



Estimación de biomasa de peces en granjas marinas mediante ultrasonidos

Ester Soliveres González

Institut per a la Gestió Integrada de Zones Costaneres

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Gandia, noviembre de 2015

Tesis Doctoral dirigida por:

Dr. Víctor Espinosa Roselló

Dra. Silvia Martínez Llorens

Índice

Resumen	5
Resum	9
Abstract	13
1. Introducción	17
1.1. Motivación y objetivos.....	17
2. Generalidades de la dorada y la lubina	21
2.1. Dorada.....	21
2.2. Lubina	25
3. Fundamentos teóricos en acústica activa para la estimación de biomasa de peces	31
3.1. Conceptos básicos	32
3.1.1. Propagación de una onda acústica.....	32
3.1.2. Transductor acústico	35
3.1.3. Dispersión acústica.....	42
3.1.3.1. Dispensor individual.....	42
3.1.3.2. Múltiples dispersores	46
3.1.4. Ecuación del sónar	49
3.1.4.1. Dispensor individual.....	49
3.1.4.2. Múltiples dispersores	52
3.1.5. Estimación de la talla y la biomasa	53
3.2. Consideraciones en el uso de la ecosonda EK60.....	54
3.2.1. Expresiones empleadas	54
3.2.2. Calibración	59
3.3. Consideraciones en el uso de la ecosonda DT-X	61

3.3.1. Expresiones empleadas.....	61
3.4. Consideraciones en el uso de ecosondas científicas a cortas distancias	62
3.4.1. Compensación de pérdidas por propagación	63
3.4.1.1. Distancia al blanco	63
3.4.1.2. Aproximación asintótica del TVG	64
3.4.1.3. Coeficiente de absorción del medio	66
3.4.2. Compensación del patrón de radiación.....	67
3.4.2.1. Posición angular	67
3.4.2.2. Campo cercano del pez	68
3.4.2.3. Aproximación de onda plana	68
4. Medida del TS de la dorada a cortas distancias.....	69
4.1. Materiales y métodos.....	71
4.1.1. Dispositivo experimental.....	71
4.1.1.1. Lugar de medida.....	72
4.1.1.2. Definición de las tallas a medir.....	77
4.1.1.3. Muestreos biológicos	79
4.1.1.4. Sistema acústico.....	80
4.1.1.5. Calibración.....	84
4.1.1.6. Recogida de datos acústicos.....	87
4.1.2. Procesado de datos	88
4.1.2.1. Análisis de los datos biométricos.....	88
4.1.2.2. Tratamiento y análisis de los datos acústicos.....	89
4.2. Resultados y discusión.....	95
4.2.1. Relaciones biométricas.....	95
4.2.2. Clasificación de los peces por tallas	99
4.2.3. Calibración	104
4.2.4. Medida del TS.....	106
4.2.4.1. Densidad de probabilidad del TS por tallas.....	107
4.2.4.2. Relación entre el TS y la longitud	112
4.2.4.3. Relación entre el TS y la masa	119

4.2.4.4. Densidad de probabilidad de la <i>Lbs</i> por tallas y ajuste a modelos teóricos	123
4.2.4.5. Determinación del tamaño mínimo de la muestra	141
4.2.4.6. Dependencia del <i>TS</i> con la distancia al transductor	145
4.3. Conclusión.....	147
5. Medida del <i>TS</i> y el <i>Sv</i> de dorada y lubina en condiciones de producción	149
5.1. Materiales y métodos	150
5.1.1. Culmarex	151
5.1.2. Piagua.....	157
5.1.3. Tratamiento y análisis de los datos acústicos	162
5.2. Resultados y discusión	165
5.2.1. Estimación de la talla	166
5.2.1.1. Lubina	166
5.2.1.2. Dorada.....	173
5.2.2. Estimación de la abundancia	176
5.2.2.1. Piagua	176
5.2.2.2. Culmarex.....	187
5.3. Conclusiones	194
6. Estimación del tamaño a cortas distancias mediante el análisis de la forma de onda del eco	197
6.1. Materiales y métodos	199
6.1.1. Dispositivo experimental.....	200
6.1.2. Procesado de datos	203
6.1.3. Simulación numérica.....	206
6.2. Resultados y discusión	207
6.2.1. Resultados de la simulación numérica	208
6.2.2. Resultados experimentales	209
6.3. Conclusión.....	213

7. Detección acústica de la caída de pienso.....	215
7.1. Materiales y métodos.....	216
7.2. Resultados y discusión.....	219
7.3. Conclusión.....	223
Conclusiones	225
Referencias.....	227
Agradecimientos.....	235
Índice de Tablas.....	237
Índice de Figuras	243
Símbolos y abreviaturas.....	251
Anexo Fotográfico	261

Resumen

La acuicultura marina ha aumentado considerablemente su producción en los últimos años debido a la escasez de recursos pesqueros y al aumento de la demanda. En el año 2013 la producción mundial alcanzó las 173062 Tn de dorada (*Sparus aurata*) y 161059 Tn de lubina (*Dicentrarchus labrax*), producida principalmente en Grecia, Turquía, España e Italia. La dorada y la lubina son unas de las especies más interesantes para su cultivo en España. Su zona de cultivo se limita a aguas templadas y se cultiva normalmente en sistemas de jaulas flotantes. La estimación del crecimiento de los peces y la biomasa son esenciales en la preparación del plan de producción de granjas de peces, así como para organizar y llevar a cabo operaciones de gestión, tales como la clasificación y la distribución de los peces, la descarga de nuevos lotes, los horarios de recolección, el cálculo de las tasas de alimentación diaria, etc. Es necesario optimizar estos procesos de producción, no sólo para mejorar la rentabilidad económica, sino también para minimizar el impacto ecológico de las instalaciones. Entre estos procesos cabe destacar la estrategia de alimentación, el crecimiento y la vigilancia de la población. La alimentación diaria se estima en función de la biomasa presente y diferentes factores como el tamaño medio de los peces, la época del año, la temperatura del agua, etc. Por tanto, las estimaciones del tamaño y el número de peces son datos cruciales para el manejo adecuado de la producción.

Las técnicas acústicas resultan las más apropiadas para la detección remota en el agua, debido a que las ondas acústicas permiten recorrer grandes distancias en comparación con las ondas electromagnéticas, que se atenúan muy rápidamente. La luz no penetra

más de un par de cientos de metros por debajo de la superficie del agua, y mucho menos cuando el medio está cargado de sólidos en suspensión o biota, como por ejemplo plancton. De este modo, los instrumentos acústicos que transmiten y reciben ondas acústicas son capaces de detectar peces u otros objetos lejanos que quedan más allá del campo de visión. Por este motivo, las tecnologías acústicas han tenido un mayor impacto en la detección de peces. Desde hace algunas décadas se han estado empleando métodos acústicos para la detección de bancos de peces, de forma que la información proporcionada por sónares y ecosondas resulta un factor importante en la eficiencia de las operaciones actuales de pesca.

Hoy en día se está investigando la manera de determinar de forma precisa la biomasa presente en jaulas mediante técnicas acústicas no invasivas, que pasan por la estimación de la abundancia de peces y la distribución de tamaños. De igual modo estas técnicas pueden permitir el estudio del comportamiento del cardumen en jaulas flotantes, el control del proceso de alimentación e incluso la identificación de especies. La metodología de ecosondas científicas o comerciales se ha orientado principalmente hacia la pesca pelágica, y resulta necesario evaluar si el equipo y los algoritmos pueden aplicarse en el control de granjas de acuicultura marina.

Con el fin de evaluar la biomasa de peces en jaulas, en esta tesis se evalúan dos técnicas para la estimación de la talla y se aborda el estudio de la energía devuelta por el cardumen de peces para la estimación de la abundancia, tal y como se comenta en el Capítulo 1. De igual modo se caracteriza la respuesta acústica del pienso en función de su calibre.

En el Capítulo 2 se incluye información general sobre la dorada y la lubina, y su cultivo en jaulas flotantes, con la finalidad de facilitar la comprensión del comportamiento de los animales y la interpretación del campo acústico dispersado por sus cuerpos. Los conceptos básicos y las formulaciones empleadas en acústica para la estimación de biomasa se describen en el Capítulo 3, que resultan útiles para la comprensión de esta tesis. Se asume un medio homogéneo, isotrópico y no dispersivo, en el que las variaciones de presión son de pequeña amplitud, de forma que los efectos no lineales pueden ser despreciados. Se aborda la ecuación del sónar a partir del estudio de la propagación de una onda acústica en un fluido y la dispersión del campo sonoro producida por un blanco. También se tratan los parámetros electroacústicos del transductor. Se incluyen los conceptos necesarios para la estimación de la talla y la abundancia a partir de la energía devuelta por los peces. Además se resumen las expresiones empleadas por dos ecosondas científicas de las más comercializadas, la EK60 de Simrad y la DT-X de Biosonics.

