del *TS* está compensado.

La variabilidad del *TS* esperada debido a la configuración de medida (al encontrarnos a cortas distancias y frente a blancos de gran tamaño), se ve incrementada por el comportamiento de los peces durante las medidas, como se refleja en algunas de las gráficas en las que se muestran oscilaciones de los valores medios muy abruptas entre capas. Se observa la repetición de un fenómeno, que tal vez, esté asociado al cambio en el factor de condición de los peces debido al proceso de engrase. En más de una ocasión los valores medios disminuyen con los meses hasta septiembre momento en el que se recuperan (para los meses de octubre y noviembre). Este hecho, pone de manifiesto la necesidad de un estudio intensivo sobre como se ve afectado el valor del *TS* con la distancia dentro de una jaula con la ayuda de métodos de simulación numérica, apoyados a posteriori por nuevas campañas de medidas en las jaulas que ayuden a clarificar que efectos se deben a la incertidumbre de la determinación del *TS* a cortas distancias, y cuales

se pueden asociar al comportamiento de los peces y/o a los cambios en las condiciones biométricas de los atunes (aumento de la longitud, de la anchura o del factor de condición).

7.3.7. RELACIÓN DEL *TS* CON INCLINACIÓN DEL ATÚN

Para finalizar el estudio, y tras observar que los valores del *TS* y su relación con el tamaño del atún depende fuertemente de la inclinación del pez respecto a la cara del transductor; se realiza un análisis de la variabilidad del *TS* frente a la inclinación para las muestras de las que se conoce la inclinación y los valores del *TS*.

El análisis se lleva a cabo dividiendo los peces en intervalos de 5 cm a partir de los valores de longitud. Se realiza el estudio para ocho grupos que incluyen peces entre 190 y 230 cm. En la Figura 7.26 se puede observar cuales son los valores del *TS*_{max} frente a los valores de la inclinación de los peces para todos los grupos estudiados a la frecuencia de 120 kHz. Del mismo modo, en la Figura 7.27 se observa la misma representación en este caso a la frecuencia de 200 kHz. Se realiza el mismo estudio para el *TS* compensado (*TS*_{comp}) y los resultados se muestran en la Figura 7.28 para la frecuencia de 120 kHz y la Figura 7.29 para 200 kHz.

Si observamos cómo se comporta el *TS*_{max}, tanto a 120 como a 200 kHz, se puede apreciar que el valor máximo para el *TS* aparece para inclinaciones negativas. Este hecho, se corresponde con lo indicado por otros autores para el atún de aleta amarilla. En dichos trabajos se afirma que debido a la inclinación de la vejiga natatoria para esa especie de atunes (que suele ser de alrededor de 25°) la respuesta acústica debe ser máxima cuando los peces nadan hacia el fondo de la jaula de tal manera que la vejiga presenta una mayor superficie (y dicha superficie es más paralela a la cara del transductor) (Hsueh-Jung *et al.*, 2011). Como ya se ha comentado a lo largo de este capítulo, no se conoce con exactitud el tamaño ni la inclinación de la vejiga natatoria del atún rojo. No obstante, se supone que la diferencia con otras especies de atunes no debe ser significativa.

Cuando nos fijamos en los valores del *TS*_{comp} a 120 kHz, la tendencia descrita anteriormente se repite, aunque no de manera tan marcada. Para alguno de los grupos el valor máximo aparece en inclinaciones cercanas a cero y que en algún caso son positivas (como por ejemplo para el grupo 210-215 cm y para el grupo 215-220 cm). Los valores del *TS*_{comp} frente a la inclinación para 200 kHz, siguen la tendencia descrita para el *TS* sin compensar de manera más clara, aunque en algunos casos ese máximo se encuentra en posiciones cercanas a 0° de inclinación. La tendencia mostrada en este caso (*TS*_{comp} frente a la inclinación a 200 kHz) se asemeja a los mostrado por Hsueh-Jung *et al.* (2011) en su trabajo en el que las medidas eran realizadas en tanques, de manera dorsal y a la misma frecuencia (200 kHz).

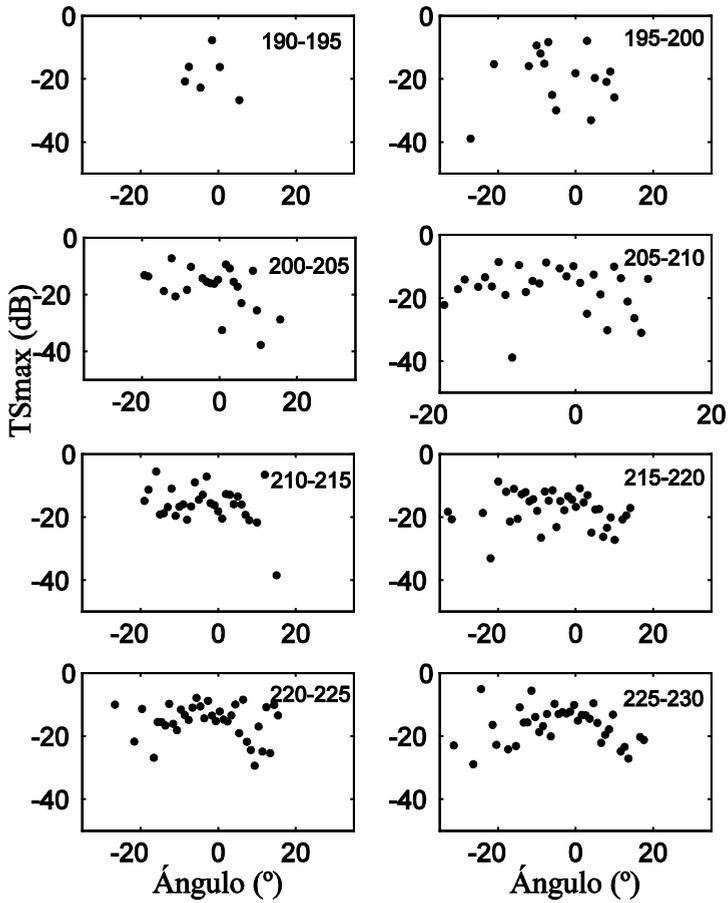


Figura 7.26. TS_{max} frente a la inclinación de los atunes para grupos representados en intervalos de 5 cm a la frecuencia de 120 kHz.

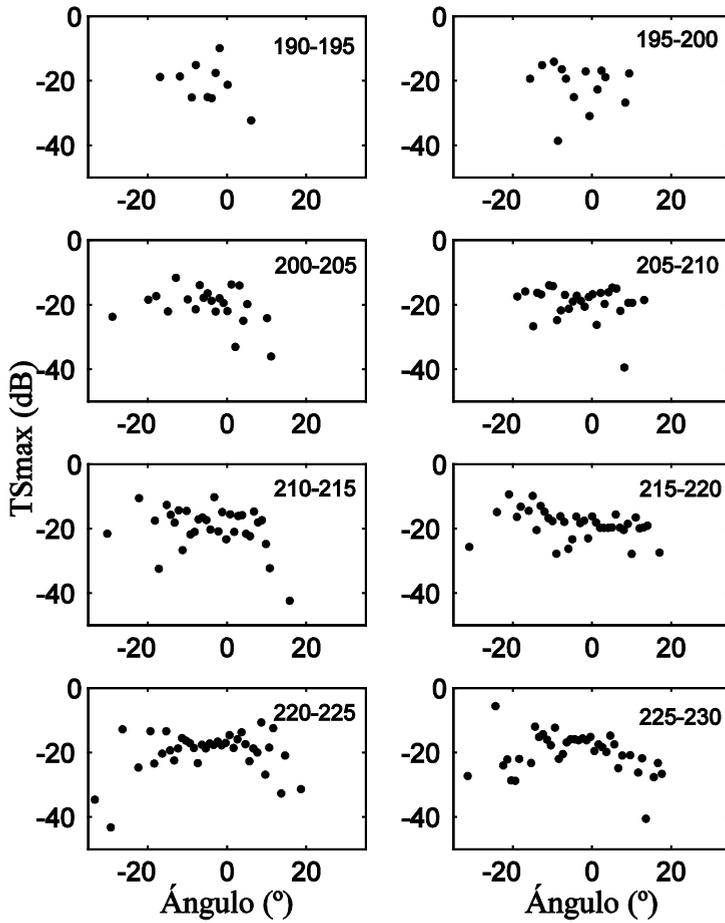


Figura 7.27. TSmax frente a la inclinación de los atunes para grupos representados en intervalos de 5 cm a la frecuencia de 200 kHz.

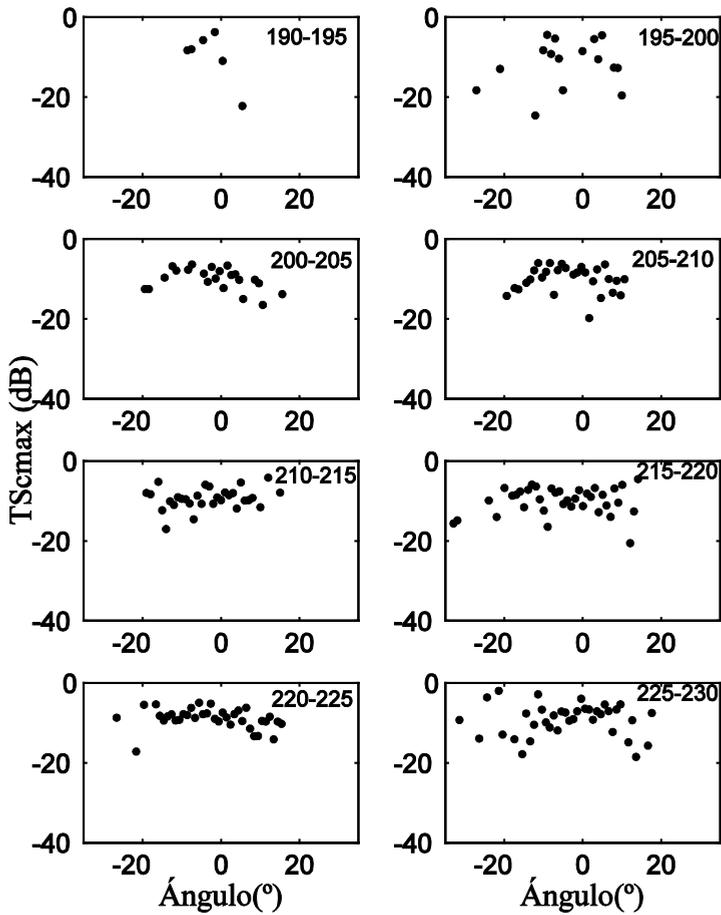


Figura 7.28. TScmax frente a la inclinación de los atunes para grupos representados en intervalos de 5 cm a la frecuencia de 120 kHz.

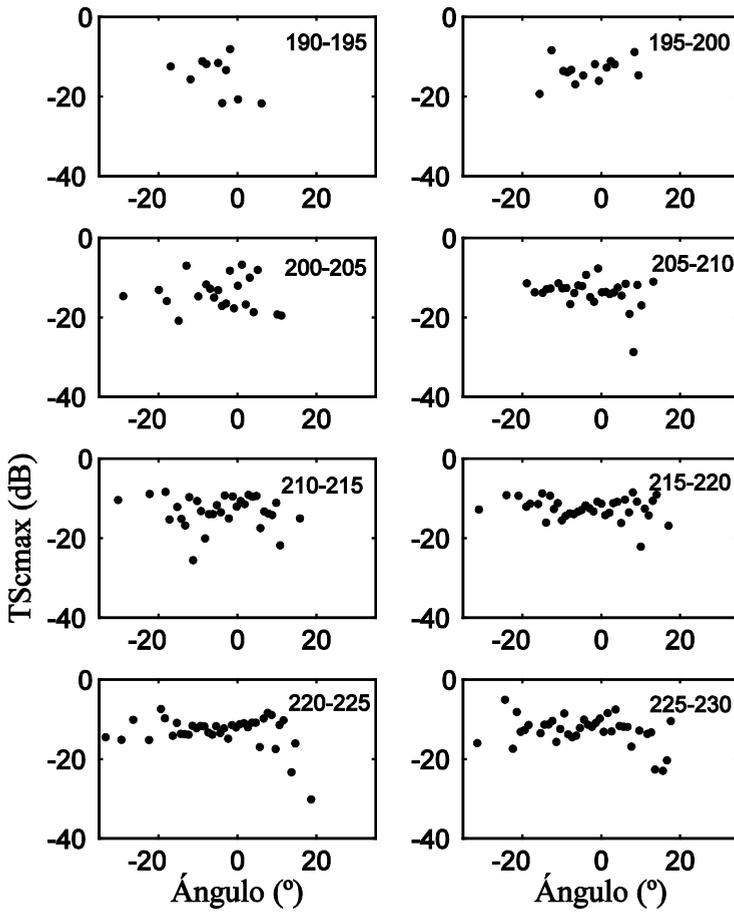


Figura 7.29. TS_{max} frente a la inclinación de los atunes para grupos representados en intervalos de 5 cm a la frecuencia de 200 kHz.

7.4. CONCLUSIONES

En este capítulo se ha presentado una técnica novedosa para la determinación la biomasa en jaulas de engrase de atunes mediante el uso combinado de técnicas acústicas y ópticas. Este sistema mixto, del que ya se habían realizado pruebas satisfactorias (Puig *et al.*, 2012); ha sido sustancialmente mejorado integrando la medición de peces automática a partir de pares de imágenes estereoscópicas (Atienza-Vanacloig *et al.*, 2016) y la detección de las trazas de los atunes también de modo automático.

Las técnicas de análisis óptico han quedado validadas al comparar los datos obtenidos con los ofrecidos por la empresa propietaria de la planta de engrase de atunes después del sacrificio de los peces integrantes del estudio.

En el análisis acústico se ha utilizado el *TS* máximo de las trazas, entendiendo que este valor procede de la energía devuelta por la vejiga natatoria, ya que se sabe, que para las especies que la poseen, la vejiga es la responsable de la mayor cantidad de la energía devuelta por un pez al ser alcanzado por la onda acústica. La configuración de medida y el tamaño de los peces introducen incertidumbre en la determinación exacta del *TS*, por lo que se decide realizar un estudio para los valores compensado y sin compensar de este parámetro para valora cual se adecua mejor a las condiciones de medida.

Combinando los datos acústicos y ópticos se han podido encontrar relaciones entre el *TS* máximo medido de forma ventral y la longitud del atún rojo a las frecuencias de 120 y 200 kHz. El procedimiento de medida se ha visto limitado por el hecho de haber sido realizado en jaulas de engrase, este hecho, introduce incertidumbres en la determinación del *TS* asociadas a las medidas a cortas distancias y al tamaño de los peces estudiados. Se observa que, en la mayoría de los casos, las distribuciones de *TS* mostradas tienen carácter unimodal. Este hecho corrobora los resultados obtenidos para otras especies en los que dicha unimodalidad en las distribuciones del *TS* suelen asociarse a la baja directividad de la vejiga a las frecuencias de estudio o al enmascaramiento de los lóbulos laterales bien por el ruido ambiental o bien porque se encuentran en una dirección muy lejana al eje acústico por lo que la probabilidad de su detección disminuye (Knudsen *et al.*, 2004). No obstante, algunas de las distribuciones no están exentas de ensanchamientos excesivos y en alguna de ellas presentan claro carácter bimodal cuando observamos los valores del *TS*_{max}. Este fenómeno es atribuible al comportamiento de los peces durante las medidas, ya que, se ven afectados por trabajo en la jaula para la disposición de los equipos y también por los trabajos que se realizan en las otras jaulas consecuencia de las necesidades de la planta de engrase. En el capítulo 4, se ha demostrado, que, aunque posee un alto grado de adaptabilidad, el atún rojo es capaz de reaccionar a estímulos externos con una variación del comportamiento habitual. Este hecho se añade a la gran cantidad de factores de variabilidad que pueden afectar medidas de este tipo. Sin embargo, las distribuciones del *TS*_{max} si mantienen el carácter unimodal, ofreciendo distribuciones estrechas y compactas. Los valores medios del *TS* de cada mes (si nos fijamos en los datos de las tres

jaulas a la vez) se ciñen a los mostrados por los datos ópticos, es decir, no existe una variabilidad de la media con el tiempo, como tampoco parece existir cuando se mide la longitud media de los peces cada mes que parece constante con el tiempo.

El análisis de los datos acústicos y ópticos de manera combinada nos ofrece la oportunidad de encontrar relaciones no solo entre la energía retrodispersada por los atunes (*TS*) y su longitud, si no, en el caso de la frecuencia de 200 kHz, además estas relaciones se pueden establecer también con la anchura máxima de los peces. Este hecho nos ha permitido, como se ha demostrado, calcular el peso medio de los atunes engrasados a partir del valor medio de la energía acústica evaluado en una capa entre 5 y 10 metros desde el transductor. Esta limitación, impuesta por el sistema de visión, limita el tamaño máximo de los peces que se pueden medir a 3 metros, partiendo de la hipótesis de la capacidad de insonificar la vejiga natatoria al completo de un atún de dicho tamaño a 5 metros de distancia. No se conoce la relación exacta entre el tamaño (o volumen) de la vejiga natatoria del atún rojo y su longitud como si se conoce para otras especies de atún (Schaefer & Oliver, 1998), pero la similitud en otros factores biológicos, nos permite partir de la hipótesis de que, del mismo modo que para el atún de aleta amarilla, debe tener cerca de la quinta parte de la longitud total del pez. Todas estas hipótesis de trabajo deberán ser, a posteriori, validadas mediante simulaciones con métodos numéricos. Aún contando con dicha limitación, se ha demostrado que el uso del *TScmax* a 200 kHz es válido para estimar el peso medio de los atunes. El valor del peso medio calculado a partir del *TScmax* a 200 kHz, ha podido predecirse haciendo uso de las diferentes expresiones mostradas en el capítulo 6 y que se han desarrollado para peces engrasados en jaulas marinas. Los resultados muestran desviaciones del 5% en la determinación de la masa media cuando se hace uso de más de una de las dimensiones del atún (largo, alto y ancho máximo).

El uso del sistema estereoscópico de visión de manera sincronizada con los equipos acústicos, ha permitido conocer la inclinación de los peces respecto a la cara del transductor en el momento de ser insonificados. Gracias a ello, se han establecido relaciones del *TS* frente al tamaño de los peces con diferentes grados de orientación. Observándose que, la orientación más habitual de nado oscila entre -5° y 5° . Otros trabajos con túnidos en tanques, realizados desde el punto de vista dorsal, fijaban entre -5° y 1° las orientaciones más habituales (Hsueh-Jung *et al.*, 2011).

Finalmente se ha realizado un estudio de la dependencia del *TS* con la distancia al transductor. En el estudio el *TS* (compensado y sin compensar) muestra dependencia con la distancia. Uniendo los datos de todas las jaulas para cada una de las frecuencias estudiadas se aprecia mejor dicho efecto debido al aumento de detecciones en cada capa. Esta dependencia es más acusada a la frecuencia de 200 kHz que a la de 120 kHz, siendo las pendientes mayores cuando la energía retrodispersada por los peces no está

compensada. Se han observado efectos asociados al comportamiento de los peces que conllevan gran variabilidad del *TS* entre capas cercanas, del mismo modo, se ha podido constatar que en repetidas ocasiones los valores medios se comportan de la misma manera, disminuyendo paulatinamente los meses de julio, agosto y septiembre y aumentando los meses de octubre y noviembre. Esta tendencia se ha repetido para las dos frecuencias consideradas.

Es importante realizar nuevos estudios que permitan discernir como varia el *TS* dentro de una jaula marina para el engrase de atunes, así como estudiar como se ve afectado el valor de este parámetro cuando se miden peces grandes a cortas distancias. De este modo, podrán aislarse las posibles causas de la variabilidad de los resultados asociadas a la configuración de medida y las derivadas del comportamiento de los peces (y del proceso de engrase de los mismos).



Mecanismo para el conteo de emplares de atún rojo durante las transferencias

8.1. INTRODUCCIÓN

Cuando se habla de “transferencias” u “operaciones de transferencia” se hace referencia a cualquier traspaso de atún rojo vivo desde la red del buque de captura a la jaula de transporte, de una jaula de transporte a otra, de un remolcador a otro, de una granja a otra o desde la almadraba a la jaula de transporte. Cuando esta transferencia se realiza entre la jaula de transporte o la almadraba y la jaula de cría, el procedimiento se conoce como “introducción en la jaula” o “enjaulamiento” (ICCAT REC 14-04, 2014; Comisión Europea, 2015).

En todos los casos, el procedimiento consiste en hacer pasar a los ejemplares de atún rojo desde el contenedor en el que se encuentran (cerco, almadraba o jaula) a una jaula donde serán transportados hasta la granja de cría, o bien a una jaula de cría donde serán alojados para su engrase. Este procedimiento, de gran complejidad logística y dificultad ante la posibilidad de daño a los animales, es aprovechado por las autoridades para el control de las cuotas pesqueras.

El procedimiento habitual consiste en juntar dos jaulas en cuya red hay practicada una abertura de 10 por 10 metros, que se conoce como “puerta” (aunque como ya se indicó en los párrafos anteriores una de ellas puede ser la red de cerco o una almadraba). Una vez

que las jaulas están unidas se procede a la apertura de las puertas de ambas jaulas permitiendo el tránsito de los peces desde la jaula emisora a la receptora. Para asegurar que no queda ningún atún en la jaula emisora, se hace uso de globos y grúas que levantan la red y disminuyen el espacio de tal manera que los peces se ven obligados a cruzar a la jaula receptora.

Existen estudios que presentan métodos para la estimación del tamaño y el número de los peces transferidos entre dos jaulas habiendo uso de la tecnología DIDSON (dual frequency IDentification SONar) que se realizan haciendo uso de puertas entre jaulas de un metro cuadrado de superficie (Han *et al.*, 2009; Han *et al.*, 2009b). En estos estudios se presentan resultados sobre experimentos de conteo y de la estimación del tamaño de los peces a partir de las imágenes obtenidas de la cámara acústica. Recientemente se han presentado trabajos en los que se realiza el conteo de los atunes en las jaulas (no durante las transferencias) haciendo uso de un array de 15 transductores acústicos trabajando a 460 kHz (formando una cortina acústica) y un pinger que permite estimar la velocidad media de nado de los peces en la jaula. A partir de la estimación de los peces que atraviesan dicha cortina acústica en un instante de tiempo determinado y del valor de la velocidad media de nado se infiere el número de peces alojados en la jaula con la finalidad de conocer si ha existido mortandad o fugas. Este último trabajo presentado en abril de 2017 en la reunión del ICES Working Group on Fisheries Acoustics Science and Technology (WGFAST) and ICES-FAO Working Group on Fishing Technology and Fish Behaviour (WGFTFB) en Nueva Zelanda, aún no ha sido publicado.

Tanto el reglamento de la Comunidad Europea (CE) (Comisión Europea, 2015) como de la Comisión Internacional para la conservación del Atún Atlántico (ICCAT) (ICCAT REC 14-04, 2014), marcan claras directrices sobre cómo asegurar el correcto control de las cuotas durante las transferencias. Este control se realiza mediante grabaciones de vídeo por parte de buzos experimentados que según indica la legislación vigente deben asegurar que:

- *Antes del inicio de la transferencia, la grabación de vídeo deberá incluir la apertura y el cierre de la red/puerta y filmación que muestre si las jaulas de origen y de destino contienen ya atún rojo.*
- *La grabación de vídeo deberá ser continua, sin ninguna interrupción o corte, y cubrir toda la operación de transferencia.*
- *La grabación de vídeo será de calidad suficiente para realizar estimaciones del número de atunes rojos que se está transfiriendo.*
- *Si la grabación de vídeo es de calidad insuficiente para estimar el número de atunes rojos que se está transfiriendo, las autoridades de control solicitarán una nueva transferencia. La nueva transferencia incluirá todo el desplazamiento del atún rojo que se encuentre en la jaula de destino hacia otra jaula, que deberá estar vacía.*

- *El 100% de las operaciones de introducción en jaulas debería estar cubierto por un programa que utiliza sistemas de cámaras estereoscópicas o técnicas alternativas que proporcionen una precisión equivalente, con el fin de estimar con más precisión el número y peso de los peces.*
- *Las normas y procedimientos para los sistemas de cámaras estereoscópicas seguirán las siguientes directrices:*
 - i) *La intensidad de muestreo de peces vivos no deberá ser inferior al 20% de la cantidad de los peces que se está introduciendo en las jaulas. Cuando sea posible desde el punto de vista técnico, el muestreo de peces vivos se realizará de forma secuencial, midiendo uno de cada cinco ejemplares. Dicho muestreo estará compuesto por ejemplares medidos a una distancia de entre 2 y 8 m de la cámara.*
 - ii) *Las dimensiones de la puerta de transferencia que conecta la jaula de salida con la jaula receptora tendrán una anchura máxima de 10 m y una altura máxima de 10 m.*
 - iii) *Cuando las mediciones de talla de los peces presenten una distribución multimodal (dos o más cohortes de diferentes tallas) se podrá utilizar más de un algoritmo de conversión para la misma operación de introducción en jaulas. Se utilizarán el (los) algoritmo(s) más actualizado(s) establecido(s) por el Resúmenes Ejecutivos del Comité Permanente de Investigaciones y Estadísticas (SCRS) para convertir las longitudes a la horquilla en pesos totales, de conformidad con la categoría de talla de los peces medidos durante la operación de introducción en jaulas.*
 - iv) *La validación de las mediciones estereoscópicas de talla deberá realizarse antes de cada operación de introducción en jaula utilizando una barra graduada a una distancia de 2 y 8 m.*
 - v) *Cuando se comuniquen los resultados del programa estereoscópico, se informará sobre el margen de error inherente a las especificaciones técnicas del sistema de cámaras estereoscópicas, que no superará una gama de +/- 5%.*

Por lo tanto, durante las transferencias de atún rojo se realizan grabaciones con cámaras submarinas convencionales que permitirán asegurar el control por parte de las autoridades, es decir; que la jaula receptora está vacía al principio de las operaciones y que todos los peces de la jaula emisora son transferidos a la jaula receptora. Además, las grabaciones realizadas con estas cámaras permitirán el conteo de los ejemplares en las imágenes. Por otro lado, se hará uso de un sistema de cámaras estereoscópicas que permita la medición de al menos el 20% de los ejemplares transferidos, de tal modo que, se puedan obtener valores biométricos promedio de todos los peces transferidos con la finalidad de establecer

la cantidad de biomasa capturada a partir de los algoritmos de conversión talla-masa fijados por ICCAT.

En el caso del Gobierno de España, los servicios de control e inspección de la Secretaria de Pesca, hacen uso del sistema estereoscópico de AQ1Systems Pty Ltd. (AM100 Stereo Camera Unit) que va acompañado de un software de grabación y análisis que permite la medición de la longitud de los atunes en los pares de imágenes estereoscópicas, así como el conteo de los peces en las mismas imágenes. Ambos procesos hacen necesaria la intervención de un operador de tal manera que:

- En el caso de la medida de la talla de los peces: el operador marque de manera manual la nariz y la cola de los peces en cada par de imágenes estereoscópicas y verifique que se trata del mismo ejemplar y que los puntos de medida se eligen con el menor error posible.
- En el caso del conteo de los peces: el operador marcará en la pantalla cada ejemplar contado para que este sea sumado al cómputo total de peces.

En cuanto al algoritmo de conversión talla-masa utilizado en España para poder controlar el cumplimiento de las cuotas, se hace uso el propuesto por Rodríguez-Marín (Rodríguez-Marín *et al.*, 2012) y que fue presentado en el Comité Permanente de Investigaciones y Estadísticas (SCRS) con referencia SCRS/2012/104.

Para evaluar la fiabilidad del sistema estereoscópico se realizó un proyecto piloto desarrollado por la Agencia Europea para el control de la Pesca (EFCA). En dicho estudio, se constató que el sistema de cámaras estereoscópicas introducía un error medio del 6 % en la estimación de la talla, mejorando los métodos existentes hasta el momento. No obstante, las pruebas se realizaron con puertas de 6 x 4 metros (inferiores a las de 10 x 10 metros que marca la directiva europea y de ICCAT) y con una pantalla de plexiglass que aumentaba el contraste de las muestras permitiendo una mejor identificación de los peces durante la medición (Mariani *et al.*, 2014).

Pero este sistema añade, además, entre las incertidumbres de medida (asociadas al proceso de estimación de la talla de manera indirecta a partir de las imágenes), la proveniente del grado de experiencia del operador que realiza las mediciones y el conteo. Este hecho, permite plantear herramientas alternativas, con un mayor grado de automatización, que eliminen la incertidumbre asociada al operador, de tal modo que la medición y el conteo se realice siempre bajo los mismos criterios.

En este sentido, se plantea el proyecto "BIACOP" (ES/13/41) financiado por la Comisión de la UE mediante la decisión ejecutiva de la Comisión de la UE de 10 de julio de 2013 (2013/410/UE)). Dicho estudio, en el que se engloban los resultados presentados en este capítulo; pretende desarrollar un sistema de estimación de la talla, basado en un sistema de cámaras estereoscópicas con un procesado de los datos altamente automatizado que no necesita de un operador (cuyos fundamentos ya fueron explicados en el capítulo 7 de la

presente Tesis Doctoral). Del mismo modo, como se mostrará en este capítulo, se desarrolla una herramienta para el conteo de los ejemplares durante la transferencia mediante técnicas acústicas, automático y asociado al sistema de visión estereoscópica.

8.2. MATERIALES Y MÉTODOS

8.2.1. LUGAR DE MEDIDA

Las medidas se llevaron a cabo en las instalaciones que el *Grup Balfegó* tiene en l'Ametlla de Mar en Tarragona (Figura 8.1). En dichas instalaciones, la empresa dispone de jaulas de cría en las que engrasa atunes procedentes de las campañas de pesca, mediante la técnica de cerco, que la propia empresa realiza. Tras capturar los atunes vivos, estos son transportados y finalmente enjaulados en las instalaciones de la citada granja hasta el momento del sacrificio. Se realizan mediciones en dos periodos de tiempo, durante el mes de enero de 2016 (día 27), en el que se realiza una medida de la transferencia de atunes de la jaula 18 a la 16, y de después de la jaula 16 a la 18. Dicha transferencia de ida y vuelta se realiza con el único fin de recoger datos para el proyecto BIACOP, por ello se usa una jaula vacía dentro de la misma granja. Los atunes transferidos en esta ocasión pertenecen a la campaña de pesca del 2015. El segundo periodo se produce durante el mes de julio de 2016, y en este caso se realizan transferencias de ida y vuelta entre las jaulas 20 y 18, regresando los peces a la jaula original donde permanecen después de cada par de pruebas en las que se recogen datos. Durante el mes de julio se realizan un total de 6 transferencias los días 13, 20 y 27 de julio, realizándose una transferencia de ida y una de vuelta cada jornada. Todas las jaulas usadas durante las trasferencias tenían el mismo tamaño, 50 metros de diámetro y 30 metros en la parte más profunda del copo.



Fuente: Grup Balfegó (2016)

Figura 8.1. Fotografía de las instalaciones de El Grup Balfegó en l'Ametlla de Mar (Tarragona).

8.2.2. EQUIPO UTILIZADO DURANTE LAS MEDIDAS

Se empleó una ecosonda científica EK-60 de Simrad junto a un transductor sonar de barrido lateral (side scan sonar (SSS)) de 200 kHz. El transductor fue diseñado por la empresa Airmar Technology Corporation especialmente para este proyecto (Figura 8.2). Este tipo de transductores son mono haz, pero en este caso se pidió al fabricante la posibilidad de convertirlo en uno de haz dividido o split beam, aunque se pretendía hacer uso de la opción mono haz para el objetivo de este estudio. Las especificaciones del transductor se muestran en la Tabla 8.1. La potencia transmitida durante las pruebas es de 100 W, la duración del pulso transmitido es de 64 μ s y el intervalo entre pings es el mínimo que permite la ecosonda (se emitieron 19 pings por segundo en este caso). Se solicitó a los buzos de la empresa información sobre las condiciones ambientales (estado del mar, meteorología, temperatura del agua, salinidad y pH).



Figura 8.2. Detalle del transductor sonar de barrido lateral.

Tabla 8.1. Datos del transductor SSS de Airmar.

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>	<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
Tipo	<i>Single-beam/ Split-beam</i>	$\theta_{-3dB,\beta 1}$ (°)	0.5
Nº serie	<i>150049-01</i>	$\theta_{-3dB,\beta 2}$ (°)	49
f (kHz)	200	ψ	0.004
$S_{Tx,v}$ (dB ref. 1 μ Pa/V)	182	Ψ (dB)	-23.5
S_{Rx} (dB ref. 1 V/ μ Pa)	-167	η	0.32
$Q_{m\acute{a}x}$	794	$ Z $	50.62
$ID_{m\acute{a}x}$ (dB)	29	$W_{Tx,m\acute{a}x}$ (W)	1000

Se usó también durante las medidas, un sistema de cámaras estereoscópicas que permitiría estimar la talla de manera automática. El sistema de visión estereoscópico diseñado para el proyecto BIACOP estaba compuesto por dos cámaras de alta resolución sincronizadas (Prosilica GT1910 de 2 Megapixels con interfaz Gigabit Ethernet (GigE Vision®)), separadas 80 centímetros e inclinadas 5° cada una respecto al centro en configuración convergente. Las cámaras están diseñadas para ambientes extremos y de luminosidad variable, con un intervalo entre frames elevado e incorporan un sensor de alta definición (OnSemi KAI-02150 CCD) que proporciona imágenes de alta calidad. Se utilizaron lentes profesionales con una distancia focal de 6.2 mm. Se realizó la sincronización de ambas cámaras mediante el protocolo IEEE 1588 Precision Time Protocol (PTP) que permite sincronizar el reloj de múltiples dispositivos a través de una red Ethernet. Este protocolo permitió la sincronización de ambas cámaras y del ordenador que las controlaba con tiempos de sincronización de ± 1 s.

Para poder sumergirlas se diseñaron unas carcasas de aluminio anodizado duro, que podían abrirse y cerrarse para la manipulación de las ópticas y las cámaras. Dichas carcasas disponían de un conector submarino al que se conectaba un cable ethernet submarino que le proporcionaba alimentación a las cámaras mediante tecnología PoE, y permitía la transmisión de los datos. Se hizo uso de un switch Gigabite que proporcionaba la alimentación a las cámaras y permitía la conexión con el ordenador. En la Figura 8.3 se muestran imágenes de las cámaras y de las cámaras dentro de la carcasa y montadas en un perfil que permite separarlas 80 cm e inclinarlas 5° cada una respecto al centro en configuración convergente. Se realizaron las grabaciones en las dos cámaras de manera simultánea a 12 frames por segundo. La codificación del video empleada fue ffdshow;

esta codificación es un filtro codificador y decodificador de audio y video parte del Proyecto FFMPEG, dicho filtro es capaz de reproducir múltiples formatos de audio y video, su código está sobre licencia GPL (General Public License).

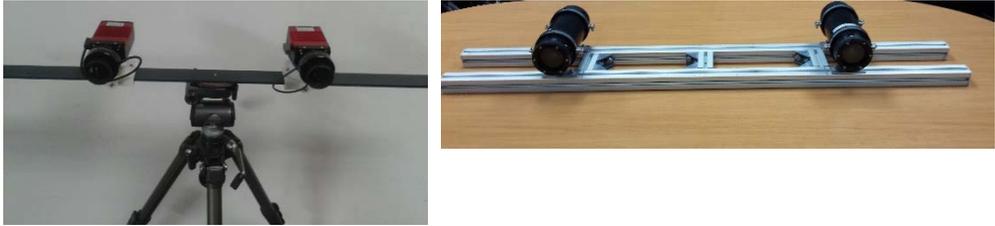


Figura 8.3. Detalle de las cámaras durante pruebas en el laboratorio y de las camas después de encapsularlas y montarlas en el perfil para montar el par estéreo (80 cm de separación y 5° de inclinación).

Para poder realizar las medidas se diseñó una estructura que se colocó entre la jaula emisora y la receptora de atunes, de tal modo que ambas jaulas quedaban ancladas a la estructura que servía de “túnel” de paso de los atunes entre una jaula y la otra. En la parte inferior de dicha estructura se colocaron los equipos. Tanto las cámaras como el transductor se anclaron a la parte central mirando hacia la superficie a 16 metros de profundidad. De este modo, se generaba una cortina acústica que los peces debían cruzar para atravesar el túnel, y las cámaras captaban el nado de los peces cruzando dicho túnel. En la Figura 8.4 se muestra una imagen de la estructura diseñada. En esta figura se puede apreciar en color amarillo el haz (cortina) acústico y en rojo el haz de las cámaras. Como se puede observar, los peces cruzan ambos haces de manera que los sensores registran el paso de los peces. Esta estructura y posición de los equipos es usada durante las transferencias del 27 de enero de 2016 y también en las transferencias del día 13 de julio de 2016. La estructura tiene forma rómbica, de tal modo que la parte superior del rombo formaría el túnel, del tamaño exigido por la norma (10 x 10 metros). Toda la estructura se aseguró mediante una red para que en ningún caso pudiesen escaparse los atunes mientras cruzaban a través de la estructura.

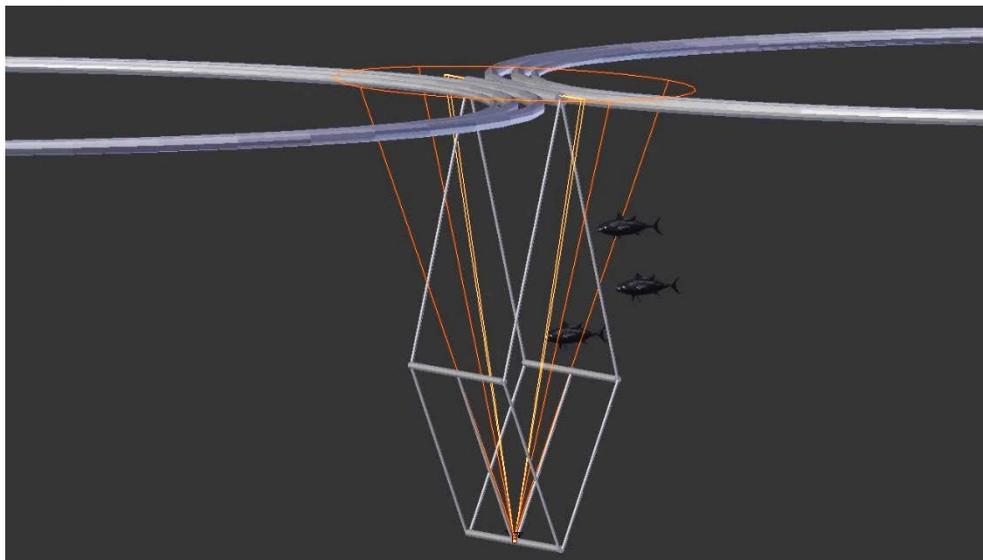


Figura 8.4. Detalle de la estructura usada el 27-01-2016 y 13-07-2016. Forma róbica y los equipos alojados en el interior.