En el Capítulo 4 se estudia la idoneidad del uso de ecosondas científicas para la estimación de la talla a partir de la detección de ecos procedentes de blancos individuales, con la particularidad de que los peces se encuentran situados a distancias próximas al transductor. Se mide el aspecto ventral y dorsal del target strength (*TS*) para 5 tallas diferentes de dorada a una frecuencia de 200 kHz. El ensayo se lleva a cabo en un

reducido rango de distancias, similar a las distancias que se dan en jaulas en condiciones de producción para la detección de peces aislados. La medida del *TS* a distancias tan próximas al transductor lleva implícita una serie de complicaciones e incertidumbres debido principalmente al campo cercano de los peces, la compensación de las pérdidas de propagación de la onda acústica, la lectura del ángulo de incidencia del campo sonoro retrodispersado y la alteración de la envolvente del eco causada por el tamaño finito de los peces. La relación del *TS* con la talla permitirá estimar de forma indirecta el tamaño de los peces a partir de mediciones acústicas.

En el Capítulo 5 se evalúa la aplicabilidad de ecosondas científicas en la estimación de la talla promedio y la abundancia de peces en jaulas de dorada y lubina en condiciones de producción, que se caracteriza por una reducida separación entre el transductor y los peces así como por densidades elevadas. Se evalúan dos frecuencias, 123 y 201 kHz, de forma dorsal. El estudio del *TS* para la determinación del tamaño queda limitado a la zona superior del cardumen, donde se pueden obtener detecciones de peces aislados, siendo inviable su evaluación a mayores distancias donde la elevada densidad del cardumen hace inevitable la detección de ecos procedentes de múltiples blancos. La abundancia de peces se evalúa mediante la integración de la energía retrodispersada por el banco.

En el Capítulo 6 se propone un método alternativo para la estimación del tamaño de los peces basado en la medida de la diferencia del tiempo de vuelo entre dos máximos de un mismo eco, que corresponden a las reflexiones del pulso transmitido en diferentes partes del cuerpo del pez. Se evalúa el método para el aspecto ventral y dorsal de la dorada, empleando un transductor single-beam a 200 kHz.

Por último, en el Capítulo 7 se caracteriza la respuesta acústica del pienso en función de su calibre empleando una ecosonda científica a 200 kHz, que permitirá la detección e identificación de la caída del pienso sobrante en jaulas en condiciones de producción.

Resum

L'aqüicultura marina ha augmentat considerablement la seua producció en els últims anys a causa de la manca de recursos pesquers i l'augment de la demanda. L'any 2013 es va arribar a una producció mundial de 173062 Tn d'orada (*Sparus aurata*) i 161059 Tn de llobarro (*Dicentrarchus labrax*), produïda principalment a Grècia, Turquia, Espanya i Itàlia. La daurada i el llobarro són unes de les espècies més interessants per al seu cultiu a Espanya. La seua zona de cultiu es limita a aigües temperades i es conrea normalment en sistemes de gàbies flotants. L'estimació del creixement dels peixos i la biomassa són essencials en la preparació del pla de producció de granges de peixos, així com per a organitzar i dur a terme operacions de gestió, com ara la classificació i la distribució dels peixos, la descàrrega de nous lots, els horaris de recollida, el càlcul de les taxes d'alimentació diària, etc. Cal optimitzar aquests processos de producció, no només per millorar la rendibilitat econòmica, sinó també per minimitzar l'impacte ecològic de les instal·lacions. Entre aquests processos cal destacar l'estratègia d'alimentació, el creixement i la vigilància de la població. L'alimentació diària s'estima en funció de la biomassa present i diferents factors com la mida mitjana dels peixos, l'època de l'any, la temperatura de l'aigua, etc. Per tant, les estimacions de la talla i el nombre de peixos són dades crucials per a la gestió adequada de la producció.

Les tècniques acústiques resulten les més apropiades per a la detecció remota en l'aigua, degut a que les ones acústiques permeten recórrer grans distàncies en comparació amb les ones electromagnètiques, que s'atenuen molt ràpidament. La llum no penetra més enllà d'un par de centenars de metres per sota de la superfície de l'aigua, i molt menys

quan el medi està carregat de sòlids en suspensió o biota, com ara plàncton. D'aquesta manera, els instruments acústics que transmeten i reben ones acústiques són capaços de detectar peixos o altres objectes llunyans que queden més enllà del camp de visió. Per aquest motiu, les tecnologies acústiques han tingut un major impacte en la detecció de peixos. Des de fa algunes dècades s'han estat utilitzant mètodes acústics per a la detecció de bancs de peixos, de manera que la informació proporcionada per sonars i ecosondes resulta un factor important en l'eficiència de les operacions actuals de pesca.

Hui en dia s'està investigant la manera de determinar de forma precisa la biomassa present en gàbies mitjançant tècniques acústiques no invasives, que passen per l'estimació de l'abundància de peixos i la distribució de la grandària. De la mateixa manera aquestes tècniques poden permetre l'estudi del comportament del banc en gàbies flotants, el control del procés d'alimentació i fins i tot la identificació d'espècies. La metodologia d'ecosondes científiques o comercials s'ha orientat principalment cap a la pesca pelàgica, i resulta necessari avaluar si l'equip i els algorismes poden aplicar-se en el control de granges d'aqüicultura marina.

Per tal d'avaluar la biomassa de peixos en gàbies, en aquesta tesi s'avaluen dues tècniques per a l'estimació de la talla i s'aborda l'estudi de l'energia retornada pel banc de peixos per a l'estimació de l'abundància, tal com es comenta en el Capítol 1. De la mateixa manera es caracteritza la resposta acústica del pinso en funció del seu calibre.

En el Capítol 2 s'inclou informació general sobre l'orada i el llobarro, i el seu cultiu en gàbies flotants, amb la finalitat de facilitar la comprensió del comportament dels animals i la interpretació del camp acústic dispersat pels seus cossos. Els conceptes bàsics i les formulacions utilitzades en acústica per a l'estimació de biomassa es descriuen en el Capítol 3, que resulten útils per a la comprensió d'aquesta tesi. S'assumeix un medi homogeni, isotròpic i no dispersiu, en el qual les variacions de pressió són de amplitud reduïda, de manera que els efectes no lineals poden ser menyspreats. S'aborda l'equació del sonar a partir de l'estudi de la propagació d'una ona acústica en un fluid i la dispersió del camp sonor produïda per un blanc. També es tracten els paràmetres electroacústics del transductor. S'inclouen els conceptes necessaris per a l'estimació de la talla i l'abundància a partir de l'energia retornada pels peixos. A més es resumeixen les expressions utilitzades per dos ecosondes científiques de les més comercialitzades, la EK60 de Simrad i la DT-X de Biosonics.

En el Capítol 4 s'estudia la idoneïtat de l'ús de ecosondes científiques per a l'estimació de la talla a partir de la detecció d'ecos procedents de blancs individuals, amb la particularitat que els peixos es troben situats a distàncies pròximes al transductor. Es mesura l'aspecte ventral i dorsal del target strength (*TS*) per a 5 talles diferents d'orada a una freqüència de 200 kHz. L'assaig es porta a terme en un reduït rang de distàncies, similar a les distàncies que es donen en gàbies en condicions de producció per a la detecció de peixos aïllats. La mesura del *TS* a distàncies tan properes al transductor porta implícita una sèrie de complicacions i incerteses a causa principalment del camp proper

dels peixos, la compensació de les pèrdues degudes propagació de l'ona acústica, la lectura de l'angle d'incidència del camp sonor retrodispersat, i l'alteració de l'envoltant de l'eco causada per la grandària finita dels peixos. La relació del *TS* amb la talla permetrà estimar de forma indirecta la talla dels peixos a partir de mesures acústiques.

En el Capítol 5 s'avalua l'aplicabilitat de ecosondes científiques en l'estimació de la talla mitjana i l'abundància de peixos en gàbies d'orada i llobarro en condicions de producció, que es caracteritza per una reduïda separació entre el transductor i els peixos així com per densitats elevades. S'avaluen dues freqüències, 123 i 201 kHz, de manera dorsal. L'estudi del *TS* per a la determinació de la grandària queda limitat a la zona superior del banc, on es poden obtenir deteccions de peixos aïllats, sent inviable la seua avaluació a majors distàncies on l'elevada densitat del banc fa inevitable la detecció d'ecos procedents de múltiples blancs. L'abundància de peixos s'avalua mitjançant la integració de l'energia retrodispersada pel banc.

Al Capítol 6 es proposa un mètode alternatiu per a l'estimació de la grandària dels peixos basat en la mesura de la diferència del temps de vol entre dos màxims d'un mateix eco, que corresponen a les reflexions del pols transmès en diferents parts del cos del peix. S'avalua el mètode per l'aspecte ventral i dorsal de l'orada, emprant un transductor single-beam a 200 kHz.

Finalment, en el Capítol 7 es caracteritza la resposta acústica del pinso en funció del seu calibre emprant una ecosonda científica a 200 kHz, que permetrà la detecció i identificació de la caiguda del pinso sobrant en gàbies en condicions de producció.

Abstract

Marine aquaculture production has increased considerably in recent years due to the scarcity of fisheries resources and increased demand. In 2013 world production reached 173,062 tons of gilthead sea bream (*Sparus aurata*) and 161,059 tons of European sea bass (*Dicentrarchus labrax*), produced mainly in Greece, Turkey, Spain and Italy. Gilthead sea bream and European sea bass are among the most interesting species for cultivation in Spain. Its cultivation area is limited to temperate waters and is usually cultivated in floating cages systems. Fish growth and biomass estimations are essential to prepare the production plan of fish farms, as well as to organize and to perform management operations such as sorting and distribution of fish, downloading new lots, harvesting schedules, calculating daily feeding rates, etc. It is necessary to optimize these production processes, not only to improve economic profitability but also to minimize the environmental impact of the facilities. These processes include feeding strategy, growth and population monitoring. The daily dose of feed is estimated from the estimated biomass and different factors such as the average size of the fish, the season, the water temperature, etc. Therefore, size and number of fish estimations are crucial for the proper management of production.

Acoustic techniques are most appropriate for remote sensing in the water, because acoustic waves travel long distances compared with electromagnetic waves which are attenuated very quickly. Light does not penetrate more than a couple of hundred metres below the water surface, even less when the medium is loaded with suspended solids or biota such as plankton. Thus, acoustic instruments that transmit and receive sound waves

are able to detect fish or other far objects that are beyond the field of view. For this reason, acoustic technologies have had a major impact on the detection of fish. For several decades acoustic methods have been employed to detect shoals of fish, so that the information provided by sonars and echo sounders is an important factor in the efficiency of current fishing operations.

Today acousticians are investigating ways to accurately determine the biomass in cages by noninvasive techniques, which go through the estimation of fish abundance and size distribution. Similarly, these techniques can allow the study of the behavior school in floating cages, the control of the feeding process and even the species identification. The methodology of scientific or commercial echo sounders have been directed mainly towards pelagic fishing, and it is necessary to evaluate whether the equipment and algorithms can be applied in the control of marine aquaculture farms.

In order to evaluate the biomass of fish in cages, two techniques for estimating size are evaluated in this thesis, whilst the study of energy returned by the school of fish is addressed to estimate abundance, as discussed in Chapter 1. Also the acoustic response of pellets by size is characterized.

In Chapter 2 general information about gilthead sea bream and European sea bass and their farming in floating cages is included, in order to facilitate the understanding of the behavior of animals and the interpretation of the acoustic field scattered by their bodies. The basic concepts and formulations used in acoustics to estimate biomass are described in Chapter 3, which are useful for understanding this thesis. A homogeneous, isotropic and non-dispersive medium is assumed, in which pressure variations are of small amplitude, so that the nonlinear effects can be neglected. Sonar equation is approached from the study of the propagation of a sound wave in a fluid and from the dispersion of the sound field produced by a target. The electroacoustic transducer parameters are also discussed. The necessary concepts for size and abundance estimations from energy returned by fish are included. Besides the expressions used by two of the most commercialized scientific echo sounders, the Simrad EK60 and DT-X Biosonics, are summarized.

In Chapter 4 the suitability of using scientific sounders for estimating size from echo detection from individual targets is studied, with the peculiarity that fish are close to transducer. Ventral and dorsal aspects of the target strength (TS) are measured for five different sizes of gilthead sea bream at a frequency of 200 kHz. The measurements are carried out in a small distance range, similar to the distances involved under production conditions to detect single fish. TS measurements at close distances to transducer imply a series of complications and uncertainties primarily due to the near field of the fish, compensation of propagation losses of the acoustic wave, determination of incidence angle of the backscattered sound field and alteration of echo envelope caused by the finite size of fish. The relationship between TS and size will allow indirect estimation of fish size from acoustic measurements.

In Chapter 5, applicability of scientific echo sounders for estimation of average size and abundance of fish in cages of gilt head sea bream and European sea bass in production conditions, which are characterized by a reduced distance between transducer and fish as well as high densities, is evaluated. Two frequencies, 123 and 201 kHz, are used to evaluate dorsal aspect of *TS*. The study of *TS* for determining fish size is limited to the volume above the shoal where detections from isolated fish are obtained, being unviable the evaluation at greater distances where the high density of school hinders the echo detection from multiple targets. The abundance of fish is evaluated by integrating energy backscattered by the school.

In Chapter 6 an alternative method for estimating fish size is proposed, based on measurement of the difference of flight time between two peaks of the same echo, which correspond to reflections of the pulse transmitted in different parts of fish body. The method is evaluated for ventral and dorsal aspect of gilthead sea bream, using a single-beam transducer operating at 200 kHz.

Finally, in Chapter 7 the acoustic response of pellets versus their size is measured using a scientific echo sounder working at 200 kHz, enabling the detection and identification of pellets fall in cages under production conditions.

1

Introducción

1.1. MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS

En piscicultura el valor de la biomasa es el principal activo contable de las empresas. El elevado precio unitario por kilo de pez, unido a ciclos de producción superiores a uno e incluso dos años causa que el conocimiento exacto de la biomasa en la granja de producción sea una información clave para la viabilidad de las empresas. De esta forma, las necesidades de las empresas productoras se basan en el conocimiento de la biomasa en tres momentos importantes de la producción: siembra, desarrollo del cultivo y las reclasificaciones y/o desdobles. Sin embargo, actualmente en el mercado no existe ningún sistema ni tecnología que permita conocer con suficiente exactitud la biomasa total de peces en una granja.

Actualmente la biomasa de una jaula se estima multiplicando el peso medio de los peces, establecido mediante muestreos manuales o mediante sistemas ópticos, por la estima del número de peces en el interior de las jaulas. Aunque es posible conocer con relativa exactitud el peso medio de los peces con un muestreo adecuado, el cálculo del número de peces es siempre una aproximación que tiene en cuenta el total de ejemplares sembrados inicialmente y las bajas registradas a lo largo del ciclo productivo, y está sujeto a graves errores que impiden una correcta cuantificación de la biomasa. El método de cálculo de la abundancia es bastante inexacto debido a que no se tienen en cuenta aquellas bajas que no quedan patentes en la instalación, es decir, aquellos peces que han

sido depredados por aves ictiófagas o incluso devorados por otros peces, como sucede en especies como la dorada donde se da el canibalismo.

Por ello, tanto empresas de base tecnológica como grupos de investigación están realizando importantes esfuerzos enfocados a desarrollar un sistema capaz de determinar, de forma automática y con un método no invasivo, la biomasa presente en las instalaciones. Con objeto de dar solución a esta cuestión, en los últimos años se viene experimentando algunos avances tecnológicos que se han ido probando en las instalaciones de cultivo desarrolladas en mar, los cuales están contribuyendo a que la acuicultura marina sea una actividad más segura y rentable.

Entre estas tecnologías se encuentran los sistemas de visión estereográfica y los sistemas tipo marco, basados en tecnologías ópticas y comercializados en los últimos años, así como las técnicas acústicas, que contribuyen a mejorar la gestión de la producción en las instalaciones. Aunque los avances técnicos realizados hasta la fecha consiguen determinar la talla de forma precisa, no han logrado resultados en cuanto a estimación de biomasa total se refiere.

Las tecnologías ópticas, basadas en el uso de cámaras estereoscópicas o sistemas tipo marco, permiten determinar la talla media de forma suficientemente precisa. Estas técnicas no invasivas suponen un gran avance respecto a los muestreos manuales llevados a cabo para determinar el tamaño de los peces, que constituyen un aumento en el nivel de estrés de los peces empeorando el bienestar del animal y conlleva un sobrecoste en el manejo de la producción, disminuyendo así la rentabilidad de la actividad. Sin embargo, aun no se ha desarrollado la metodología necesaria que permita conocer de manera exacta la abundancia de peces en el interior de una jaula flotante. Las técnicas acústicas parecen ser una buena elección tanto para la estimación de la talla como de la abundancia de peces en una jaula, pues presentan ciertas ventajas frente a los sistemas ópticos. Según la literatura permiten estimar el tamaño y la abundancia empleando una ecosonda científica, y son capaces de monitorizar el comportamiento del cardumen de peces, pudiendo identificar conductas anómalas debidas a fugas, presencia de depredadores, etc. Mientras que los sistemas ópticos ven limitados su funcionalidad por diversos factores como la turbidez del agua, la luminosidad o el alcance máximo, que afectan notablemente a la calidad de la imagen, además de manejar un volumen elevado de datos y precisar de un procesado complejo y de difícil automatización.