Tras el análisis de los datos, se optó por realizar una pequeña modificación a la estructura de tal modo que se acopló un brazo desde la parte inferior de la puerta de la jaula receptora y se dejó los equipos dentro de dicha jaula y a 16 metros de profundidad como en el caso anterior. En este caso se grabó (tanto óptica como acústicamente) a los atunes en el momento en el que entraban a la jaula receptora tras cruzar el túnel. La estructura en este caso aseguraba la correcta disposición de los equipos y el movimiento solidario de los mismos con las jaulas, cuando se forzaba a los peces a cruzar de una jaula a otra mediante globos y el uso de grúas. Esta modificación de la estructura se utilizó durante las transferencias realizadas los días 20 y 27 de julio de 2016. En la Figura 8.5 se muestra un esquema de esta modificación. Como en el caso anterior en amarillo se representa el haz acústico y en rojo el haz óptico.

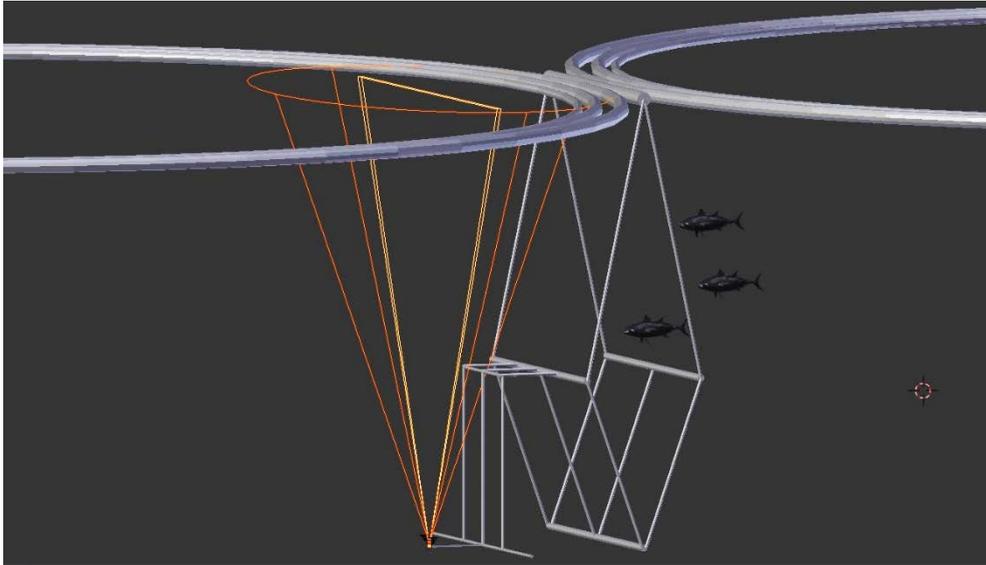


Figura 8.5. Detalle de la estructura usada el 20-07-2016 y 27-07-2016. Forma rómbrica y los equipos alojados en el exterior de la estructura (jaula receptora).

El equipo acústico se usa en su opción single beam. Por este hecho no se realiza ningún tipo de calibración del sistema antes de la realización de las medidas. No obstante, si se realiza la calibración del sistema estereoscópico en una piscina situada en las instalaciones que la Universitat Politècnica de València tiene en el puerto de Gandía con el uso de un patrón bidimensional de calibración tipo “*checkboard 2D*”. Para la calibración se realizaron grabaciones del patrón a distintas distancias y orientaciones respecto de las cámaras. Dichas grabaciones fueron analizadas con el algoritmo de calibración estéreo “Stereo Calibration App” de Matlab ® (The MathWorks Inc., 2014).

En las siguientes figuras (Figura 8.6 a 8.10) se muestran fotografías de la estructura en el puerto antes de ser llevada al mar (Figura 8.6); en la Figura 8.7 se muestra la estructura colocada entre las dos jaulas y en la Figura 8.8 la vista de la misma desde la posición de los equipos en la configuración 1 (Figura 8.4) y en las Figuras 8.9 y 8.10 se puede observar el montaje de los equipos para la configuración 2 (mostrada en la Figura 8.5).



Figura 8.6. Imagen de la estructura en el puerto de l'Ametlla de Mar antes de ser llevada a las instalaciones en el mar el día 27-01-2016 .



Figura 8.7. Imagen de la estructura colocada entre las dos jaulas en las instalaciones de engrase de atunes del Grup Balfegó.



Figura 8.8. Imagen de la estructura colocada entre las dos jaulas vista desde el punto en el que se encuentran los equipos en la configuración 1 mostrada en la Figura 8.4.



Figura 8.9. Imagen del montaje de los equipos en la configuración 2 mostrada en la Figura 8.5.

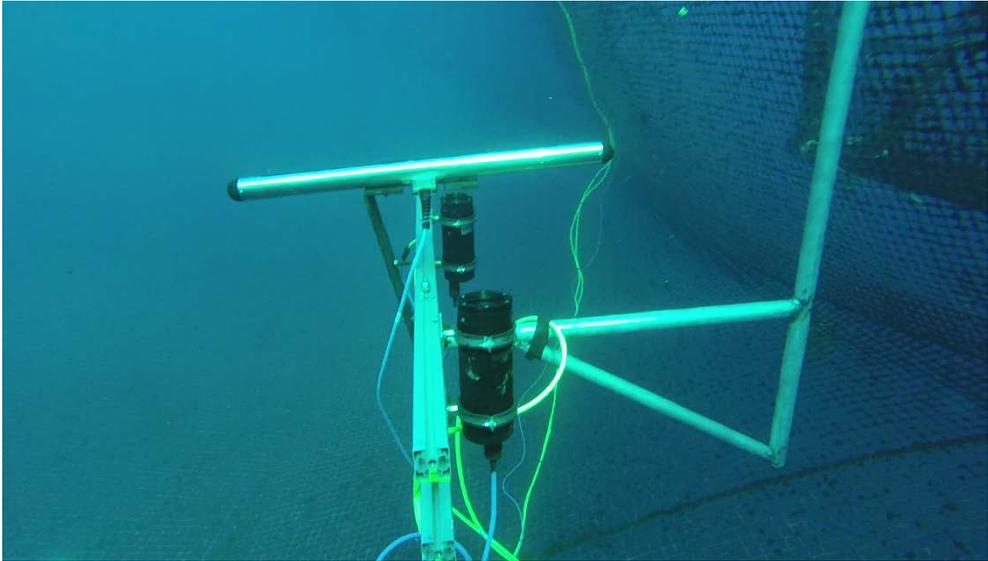


Figura 8.10. Imagen de los equipos en la posición final en la configuración 2 mostrada en la Figura 8.5.

8.2.3. RECOGIDA Y ANÁLISIS DE LOS DATOS

Los datos fueron recogidos durante las transferencias realizadas (enero y julio de 2016). Se tomaron datos acústicos y ópticos que se recopilaban en un ordenador portátil que controlaba de manera síncrona la ecosonda EK60 de 200 kHz y el sistema de cámaras estereoscópicas.

Los datos acústicos se convirtieron del formato de salida de la ecosonda .raw a un fichero .txt con ayuda del Sonar5 Pro (Balk & Lindem, 2011). Con la ayuda de dicho software se unieron los distintos archivos consiguiéndose uno solo que posteriormente fue convertido a una matriz de datos .mat para su posterior tratamiento en Matlab®.

Se implementó una herramienta en Matlab® que permitía la detección de las trazas y el conteo de los ejemplares de atún. Como en el caso de las herramientas mostradas en los capítulos 5 y 7 de la presente tesis, en el momento de la detección de las trazas se pudo extraer diferentes parámetros para realizar el análisis de las mismas y proceder al conteo de los atunes (TS máximo, la distancia al transductor de cada ping, el número de pings que componen la traza y su correspondiente intervalo temporal). Durante el análisis, para

eliminar detecciones de bajo nivel se eligió un umbral de -70 dB, y se eliminó el primer metro desde la superficie del transductor.

La herramienta que se utilizó para aislar las trazas y realizar el conteo de ejemplares combina las técnicas de tratamiento digital de imágenes (aplicándolas al ecograma como si se tratase de una imagen) y los valores de energía devueltos por los peces tras ser alcanzados por el haz acústico. No hablamos en este caso del valor del TS o target strength, ya que, debido a la configuración experimental y a los equipos elegidos, las medidas no se ciñeron a la ortodoxia en cuanto a lo que la obtención de este parámetro por métodos indirectos se refiere. No obstante, asumiendo que el atún estaba insonificado parcialmente, debido al rango de medida y a la pequeña apertura del haz acústico en la dirección de nado de los peces (que tan solo es de 0.5°), y asumiendo también que el blanco podía el pez puede considerarse un blanco extenso respecto a la anchura del haz, se corrigen las pérdidas por propagación aplicando como función cronovisible (*TVG*) el $20 \log$ de las pérdidas (el mismo procedimiento de cálculo que se aplicaría para la obtención de la potencia volumétrica de retrodispersión o Sv en condiciones óptimas (Simonds & MacLennan, 2007)).

En la Figura 8.11 se representa un esquema del procedimiento de análisis seguido para el conteo de los ejemplares de atún durante las transferencias. Una vez que el ecograma es transformado al formato .mat es procesado con el software Matlab®. Como se ha indicado anteriormente, en la primera parte del procesado se trató el ecograma como si fuera una imagen. Para poder realizar una segmentación de las trazas de atún, se convirtió el ecograma a escala de grises y después se transformó en una imagen binaria. A la imagen binaria resultante se le aplicaron diferentes operaciones morfológicas que nos permitían la segmentación de las trazas mediante mecanismos de detección de regiones. Entre las operaciones morfológicas utilizadas las más destacadas son un proceso de engorde de las regiones (“thickening”) que permite disponer de trazas más compactas, procedimientos alternos de apertura y cierre, que nos permitían eliminar protuberancias y romper conexiones débiles (opening) y suavizar contornos, rellenar vacíos y pequeños huecos (closing) (Gonzalez & Woods, 2008). Tras las operaciones morfológicas, se procedió al etiquetado de las regiones y la extracción de características de las mismas. Este proceso es similar al ya explicado en el apartado 2 del capítulo 7 de la presente tesis, hace uso del algoritmo “unión-find” (Marques, 2011) (The MathWorks Inc., 2014) para separar las diferentes regiones y proceder a extraer de ellas diferentes características que nos permitieran el posterior análisis de las mismas para obtener un conteo más ajustado de los peces.

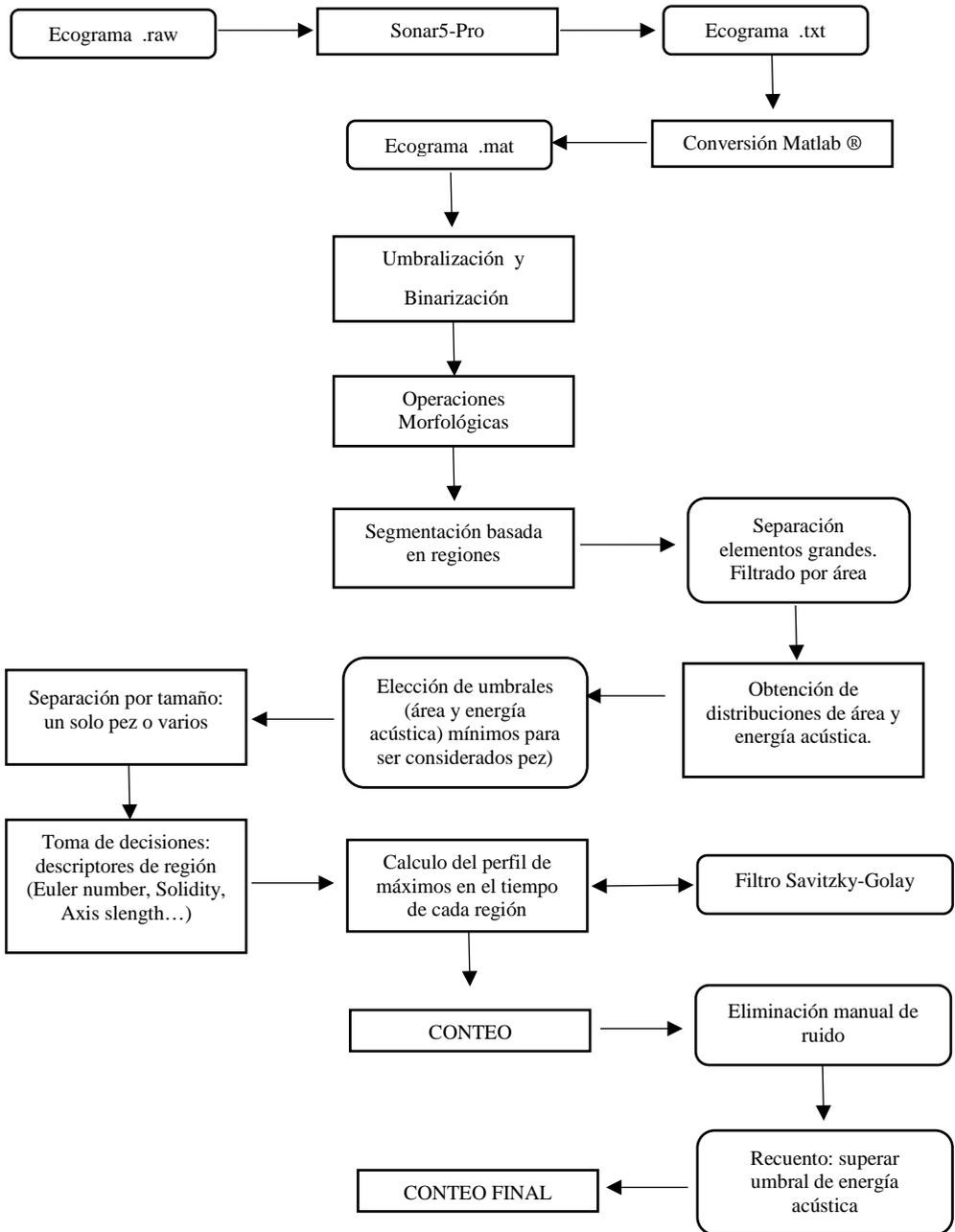


Figura 8.11. Esquema del procesado de los ecogramas.

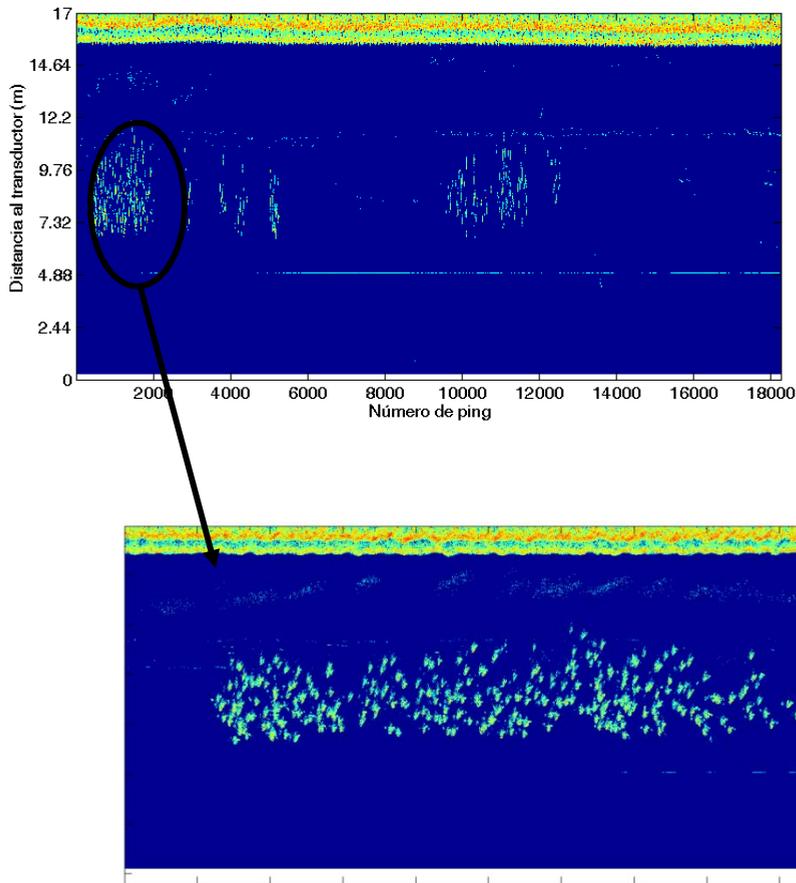


Figura 8.12. En la parte superior ecograma de la transferencia realizada el día 27-07-2016 entre las jaulas 18 y 20. En la parte inferior detalle de una de las molas de atunes captadas. En ambas imágenes puede apreciarse en azul el fondo y en la parte superior la detección de la superficie (de gran nivel debido al cambio de impedancias agua/aire) además se aprecia leve ruido debido a reflexiones con los diferentes elementos que el haz acústico encuentra en su camino (redes de las jaulas, mecanismos de anclaje de los equipos e incluso otras especies de peces de menor tamaño presentes en las jaulas. En esta transferencia la posición de los equipos es la mostrada en la Figura 8.5.

Una vez etiquetadas todas las regiones diferentes encontradas en la imagen, se procedió a separar las trazas del fondo y de otras detecciones que se encontraban en el ecograma como la superficie del mar, quedando únicamente las trazas de los atunes que cruzaron el

haz acústico durante la transferencia. Estas trazas en la mayoría de las ocasiones iban acompañadas de ruido proveniente de diversas fuentes que debía ser eliminado en las partes posteriores del procesado. En la Figura 8.12 se muestra como ejemplo un ecograma captado por la ecosonda.

Después de separar el fondo y la superficie de posibles trazas, mediante un filtrado por el tamaño del área de las regiones detectadas; se obtuvo distribuciones de área y de la energía acústica de las posibles trazas, a partir de las cuales se eligió el valor del área mínima que debía tener una región para ser considerada traza y el valor mínimo de la energía acústica que debía tener el punto de máxima energía dentro de la región para que fuese considerada traza y no ruido. Este segundo filtrado debía ser refinado. Por ello en ese momento la aplicación desarrollada para el conteo solicitaba la colaboración del operador para que seleccionase en el ecograma la zona en la que se encuentran trazas, sin realizar ninguna manipulación más sobre el proceso. Con este sencillo gesto, en el que el operador encuadraba con el ratón del ordenador las diferentes molas de peces; el procesado se centraba en las partes del ecograma en las que se encontraban los atunes, facilitando la eliminación de ruido y minimizando la posibilidad de falsos positivos (es decir, contar como un atún algo que no lo es).

Una vez restringidas las zonas de análisis por un operador, y elegidos de manera automática los umbrales mínimos de área y energía acústica ; la aplicación desarrollada sometía a las diferentes regiones detectadas a una serie de toma de decisiones en cadena: en ellas se decidía si se trataba de una región que contenía un atún o varios (mediante criterios de área combinados con otros criterios que se establecían a partir de las características de la región (número de Euler, nivel de solidez de la traza, relación de tamaño entre el alto y el ancho...)).

Cuando la aplicación ya había decidido si la región contenía un pez o varios, se realizaba un estudio del perfil de máximos de la energía acústica para cada uno de los pings que formaban la traza o región. Este perfil de máximos, que fue tratado mediante un Filtro Savitzky-Golay (Savitzky & Golay, 1964), basado en el cálculo de una regresión polinómica local que permitía el suavizado del perfil de máximos manteniendo las características del mismo, es decir, sin perder los máximos y mínimos relativos, ni el ancho de los picos. Esta información, necesaria para el conteo de los peces, desaparecía si se hacía uso de otras técnicas de promediado de la señal (como la técnica de la media desplazada de amplio uso en el tratamiento de señales). Este procedimiento se realizó de manera iterativa hasta encontrar los valores óptimos del filtro. Finalizado este proceso, se procedió al primer conteo por parte de la aplicación. Tras este primer conteo, la aplicación solicitaba al operador una inspección visual de los resultados para poder eliminar ruido (falsos positivos) en caso de que se hubieran producido. Este procedimiento realizado por el operador marcando los posibles falsos positivos en la pantalla con ayuda del ratón los descontaría antes del conteo final. Después de la inspección visual, se analizaba la

distribución de la energía acústica de los atunes contabilizados, de tal manera que, en los casos que dicho valor superase un umbral máximo, la contribución se consideraría proveniente de la suma de la energía de más de un ejemplar; aumentando el computo de atunes contabilizados en el conteo final.

Es conocido que cuando dos blancos se encuentran cerca, a la misma distancia del transductor, pero en zonas diferentes dentro del haz, los ecos procedentes de cada uno de los blancos pueden interferir entre ellos, sumándose cuando están en fase (aumentando el valor del eco recibido) o atenuando el valor del eco total recibido cuando no lo están. Para estimar el umbral que decidirá si el eco procede de un solo blanco o de más de uno se analizan los ecos de todos los blancos que se suponen individuales de varias transferencias. Se calculó el valor medio de la distribución de la energía acústica de los peces asilados y la desviación estándar de citada distribución y se observó que el percentil 95 de la distribución superaba en todo caso el valor de la media más la desviación estándar. Se fijó, por lo tanto, el percentil 95 (P_{95}) de la distribución de la energía acústica máxima como el valor umbral que debía ser superado para considerar la energía proveniente de más de un pez.

Durante las secciones 1 y 2 del presente capítulo se hace referencia al sistema de visión estereoscópica usado de manera conjunta al sistema acústico. El procesado de las imágenes se realiza del mismo modo que se describió en la sección 2 del capítulo 7, por ello no se ha realizado una descripción más exhaustiva en este capítulo. Dicho procesado, como ya se explicó, permite conocer la longitud y la anchura de los peces que son captados por el par de cámaras, con el añadido de que el procesado de los datos no necesita la intervención de un operador. Este hecho, sistematiza el proceso de determinación de la talla de los peces, permitiendo restringir la incertidumbre que el operador añadía durante la estimación de la talla con el uso de sistemas de medida manuales.

8.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se muestran los resultados del conteo de los peces durante los procesos de transferencia realizados en los meses de enero y julio de 2016 en las instalaciones del Grup Balfegó. No se incluyen los valores de la estimación de la talla mediante el sistema óptico diseñado para el proyecto BIACOP.

En la Tabla 8.2 se resumen las transferencias que fueron medidas, las condiciones en que fueron medidas y las incidencias encontradas durante las mismas.

Tabla 8.2. Resumen de los datos grabados durante las transferencias. T1 hace referencia a la transferencia de ida y T2 hace referencia a la transferencia de vuelta

<i>Transferencia</i>	<i>Datos acústicos</i>	<i>Datos ópticos</i>	<i>Análisis acústico</i>	<i>Análisis óptico</i>
27-01-2016 (T1)	si	si	Complejo, ruido	Imposible
27-01-2016 (T2)	si	si	Complejo, ruido	Imposible
13-07-2016 (T1)	si	si	Imposible	Imposible
13-07-2016 (T2)	si	si	Imposible	Imposible
20-07-2016 (T1)	si	Solo una cámara	si	Imposible
20-07-2016 (T2)	si	Solo una cámara	si	Imposible
27-07-2016 (T1)	si	si	si	si
27-07-2016 (T2)	si	si	si	si

Como se puede apreciar en la Tabla 8.2 se pudieron realizar grabaciones acústicas en todos los casos y solo no pudieron ser analizadas con el método automático propuesto las llevadas a cabo el día 13 de julio de 2016. La imposibilidad del análisis automático se debió al estado de la mar de fuerte marejada durante el proceso de transferencias. Aunque las condiciones ambientales no eran las idóneas para estos trabajos, se optó por la realización de las medidas para poder testar el grado de adaptabilidad del algoritmo de conteo a las malas condiciones ambientales. Además, del análisis de estos datos se desprende la posibilidad del tratamiento de los mismos con un menor grado de automatización que permitiría el conteo. En la aplicación explicada la intervención del operador se restringe a señalar las zonas del ecograma donde se encuentran los peces, y una inspección visual para señalar falsos positivos antes del conteo final. Al no poder hacer uso de esta aplicación en este caso, se señaló las transferencias como “imposibles de contar”. En la Figura 8.13 se muestra una imagen de uno de los ecogramas conseguidos durante las transferencias realizadas ese día. En dicha imagen puede apreciarse como el ruido de las burbujas debidas a la agitación del mar enmascaran de manera parcial los atunes.

Como se indica en la Tabla 8.2 se realizaron medidas en enero y julio de 2016 que sí permitieron la aplicación del mecanismo de conteo mediante técnicas acústicas explicado en este capítulo. Durante las medidas del 27 de enero de 2016 se registraron dos transferencias, debido a la turbiedad del agua fue imposible disponer de imágenes del sistema estereoscópico propio, del sistema estereocópico AQ1 usado por la inspección de pesca ni de las cámaras submarinas con las que se controla las transferencias habitualmente. En este proceso de transferencia se traspasaron entre las dos jaulas 608 atunes según nos indicó la empresa a posteriori. En la Tabla 8.3 se muestran los resultados

obtenidos con el conteo acústico. En la Tabla se aprecia que el error de conteo es más elevado durante la transferencia de vuelta (T2) que durante la de ida. Aunque en ningún caso dicho error supera el 10% fijado como desviación máxima por las directivas de ICCAT (ICCAT REC 14-04, 2014). Este hecho es debido, principalmente, a la posición de unos tubos colocados para reforzar la estructura en la parte baja de la puerta. Como se puede observar en la Figura 8.14; aparece en el ecograma una línea continua en el centro de los grupos de peces que dificulta el tratamiento automático de los datos. En el caso de la transferencia de ida (T1), los peces nadaron más hacia la superficie por lo que la segmentación y el conteo pueda realizarse de una manera más efectiva. En este caso ante la imposibilidad de disponer de registros ópticos, queda demostrada la eficacia de un sistema de conteo acústico inmune a la turbidez del agua.

Tabla 8.3. Resultado del conteo de las transferencias del día 27-01-2016. T1 hace referencia a la transferencia de ida y T2 hace referencia a la transferencia de vuelta

<i>Transferencia</i>	<i>Atunes transferidos</i>	<i>Conteo acústico</i>	<i>Error cometido (%)</i>
27-01-2016 (T1)	608	574	5.59
27-01-2016 (T2)	608	549	9.70

En la Tabla 8.4 se resumen los resultados del conteo de las transferencias realizadas el día 20-07-2016. En este caso se transfirieron 577 peces según nos indicó la empresa. Tras el análisis de los datos y el conteo se obtienen de nuevo error en la estimación del número por debajo del 10 %. En este caso los equipos no se encuentran dentro de la estructura sino en un brazo extensible, anclado a dicha estructura y colocado dentro de la jaula receptora (figura 8.5). Hay que señalar que durante la transferencia de vuelta (T2) un grupo de atunes cambia de dirección al llegar a la jaula receptora con la intención de volver a la jaula emisora, pero tras nadar en dicha dirección y encontrarse con un nuevo grupo de peces cambian de nuevo de sentido y vuelven a la jaula receptora. Dichos peces han tenido que ser identificados y eliminados del ecograma para poder realizar el conteo automático.

Tabla 8.4. Resultado del conteo de las transferencias del día 20-07-2016. T1 hace referencia a la transferencia de ida y T2 hace referencia a la transferencia de vuelta

<i>Transferencia</i>	<i>Atunes transferidos</i>	<i>Conteo acústico</i>	<i>Error cometido (%)</i>
20-07-2016 (T1)	577	554	3.98
20-07-2016 (T2)	577	535	7.28

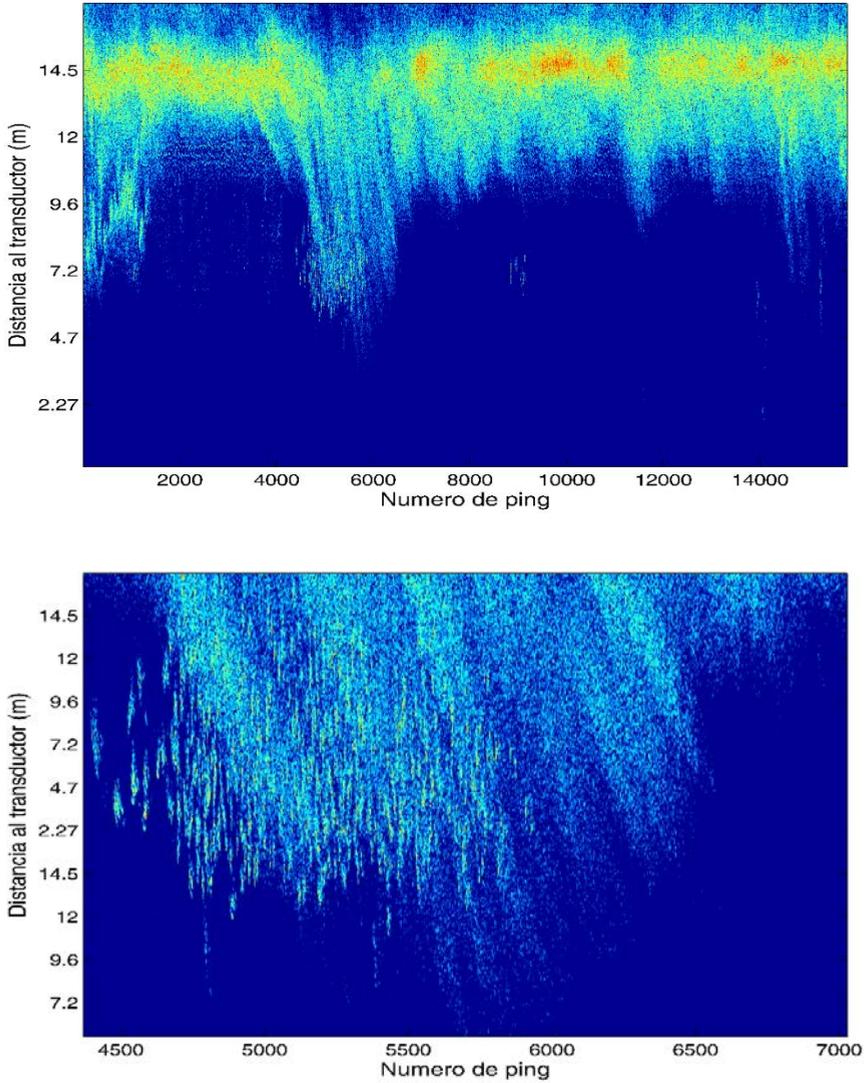


Figura 8.13. En la parte superior ecograma captado durante el día 13-07-2016 en el que no se aprecian trazas de atunes al quedar enmascaradas por el ruido. En la parte de abajo detalle del mismo ecograma en el que se ven las trazas enmascaradas.

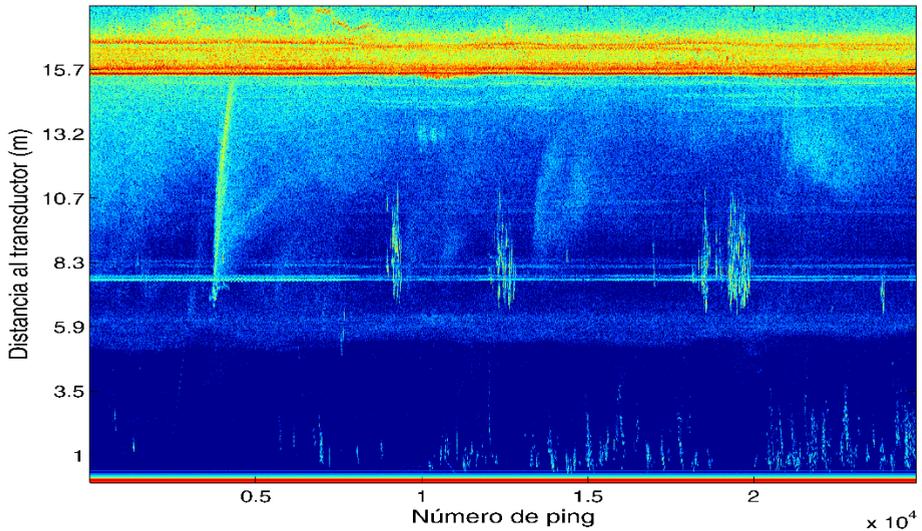


Figura 8.14. En esta figura se aprecia el efecto de la posición del tubo de refuerzo de la estructura durante la transferencia del día 27-01-2016.

Finalmente se muestran los resultados obtenidos en las transferencias del día 27-07-2016. En este caso se realizaron las pruebas con los mismos atunes que en el caso de las transferencias del día 20 de julio. Por este hecho, y tras constatar con la empresa que no se había realizado ningún sacrificio en el periodo entre medidas, se traspasan 577 atunes como en el caso anterior. En ambas transferencias, tanto de ida como de vuelta los equipos se hallaban colocados en la jaula receptora (Figura 8.5). La posición elegida por el buzo, y la inclinación de los equipos introducen ruido que ha sido eliminado durante el proceso de análisis. Este proceso de detección de falsos positivos ya fue contemplado en la herramienta propuesta para que fuese utilizado cuando las grabaciones lo requiriesen. En la Tabla 8.5 se muestran los resultados para estas transferencias. En este caso se consiguieron errores de estimación del número de peces cercanos al 1%.

Tabla 8.5. Resultado del conteo de las transferencias del día 27-07-2016. T1 hace referencia a la transferencia de ida y T2 hace referencia a la transferencia de vuelta

<i>Transferencia</i>	<i>Atunes transferidos</i>	<i>Conteo acústico</i>	<i>Error cometido (%)</i>
27-07-2016 (T1)	577	575	1
27-07-2016 (T2)	577	570	1.2

Los resultados del conteo automático, aunque son prometedores, deben ser mejorados, eligiendo una configuración fija de los equipos que permita profundizar en las técnicas de segmentación análisis de los datos y en procesos para la eliminación de falsos positivos de manera automática.

8.4. CONCLUSIÓN

En este capítulo se ha planteado un mecanismo para el conteo de atunes durante las transferencias basado en técnicas acústicas, frente a los que hacen uso de las imágenes utilizados actualmente. Los resultados obtenidos, permiten afirmar que la técnica presentada posibilita el conteo de los atunes con errores de estimación por debajo de los exigidos por ICCAT en sus directivas sobre las transferencias.

El uso de estas técnicas no está exento de manera total de las condiciones ambientales. Se ha comprobado que en situaciones de mala mar se pierde la capacidad de automatización del conteo (como ocurre con los datos del día 13-07-2016). No obstante, si es independiente de la turbidez del agua, de la posición del sol y la cantidad de luz. Al no estar afectadas por estos factores, que si afecta la grabación de imágenes bajo el agua; es posible el conteo efectivo en mayor cantidad de casos que cuando se usa un sistema óptico.

Queda patente, por otra parte, que la posición de los equipos y de los buzos durante el procedimiento debe reglamentarse para obtener grabaciones de datos de alta calidad que permitan la automatización del conteo. Por lo tanto, se debe trabajar en la definición de un protocolo de medida que permita obtener datos con la calidad necesaria; para ello, deberá determinarse la forma de la estructura y la posición de los equipos, así como la posición de los buzos durante la transferencia, y el procedimiento para la apertura y cierre de las puertas, de tal modo que las redes desprendidas de la jaula no afecten a las medidas.

Además, se propone el uso de una cámara de control fija en la estructura, con visión total de la puerta y de los trabajos que en ella se realizan (incluso de dos cámaras enfocando a cada una de las puertas), de tal manera que se ejerza el control del proceso requerido por ICCAT y las autoridades sin operador que interfiera en la recogida de datos para el conteo y el tallaje automático.



Conclusiones

En esta tesis, se ha podido demostrar que las técnicas acústicas son una herramienta adecuada para la monitorización del comportamiento de los atunes en jaulas flotantes. El estudio de los datos recogidos durante los meses de monitorización continua ha permitido observar la forma de nado “habitual” de los atunes en las jaulas y se ha constatado la variación del comportamiento asociado al día y a la noche. Se ha podido documentar que cuando se somete a los atunes a estímulos sonoros externos se produce una reacción asociada que se materializa en movimientos verticales y cambios de velocidad y dirección de nado.

Al someter a los atunes a la exposición al ruido de banda ancha procedente de la turbina de un aerogenerador, la respuesta a la misma fue proporcional a la duración de dicha emisión y al nivel de presión sonora emitido. Las reacciones observadas pueden resumirse en cambios de posición en la columna de agua, contracción del banco para evitar la fuente de ruido, cambio en la dirección de nado de algunos de los especímenes tras la emisión que puede ser interpretada como una desorientación temporal y variación de la velocidad de nado. Estas reacciones se manifiestan de manera más clara para las emisiones de larga duración y de alto nivel. Teniendo en cuenta lo observado, los atunes en cautividad parecen mostrar un alto grado de adaptabilidad al ruido. No obstante, los resultados se vieron afectados por el confinamiento de los peces, y por los límites de los niveles de

emisión y de duración de los ensayos impuestos por la empresa. Aunque el efecto de las nuevas actividades humanas en los ecosistemas oceánicos debería ser evaluado mediante estudios específicos para las especies o zonas geográficas sensibles; este tipo de estudios para especies altamente migratorias como el atún rojo deben acometerse para garantizar que los cambios de comportamiento asociados a las actividades que realiza el ser humano en el medio marino, no van a provocar perjuicios para dichas especies.

A partir de los datos acústicos se han encontrado expresiones que relacionan el *TS* máximo medido de forma dorsal con la longitud del atún rojo para las frecuencias de 120 y 200 kHz. Todas las medidas se han realizado en jaulas de engrase; este hecho, introduce limitaciones en las medidas, ya que, dichas medidas del *TS* se realizan a cortas distancias. Sin embargo, las relaciones encontradas presentan un buen grado de correlación e incertidumbres aceptables. Los resultados asocian una ligera mejora de la bondad de los ajustes obtenidos al hacer uso del *TS* máximo compensado frente al uso del *TS* máximo sin compensar. Los resultados tomados dorsalmente muestran una baja dependencia del *TS* con la distancia cuando se evalúa el *TS* máximo compensado (a ambas frecuencias). Sin embargo, cuando se usa el *TS* máximo sin compensar, el *TS* se vuelve menos estable y necesita de mayor cantidad de detecciones.

Se presenta, en esta tesis, una técnica novedosa para la determinación del *TS*, desde el punto de vista ventral, en jaulas de engrase de atunes, mediante el uso combinado de técnicas acústicas y ópticas. El análisis conjunto de los datos acústicos y ópticos ha permitido encontrar relaciones entre el *TS* máximo medido de forma ventral y la longitud del atún rojo a las frecuencias de 120 y 200 kHz. Estableciendo una correlación entre los valores medios por meses acústicos y ópticos que parecen no variar.