Con el fin de conocer la biomasa total de peces en una jaula flotante de acuicultura marina, en esta tesis se evalúan diferentes metodologías acústicas no invasivas para la estimación de la talla y la abundancia de peces. La determinación del tamaño medio de los peces se aborda mediante dos metodologías diferentes, el estudio clásico del *TS* que evalúa la energía devuelta por un pez con la particularidad de que los peces se encuentran muy próximos al transductor, y el análisis de la envolvente de la forma de onda del eco registrada a una elevada frecuencia de muestreo y debida al uso de pulsos de corta duración. Y el número de peces se evalúa mediante el estudio del *Sv*, que cuantifica la

energía acústica devuelta por el cardumen, aplicada a cortas distancias y para densidades en general mayores a las observadas en bancos de peces en libertad.

2

Generalidades de la dorada y la lubina

En este Capítulo se recoge la información básica sobre la anatomía de la dorada y la lubina, su distribución geográfica, ecología y reproducción, así como nociones elementales sobre el cultivo intensivo de estas especies y datos de producción, que facilitan la interpretación de los datos acústicos y la comprensión del comportamiento de los animales.

2.1. DORADA

La dorada, *Sparus aurata* (Linnaeus, 1758), es un perciforme perteneciente a la familia de los espáridos (Fam. Sparidae), que en inglés recibe el nombre del gilthead sea bream. Según las estadísticas sobre acuicultura de la FAO, en 2013 esta especie de pez marino es la más cultivada en el mar Mediterráneo.

Es una especie muy apropiada para la acuicultura extensiva en el Mediterráneo, debido a su buen precio de mercado, la alta tasa de supervivencia y los hábitos de alimentación, pues ocupa un puesto relativamente bajo dentro de la cadena trófica (FAO, 2015).

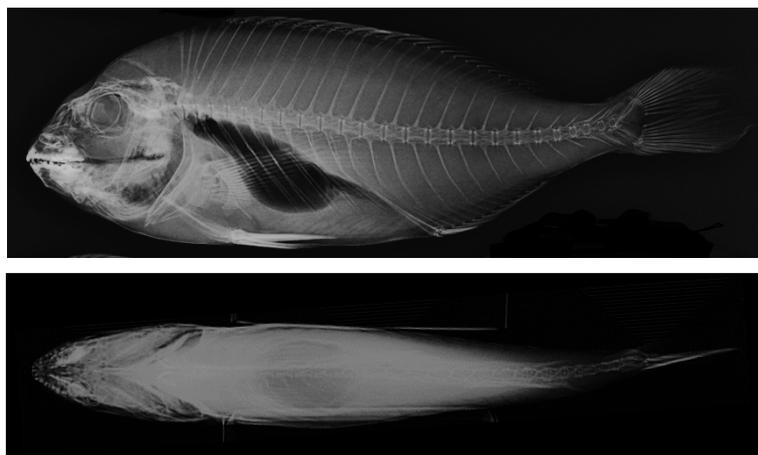
Presenta una banda dorada entre los ojos, que se hace más patente en individuos adultos, sobre la que aparece otra banda de color negro, una mancha negra en el origen de la línea lateral y una banda rosada en el borde de la mitad inferior del opérculo. El cuerpo es ovalado, alto y comprimido lateralmente. Es de color gris plateado, más oscuro en el dorso y bastante claro en la zona ventral (Figura 2.1).



Fuente: FAO (2012)

Figura 2.1. Fotografía de un ejemplar de dorada (*Sparus aurata*, L. 1758)

Desde el punto de vista acústico, el aspecto más relevante de su anatomía es la presencia de la vejiga natatoria y el esqueleto óseo, cuyas disposiciones se puede apreciar en la imagen obtenida mediante rayos X que se muestra en la Figura 2.2. La dorada es un pez fisoclisto, es decir, presenta una vejiga natatoria cerrada capaz de ajustar su volumen mediante una glándula que permite el intercambio de gas con el exterior. La vejiga ha de ser inflada inicialmente por la larva en sus primeros días de vida para hacerla funcional y comenzar su desarrollo. Después va adquiriendo forma de una vesícula elíptica que se va estirando progresivamente hacia atrás en el alevín, alcanzando su longitud máxima (alrededor del 20-30% de la longitud total del pez) cuando este mide unos 5 cm (Ortega, 2008).



Fuente: Propia (2014)

Figura 2.2. Radiografía de una dorada de talla comercial, con una longitud de 29 cm y una masa de 420 g.

La dorada es común en todo el mar Mediterráneo, y está presente también por las costas del océano Atlántico Oriental desde Guinea y Senegal hasta el Cantábrico y el sur de las islas Británicas (Figura 2.3). Es una especie marina muy común en fondos rocosos y praderas de algas de *Posidonia oceanica*, aunque también es posible encontrarla sobre fondos arenosos o fangosos. Los individuos jóvenes permanecen en aguas relativamente poco profundas de hasta 30 m, mientras que los adultos pueden alcanzar profundidades de hasta 100-150 m, aunque generalmente no superan los 50 m. A pesar de ser una especie gregaria, suele vivir en solitario o formando grupos poco numerosos. Sin embargo, en las migraciones reproductivas pueden llegar a formar grupos de miles de individuos.



Fuente: FAO (2015)

Figura 2.3. Mapa de distribución de la dorada.

Es un pez euritermo y eurihalino, es decir, soporta considerables variaciones de temperatura y salinidad. Son animales carnívoros, que se alimentan principalmente a base de moluscos bivalvos y pequeños peces o cefalópodos (pulpos, calamares, sepias y nautilus). Es una especie hermafrodita protándrica. Durante el primer año de vida suelen ser inmaduros, aunque algunos individuos pueden llegar a madurar como machos. La primera maduración sexual suele darse durante el segundo año, cuando presentan longitudes entre 20 y 30 cm, momento en que desarrolla la parte ventral de la gónada y produce testículos funcionales. Al final de esta primera etapa reproductora, todos los individuos sufren un proceso de inversión sexual. Aproximadamente el 80% de la población concluye la inversión y a partir del tercer año serán hembras, cuando alcanzan longitudes entre 33 y 40 cm. El 20% restante interrumpe el proceso y permanece como machos. Las hembras desovan de forma intermitente, pudiendo realizar puestas de hasta 20000-80000 huevos al día por un periodo de hasta 4 meses. Sin embargo, en cautividad el cambio de sexo está condicionado por factores sociales y hormonales (Ortega, 2008).

La reproducción artificial se logró en Italia en 1981-1982, y la producción a gran escala de juveniles en 1988-1989 en España, Italia y Grecia. Esta especie mostró muy rápidamente una alta adaptabilidad a las condiciones de crianza intensiva tanto en estanques como en jaulas, Inicialmente el preengorde y engorde se realizaba en esteros de forma extensiva o semiextensiva, y más adelante aparecieron algunas instalaciones de cultivo intensivo en tierra y las primeras jaulas, que se colocaron en sitios protegidos. En España se expandió el uso de jaulas flotantes en mar abierto a finales de los 90 (Ortega, 2008).

En cultivo intensivo el engorde suele dividirse en dos fases: un primer preengorde desde 1-2 g hasta 15-20g, y el engorde en sí que va desde 15-20 g hasta la talla comercial (350-400 g). El preengorde normalmente se realiza en tanques en tierra, alimentándolos a base de pienso seco hasta que alcanzan un peso de 15-20 g, momento en que son transferidos a las instalaciones de engorde. El engorde en jaulas marinas es simple y económico, y es el sistema normalmente utilizado en el mar Mediterráneo.

La dorada tarda entre 13 y 16 meses en alcanzar la talla comercial, dependiendo de la época de inicio del engorde. Se alimentan exclusivamente de pienso seco comercial, consumiendo al día entre el 0.5 y el 3.5% de su peso según el tamaño de los peces y la temperatura del agua. La estrategia de alimentación depende de la empresa, y el cálculo de la dosis diaria de pienso se suele obtener mediante unas tablas de alimentación o programas informáticos suministrados por las empresas productoras de pienso, aunque la cantidad ideal de pienso es la suministrada a saciedad.

Esta especie es relativamente fácil de manejar y clasificar. La mortalidad durante el engorde suele ser baja, entorno al 5-10%. El factor de condición (*FC*), que es un índice que relaciona la longitud y la masa, normalmente varía entre 1.5 y 2.

En la actualidad el engorde se realiza fundamentalmente en jaulas. Las jaulas están construidas con polietileno de alta densidad, con una doble corona de flotación y una barandilla superior. Normalmente poseen diámetros entre 16 y 25 m y una profundidad de 10-12 m, por lo que alcanzan volúmenes de 2000-6000 m³. Al inicio del engorde, cuando los ejemplares presentan una masa de unos 20 g, se emplean mallas con una luz de 10 mm, que posteriormente son sustituidas por unas mayores de 15 y 25 mm.

A causa de diferentes factores (preservación de los ecosistemas litorales, búsqueda de aguas de mayor calidad, interacciones con el turismo, etc.) se tiende a ubicar las instalaciones a distancias de la costa que pueden alcanzar varias millas y agrupadas en polígonos. Esto supone un mayor coste inicial, aunque para disminuir el coste de producción cada vez se colocan un mayor número de jaulas y de mayor tamaño.