Para la frecuencia de 200kHz se ha establecido, además, una relación entre la energía retrodispersada por los atunes (*TS*) y su anchura máxima. Este hecho ha posibilitado el cálculo del peso medio de los atunes engrasados a partir del valor medio de la energía acústica evaluado en una capa entre 5 y 10 metros desde el transductor.

El cálculo del peso medio para peces engrasados en jaulas marinas se ha predicho a partir de las expresiones ajustadas con datos de los sacrificios proporcionados por una empresa que se dedica al engrase de atunes. Las expresiones conseguidas ponen de manifiesto que cuando se usan las tres dimensiones del pez (longitud, altura y anchura máxima), la bondad del ajuste mejora disminuyendo el error absoluto medio y el error relativo medio. Estos resultados, parecen indicar que deberían realizarse medidas de las tres dimensiones en los animales recién capturados para mejorar la estimación del estado de los mismos según el lugar geográfico y época del año. Los resultados del cálculo del peso medio a partir de la energía acústica media, muestran desviaciones del 5% en la determinación de la masa media cuando se hace uso de más de una de las dimensiones del atún.

El uso del sistema estereoscópico de visión de manera sincronizada con los equipos acústicos, ha permitido conocer la inclinación de los peces respecto a la cara del transductor, observándose que la orientación más habitual de nado oscila entre -5° y 5° .

Para el caso del *TS* ventral (compensado y sin compensar), existe una dependencia de la energía acústica retrodispersada con la distancia. Esta dependencia es más notable a frecuencia de 200 kHz que a la de 120 kHz, siendo las pendientes mayores cuando la energía retrodispersada por los peces no está compensada.

Es importante plantear nuevos estudios que permitan discernir cuales son los factores que afectan el valor del *TS* dentro de una jaula marina para el engrase de atunes. El hecho de medir peces de gran tamaño a cortas distancias se ve agravado por el comportamiento de los atunes y el proceso de engrase de los mismos.

Tanto para las medidas dorsales como para las ventrales se ha desarrollado un método de selección automático de las trazas de atunes mediante el uso de técnicas de tratamiento digital de imágenes. Dicho método permite la extracción de las características de las trazas y su almacenamiento para posteriores análisis, así como la clasificación de las mismas por tamaño del área que ocupan en la imagen y otras propiedades morfológicas de las mismas.

Por la técnica empleada que relaciona la longitud de un atún determinado con su respuesta acústica, y debido a las limitaciones impuestas por el sistema óptico (solo es capaz de medir hasta 10 metros de las cámaras) los coeficientes de determinación de los ajustes obtenidos entre la energía acústica son ligeramente mayores para las medidas dorsales que para las ventrales. Como se indicó en el capítulo 5 y 7, en otros trabajos realizados con doradas y salmones los coeficientes de determinación obtenidos desde el punto de vista dorsal eran menores (Soliveres, 2015) o no se daban ajustes significativos (Knudsen *et al.*, 2004). En este trabajo, la técnica empleada para la obtención de los datos desde el punto de vista ventral permite predecir la talla media de los atunes a partir de los datos acústicos registrados desde este punto de vista. La imposibilidad de conocer las dimensiones del atún cuando las medidas se toman desde el punto de vista dorsal (ya que un sistema óptico no sería capaz de captar imágenes con la nitidez adecuada con la orientación dorsal por falta de luminosidad) dificulta la consecución de ajustes entre el *TS* dorsal y la anchura, por lo que a partir de técnicas acústicas solo podría conocerse la longitud de los atunes y calcular su peso medio a partir de dicho valor. Como se muestra en el capítulo 6, disponer de más de una dimensión del pez mejora la predicción del peso para atunes engrasados. Este hecho, permite considerar las medidas ventrales como una herramienta más adecuada para la monitorización del engrase en jaulas flotantes.

Se ha mostrado un mecanismo para el conteo de atunes durante las transferencias basado en técnicas acústicas, que posibilita el conteo de los atunes con un alto grado de automatización obteniéndose errores de estimación por debajo de los exigidos por ICCAT en sus directivas sobre las transferencias. Aunque el uso de estas técnicas no está exento

de manera total de las condiciones ambientales si es independiente de la turbidez del agua, de la posición del sol y la cantidad de luz. Al no estar afectadas por estos factores, que si afectan la grabación de imágenes bajo el agua; es posible el conteo efectivo en mayor cantidad de casos que cuando se usa un sistema óptico.

Por estos motivos, las técnicas acústicas se revelan como una herramienta muy útil para la monitorización y el control del atún rojo en jaulas marinas, como ya se había constatado para otras especies. El uso de estas técnicas permite la monitorización del comportamiento de los atunes durante el proceso de engrases, así como el control de dicho proceso. No obstante, se hace patente la necesidad de abordar estudios de simulación matemática seguidos de nuevas experiencias en las jaulas de engrase que ayuden a clarificar los factores de variabilidad del TS en las condiciones de medida que las jaulas y las especies imponen.

Referencias

Aguado, F; Garcia B., 2006. “*Estimación de La Biomasa En Especies En Cultivo Por Métodos No Invasivos: Adecuación Y Puesta a Punto de Las Técnicas Para Diversas Especies En El Atlántico Y El Mediterráneo.*” Junta Nacional Asesora de Cultivos marinos (JACUMAR) y Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.

Allen, S; Demer, D.A., 2003. “*Detection and Characterization of Yellowfin and Bluefin Tuna Using Passive-Acoustical Techniques.*” *Fisheries Research*, vol. 63, no. 3, pp. 393–403.

Aracena-Pizarro, D.; Campos,P.; Tozzi,C. L., 2005. “*Comparación De Técnicas De Calibración De Cámaras Digitales.*” *Revista Facultad de Ingeniería - Universidad de Tarapacá* 13(1):57–67.

Atienza-Vanacloig, V.;Andreu-García, G.; López-García, F.; Valiente-González, J.M.; Puig V., 2016. “*Vision-Based Discrimination of Tuna Individuals in Grow-out Cages through a Fish Bending Model.*” *Computers and Electronics in Agriculture* 130:142–50.

Bailey, H.; Brookes, K.L; Thompson, P.M.,2014. “*Assessing Environmental Impacts of Offshore Wind Farms: Lessons Learned and Recommendations for the Future.*” *Aquatic biosystems* 1–13.

Balk, H., Lindem, T., 2011. *Sonar4 and Sonar5-Pro POst Processing Systems. Operator Manual Version 6.0.2.* Oslo, Norway.

Belmonte A.; De la Gandara F., 2008. “*Cuadernos de Acuicultura 2.El Cultivo Del Atún Rojo (Thunnus Thynnus).*” *Fundacion Oservatorio Español de Acuicultura (FOESA).* Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino eds., Madrid.

Bertrand, A.; Josse, E.; Masse, J., 1999. “*In Situ Acoustic Target-Strength Measurement of Bigeye (Thunnus Obesus) and Yellowfin Tuna (Thunnus Albacares) by Coupling Split-*

Beam Echosounder Observations and Sonic Tracking.” ICES Journal of Marine Science 56(1):51–60.

Bertrand, A.; Josse, E., 2000. “*Tuna Target-Strength Related to Fish Length and Swimbladder Volume.*” ICES Journal of Marine Science 57(4):1143–46.

Calise L., 2009. “*Multifrequency Acoustic Target Strength of Northern Krill.*” The University of Bergen.

Capell, I., 2006. “*Sistema Estereoscópico Para Teleoperación Asistida Y Supervisión de Tareas Robotizadas.*” Escola Superior d’Enginyeria Industrial de Barcelona. Universitat Politècnica de Catalunya.

Clay, C.; Heist, B. G., 1984. “*Acoustic Scattering by Fish--Acoustic Models and a Two-Parameter Fit.*” Journal of the Acoustical Society of America 75(4):1077–83.

Cort, J. L., 2007. *El Enigma Del Atún Rojo Reproductor Del Atlántico Nororiental.* Santander: Bedia Artes ráficas, S.C. Retrieved January 12, 2016 (h).

Cort, J. L.; Deguara, E.; Galaz, E.; Mèlich, B.; Artetxe, I.; Arregi, I. ; Neilson, J.; Andrushchenko, I.; Hanke, A.; Santos, M. N.; Estruch, V.; Lutcavage, M.; Knapp, J.; Compeán-Jiménez, G.; Solana-Sansores, R.; Belmonte, A.; Martínez, D. ; Piccinetti, C.; Kimoto, A.; Idrissi, M., 2013. “*Determination of L Max for Atlantic Bluefin Tuna , Thunnus Thynnus (L.), from Meta-Analysis of Published and Available Biometric Data.*” Reviews in Fisheries Science 21(2):181–212.

Dahl, P. H.; Mathisen, O. A., 1983. “*Measurement of Fish Target Strength and Associated Di-Ectivity.*” Journal of the Acoustical Society of America 73(4):1205–11.

Dawson, J.J.; Wiggins, D.; Degan, D.; Geiger, H.; Hart, D.; Adams, B., 2000. “*Point-Source Violations: Split-Beam Tracking of Fish at Close Range.*” Aquatic Living Resources 13(5):291–95.

Deguara, S.; Gordo, A.; Cort, J.L.; Zarrad, R.; Abid, N.; Lino, P.G.; Karakulak, S.; Katavic, I.; Grubisic, L.; Gatt, M.; Ortiz, M.; Palma, C.; Navarro Cid, J.J.; Lombardo, F., 2016. “*Determination of a Length-Weight Equation Applicable to Atlantic Bluefin Tuna (Thunnus Thynnus) during the Purse Seine Fishing in the Mediterranean.*” ICCAT, SCRS/2016/189 10.

Comision Europea, 2015. *Reglamento Del Parlamento Europeo Y Del Consejo Relativo a Un Plan de Recuperación Plurianual Para El Atún Rojo Del Atlántico Oriental Y El Mediterraneo Y Por El Que Se Deroga El Reglamento (CE)no302/2009.*

De la Gándara, F., 2013. “*Del Cultivo Basado En Capturas , a La Acuicultura Independiente Y La Domesticación Del Atún Rojo , Thunnus Thynnus . Principales Resultados , Conclusiones Y Recomendaciones Del Proyecto Introducción Materiales Y Métodos.*” *AquaTic* 37:32–41.

De la Gándara, F., 2015. “*El Cultivo de Atún Rojo.*” *ambienta* 11:102–15.

De la Gándara, F.; Ortega, A.; Buentello, A., 2016. “*Tuna Aquaculture in Europe.*” *Advances in Tuna Aquaculture. From hatchery to market*, edited by L. Benetti, D.D., G.J. Partridge and A. Buentello (Eds). Elsevier Academic Press.

De la Serna, J.M.; Vargas, M.; Ortiz de Urbina, J.M.; Rioja, P.; Alot, E., 2004. “*La Migración Trófica Post-Reproductiva Del Atún Rojo (Thunnus Thynnus) a Través Del Estrecho de Gibraltar.*” *ICCAT-SCRS* 56(3):1196–1209.

Dharshana-Yapa,R.; Harada, K., 2008. “*Connected Component Labeling Algorithms for Gray-Scale Images and Evaluation of Performance Using Digital Mammograms.*” *International Journal of Computer Science and Network Security* 8(6):33–41.

Doray, M.; Josse, E.; Gervain, P.; Reynal, L.; Chantrel, J., 2007. “*Joint use of echosounding and video techniques to asses the structure of fish aggregations around moored Fish Aggregating Devices in Martinique (Lesser Antilles).*” *Aquatic Living Resources* 20:357-366.

Foote, K.; Knudsen, H.; Vestnes, G.; Maclellan, D.; Simmonds, E., 1987. “*Calibration of Acoustic Instruments for Fish Density Estimation: A Practical Guide.*” *International Council for the Exploration of the Sea.*

Foote, K., 1979. “*Fish Target Strength to Length Regressions for Application in Fisheries Research.*” *Proceedings of the Ultrasonic International* 19, Graz Austria 327–33.

Fromentin, J. M.; Powers, J. E., 2005. “*Atlantic Bluefin Tuna: Population Dynamics, Ecology, Fisheries and Management.*” *Fish and Fisheries* 6:281–306.

Fromentin, J. M., 2006. "Manual de ICCAT. Capítulo 2.1.5. El Atún Rojo." Pp. 99–118 in Manual de ICCAT. ICCAT.

Furusawa, M.; Hamada, M.; Aoyama, C., 1999. "Near Range Errors in Sound Scattering Measurements of Fish." Fisheries Science: FS 65(1):109–19.

Gonzalez, R.C.; Woods. R.E., 2008. *Digital Image Processing*. Prentice Hall.

Han, J.; Honda, N.; Asada, A.; Shibata, K., 2009 "Automated Acoustic Method for Farmed Fish Counting and Sizing during Its Transfer Using DIDSON" Fisheries Science, 75, 1359-1367, 2009.

Han, J.; Honda, N.; Asada, A.; Shibata, K., 2009b "DIDSON-based Acoustic Counting Method for Juvenile Ayu *Plecoglossus altivelis* Migrating Upstream" The Journal of the Marine Acoustic Society of Japan, 36(4), 1-8, 2009.

Hartley, R.; Zisserman, A., 2003. *Multiple View Geometry in Computer Visión*. 2nd ed. Reino Unido: Cambridge University Press.

Hawkins, A.D.; Roberts, L.; Cheesman, S., 2014. "Responses of Free-Living Coastal Pelagic Fish to Impulsive Sounds." The Journal of the Acoustical Society of America 135(5):3101–16.

Hsueh-Jung, L.; Myounghee, K.; Hsing-Han, H.; Chi-Chang, L.; Long-Jin, W., 2011. "Ex Situ and in Situ Measurements of Juvenile Yellowfin Tuna *Thunnus Albacares* Target Strength." Fisheries Science 77(6):903–13.

ICCAT, 2006. *Recommendation by ICCAT to Establish a Multi-Annual Recovery Plan for Bluefin Tuna in Eastern Atlantic and Mediterranean. Rec.[06-05]*.

ICCAT, 2014. *Recomendación de ICCAT para Enmendar la Recomendación 13-07 de ICCAT sobre el Establecimiento de un Plan de Recuperación Plurianual para el Atún Rojo en el Atlántico Este y Mediterráneo*.

Josse, E.; Bertrand, A., 2000. "In Situ Acoustic Target Strength Measurements of Tuna Associated with a Fish Aggregating Device." ICES Journal of Marine Science 57(4):911–18.

- Josse, E.; Dagorn, L.; Bertrand, A., 2000b. "Typology and Behaviour of tuna aggregations around fish aggregating devices from acoustic surveys in French Polynesia." *Aquatic Living Resources* 12:303-313.
- Karakulak, S.; Oray, I.; Corriero, A.; Aprea, A.; Spedicato, D.; Zubani, D.; Santamaria, N.; De Merito, G., 2004. "First Information on the Reproductive Biology of the Bluefin Tuna (*Thunnus Thynnus*) in the Eastern Mediterranean." ICCAT, SCRS/2003/124 56(3):1158–62.
- Kinsler, R.; Frey, A.R.; Ehrenberg, J., 1999. *Fundamentals of Acoustics*. 4th ed. edited by J. W. & S. Ed.
- Knudsen, F.R.; Fosseidengen, J.E.; Oppedal, F.; Karlsen, O.; Ona, E., 2004. "Hydroacoustic Monitoring of Fish in Sea Cages: Target Strength (TS) Measurements on Atlantic Salmon (*Salmo Salar*)." *Fisheries Research* 69(2):205–9.
- Komeyama, K.; Kadota, M.; Torisawa, S.; Takagi, T., 2013. "Three-Dimensional Trajectories of Cultivated Pacific Bluefin Tuna *Thunnus Orientalis* in an Aquaculture Net Cage." *Aquaculture Environment Interactions* 4(1):81–90.
- Komeyama, K.; Kadota, M.; Torisawa, S.; Suzuki, K.; Tsuda, Y.; Takagi, T., 2011. "Measuring the Swimming Behaviour of a Reared Pacific Bluefin Tuna in a Submerged Aquaculture Net Cage." *Aquatic Living Resources* 24(2):99–105.
- Lindell, H., 2003. "Utgrunden off-Shore Wind Farm. Measurements of Underwater Noise." Ingemansson Technology AB. Project11-00329 30.
- Lopez, J.; Moreno, G.; Boyra, G.; Dagorn, L., 2016. "A model based on data from echosounder buoys to estimate biomass of fish species associated with fish aggregating devices." *Fishery Bulletin* 114 (2), 166-178.
- Love, R. H., 1971. "Dorsal-Aspect Target Strength of an Individual Fish." *Journal of the Acoustical Society of America* 49(3B):816–23.
- Lunde, P.; Pedersen, A.O.; Korneliussen, R.J., 2016. *Power-Budget Equations and Echo-Integration Equations for Fish Abundance Estimation*. *Journal of Marine Science and Engineering* 4(3), 43

Lurton, X., 2002. *An Introduction to Underwater Acoustics: Principles and Applications*. Springer.

MacLennan, D.N., 1986. "Time Varied Gain Functions for Pulsed Sonars." *J.Sound Vibrat* 110(3):511–22.

Manik, H.M., 2009. "Measurement of Acoustic Reflection of Tuna Fish Using Echosounder Instrument." *Ilmu Kelautan* 14(2):84–88.

Mann, J.; Teilmann, J., 2013. "Environmental Impact of Wind Energy." *Environmental Research Letters* 35001:8–11.

Mariani, A.; Scardi, M.; Costa, C., 2014. "Feasibility Study to Assess the Utilization of Stereo-Video Systems During Transfer of Atlantic Bluefin Tunas (*Thunnus thynnus*) to Evaluate their Number and Size." *Collect. Vol. Sci. Pap. ICCAT* 70(2):401–21.

Marques, O., 2011. *Practical Image and Video Processing Using MATLAB*. Wiley-IEEE Press.

Martignac, F.; Daroux, A; Bagliniere, J.L.; Ombredane, D.; Guillard, J., 2015. "The use of acoustic cameras in shallow waters: new hydroacoustic tools for monitoring migratory fish population. A review of DIDSON technology." *Fish and Fisheries*. 16: 486-510

McClatchie, S.; Macaulay, G.; Coombs, R., 2003. "A Requiem for the Use of 20 log₁₀ Length for Acoustic Target Strength with Special Reference to Deep-Sea Fishes." *ICES Journal of Marine Science: Journal Du Conseil* 60(2):419–28.

Medwin, H.; Clay, C. S., 1997. *Fundamentals of Acoustical Oceanography*. Academic Press.

Moreno, G.; Josse, E.; Brehemer, P.; Hottestad, L., 2007. "Echotrace classification and spatial distribution of pelagic fish aggregations around drifting fish aggregating devices (DFADS)". *Aquatic Living Resources* 20:343-356

os s i ., 2005. "Statistical Analysis for Digital Processing of Pelagic Fish Echoes." da ni o oli ni i da s i d. da s oli ni a da s a.

- Mylonas, C.C.; De la Gandara, F.; Corriero, A.; Belmonte, A., 2010. “*Atlantic Bluefin Tuna (Thunnus Thynnus) Farming and Fattening in the Mediterranean Sea.*” *Reviews in Fisheries Science* 18:266–80.
- Nedwell, J.; Turnpenny, A.; Langworthy, J.; Edwards, B., 2003. “*Measurements of Underwater Noise during Piling at the Red Funnel Terminal , Southampton , and Observations of Its Effect on Caged Fish.*” Subacoustics LTD. Report (October 2003):558.
- Norro, A.; Rumes, B.; Degraer, S., 2009. “*Chapter 3 . Characterisation of the Operational Noise , Generated by Offshore Wind Farms in the Belgian Part of the North Sea.*” P. 327 in *Offshore wind farms in the Belgian part of the North Sea.*, edited by M. U. of the N. S. M. M. Royal Belgian Institute of Natural Sciences and 1200 Brussels (MUMM), Marine Ecosystem Management Section, Gulledele 100.
- Nucci, M. E.; Costa, C.; Scardi, M.; Cataudella, S., 2010. “*Preliminary Observations on Bluefin Tuna (Thunnus Thynnus , Linnaeus 1758) Behaviour in Captivity.*” *Journal of Applied Ichthyology* 26:95–98.
- Ona, E., 1990a. “*Optimal Acoustic Beam Pattern Corrections for Split Beam Transducers.*” *Ices Journal of Marine Science*.
- Ona, E., 1990b. “*Physiological Factors Causing Natural Variations in Acoustic Target Strength of Fish.*” *J.Mar.Biol.Assoc.U.K.* 70(4):107–27.
- na . ao . llin n . Foote, K. G., 1996. “*Some Pitfalls of Short-Range Standard-Target Calibration.*” *ICES Journal of Marine Science* 18.
- Ortega, A.; Viguri, J.; Belmonete, J.R.; Martinez, A.; Velazquez, M.; De la Gandara, F., 2013. “*First Results on Ongrowing of Hatchery Reared Atlantic Bluefin Tuna , Thunnus Thynnus , Kept in Sea Cages.*” *Aquaculture Europe*14: 931–32.
- Partridge, B. L., 1982. “*The Structure and Function of Fish Schools.*” *Sci.Am.* Jun, vol.246, no.6, pp.114–123.
- Pedersen, A., 2006. *Effects of Nonlinear Sound Propagation in Fisheries Research.* The University of Bergen.

Popper, A.N; Schilt. C.R., 2008. “*Hearing and Acoustic Behavior: Basic and Applied Considerations.*” Fish Bioacoustics: Springer Handbook of Auditory Research Volume 32 (1999):17–48.

Popper, A. N.; Hastings, M. C, 2009. “*The Effects of Anthropogenic Sources of Sound on Fishes.*” Journal of Fish Biology 75(3):455–89.

Popper, A. N.; Dale, J.; Grav, M.D.; Keith, W.; Block, B.A.; Rogers, P.H., 2013. “*Threshold of Hearing for Swimming Bluefin Tuna (Thunnus Orientalis).*” J. Acoust. Soc. Am., vol. 133, pp. 3258, 2013.

Puig, V.; Espinosa, V.; Soliveres, E.; Ortega, A.; Belmonte, A.; De la Gándara, F., 2012. “*Biomass Estimation of Bluefin Tuna in Sea Cages By the Combined Use of Acoustic and Optical Techniques.*” Collect. Vol. Sci. Pap. ICCAT 68(1):284–90.

Rodriguez-Marin, E. et al., 2012. “*Biometric Relationships of Atlantic Bluefin Tuna (Thunnus Thynnus) from the North-East Atlantic and Mediterranean Sea .*” Collect. Vol. Sci. Pap. ICCAT SCRS/2012/:16.

Rodriguez-Marin, E.; Ortiz, M; Ortiz De Urbina, J.M.; et al. , 2015. “*Atlantic Bluefin Tuna (Thunnus Thynnus) Biometrics and Condition.*” PLoS ONE 10:1–21.

San Francisco – Oakland Bay Bridge East Span Seismic Safety Project. 2001. “*Fisheries Impact Assessment.*” PIDP EA 012081. San Francisco – Oakland Bay Bridge East Span Seismic Safety Project Caltrans Contract 04A0148 San Francisco, CA: Caltran. (August):59.

Sarà, G.; Buffa, G.; Lo Matire, M., 2007. “*Effect of Boat Noise on the Behaviour of Bluefin Tuna Thunnus Thynnus in the Mediterranean Sea.*” Marine Ecology Progress Series 331(February):243–53.

Savitzky, A.; Golay, J. E., 1964. “*Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures.*” Analytical Chemistry 36:1627–39.

Schaefer, K.M.; Oliver, C.W., 1998. “*Shape, Volume, and Resonance Frequency of the Swimbladder of Yellowfin Tuna (Thunnus albacares).*” National Marine Fisheries. Service Southeast Fisheries Science Center. P.O. Box 271. La Jolla, CA 92038 1:34.

Sherman, C.H.; Butler, J. L., 2007. *Tansducers Ans Arrays for Underwater Sound*. Springer.

Simmonds, J.; MacLennan, D. N., 2005. *Fisheries Acoustics: Theory and Practice*. Second edi. edited by Blackwell Sciencie.

Simonds, J; MacLennan, D., 2007. *Fisheries Acoustics:Theory and Practice Second Edition*. Second edi. edited by D. Simonds, J; MacLennan. Blackwell Science.

Simrad, 1997. “*Simrad EK500. Fishery Research Echo Sounder. Operator Manual.*”

Simrad, 2008. “*Simrad ER60, Scientific Echo Sounder. Reference Manual.*”

Soliveres, E., 2015. *Estimación de La Biomasa de Peces En Granjas Marinas Mediante Ultrasonidos*. Tesis Docotral. edited by Universitat Politècnica de València. Universitat Politècnica de València.

oli r s . o da . sr V.D. r -Arjona, I.; Puig, V.; Ordo . amis J.;Espinosa, V., 2017. “*Monitoring Fish Weight Using Pulse-Echo Waveform Metrics.*” *Aquacultural Engineering* 29.

Sonka, M.; Hlavac, V.; Boyle, R., 2008. *Image Processing, Analisis and Machine Vision*. Third Edit. Thompson Learning.

StatPoint Technologies, Inc., 2013. “*Statgraphics Centurion XVI.*”

The MathWorks Inc., 2014. “*MATLAB User’s Guide.*”

Thomsen, F.; Lüdemann, K.; Kafemann, R.; Piper, W., 2006. “*Effects of Offshore Wind Farm Noise on Marine Mammals and Fish.*” Biola, Hamburg, Germany on behalf of COWRIE Ltd 62.

Tichy, F. E.; Solli, H.; Klaveness, H., 2003. “*Non-Linear Effects in a 200-kHz Sound Beam and the Consequences for Target-Strength Measurement.*” ICES Journal of Marine Sciencie: Journal Du Conseil, vol.60,no.3, pp.571–74.

Tipler, P.A., 1996. *Fisica*. Reverté.

Tougaard, J.; Henriksen, O. D.; Miller, L.A., 2009. “*Underwater Noise from Three Types of Offshore Wind Turbines : Estimation of Impact Zones for Harbor Porpoises and Harbor Seals.*” *The Journal of the Acoustical Society of America* 125:3766–73.

Urick, R. J., 1983. *Principles of Underwater Sound*. Los Altos, California: Peninsula Publishing.

Wahlberg, M., 1999. “*A Literature Study on Acoustic Herding and Attraction of Fish.*” *Fiskeriverket Rapport* 2:5–43.

Wilson, J.C.; Elliott, M.; Cutts, N.D.; Mander, L; Mendão, V., 2010. “*Coastal and Offshore Wind Energy Generation : Is It.*” *Energies* 3 1383–1422.

Agradecimientos

Agradecimientos institucionales:

Me gustaría agradecer al Programa de Ayudas de Investigación y Desarrollo (PAID) de la Universitat Politècnica de València la ayuda financiera a través del programa de becas FPI subprograma 2 (2012-S2-002-70).

Al soporte financiero recibido del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino al proyecto “Diseño de tecnología para el cálculo de la biomasa total de peces en instalaciones offshore” (ARM/1790/010), así como la participación de Ctaqua y Apromar en el proyecto.

La colaboración del Grup Balfegó por la inestimable participación y su creencia en la ciencia que nos permitió realizar, con su financiación, el proyecto: “Estudio de viabilidad de aplicación de ecosondas acústicas para la evaluación de transferencias de atún rojo. Org. Produc. atún rojo con artes de cerco – OPARAC”

A la empresa ACCIONA por impulsar y financiar el proyecto para la “Caracterización del comportamiento del atún rojo (*Thunnus thynnus*) ante estímulos externos y mediante sistema acústico-óptico en granjas de engorde de atún rojo (Proyecto AZIMUT)”. Así como al Instituto Español de Oceanografía por sus directrices y aportaciones.

Del mismo modo, agradecer a la Comisión de la UE la financiación del proyecto “Sistema de medida de biomasa en transferencias atún rojo por técnicas acústicas (BIACOP (ES/13/41 mediante la decisión ejecutiva de la Comisión de la UE de 10 de julio de 2013 (2013/410/UE)).

A Zunibal S.L. por apoyar económicamente el proyecto “Adaptación y desarrollo de sistemas acústicos en boyas satelitarias para la caracterización de biomasa (TUNASPOT)”.

Agradecimientos personales:

Cuando se emprende una empresa como ésta (la realización de una tesis doctoral), se sabe de antemano que no se va a estar solo en la trinchera, pero nunca pensé que encontraría tantas y tan valiosas personas en el camino que ahora termina. Solo puedo decir ¡gracias a todos y todas!

En primer lugar, tengo que agradecer (mucho más de lo que soy capaz de plasmar en el papel) a mis compañeras Ester y Patri por ser apoyo, guía, estímulo y fuerza. Todo el trabajo realizado durante estos años es tan vuestro como mío. Gracias por soportar los días buenos y los regulares, y, sobre todo, por hacerme olvidar los malos sepultados en risas. ¡¡¡GRACIAS!!!

Tengo que mencionar de manera especial a Silvia. Ahora otros dos Vicent ocupan tu vida, pero no puedo terminar esta etapa sin darte las gracias por llevarme de la mano al principio, cuando todo es difícil y extraño. Gracias por ser mi confidente y sobre todo por ser mi amiga.

A Manu y a Susana por vuestra ayuda y por hacerme recordar que el rojo es un buen color.

A Víctor por rescatarme y creer en mi capacidad. Gracias por la motivación para crecer y aprender. Por tu dedicación y tu visión.

Igualmente, agradecer a Ana Tomás la supervisión de mi trabajo con tanta paciencia.

También quiero dar las gracias a Isabel Pérez, Fernando de la Gándara, Eladio Santaella, Vicent Estruch y Lucio Calise. Todos ellos han enriquecido esta tesis a nivel científico, pero me han enriquecido también a mí con sus consejos y su ejemplo.

A los técnicos de la UPV por su paciencia y dedicación “por amor a la ciencia”. Fernando y Carlos gracias por hacer fácil lo difícil. No puedo olvidarme del resto de compañeros del Departamento de Física Aplicada de la UPV en la Escuela Superior de Gandía.

Me gustaría expresar mi gratitud, al equipo del Grup Balfegó, que nos han acogido como uno más, involucrándose en cada locura que les proponíamos. Muy especialmente la colaboración de Manolo Guijarro y Toni López, gracias por vuestra profesionalidad y empatía.

También quiero agradecer la colaboración del grupo de visión por computador del Instituto ai2 de la UPV. Gracias a Pau, Gabriela, José Miguel y Vicente sin vosotros gran parte de esto no hubiera sido posible.

Permitidme que no termine sin dar las gracias a mis padres y mis hermanos. Por su paciencia, por su apoyo, por sus ánimos... por quererme. Muchas Gracias.

Gracias también a Luis por estar ahí al final de este camino, sin permitirme desviarme ni desfallecer. Llenando mis días de optimismo. Gracias. XX XXXXXX.

Índice de Tablas

Tabla 4.1. Especificaciones y calibración del transductor single-beam SS264W de Airmar.....	72
Tabla 4.2. Resumen de los datos acústicos (horas de ecograma) y ópticos (horas de vídeo) grabados durante el experimento.	74
Tabla 4.3. Parámetros del día 8/12/2012.	78
Tabla 4.4. Parámetros del día 12/12/2012.	79
Tabla 4.5. Parámetros del día 24-25/12/2012.	80
Tabla 4.6. Parámetros del día 12/01/2013.	82
Tabla 4.7. Parámetros del día 15/01/2013.	84
Tabla 4.8. Parámetros del día 18-19/01/2013.	85
Tabla 4.9. Valores de la hoja de especificaciones del transductor single-beam DT4 de Biosonics.	95
Tabla 4.10. Frecuencias de tonos puros emitidas y niveles de las amplitudes máximas emitidas para cada uno de ellos.	105
Tabla 4.11. Resumen de los eventos acústicos emitidos el día 23/7/2013. La duración de las emisiones fue de entre 10 y 15 segundos. Los niveles emitidos entre 140 y 165 dB ref. 1 μ Pa.	107
Tabla 4.12. Resumen de los eventos acústicos emitidos el día 24/7/2013. La duración de las emisiones fue de entre 10 y 15 segundos. Los niveles emitidos entre 140 y 165 dB ref. 1 μ Pa.	108
Tabla 4.13. Resumen de los eventos acústicos emitidos el día 25/7/2013. La duración de las emisiones fue de entre 10 y 15 segundos. Los niveles emitidos entre 140 y 165	

dB ref. 1 μ Pa , excepto para el caso de las señales marcadas (*) que la duración fue de 15 minutos y el nivel emitido de 150 a 182 dB ref. 1 μ Pa.	109
Tabla 4.14. Resumen de los parámetros medios para los eventos acústicos emitidos el día 23/7/2013.	116
Tabla 4.15. Resumen de los parámetros medios para los eventos acústicos emitidos el día 24/7/2013.	118
Tabla 4.16. Resumen de los parámetros medios para los eventos acústicos emitidos el día 25/7/2013.	121
Tabla 5.1. Año de nacimiento de los peces de cada una de las jaulas donde se realizaron medidas	130
Tabla 5.2. Datos del transductor ES120-7C de Simrad.	131
Tabla 5.3. Datos del transductor ES200-7C de Simrad.	132
Tabla 5.4. Resultados obtenidos de la calibración de la EK60 junto con el transductor ES120-7C y de la EK60 junto con el transductor ES200-7C, duración del pulso 64 μ s.	134
Tabla 5.5. Parámetros del detector de ecos individuales (SED) utilizados.....	141
Tabla 5.6. Longitud media de cada una de las jaulas donde se realizaron medidas ...	142
Tabla 5.7. Valores de la longitud media, número de trazas, media y desviación típica del <i>TS</i> máximo compensado y sin compensar para las medidas dorsales realizadas a 120 kHz en todas las jaulas bajo estudio.	146
Tabla 5.8. Valores de la longitud media, número de trazas, media y desviación típica del <i>TS</i> máximo compensado y sin compensar para las medidas dorsales realizadas a 200 kHz en todas las jaulas bajo estudio.	146
Tabla 5.9. Resultados del ajuste lineal del <i>TS</i> máximo de las trazas (compensado y sin compensar) para las dos frecuencias bajo estudio.	149
Tabla 5.10. Resultados del ajuste lineal del <i>TS</i> máximo de las trazas (compensado y sin compensar) para las dos frecuencias bajo estudio fijando la pendiente a 20.	150
Tabla 5.11. Resultados del ajuste lineal de la longitud a partir del <i>TS</i> máximo de las trazas (compensado y sin compensar) para las dos frecuencias bajo estudio.	151
Tabla 5.12. Resultados del ajuste lineal del <i>TS</i> máximo de las trazas (compensado y sin compensar) para las dos frecuencias bajo estudio. En este caso se usa el área media de las trazas aisladas en cada jaula en lugar de la longitud media de los atunes. 157	

Tabla 5.13. Resultados del ajuste lineal del <i>TS</i> máximo de las trazas (compensado y sin compensar) para las dos frecuencias bajo estudio. En este caso se usa el área media de las trazas aisladas en cada jaula en lugar de la longitud media de los atunes. Se realiza ajuste sin usar el logaritmo del área.	158
Tabla 6.1. Modelos propuestos para el cálculo de la altura a partir de la longitud y la anchura, y la relación entre la longitud y la anchura máxima. Se presenta su ecuación linealizada para realizar el ajuste lineal por el método de mínimos cuadrados.	164
Tabla 6.2. Identificador de los modelos, ecuación de los modelos propuestos, y ecuación del modelo linealizado y parámetros a calcular.	164
Tabla 6.3. Coeficientes y valores de R^2 (ajustados a grados de libertad de cada uno de los ajustes). Todos con un p-valor por debajo de 0.05.	167
Tabla 7.1. Días de medida en cada una de las jaulas durante el tiempo que duró el experimento, y temperatura media de la columna de agua durante las medidas.	179
Tabla 7.2. Parámetros del detector de ecos individuales (<i>SED</i>) utilizados.	186
Tabla 7.3. Número de medidas ópticas para cada una de las jaulas durante todos los meses del estudio.	189
Tabla 7.4. Longitud media para cada una de las jaulas durante todos los meses del estudio. Se especifica la media de la longitud (<i>L</i>) el número de muestras analizadas (<i>n</i>) y el número de peces en el momento de la grabación (<i>p</i>).	191
Tabla 7.5. Resumen de los datos resultantes de la comparación de las mediciones automáticas del mes de octubre con los sacrificios de cada una de las jaulas. ...	192
Tabla 7.6. Anchura media en el punto 1 (A_1) para cada una de las jaulas durante todos los meses del estudio.	193
Tabla 7.7. Anchura media en el punto 2 (A_2) para cada una de las jaulas durante todos los meses del estudio.	194
Tabla 7.8. Anchura media en el punto 3 (A_3) para cada una de las jaulas durante todos los meses del estudio.	194
Tabla 7.9. Anchura media en el punto 4 (A_4) para cada una de las jaulas durante todos los meses del estudio.	194
Tabla 7.10. Anchura media en el punto 5 (A_5) para cada una de las jaulas durante todos los meses del estudio.	195

Tabla 7.11. Valores de la longitud media, numero de trazas, media y desviación típica del TS máximo compensado y sin compensar para las medidas dorsales realizadas a 120 kHz en la jaula J16 durante todos los meses del estudio.....	196
Tabla 7.12. Valores de la longitud media, numero de trazas, media y desviación típica del TS máximo compensado y sin compensar para las medidas dorsales realizadas a 200 kHz en la jaula J16 durante todos los meses del estudio.....	196
Tabla 7.13. Valores de la longitud media, numero de trazas, media y desviación típica del TS máximo compensado y sin compensar para las medidas dorsales realizadas a 120 kHz en la jaula J18 durante todos los meses del estudio.....	199
Tabla 7.14. Valores de la longitud media, numero de trazas, media y desviación típica del TS máximo compensado y sin compensar para las medidas dorsales realizadas a 200 kHz en la jaula J18 durante todos los meses del estudio.....	202
Tabla 7.15. Valores de la longitud media, numero de trazas, media y desviación típica del TS máximo compensado y sin compensar para las medidas dorsales realizadas a 120 kHz en la jaula J20 durante todos los meses del estudio.....	205
Tabla 7.16. Valores de la longitud media, numero de trazas, media y desviación típica del TS máximo compensado y sin compensar para las medidas dorsales realizadas a 200 kHz en la jaula J18 durante todos los meses del estudio.....	205
Tabla 7.17. Valores de la longitud media, numero de trazas, media y desviación típica del TS máximo compensado y sin compensar para las medidas dorsales realizadas a 120 kHz en la jaula J18 durante todos los meses del estudio.....	208
Tabla 7.18. Valores de la longitud media, numero de trazas, media y desviación típica del TS máximo compensado y sin compensar para las medidas dorsales realizadas a 200 kHz en la jaula J18 durante todos los meses del estudio.....	208
Tabla 7.19. Resultados del ajuste lineal del TS máximo de las trazas (compensado y sin compensar) para la frecuencia de 120 kHz.....	215
Tabla 7.20. Resultados del ajuste lineal del TS máximo de las trazas (compensado y sin compensar) para la frecuencia de 200 kHz.....	216
Tabla 7.21. Resultados del ajuste lineal del TS máximo de las trazas (compensado y sin compensar) para la frecuencia de 200 kHz.....	220
Tabla 7.22. Resultados del ajuste lineal de la longitud a partir del TS máximo de las trazas (compensado y sin compensar) para las dos frecuencias bajo estudio.	221
Tabla 7.23. TS (compensado y sin compensar) promedio y Longitud resultante de aplicar las expresiones de la Tabla 7.22 en la capa considerada a ambas frecuencias. ..	222