La máxima densidad en jaulas es de 20 kg/m³, situándose normalmente entre 10 y 15 kg/m³. Cada jaula puede contener entre 30 y 120 Tn de dorada, con lo que las operaciones de pesca en las jaulas, o también llamadas de despesque, son complejas y obligan a pescar dentro de la jaula con el consiguiente estrés para los peces.

La aparición de sistemas de alimentación automáticos está mejorando los índices de conversión y reduciendo la pérdida de pienso. Estos sistemas están en continua evolución para ajustar el suministro de pienso a la demanda de los peces.

Su producción mundial anual ha aumentado regularmente, alcanzando una producción de 173062 Tn en 2013 que supera con creces a las cantidades procedentes de pescas, que suman un total de 7224 Tn (FAO, 2015). La producción de dorada en el Mediterráneo ha experimentado un gran crecimiento en los últimos años, que ha pasado de apenas 4500 Tn en 1990 a unas de 158500 Tn en 2013. El principal país productor es Grecia (42.4%), seguida de Turquía (20.6%) y España (10.9%). La producción de estos tres países junto con Egipto, Túnez e Italia supone el 90.3% de la producción acuícola mundial, según datos de la FAO de 2013.



Fuente: FAO (2006)

Figura 2.4. Principales países productores de dorada.

La producción en España sufrió un crecimiento hasta 2009, con una producción de 23219 Tn. La producción se redujo un 12.3% en 2010 (20358 Tn) y un 34.9% en 2011 (15118 Tn) respecto al máximo de 2009, y aumentó un 9.8% (16607 Tn) en 2012 y un 25.5% (18897) en 2013 respecto al mínimo de 2011. En 2014 la dorada fue la segunda especie piscícola marina más cultivada en España, y la primera en años anteriores, con una producción de 16068 Tn. La Comunidad Valenciana encabezó la producción (51.8%), seguida de Murcia (27.5%), Canarias (11.7%), Andalucía (4.9%) y Cataluña (4.1%), según datos del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2015).

2.2. LUBINA

La lubina, *Dicentrarchus labrax* (Linnaeus, 1758), es un perciforme de la familia de los morónidos (Fam. Moronidae), que en inglés recibe el nombre de European sea bass. Junto con la dorada es el pez más producido en la acuicultura mediterránea, con una producción que superó 160000 Tn en 2013 (FAO, 2015).

Presenta un cuerpo alargado y provisto de grandes escamas. El color es gris plomizo, más oscuro en la parte dorsal. La parte ventral es amarillenta y los laterales son plateados. Estos colores pueden variar en función del área de distribución y los fondos en que se encuentre. Tiene una mancha negra difusa en el ángulo superior del opérculo (Ortega, 2012).

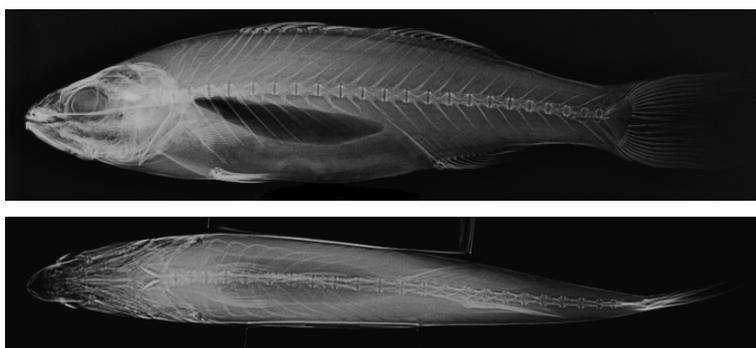


Fuente: AlphaSouth SARL (2012)

Figura 2.5 . Fotografía de un ejemplar de lubina (*Dicentrarchus labrax*, L. 1758)

Puede alcanzar tallas de hasta 80-100 cm y pesos de más de 10 kg, siendo más comunes las tallas entre 40 y 55 cm y pesos entre 2 y 5 kg. A pesar de que las hembras tienen la cabeza más larga y el cuerpo más alto que los machos, no presentan dimorfismo sexual. Sin embargo, crecen más rápidamente y alcanzan tamaños mayores.

Del mismo modo que sucede con la dorada, la vejiga y el esqueleto óseo son los aspectos más relevantes desde el punto de vista acústico, cuya disposición se puede apreciar en la Figura 2.6. La lubina es un pez fisoclisto, pero al igual que sucede con alguno de ellos son fisóstomos de forma transitoria en su estado larvario, momento en que poseen un ducto neumático temporal que emplean para tragar aire en la superficie del agua y activar la vejiga natatoria mediante su inflado, como sucede con la dorada (Peruzzi *et al.*, 2007).



Fuente: Propia

Figura 2.6. Radiografía de una lubina de tamaño comercial.

Se extiende por todo el mar Mediterráneo, por el mar Negro, y en el Atlántico Este desde Noruega hasta Marruecos, pudiendo alcanzar las costas de Senegal (Figura 2.7). Suele encontrarse en aguas costeras poco profundas, normalmente agrupadas durante su juventud y solitarias o en parejas durante su estado adulto. Pueden encontrarse cerca de costas rocosas, y en desembocaduras de ríos y salinas, penetrando en estuarios y en ocasiones remontando parcialmente los ríos. Es muy voraz, se nutre de pequeños peces e invertebrados de todo tipo.



Fuente: FAO (2015)

Figura 2.7. Mapa de distribución de la lubina.

Es una especie muy eurihalina y euriterma. Es una especie gonocórica, que posee sexos separados durante todo su ciclo vital, y no presenta dimorfismo sexual. En el Mediterráneo los machos suelen alcanzar la madurez sexual a partir del segundo año de vida (300-400 g), mientras que las hembras no lo hacen hasta el tercer o cuarto año (500-600 g). Su gónada madura de forma sincrona, realizando una sola puesta al año. Pueden generar hasta 300000 huevos/kg de hembra. La puesta se realiza desde enero hasta marzo, pudiendo variar en función de la latitud. En condiciones de cultivo la mayoría de peces (70-80%) se desarrollan como machos. Algunos autores relacionan este hecho con las altas temperaturas que experimentan en la época de diferenciación sexual.

A finales de los 70 se desarrollaron técnicas fiables de producción masiva de juveniles de lubina en la mayoría de países mediterráneos. Fue la primera especie marina no perteneciente a la familia de los salmónidos cultivada comercialmente en Europa. Inicialmente se engordaba de forma extensiva en lagunas costeras y esteros, aunque en

la actualidad casi toda la producción procede de cultivo intensivo en jaulas marinas situadas en mar abierto.

Su crecimiento es algo más lento que el de la dorada, pero su valor comercial es mayor. Su manejo es más complejo debido a que se estresan con facilidad, son relativamente fotófobas y tienen un comportamiento más agresivo. Si se enmallan es muy difícil que puedan soltarse y cualquier roce o pequeña herida supone una puerta de entrada de infecciones, por lo que se ha de tener mucho cuidado en su manejo, especialmente cuando la temperatura es elevada (Ortega, 2012).

Al igual que sucede con la dorada, para su cultivo en jaulas es necesario preengordar los juveniles hasta los 10-20 g antes de transportarlos a las jaulas. Normalmente el preengorde se realiza en tanques situados en tierra alimentándolas con pienso seco, y el engorde se realiza mayoritariamente en jaulas en mar abierto.

En España la talla comercial es de unos 350-500 g, que tarda en alcanzar entre 12 y 15 meses, aunque puede oscilar entre 14 y 18 meses en el Mediterráneo, e incluso más según la época del año en que se inicia el engorde. Al igual que la dorada, su crecimiento se ve ralentizado durante los meses de diciembre a abril, aunque de forma menos acusada.

Se alimentan a base de piensos secos comerciales, siendo más ampliamente utilizados los piensos extruidos de alto contenido energético. El número de tomas y la dosis varía según su tamaño y la temperatura del agua, proporcionándoles al día entre el 0.5% y el 3.0% de su peso. Prefieren comer al amanecer o al anochecer, no les gusta hacerlo en las horas de máxima radiación solar, y suelen hacerlo a media agua. La cantidad de pienso a suministrar se suele obtener mediante unas tablas de alimentación o programas informáticos suministrados por las empresas productoras de pienso, aunque la cantidad ideal de pienso es la suministrada a saciedad.

La mortalidad durante el engorde suele ser baja (5-10%), con una tasa ligeramente superior al de la dorada. Su factor de condición está comprendido entre 1 y 1.5, siendo algo menor que el de la dorada debido a su forma más alargada.

En la actualidad el engorde se realiza fundamentalmente en jaulas de iguales características que las empleadas en el cultivo de la dorada. Sin embargo, la luz de malla empleada es menor que la empleada en doradas (6, 12 y 20 mm).

Al igual que sucede con la dorada, se tiende a ubicar las instalaciones alejadas a varias millas de la costa. Esto supone un mayor coste inicial, por lo que se tiende a colocar un mayor número de jaulas y de mayor tamaño para disminuir los costes de producción.