Tabla 7.24. Resultados del ajuste lineal de la anchura máxima a partir del TS máximo de las trazas (compensado y sin compensar) para 200 kHz.....	223
Tabla 7.25. TS (compensado y sin compensar) promedio y Ancho máximo resultante de aplicar las expresiones de la Tabla 7.24 en la capa considerada a 200 kHz.	223
Tabla 7.26. Estimación de la masa promedio a partir de la longitud media y la anchura máxima obtenida por métodos acústicos para una frecuencia de 200 kHz.....	224
Tabla 8.1. Datos del transductor SSS de Airmar.	245
Tabla 8.2. Resumen de los datos grabados durante las transferencias. T1 hace referencia a la transferencia de ida y T2 hace referencia a la transferencia de vuelta	257
Tabla 8.3. Resultado del conteo de las transferencias del día 27-01-2016. T1 hace referencia a la transferencia de ida y T2 hace referencia a la transferencia de vuelta	258
Tabla 8.4. Resultado del conteo de las transferencias del día 20-07-2016. T1 hace referencia a la transferencia de ida y T2 hace referencia a la transferencia de vuelta	258
Tabla 8.5. Resultado del conteo de las transferencias del día 27-07-2016. T1 hace referencia a la transferencia de ida y T2 hace referencia a la transferencia de vuelta	261

Índice de Figuras

Figura 2.1. Fotografía de un ejemplar de atún rojo (<i>Thunnus thynnus</i> , Linnaeus 1758)	24
Figura 2.2. Mapa de distribución del atún rojo. El gradiente rojo-amarillo indica la mayor-menor presencia.	25
Figura 2.3. Principales rutas migratorias del atún rojo (flechas negras) y principales zonas de desove (en amarillo).....	26
Figura 3.1. Esquema de funcionamiento de una ecosonda en modo activo.....	31
Figura 3.2. Patrón de directividad de un pistón plano circular de 4 cm de radio, montado sobre una pantalla infinita, para una frecuencia de 200 kHz ($kr = 33.5$).	37
Figura 3.3. Esquema de funcionamiento del TVG.	48
Figura 3.4. Representación gráfica de un blanco extenso.....	58
Figura 3.5. Funcionamiento de una lente delgada.	60
Figura 3.6. Sistema de visión estereoscópica con dos cámaras paralelas.	62
Figura 4.1. Fotografía por satélite de la granja del <i>Grup Balfegó</i> , en la que se señala en amarillo la jaula (J6) donde se realizan las medidas.....	67
Figura 4.2. A la izquierda ecosonda ROVer de Knudsen Engineering usada y a la derecha transductor SS264W de Airmar.	68
Figura 4.3. Detalle de la cámara antes de encapsularse, y de la cámara unida al cable y preparada para sumergirse.	68
Figura 4.4. Detalle de la plataforma donde se colocaron los equipos a la izquierda vista desde arriba a la derecha vista frontal.....	69
Figura 4.5. Sistema de cajas estancas que alojaban los equipos en tierra y el sistema de alimentación (arriba). Detalle de los equipos que quedaron en la caja que no tiene módulos solares (abajo izquierda) y de la caja que contiene las baterías y las placas solares (abajo derecha).	70
Figura 4.6. Esquema de la configuración de noviembre y diciembre (izquierda) y de la configuración enero y febrero (derecha). En rojo el tamaño del haz del transductor y el cable de señal.	71

- Figura 4.7. Detalle de las cajas que contienen los equipos, los módulos solares y la antena (izquierda) y de la plataforma utilizada para montar el transductor y la cámara (arriba derecha y abajo). 71
- Figura 4.8. Ejemplo de ecograma registrado durante el mes de diciembre, configuración con los equipos en el centro de la jaula (arriba) y ecograma grabado durante el mes de enero con los equipos colocados a la mitad del radio de la jaula (abajo). La línea negra representa el valor medio del centro de masas para todo el tiempo representado en cada ecograma, la detección fuerte en color rojo en la parte superior de cada ecograma se corresponde con la superficie..... 76
- Figura 4.9. Representación de los datos registrados durante el día 8/12/2012. En azul límite superior del banco, en rojo el centro de masas y en amarillo el límite inferior del banco. La elipse negra representa el momento de la alimentación, y la elipse verde el del ocaso..... 78
- Figura 4.10. Representación de los datos registrados durante el día 12/12/2012. En azul límite superior del banco, en rojo el centro de masas y en amarillo el límite inferior del banco. La elipse negra representa el momento de la alimentación, y la elipse verde el del ocaso..... 80
- Figura 4.11. Representación de los datos registrados durante el día 24 -25/12/2012. En azul límite superior del banco, en rojo el centro de masas y en amarillo el límite inferior del banco. La elipse verde representa el momento del ocaso. 81
- Figura 4.12. Representación de los datos registrados durante el día 12/01/2013. En azul límite superior del banco, en rojo el centro de masas y en amarillo el límite inferior del banco. La elipse negra representa el momento de la alimentación, y la elipse verde el del ocaso..... 83
- Figura 4.13. Representación de los datos registrados durante el día 15/01/2013. En azul límite superior del banco, en rojo el centro de masas y en amarillo el límite inferior del banco. La elipse negra representa el momento de la alimentación, y la elipse verde el del ocaso..... 84
- Figura 4.14. Representación de los datos registrados durante el día 18-19/01/2013. En azul límite superior del banco, en rojo el centro de masas y en amarillo el límite inferior del banco. La elipse negra representa el momento de la alimentación, y la elipse verde el del ocaso. 86
- Figura 4.15. Ecogramas correspondientes al proceso de alimentación del día 15-01-2013. En la imagen de arriba a la izquierda el barco se aproxima y el banco baja, en la imagen de arriba a la derecha el barco ya amarrado en la jaula carga los bloques de pescado congelado sobre la plataforma, en la imagen de abajo a la izquierda la plataforma junto con los bloques se coloca en el centro de la jaula y finalmente en

la imagen de abajo a la derecha el barco se aleja y los atunes comienzan a subir de nuevo.	89
Figura 4.16. Imagen que confirma el cambio de dirección de nado de los atunes. A la izquierda dirección de nado original. En el centro momento del cambio de dirección y a la derecha momento en el que recobran la dirección de nado original.	89
Figura 4.17. Fotografía por satélite de la granja del Grup Balfegó, en la que se señala en amarillo la jaula (J2) donde se realizan las medidas.	94
Figura 4.18. Imagen del transductor DT4 single-beam de Biosonics montado en la plataforma antes de ser colocado de manera dorsal.	95
Figura 4.19. Imagen del proyector acústico submarino GW155 MK.2 de Gearing & Watson Electronics montado sobre el bastidor de acero. En la parte de abajo el transductor unido por un cable a uno de los compensadores colocado en la parte superior del bastidor.	97
Figura 4.20. Representación de la directividad obtenida para el transductor del proyector acústico submarino GW155 MK.2 desde 1000 Hz (por debajo es omnidireccional) hasta los 12500 Hz, medida a 2 y a 4 metros.	99
Figura 4.21. Respuesta en frecuencia del proyector acústico submarino GW155 MK.2.	99
Figura 4.22. Hidrófono B&K 8103 a la izquierda e hidrófono ITC-1032 a la derecha.	100
Figura 4.23. Esquema de la configuración 1. A: Transductor de Airmar (conectado a la ecosonda ROVer). B: transductor DT4 conectado a la ecosonda DTX de Biosonics. C: Proyector de ruido de la armada y barco desde donde se controla todos los equipos. D: Hidrófono B&K 8103 a 10 metros de la fuente y 10 metros de profundidad. E: Hidrófono ITC-1032 a 25 metros de la fuente y 10 metros de profundidad.	101
Figura 4.24. Esquema de la configuración 2. A: Transductor de Airmar (conectado a la ecosonda ROVER). B: transductor DT4 conectado a la ecosonda DTX de Biosonics. C: Proyector de ruido de la armada y barco desde donde se controla todos los equipos. D: Hidrófono B&K 8103 a 10 metros de la fuente y 10 metros de profundidad. E: Hidrófono ITC-1032 a 25 metros de la fuente y 10 metros de profundidad.	102
Figura 4.25. A la izquierda detalle del emisor siendo sumergido. El proyector en el bastidor sumergido a 10 metros (a la derecha).	102
Figura 4.26. A la izquierda arriba detalle de del transductor Biosonics colocado en la superficie (rojo) y del hidrófono ITC colocado a 25 metros (amarillo). Arriba a la	

derecha imagen del barco de control y abajo imagen submarina del transductor Airmar y la cámara colocados a 26 metros de profundidad.....	103
Figura 4.27. Umbrales medios de audición por frecuencias para el <i>Thunnus orientalis</i> . Los umbrales corresponden al nivel de presión sonora, los resultados se dibujan junto con los valores para el Yellowfin tuna (Iversen 1967) y para el Kawakawa (Iversen 1967).....	104
Figura 4.28. Emisión de la turbina grabada (en negro) y en rojo el nivel reproducido durante el experimento.	105
Figura 4.29. Ruido de fondo existente en la granja. En ausencia de trabajos (azul), y durante las maniobras de alimentación (negro).	106
Figura 4.30. Ruido impulsivo de la Lupara usada para el sacrificio de los atunes (abajo) y su contenido espectral (arriba).	106
Figura 4.31. Ejemplo de imagen grabada con la cámara submarina Sony (arriba), un ecograma registrado con la ecosonda Biosonics (centro) y un ecograma de la ecosonda Knudsen (abajo). Datos del día 25/7/2013 con la configuración de medida 2 en la que se realizan grabaciones desde el punto de vista ventral, por ello la detección roja intensa de la parte superior de los ecogramas se corresponde con la superficie.	111
Figura 4.32. Variación de los límites inferior, superior y del centro de masas durante las emisiones del día 23/7/2013. Arriba valores registrados por la ecosonda Knudsen desde el punto de vista ventral. Abajo valores registrados por la ecosonda Biosonics desde el punto de vista dorsal.	113
Figura 4.33. Ejemplo de traza aislada. En negro el ajuste usado para el cálculo de la longitud (103.2). En blanco el ajuste lineal que nos da la inclinación de la traza (4.8°). La relación longitud de la traza frente a la duración de la misma nos da un factor 19.2.....	115
Figura 4.34. Variación de los límites inferior, superior y del centro de masas durante las emisiones del día 24/7/2013. Arriba valores registrados por la ecosonda Knudsen desde el punto de vista ventral. Abajo valores registrados por la ecosonda Biosonics desde el punto de vista dorsal.	117
Figura 4.35. Variación de los límites inferior, superior y del centro de masas durante las emisiones del día 25/7/2013. Arriba valores registrados por la ecosonda Knudsen desde el punto de vista ventral. Abajo valores registrados por la ecosonda Biosonics desde el punto de vista ventral. Las elipses negras se refieren a los eventos 24 y 25 respectivamente.	119

- Figura 4.36. Ecograma correspondiente a la reacción mostrada con la emisión de la grabación del aerogenerador durante 15 segundos, con niveles de presión sonora entre los 110 y los 145 dB. Los atunes se mueven hacia la superficie (arriba) y recuperan la distribución original (debajo). Los ecogramas se toman desde el punto de vista ventral, por lo que la detección fuerte en color rojo de la parte superior de ambos ecogramas se corresponde con la superficie..... 122
- Figura 4.37. Ecogramas que muestran la evolución de la profundidad media del banco y de sus límites inferior y superior, durante la emisión de larga duración del ruido del aerogenerador. Hay que destacar la ausencia de trazas de atunes en la imagen de abajo a la izquierda. 124
- Figura 4.38. Imagen que ilustra la reducción del patrón de nado de los atunes y su acercamiento a la superficie. Se corresponde con la configuración 2. F: Transductor de Airmar (ROVer). E: Transductor DT4 (DTX de Biosonics).B: Hidrófono B&K 8103. O: Hidrófono ITC-1032..... 124
- Figura 4.39. Imágenes grabadas durante una emisión de larga duración. La ausencia de atunes puede comprobarse en la imagen de abajo a la izquierda. Los atunes están parcialmente enmascarados por la presencia de copépodos en la lente de la cámara. 125
- Figura 5.1. Fotografía de las instalaciones de El Gorguel en (Murcia). 129
- Figura 5.2. Detalle del montaje del transductor sobre una plataforma de madera fijada a la jaula por cuatro cabos. 131
- Figura 5.3. Esquema de conexión de los equipos utilizados durante las medidas 132
- Figura 5.4. Imagen del sistema estereoscópico antes de sumergirlo (izquierda). Imagen del sistema de cámaras estereoscópicas realizando mediciones en una de las jaulas (derecha). 135
- Figura 5.5. Imagen del software de medida del sistema estereoscópico. En la imagen se aprecia cómo se mide la longitud de los peces en un par de imágenes estereoscópicas 136
- Figura 5.6. Procedimiento de análisis acústico, ecograma original en la parte superior, ecograma limpio en el centro y traza aislada mediante tratamiento digital de la imagen en la parte inferior. En ambos ecogramas la zona gruesa que aparece en la parte inferior se corresponde con el fondo de la jaula. 139
- Figura 5.7. Distribución de longitudes medidas en cada una de las jaulas de atunes juveniles medidos en el Gorguel (Murcia). A la izquierda para la jaula J2, en el centro para la jaula J3 y a la derecha para la jaula J5. 142
- Figura 5.8. Densidad de probabilidad del *TS* máximo de las trazas aisladas. A la izquierda para 120 kHz a la derecha para 200 kHz. Se presentan ordenadas por el

tamaño medio de los atunes de manera decreciente (la correspondencia de las jaulas desde arriba a hacia abajo sería J20, J2, J3 y J5).	144
Figura 5.9. Densidad de probabilidad del <i>TS</i> máximo compensado de las trazas aisladas. A la izquierda para 120 kHz a la derecha para 200 kHz. Se presentan ordenadas por el tamaño medio de los atunes de manera decreciente (la correspondencia de las jaulas desde arriba a hacia abajo sería J20, J2, J3 y J5).	145
Figura 5.10. Relación lineal entre el <i>TS</i> máximo con y sin compensar de las trazas y el logaritmo de la longitud para una frecuencia de 120 kHz. En rojo <i>TS</i> máximo compensado y en negro <i>TS</i> máximo sin compensar.	148
Figura 5.11. Relación lineal entre el <i>TS</i> máximo con y sin compensar de las trazas y el logaritmo de la longitud para una frecuencia de 200 kHz. En rojo <i>TS</i> máximo compensado y en negro <i>TS</i> máximo sin compensar.	148
Figura 5.12. Relación lineal entre la longitud y el <i>TS</i> máximo con y sin compensar de las trazas para una frecuencia de 120 kHz. En rojo <i>TS</i> máximo compensado y en negro <i>TS</i> máximo sin compensar.	152
Figura 5.13. Relación lineal entre la longitud y el <i>TS</i> máximo con y sin compensar de las trazas para una frecuencia de 200 kHz. En rojo <i>TS</i> máximo compensado y en negro <i>TS</i> máximo sin compensar.	152
Figura 5.14. Dependencia del <i>TS</i> con la distancia al transductor para una frecuencia de 120 kHz. En la parte superior para el <i>TS</i> máximo sin compensar y en la parte inferior para el <i>TS</i> compensado. Se representa en cada gráfico la evolución del <i>TS</i> con la distancia para las 4 jaulas bajo estudio. En negro J20, en azul J2, en rojo J3 y en verde J5.	154
Figura 5.15. Dependencia del <i>TS</i> con la distancia al transductor para una frecuencia de 200 kHz. En la parte superior para el <i>TS</i> máximo sin compensar y en la parte inferior para el <i>TS</i> compensado. Se representa en cada gráfico la evolución del <i>TS</i> con la distancia para las 4 jaulas bajo estudio. En negro J20, en azul J2, en rojo J3 y en verde J5.	155
Figura 5.16. Ecograma obtenido de la jaula J5 durante las medidas, se observa en la parte superior una detección continua que se corresponde con el fondo de la jaula. El ecograma ya ha sido limpiado de y se presentan únicamente detecciones de atunes. Se observa como nadan pegados al fondo y después comienzan a ascender en grupo hacia la superficie.	156
Figura 6.1. Gráfico del modelo ajustado M12, y el modelo de referencia de Deguara <i>et al.</i> (2016). Gráfico del modelo Ajustado M13 abajo.	168

Figura 6.2. Gráficos de valores de peso observados frente a los predichos para los modelos del 1 al 11.....	170
Figura 6.3. Gráficos de valores observados frente a los predichos para los modelos 14 y 15. Para el modelo M14 se representa el valor predicho frente al observado de la altura (arriba) mientras que para el M15 se representa el valor observado frente al predicho para la anchura (abajo).....	175
Figura 7.1. Imagen de la plataforma donde se montaron los equipos estando ya sumergida y colocada en el fondo de la jaula (20 metros de profundidad) y a la mitad de uno de sus radios.....	181
Figura 7.2. Esquema de la conexión de los equipos durante las medidas.....	182
Figura 7.3. Modelo de contorno del atún utilizado para inferir el modelo 2D. Blanco y amarillo corresponden a puntos de referencia a lo largo de la columna vertebral, los puntos verdes corresponden al extremo del cuerpo del atún. S_L representa una unidad de medida utilizada de referencia en nuestro modelo.	183
Figura 7.4. Esta figura muestra un ejemplo real de nuestros procesos, en este caso se está utilizando un modelo de atún sin aletas laterales y que incluye el modelado del pedúnculo. Además, la imagen representa el proceso para el par de imágenes estereoscópica y se ha seleccionado automáticamente un atún sin ocultaciones ni solapes con otros para obtener medidas biométricas fiables.....	184
Figura 7.5. Esta figura muestra gráficamente como se calcula la correspondencia entre individuos de pares de imágenes.	185
Figura 7.6. Imagen de una traza aislada en la que se puede observar la complejidad de la misma.....	186
Figura 7.7. Esquema en el que se muestra una vejiga de un atún de 3 metros totalmente insonificada a 5 metros del transductor.	188
Figura 7.8. Distribución de la longitud (L) para todas las jaulas (J16+J18+J20) en julio, frente a la distribución proporcionada por los inspectores durante el enjaulamiento. (izquierda). Comparativa de longitud L : datos históricos de sacrificios frente a las mediciones automáticas Biacop (derecha). En ambos casos donde L es la longitud media, n es el número de muestras analizadas y p es el número de peces en el momento de la grabación.....	192
Figura 7.9. Puntos de estudio de la anchura de los atunes desde el punto de vista ventral.	193
Figura 7.10. Densidad de probabilidad del TS máximo sin compensar de las trazas aisladas de la jaula J16. A la izquierda para 120 kHz y a la derecha para 200 kHz. Se presentan ordenadas por el mes de medida (la correspondencia julio, agosto, septiembre, octubre y noviembre).	197

Figura 7.11. Densidad de probabilidad del TS máximo compensado de las trazas aisladas de la jaula J16. A la izquierda para 120 kHz y a la derecha para 200 kHz. Se presentan ordenadas por el mes de medida (la correspondencia julio, agosto, septiembre, octubre y noviembre). 198

Figura 7.12. Densidad de probabilidad del TS máximo sin compensar de las trazas aisladas de la jaula J18. A la izquierda para 120 kHz y a la derecha para 200 kHz. Se presentan ordenadas por el mes de medida (la correspondencia julio, agosto, septiembre, octubre y noviembre). 200

Figura 7.13. Densidad de probabilidad del TS máximo compensado de las trazas aisladas de la jaula J18. A la izquierda para 120 kHz y a la derecha para 200 kHz. Se presentan ordenadas por el mes de medida (la correspondencia julio, agosto, septiembre, octubre y noviembre). 201

Figura 7.14. Densidad de probabilidad del TS máximo sin compensar de las trazas aisladas de la jaula J20. A la izquierda para 120 kHz y a la derecha para 200 kHz. Se presentan ordenadas por el mes de medida (la correspondencia julio, agosto, septiembre, octubre y noviembre). 203

Figura 7.15. Densidad de probabilidad del TS máximo compensado de las trazas aisladas de la jaula J20. A la izquierda para 120 kHz y a la derecha para 200 kHz. Se presentan ordenadas por el mes de medida (la correspondencia julio, agosto, septiembre, octubre y noviembre). 204

Figura 7.16. Densidad de probabilidad del TS máximo sin compensar de las trazas aisladas de todas las jaulas. A la izquierda para 120 kHz a la derecha para 200 kHz. Se presentan ordenadas por el mes de medida (la correspondencia julio, agosto, septiembre, octubre y noviembre). 206

Figura 7.17. Densidad de probabilidad del TS máximo compensado de las trazas aisladas de todas las jaulas. A la izquierda para 120 kHz a la derecha para 200 kHz. Se presentan ordenadas por el mes de medida (la correspondencia julio, agosto, septiembre, octubre y noviembre). 207

Figura 7.18. Densidad de probabilidad del TS máximo sin compensar de las trazas aisladas de todas las jaulas que tienen correspondencia óptica. A la izquierda para 120 kHz a la derecha para 200 kHz. Se presentan ordenadas por el mes de medida (la correspondencia julio, septiembre y octubre). 210

Figura 7.19. Densidad de probabilidad del TS máximo compensado de las trazas aisladas de todas las jaulas que tienen correspondencia óptica. A la izquierda para 120 kHz a la derecha para 200 kHz. Se presentan ordenadas por el mes de medida (la correspondencia julio, septiembre y octubre). 211

Figura 7.20. Relación lineal entre el <i>TS</i> máximo con y sin compensar de las trazas y el logaritmo de la longitud para una frecuencia de 120 kHz para los peces que nadan con una inclinación entre -5° y 5° . En rojo <i>TS</i> máximo compensado y en negro <i>TS</i> máximo sin compensar.	214
Figura 7.21. Relación lineal entre el <i>TS</i> máximo con y sin compensar de las trazas y el logaritmo de la longitud para una frecuencia de 120 kHz para los peces que nadan con una inclinación entre -5° y 5° . En rojo <i>TS</i> máximo compensado y en negro <i>TS</i> máximo sin compensar.	217
Figura 7.22. Datos para el ajuste el ajuste entre el <i>TS</i> y la anchura máxima a la frecuencia de 120 kHz.	218
Figura 7.23. Datos para el ajuste el ajuste entre el <i>TS</i> y la anchura máxima a la frecuencia de 200 kHz.	219
Figura 7.24. Dependencia del <i>TS</i> _{max} con la distancia al transductor para las dos frecuencias y todas las jaulas por separado y unidas. Aparecen en la parte superior J16, segunda fila J18, después J20 y abajo todas las jaulas juntas. En la columna izquierda datos de 120 kHz mientras que en la derecha datos para 200kHz. Sobre las gráficas la correspondencia de los meses con los colores de las líneas.	226
Figura 7.25. Dependencia del <i>TS</i> _{max} con la distancia al transductor para las dos frecuencias y todas las jaulas por separado y unidas. Aparecen en la parte superior J16, segunda fila J18, después J20 y abajo todas las jaulas juntas. En la columna izquierda datos de 120 kHz mientras que en la derecha datos para 200 kHz. Sobre las gráficas la correspondencia de los meses con los colores de las líneas.	228
Figura 7.26. <i>TS</i> _{max} frente a la inclinación de los atunes para grupos representados en intervalos de 5 cm a la frecuencia de 120 kHz.	231
Figura 7.27. <i>TS</i> _{max} frente a la inclinación de los atunes para grupos representados en intervalos de 5 cm a la frecuencia de 200 kHz.	232
Figura 7.28. <i>TS</i> _{max} frente a la inclinación de los atunes para grupos representados en intervalos de 5 cm a la frecuencia de 120 kHz.	233
Figura 7.29. <i>TS</i> _{max} frente a la inclinación de los atunes para grupos representados en intervalos de 5 cm a la frecuencia de 200 kHz.	234
Figura 8.1. Fotografía de las instalaciones de El Grup Balfegó en l'Ametlla de Mar (Tarragona).	244
Figura 8.2. Detalle del transductor sonar de barrido lateral.	244
Figura 8.3. Detalle de las cámaras durante pruebas en el laboratorio y de las camas después de encapsularlas y montarlas en el perfil para montar el par estéreo (80 cm de separación y 5° de inclinación).	246

Figura 8.4. Detalle de la estructura usada el 27-01-2016 y 13-07-2016. Forma rómbica y los equipos alojados en el interior.....	247
Figura 8.5. Detalle de la estructura usada el 20-07-2016 y 27-07-2016. Forma rómbica y los equipos alojados en el exterior de la estructura (jaula receptora).	248
Figura 8.6. Imagen de la estructura en el puerto de l´Ametlla de Mar antes de ser llevada a las instalaciones en el mar el día 27-01-2016	249
Figura 8.7. Imagen de la estructura colocada entre las dos jaulas en las instalaciones de engrase de atunes del Grup Balfegó.	249
Figura 8.8. Imagen de la estructura colocada entre las dos jaulas vista desde el punto en el que se encuentran los equipos en la configuración 1 mostrada en la Figura 8.4. 250	
Figura 8.9. Imagen del montaje de los equipos en la configuración 2 mostrada en la Figura 8.5.	250
Figura 8.10. Imagen de los equipos en la posición final en la configuración 2 mostrada en la Figura 8.5.....	251
Figura 8.11. Esquema del procesado de los ecogramas.....	253
Figura 8.12. En la parte superior ecograma de la transferencia realizada el día 27-07-2016 entre las jaulas 18 y 20. En la parte inferior detalle de una de las molas de atunes captadas. En ambas imágenes puede apreciarse en azul el fondo y en la parte superior la detección de la superficie (de gran nivel debido al cambio de impedancias agua/aire) además se aprecia leve ruido debido a reflexiones con los diferentes elementos que el haz acústico encuentra en su camino (redes de las jaulas, mecanismos de anclaje de los equipos e incluso otras especies de peces de menor tamaño presentes en las jaulas. En esta transferencia la posición de los equipos es la mostrada en la Figura 8.5.....	254
Figura 8.13. En la parte superior ecograma captado durante el día 13-07-2016 en el que no se aprecian trazas de atunes al quedar enmascaradas por el ruido. En la parte de abajo detalle del mismo ecograma en el que se ven las trazas enmascaradas.....	259
Figura 8.14. En esta figura se aprecia el efecto de la posición del tubo de refuerzo de la estructura durante la transferencia del día 27-01-2016.....	260

Símbolos y abreviaturas

A	Anchura máxima del pez, normalmente expresada en cm
a_i	Coefficiente para el cálculo del función exacta del TVG en función del tiempo para dispersores individuales
B	Separación o línea base de las cámaras
b_m	Ordenada en el origen de la ecuación de la recta que relaciona el TS con el logaritmo en base 10 de la L , en dB
c	Velocidad de propagación del sonido, en m/s
CG	Compensación de ganancia en una dirección, en dB
D	Función directividad, adimensional
D_{celda}	Diagonal de la celda, en m
D_{dB}	Función directividad expresada en dB
df	Grados de libertad
$d_{h,p}$	Disparidad horizontal
dR	Resolución espacial, en m
dt	Resolución temporal, en s
DT	Umbral de detección
$d\beta_1$	Resolución angular en la dirección longitudinal, en ° mecánicos/pasos
$d\beta_2$	Resolución angular en la dirección transversal, en ° mecánicos/pasos
$d\Omega$	Diferencial del ángulo sólido, en srad
$d\omega$	Diferencial de la frecuencia angular, en rad/s
EAM	Error absoluto medio
eEa	Error estándar de los errores absolutos
EE_{min}	Mínimo espaciado entre ecos, relativo a la longitud del pulso transmitido

e_{Er}	Error estándar de los errores relativos
EL	Nivel de eco recibido por el sonar
EM	Supresión de ecos múltiples
ERM	Error relativo medio, en %
f	Frecuencia de la onda acústica, en Hz
F	Distancia focal de las lentes o las cámaras, en mm
f_o	Frecuencia de trabajo del transductor, en Hz
f_s	Frecuencia de muestreo, en Hz
FDP	Función densidad de probabilidad
g	Ganancia del transductor, adimensional
G_{TS}	Parámetro de calibración ganancia del transductor de la EK60 para el cálculo del TS , en dB
h	Tamaño del objeto real , en mm
h'	Tamaño del objeto virtual , en mm
H	Altura máxima del pez, normalmente expresado en cm
I	Intensidad de la onda acústica, en W/m^2
I_{bs}	Intensidad acústica retrodispersada por el blanco en dirección de vuelta al transductor, en W/m^2
I_{inc}	Intensidad de la onda acústica incidente, en W/m^2
I_{iso}	Intensidad acústica radiada por una fuente isotrópica, en W/m^2
I_m	Momentos de la tensión normalizada para el cálculo de la función exacta del TVG en función del tiempo
I_{ref}	Intensidad acústica de referencia, normalmente se define como $p_{ref}^2 / \rho_0 c$
I_s	Intensidad acústica dispersada por el blanco, en W/m^2
ID	Índice de directividad, en dB
$ID_{máx}$	Índice de directividad en la dirección de máxima radiación del transductor, en dB
J	Parámetro de reciprocidad de ondas esféricas, en W/Pa^2
J_1	Función de Bessel de primera clase de orden 1
k	Número de onda, en m^{-1}
K	Número de pings transmitidos
L	Longitud total del pez, normalmente expresado en cm

L_0	Longitud total del pez de referencia, normalmente 1 cm
L_{celda}	Tamaño de la celda, en m
LE	Longitud del eco normalizada a la longitud del pulso transmitido, adimensional
LI	Índice de intensidad acústica normalizado en dB
LP	Índice de presión acústica normalizado en dB
LW_{Rx}	Nivel de potencia eléctrica suministrada al circuito receptor durante la recepción de ecos, en W
m	Pendiente de la ecuación de la recta que relaciona el TS con el logaritmo en base 10 de la L
MCG	Máxima compensación de ganancia en una dirección, en dB
MDF	Máxima desviación de fase, normalmente expresado en °
mLE	Mínima longitud del eco normalizada a la longitud del pulso transmitido, adimensional
MLE	Máxima longitud del eco normalizada a la longitud del pulso transmitido, adimensional
n	Número de muestras en un ping
n	Tamaño de la muestra
N	Número de dispersores en V_s
NL	Índice de ruido en dB
$Offset_{\beta 1}$	Desviación del eje acústico del transductor respecto a la normal en la dirección longitudinal, en ° mecánicos
$Offset_{\beta 2}$	Desviación del eje acústico del transductor respecto a la normal en la dirección transversal, en ° mecánicos
P	Masa del pez, normalmente expresada en kg
p	Amplitud de presión de la onda acústica, en Pa
p_{bs}	Amplitud de presión de la onda acústica retrodispersada, en Pa
P_{out}	Amplitud de presión de la onda acústica a 1 metro del transductor, en Pa
p_{ref}	Presión de referencia acústica normalizada
p_{rms}	Presión eficaz de la onda acústica, en Pa
Q	Factor de directividad, adimensional
$Q_{máx}$	Factor de directividad en la dirección de máxima radiación del transductor, adimensional
r	Radio de un pistón plano circular, en m

r	Radio de curvatura de la lente, en mm
r'	Radio de curvatura de la lente, en mm
R	Distancia a la fuente sonora, en m
R^2	Coefficiente de determinación, adimensional
$R(df)$	Coefficiente de determinación a grados de libertad
$R_{m\acute{a}x}$	Distancia al transductor en la que se detecta el máximo valor del TS_u de las muestras de un eco, en m
R_m	Distancia mínima al transductor, en m
R_M	Distancia máxima al transductor, en m
R_{TS}	Vector distancia empleado por la EK60 en la medida del TS
$R_{TS,corr}$	Distancia del blanco al transductor determinada a partir del centro de gravedad del eco.
R_0	Distancia de referencia a la fuente sonora, normalmente 1 m
R_0'	Distancia de referencia al blanco, normalmente 1 m
R_1	Distancia de la fuente al dispersor 1
R_2	Distancia de la fuente al dispersor 2
$resm$	Valor medio de los residuos
RMS	Valor cuadrático medio
s	Distancia de la lente a la imagen real, en mm
s'	Distancia de la lente a la imagen virtual, en mm
s_a	Coefficiente de retrodispersión de área, en m^2/m^2
s_A	Coefficiente de retrodispersión de área náutico, en mn^2/m^2
S_{Rx}	Sensibilidad del transductor durante la recepción, expresada normalmente en V/ μPa
$S_{Rx,dB}$	Valor de S_{Rx} en dB, normalmente ref. 1 V/ μPa
$S_{Tx,i}$	Sensibilidad del transductor durante la emisión definida en corriente, normalmente expresada en $\mu Pa/A$
$S_{Tx,v}$	Sensibilidad del transductor durante la emisión definida en tensión, normalmente expresada en $\mu Pa/V$
s_v	Coefficiente volumétrico de retrodispersión, en m^2/m^3
$s_{v,ref}$	Coefficiente volumétrico de retrodispersión de referencia, 1 m^2/m^3
$S_{a,corr}$	Parámetro de calibración de la EK60 para el cálculo del S_v , en dB

<i>SED</i>	Detector de ecos individuales o, también llamado, single echo detector
<i>SensAngβ_1</i>	Sensibilidad angular en la dirección longitudinal, en ° eléctricos en relación a ° mecánicos
<i>SensAngβ_2</i>	Sensibilidad angular en la dirección transversal, en ° eléctricos en relación a ° mecánicos
<i>SL</i>	Nivel de fuente, normalmente expresado en dB ref. 1 μ Pa
<i>SPL</i>	Nivel de presión, normalmente expresado en dB ref. 1 μ Pa
<i>Sv</i>	Potencia volumétrica de retrodispersión, en dB ref. a 1 m ² /m ³
<i>t_{del}</i>	Retardo debido al ancho de banda finito de la ecosonda y del dispersor
<i>T₀</i>	Instante de inicio óptimo de la función aproximada del <i>TVG</i> definida en el tiempo
<i>TL</i>	Pérdidas debidas a la propagación de la onda, en dB
<i>TS</i>	Target strength o potencia del blanco, en dB ref. 1 m ²
<i>TS_c</i>	<i>TS</i> con compensación del patrón de directividad del transductor, en dB ref. 1 m ²
<i>TS_{desv}</i>	Desviación permitida del <i>TS</i> de la esfera de calibración respecto al valor teórico para la aceptación de ecos, en dB ref. 1 m ²
<i>TS_{mín}</i>	Umbral de <i>TS</i> para la detección de ecos individuales, en dB ref. 1 m ²
<i>TS_{max}</i>	Valor máximo del <i>TS</i> sin compensar de una traza, en dB ref. 1 m ²
<i>TS_{cmax}</i>	Valor máximo del <i>TS</i> compensado de una traza, en dB ref. 1 m ²
<i>TS_{teór}</i>	Valor teórico del <i>TS</i> de la esfera de calibración, en dB ref. 1 m ²
<i>TS_u</i>	<i>TS</i> sin compensación del patrón de directividad del transductor, en dB ref. 1 m ²
<i>TS_{u,corr}</i>	Valor del <i>TS_u</i> del eco corregido por la distancia en la que se detecta el blanco <i>R_{TS,corr1}</i>
<i>tv_g</i>	Ganancia variable con el tiempo definida de forma lineal
<i>TVG</i>	Ganancia variable con el tiempo o, también llamada time varied gain, en dB
<i>V_{Rx}</i>	Tensión eléctrica aplicada suministrada al circuito receptor durante la recepción de ecos, en V
<i>V_s</i>	Volumen muestreado por el pulso acústico, en m ³
<i>V_{Tx}</i>	Tensión eléctrica aplicada en bornes del transductor durante la transmisión, en V
<i>V_{Tx,rms}</i>	Tensión eficaz aplicada en bornes del transductor durante la transmisión, en V

VPN	Red privada virtual
V_0	Tensión generada en circuito abierto en bornes del transductor durante la recepción, en V
W	Potencia acústica radiada por la fuente, en W
W_{Rx}	Potencia eléctrica suministrada al circuito receptor durante la recepción de ecos, en W
W_{Tx}	Potencia eléctrica entregada al transductor durante la transmisión, en W
$W_{Tx,máx}$	Máxima potencia eléctrica de trabajo del transductor en modo pulsado, en W
Z_0	Impedancia acústica del medio de propagación
Z_w	Distancia de las cámaras al punto real, normalmente expresada en m
α	Coefficiente de absorción del medio de propagación, en dB/m
β	Coefficiente de absorción del medio de propagación, normalmente en Np/m o Np/km
β_1	Ángulo del split-beam entre el blanco y la dirección longitudinal, en rad
β_2	Ángulo del split-beam entre el blanco y la dirección transversal, en rad
ΔR	Resolución espacial debida a la frecuencia de muestreo de la ecosonda, en m
η	Rendimiento electroacústico del transductor, adimensional
θ	Ángulo polar del sistema de coordenadas esféricas empleado para describir el campo acústico radiado por la fuente, en rad
θ'	Ángulo polar del sistema de coordenadas esféricas empleado para describir el campo acústico dispersado por el blanco, en rad
θ_{-3dB}	Apertura del haz a -3 dB de un transductor con haz de sección circular, en rad o grados
θ_{-3dB,β_1}	Apertura del haz del transductor a -3 dB en la dirección longitudinal, en rad o grados
θ_{-3dB,β_2}	Apertura del haz del transductor a -3 dB en la dirección transversal, en rad o grados
$\theta(Z_T)$	Fase de la impedancia eléctrica del transductor, en rad
λ	Longitud de onda, en m
μ	Media

ρ_v	Densidad numérica de dispersores en el volumen de muestreo, en n^0/m^3
ρ_0	Densidad del medio de propagación, en kg/m^3
σ	Desviación típica
σ^2	Varianza
σ_{bs}	Sección transversal de retrodispersión, en m^2
σ_s	Sección transversal de dispersión, en m^2
τ	Duración del pulso transmitido, en s
φ	Ángulo azimutal del sistema de coordenadas esféricas empleado para definir el campo acústico radiado por la fuente, en rad
φ'	Ángulo azimutal del sistema de coordenadas esféricas empleado para definir el campo acústico dispersado por el blanco, en rad
ψ	Ángulo equivalente del haz del transductor, en srad
Ψ	Ángulo equivalente del haz del transductor, en dB ref. 1 srad
ω	Frecuencia angular, en rad/s
Ω	Ángulo sólido, en srad



“Perquè hi haurà un dia que no podrem més i llavors ho podrem tot”

Vicent Andrés Estllés