La máxima densidad en jaulas es de 20 kg/m³, y cada jaula puede contener entre 30 y 120 Tn de lubina. Las operaciones de despesque son complejas y obligan a pescar dentro de la jaula con el consiguiente estrés para los peces.

Su producción mundial anual ha aumentado de forma regular hasta la actualidad, alcanzando una producción de 161059 Tn en 2013 que supera en gran medida a las cantidades procedentes de pescas, que sumaron un total de 9573 Tn (FAO, 2015).

La producción de lubina en el Mediterráneo ha ido creciendo en los últimos años, de tan solo 4000 Tn en 1990 a más de 140000 Tn en 2013, siendo la segunda especie más cultivada en el Mediterráneo (FAO, 2015).

Los principales países productores son Turquía (42.2%), Grecia (30.2%), seguida de España (9.3%), Egipto (7.7%) e Italia (4.2%). La producción de estos países supone el 93.4% de la producción mundial, según datos para 2013 de la FAO (2015).



Fuente: FAO (2006)

Figura 2.8. Principales países productores de lubina.

La producción ha ido aumentando en España hasta 2011, con una producción de 17548 Tn, a excepción del año 2010 en que se produjo una caída del 9.2% respecto al año anterior. En 2012 la producción nacional se vio reducida un 17.6% respecto al máximo histórico alcanzado en 2011 y en 2013 un 14.8%. En España su cultivo no está tan extendido como el de la dorada, aunque su valor económico sea superior y el cultivo larvario más sencillo. Sin embargo, existe una tendencia al cambio en los últimos años, debido a la bajada del precio de la dorada. En 2014 la lubina fue la primera especie piscícola marina más cultivada en España. En 2014 Murcia encabezó la producción (33.4%), seguida de Canarias (26.9%), Comunidad Valenciana (23.5%), Andalucía (16.0%) y Cataluña (0.4%), según datos del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2015).

3

Fundamentos teóricos en acústica activa para la estimación de biomasa de peces

El primer método empleado para la detección acústica de peces fue citado en la literatura científica en 1929, cuando observaron que la amplitud captada por el transductor cambiaba siguiendo las variaciones del número de peces insonificados por el haz acústico. Después de la Segunda Guerra Mundial, en los años 50, se produjeron grandes avances en aplicaciones pesqueras de las ecosondas, que fueron empleadas para la estimación de la abundancia relativa de peces mediante el conteo de trazas registradas en el papel impreso de la ecosonda. En la década de los 60 los esfuerzos se dirigieron al conteo y a la estimación del tamaño de los peces a partir de sus ecos acústicos. El inicio de la evaluación cuantitativa del stock de peces mediante técnicas acústicas estuvo marcado por el uso de un integrador electrónico que procesaba los ecos de los peces. Los métodos para la estimación del stock de peces fueron progresando en las décadas siguientes, debido a la disposición de equipos más estables y fiables, y un procesamiento de las señales de ecos mucho más rápido y preciso. Cada vez más se realizan estudios del comportamiento de los peces, orientación, densidad, distribución y cualquier otro factor que pueda afectar a los resultados obtenidos mediante técnicas acústicas (Johannesson & Mitson, 1983).

Hoy en día se emplean ecosondas científicas para la estimación de stocks en pesquerías. Se emite un pulso acústico y las ondas sonoras retrodispersadas por los bancos de peces son registradas y procesadas por la ecosonda. Se evalúa la energía acústica retrodispersada por un volumen de dispersores para estimaciones de la abundancia,

mientras que para la estimación de la talla se estudia el sonido devuelto por ejemplares individuales.

A continuación se reúnen los conceptos y formulaciones empleadas en acústica submarina para la comprensión y el desarrollo de esta tesis. En todo momento se asume un medio homogéneo, isotrópico y no dispersivo, en el que las variaciones de presión acústica son muy inferiores a la presión ambiente (Medwin & Clay, 1997), y las ondas de presión sonora son de pequeña amplitud, de forma que pueden despreciarse los efectos no lineales. En la Sección 3.1 se resumen las definiciones y formulaciones más relevantes en acústica submarina y en acústica activa para la estimación de biomasa. Se describe la propagación de una onda acústica en un fluido, los parámetros de un transductor electroacústico, la dispersión acústica producida por un blanco, la ecuación del sónar, así como las expresiones utilizadas para la estimación de la talla y la biomasa de peces mediante el uso de ecosondas científicas. En las Secciones 3.2 y 3.3 se detallan las consideraciones a tener en cuenta en el uso de las ecosondas EK60 de Simrad y DT-X de Biosonics. Se incluyen las expresiones empleadas por estas ecosondas y se describe el proceso de calibración recomendado por Simrad. Y por último, en la Sección 3.4 se detallan los aspectos a tener en cuenta en las mediciones realizadas con ecosondas científicas a cortas distancias.

3.1. CONCEPTOS BÁSICOS

3.1.1. PROPAGACIÓN DE UNA ONDA ACÚSTICA

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 onda acústica procedente de un transductor acústico o de un blanco aislado diverge esféricamente en campo lejano, de forma que la presión disminuye inversamente proporcional con la distancia a la fuente. Además la amplitud de la onda de presión disminuye de forma exponencial con la distancia debido a las pérdidas por la absorción del medio. Considerando una fuente armónica, la presión acústica p en un punto del campo situado a una distancia R de la fuente, localizado en campo lejano, viene dada por la siguiente expresión

$$p(R, \theta, \varphi) = p(R_0, \theta, \varphi) \frac{R_0}{R} e^{-\beta(R-R_0)} e^{-j \cdot k(R-R_0)} \quad 3.1$$

donde R_0 es la distancia de referencia a la fuente (normalmente 1 m), j es la unidad imaginaria, $k = \omega / c$ 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).

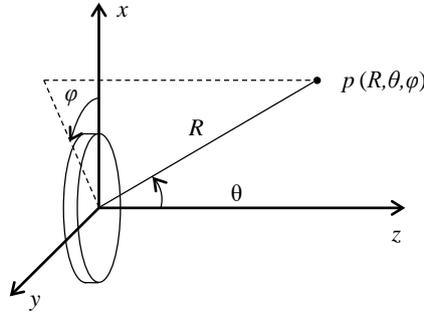


Figura 3.1. Sistema de coordenadas empleado para la descripción de la propagación de una onda acústica, donde la cara radiante de la fuente queda centrada en el origen de coordenadas.

La presión acústica en un punto del campo también se puede expresar en dB mediante el nivel de presión acústica LP , que es una medida en escala logarítmica de la presión en un punto respecto a una presión de referencia, y queda definida por

$$LP(R, \theta, \varphi) = 20 \log \frac{p_{rms}(R, \theta, \varphi)}{p_{ref}} \quad 3.2$$

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

En condiciones de campo lejano, la intensidad I de la onda acústica es proporcional al cuadrado de la presión y se puede expresar como

$$I(R, \theta, \varphi) = \frac{P_{rms}^2(R, \theta, \varphi)}{\rho_0 \cdot c} \quad 3.3$$

donde ρ_0 es la densidad del medio de propagación. Para una fuente omnidireccional la intensidad de una onda acústica propagándose desde la fuente puede describirse según

$$I(R) = \frac{W}{4 \cdot \pi \cdot R^2} e^{-2 \cdot \beta \cdot R} \quad 3.4$$

siendo W la potencia acústica radiada por la fuente.

Al igual que la presión la intensidad puede expresarse en dB mediante el nivel de intensidad acústica LI , que es una medida logarítmica de la intensidad en un punto del campo respecto a una intensidad de referencia y se define como

$$LI(R, \theta, \varphi) = 10 \log \frac{I(R, \theta, \varphi)}{I_{ref}} \quad 3.5$$

siendo I_{ref} la intensidad de referencia. Se puede demostrar que la relación entre el LP y el LI viene dada por

$$LI(R, \theta, \varphi) = LP(R, \theta, \varphi) + 10 \log \frac{P_{ref}^2}{\rho_0 \cdot c \cdot I_{ref}} \quad 3.6$$

Normalmente, se emplea una intensidad de referencia correspondiente a una onda acústica de 1 μ Pa de presión eficaz. Por tanto, el uso de esta referencia implica una equivalencia entre el nivel de presión y el nivel de intensidad (Kinsler *et al.*, 1999).

La intensidad de una onda acústica propagándose a través de un medio se ve reducida al alejarse de la fuente debido a la divergencia geométrica y a la absorción del medio. Para una onda con divergencia esférica, la reducción de la intensidad o las pérdidas por propagación pueden calcularse a partir de las Ecuaciones 3.1 y 3.3, de forma que

$$\frac{I(R, \theta, \varphi)}{I(R_0, \theta, \varphi)} = \left(\frac{R_0}{R} \right)^2 e^{-2 \cdot \beta \cdot (R - R_0)} \quad 3.7$$

En ocasiones, considerando una distancia de referencia de 1 m y puesto que la absorción del agua es mucho menor que 1, se puede emplear la siguiente aproximación

$$\frac{I(R, \theta, \varphi)}{I(R_0, \theta, \varphi)} \approx \frac{1}{R^2} e^{-2\beta R} \quad 3.8$$

Expresando la Ecuación 3.7 de forma logarítmica, las pérdidas debidas a la propagación TL pueden formularse de la siguiente manera

$$TL = -10 \log \frac{I(R, \theta, \varphi)}{I(R_0, \theta, \varphi)} = 20 \log \frac{R}{R_0} + \alpha (R - R_0) \quad 3.9$$

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).

3.1.2. TRANSDUCTOR ACÚSTICO

Los transductores acústicos empleados en ecosondas científicas son de tipo recíproco, por lo que son capaces de desempeñar dos funciones. En primer lugar, convierten la energía eléctrica aplicada en bornes en un pulso acústico que transmiten al medio. Y en segundo lugar, cuando un pulso es reflejado por un obstáculo de vuelta al transductor se encargan de convertir la energía acústica recibida en una señal eléctrica que se envía al receptor.

El transductor electroacústico no es completamente eficiente, pues parte de la energía se pierde en la conversión de energía eléctrica a energía acústica, y viceversa. La eficiencia de un transductor puede describirse mediante su rendimiento o sensibilidad.

El rendimiento η se define como la relación entre la potencia acústica radiada por el transductor y la potencia eléctrica que se le entrega W_{Tx}

$$\eta = \frac{W}{W_{Tx}} \quad 3.10$$

En régimen lineal el transductor radia una onda acústica con una amplitud proporcional a su sensibilidad en emisión, y durante la captación de ondas acústicas genera una señal eléctrica proporcional a la sensibilidad en recepción. Durante la emisión la sensibilidad del transductor definida en tensión $S_{Tx,v}$ se obtiene como el cociente de la amplitud de la presión acústica, extrapolada hacia atrás desde el campo lejano, a una distancia de

referencia sobre el eje acústico, normalmente 1 m, y la amplitud de tensión aplicada en bornes del transductor, de forma que

$$S_{Tx,v} = \frac{p_{inc}(R_0, 0, 0)}{V_{Tx}} \quad 3.11$$

donde p_{inc} es la presión generada por la fuente y V_{Tx} es la tensión aplicada al transductor. La sensibilidad también puede expresarse 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} ,

$$S_{Tx,i} = \frac{p_{inc}(R_0, 0, 0)}{I_{Tx}} \quad 3.12$$

La relación entre la sensibilidad definida en voltaje y en corriente viene dada por

$$S_{Tx,i} = S_{Tx,v} \cdot |Z_T| \quad 3.13$$

donde Z_T es la impedancia eléctrica de entrada del transductor.

Durante la recepción de ecos la relación entre la tensión generada en circuito abierto V_0 en bornes del transductor y la presión incidente en la cara del transductor p_{bs} define la sensibilidad en recepción S_{Rx} del transductor,

$$S_{Rx} = \frac{V_0}{p_{bs}} \quad 3.14$$

Para un transductor recíproco que genera ondas esféricas se 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 (Urick, 1983), cumpliéndose que

$$J = \frac{S_{Rx}}{S_{Tx,i}} = -j \frac{2 \cdot \lambda \cdot R_0}{\rho_0 \cdot c} \quad 3.15$$

donde λ es la longitud de onda. Cuando se conoce el tipo de ondas radiada por el transductor y la sensibilidad en uno de los dos sentidos, puede derivarse la sensibilidad en el otro sentido a partir del parámetro de reciprocidad. Para ondas esféricas la relación entre las dos sensibilidades viene dada por

$$20 \log \frac{S_{Rx}}{1V/\mu Pa} = 20 \log \frac{S_{Tx,i}}{1\mu Pa/A} - 354 - 20 \log f (kHz) \quad 3.16$$

empleando una distancia de referencia de 1 m, una densidad del agua de 1000 kg/m³, y una presión de referencia de 1 μPa (Urick, 1983).

La sensibilidad de los transductores empleados en ecosondas para la detección remota es altamente dependiente de la dirección de la onda acústica. Para 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 $D(\theta, \varphi)$

$$p_{inc}(R, \theta, \varphi) = p_{inc}(R_0, \theta, \varphi) \frac{R_0}{R} e^{-\beta(R-R_0)} \sqrt{D(\theta, \varphi)} \quad 3.17$$

La función directividad, o también llamada patrón de radiación, durante la transmisión de ondas acústicas 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,

$$D(\theta, \varphi) = \left| \frac{p_{inc}(R_0, \theta, \varphi)}{p_{inc}(R_0, 0, 0)} \right|^2 \quad 3.18$$

Este parámetro proporciona una idea de 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, 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,

$$D(\theta, \varphi) = \left| \frac{V_{Rx}(\theta, \varphi)}{V_{Rx}(0, 0)} \right|^2 \quad 3.19$$

Por definición 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. En ocasiones resulta conveniente definir el patrón de directividad de forma logarítmica D_{dB} según

$$D_{dB}(\theta, \varphi) = 10 \log D(\theta, \varphi) \quad 3.20$$

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

$$D(\theta, \varphi) = \left(\frac{2 \cdot J_1(k \cdot r \cdot \sin \theta)}{k \cdot r \cdot \sin \theta} \right)^2 \quad 3.21$$

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.

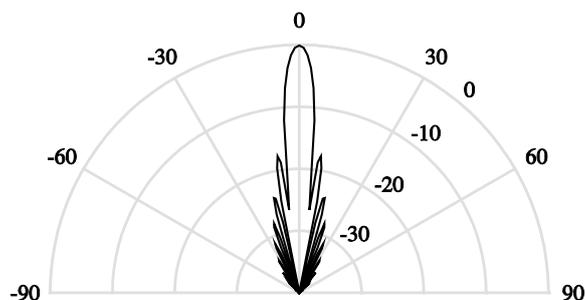


Figura 3.2. Patrón de directividad de un pistón plano circular de 4 cm de radio, montado sobre una pantalla infinita, para una frecuencia de 200 kHz ($kr = 33.5$).

Para un pistón rectangular de lados de dimensiones r_a y r_b , montado en pantalla infinita y para $r_a \approx r_b$ y $r_a \gg \lambda$, el patrón de directividad viene dado por (Sherman & Butler, 2007)

$$D(\theta, \varphi) = \left(\frac{\sin\left(\frac{k \cdot r_a \cdot \sin \theta \cdot \cos \varphi}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{k \cdot r_b \cdot \sin \theta \cdot \sin \varphi}{2}\right)}{\left(\frac{k \cdot r_a \cdot \sin \theta \cdot \cos \varphi}{2}\right) \cdot \left(\frac{k \cdot r_b \cdot \sin \theta \cdot \sin \varphi}{2}\right)} \right)^2 \quad 3.22$$

La presión de una onda acústica también puede obtenerse mediante la expresión logarítmica de la Ecuación 3.17, de forma que el nivel de presión LP en cualquier punto del campo situado en campo lejano de la fuente puede calcularse como

$$LP(R, \theta, \varphi) = SL - TL(R) + D_{dB}(\theta, \varphi) \quad 3.23$$

donde SL es el nivel de fuente, que se define como el nivel de presión generado por la fuente sobre el eje acústico a una distancia de referencia y en condiciones de campo lejano,

$$SL = 20 \log \frac{p_{rms}(R_0, 0, 0)}{p_{ref}} \quad 3.24$$

En ocasiones resulta más conveniente estimar el nivel de fuente a partir de la sensibilidad del transductor en emisión y la tensión eficaz aplicada en bornes del transductor $V_{Tx,rms}$ según (Moszyński, 2005)

$$SL = 20 \log S_{Tx,v} + 20 \log V_{Tx,rms} \quad 3.25$$

De forma alternativa, se puede demostrar que la relación entre el nivel de fuente y la potencia eléctrica entregada al transductor queda definida por la siguiente expresión

$$SL = 10 \log W_{Tx} + ID_{máx} + 10 \log \eta + 170.8 \quad 3.26$$

donde $ID_{máx}$ es el índice de directividad en la dirección de máxima radiación (Kinsler *et al.*, 1999; Moszyński, 2005; Balk & Lindem, 2011).

La directividad de un transductor también puede expresarse 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 razón entre la intensidad acústica en esa dirección y la intensidad que emitiría una fuente isotrópica I_{iso} que radiara con igual potencia

$$Q(\theta, \varphi) = \frac{I(\theta, \varphi)}{I_{iso}} \quad 3.27$$

El factor de directividad se puede expresar de forma logarítmica mediante el índice de directividad ID , que se define como

$$ID = 10 \log Q \quad 3.28$$

En la dirección de máxima radiación se cumple que

$$Q_{m\acute{a}x} = Q(0,0) = \frac{4 \cdot \pi}{\int_{4\pi} D(\theta, \varphi) \cdot d\Omega} \quad 3.29$$

$$ID_{m\acute{a}x} = 10 \log Q_{m\acute{a}x} \quad 3.30$$

donde $d\Omega$ es el diferencial del ángulo sólido. Se puede demostrar que el patrón de radiación y el factor de directividad mantienen la siguiente relación

$$Q(\theta, \varphi) = Q_{m\acute{a}x} \cdot D(\theta, \varphi) \quad 3.31$$

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

$$ID(\theta, \varphi) = ID_{m\acute{a}x} + D_{dB}(\theta, \varphi) \quad 3.32$$

Para un pistón circular de radio r , montado en pantalla infinita y $r \gg \lambda$, el $ID_{m\acute{a}x}$ se puede aproximar según las siguientes expresiones

$$ID_{m\acute{a}x} \approx 10 \log(k \cdot r)^2 \approx 45.5 - 20 \log \theta_{-3dB} \quad 3.33$$

donde θ_{-3dB} es la apertura del haz a -3 dB expresada en grados (Urick, 1983; Kinsler *et al.*, 1999; Sherman & Butler, 2007). De forma análoga, el $ID_{m\acute{a}x}$ para un pistón rectangular de dimensiones r_a y r_b , con $r_a \approx r_b$ y $r_a \gg \lambda$ se puede aproximar mediante la siguiente ecuación

$$ID_{m\acute{a}x} \approx 10 \log \frac{k^2 \cdot r_a \cdot r_b}{\pi} \approx -45.5 - 10 \log \theta_{-3dB, \beta 1} - 10 \log \theta_{-3dB, \beta 2} \quad 3.34$$

donde $\theta_{-3dB, \beta 1}$ es la apertura del haz en la dirección longitudinal y $\theta_{-3dB, \beta 2}$ en la dirección transversal, ambas expresadas en grados (Medwin & Clay, 1997; Sherman & Butler, 2007).

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

$$\theta_{-3dB} = \frac{58 \cdot \lambda}{2 \cdot r} \quad 3.35$$

donde θ_{-3dB} viene expresado en grados (Lurton, 2002; Moszyński, 2005; Sherman & Butler, 2007).

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 se define como

$$\psi = \int_{\Omega=0}^{4\pi} D^2(\theta, \varphi) \cdot d\Omega = \int_{\theta=0}^{\pi} \int_{\varphi=0}^{2\pi} D^2(\theta, \varphi) \cdot \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\varphi \quad 3.36$$

La Ecuación 3.36 se puede expresar de forma logarítmica como

$$\Psi = 10 \log \frac{\psi}{1sr} \quad 3.37$$

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

$$\Psi \approx 20 \log \frac{1}{k \cdot r} + 7.7 \approx 20 \log \frac{\theta_{-3dB}}{2} - 31.6 \quad 3.38$$

donde θ_{-3dB} viene expresado en grados (Urlick, 1983; Balk & Lindem, 2011). De igual modo, para un pistón rectangular de dimensiones r_a y r_b el ángulo equivalente puede obtenerse mediante las siguientes expresiones

$$\Psi = 10 \log \frac{\lambda^2}{4 \cdot \pi \cdot r_a \cdot r_b} + 7.4 \approx 10 \log \frac{\theta_{-3dB, \beta 1} \cdot \theta_{-3dB, \beta 2}}{4} - 31.6 \quad 3.39$$

donde $\theta_{-3dB, \beta 1}$ y $\theta_{-3dB, \beta 2}$ se expresan en grados (Urlick, 1983).

3.1.3. DISPERSIÓN ACÚSTICA

Cuando una onda acústica se encuentra con un blanco o dispersor, parte de la energía incidente es dispersada generando una onda secundaria que se propaga en todas direcciones desde el blanco. El dispersor actúa como una fuente secundaria, que reradia la energía acústica. La porción de la energía dispersada que vuelve en dirección al transductor se dice que es retrodispersada, y es la componente que proporciona el eco a la ecosonda.

El sonido dispersado por un pez depende de la relación entre su tamaño y la longitud de onda, presentando tres comportamientos más o menos diferenciados en función de esta relación. Para peces de tamaño mucho menor a la longitud de onda, la onda acústica incidente someterá 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. Cuando L es 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 (Medwin & Blue, 2005).

3.1.3.1. DISPERSOR INDIVIDUAL

Se entiende como dispersor individual un único blanco suficientemente pequeño para ser insonificado totalmente por el haz acústico del transductor, o una agrupación de blancos confinados en un volumen suficientemente pequeño de forma que la energía retrodispersada parezca proceder de un único blanco (Lunde *et al.*, 2013). La potencia dispersora de un blanco individual es independiente de las características del sistema sónar.

Para que dos o más blancos próximos puedan discriminarse han de estar separados al menos media longitud de pulso en el agua, de forma que produzcan ecos separados. Si un blanco se encuentra a una distancia R_1 del transductor y un segundo blanco se encuentra a una distancia R_2 , la mínima separación entre blancos necesaria para que puedan producir ecos separados es

$$R_2 - R_1 > \frac{c \cdot \tau}{2} \quad 3.40$$

donde τ es la duración del pulso transmitido.

Se considera un transductor acústico situado en el origen de un sistema de coordenadas esférico con coordenadas R, θ, φ , empleado para describir el campo acústico transmitido; y un dispersor individual situado en el campo lejano del transductor y centrado en el origen de coordenadas de un sistema esférico paralelo al otro sistema de coordenadas y con coordenadas R', θ', φ' , empleado para describir el campo acústico dispersado (Figura 3.3). El transductor emite un pulso acústico al medio, que al encontrarse con un blanco individual parte de su energía es dispersada en dirección de vuelta al transductor. La dirección de la onda retrodispersada viene dada por $\theta' = \pi - \theta$ y $\varphi' = \pi - \varphi$.

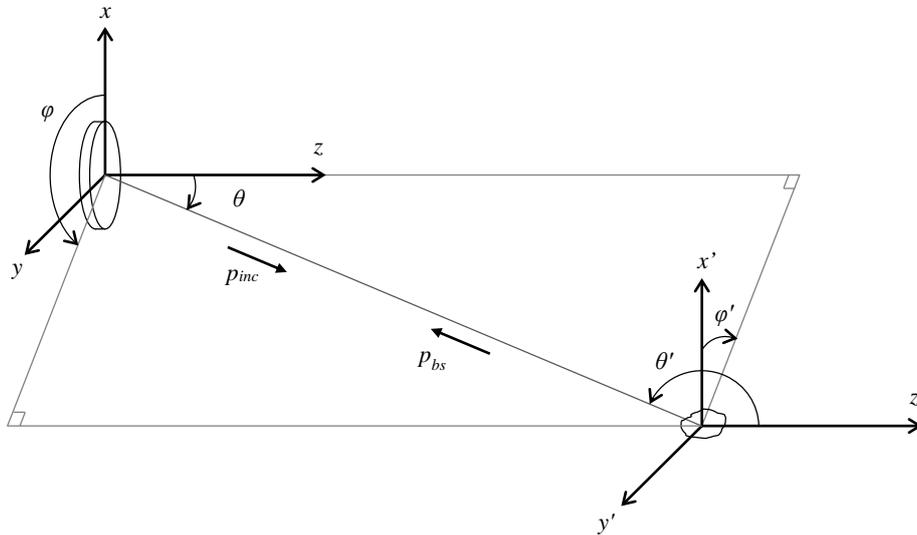


Figura 3.3. Diagrama de sistema acústico formado por un transductor y un blanco individual, situados en el origen de coordenadas de dos sistemas esféricos paralelos con coordenadas R, θ, φ y R', θ', φ' .

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 , queda definida por la Ecuación 3.3. El blanco individual dispersa la energía incidente en todas direcciones. Suponiendo que el dispersor no absorbe energía, la intensidad acústica dispersada I_s en una dirección dada a una distancia de referencia R_0' , normalmente 1 m, viene dada por

$$I_s(R_0', \theta', \varphi') = I_{inc}(R, \theta, \varphi) \cdot \sigma_s \quad 3.41$$

donde σ_s es la sección transversal de dispersión en todas direcciones de un blanco individual. Considerando tan solo la dirección de vuelta al transductor, la intensidad

acústica retrodispersada I_{bs} a una distancia de referencia R_0' en dirección de vuelta al transductor viene dada por

$$I_{bs}(R_0', \theta', \varphi') = I_{inc}(R, \theta, \varphi) \cdot \sigma_{bs} \quad 3.42$$

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

σ_{bs} es una medida de la proporción de la intensidad incidente que se dispersa en dirección de vuelta al transductor a una distancia dada del blanco. La dispersión de la onda acústica en dirección de vuelta también es llamada retrodispersión o backscattering. A partir de la Ecuación 3.42 se define la sección transversal de retrodispersión como la relación entre la intensidad retrodispersada a una distancia de referencia, normalmente 1 m, en dirección de vuelta al transductor y la intensidad incidente en el blanco (Urick, 1983)

$$\sigma_{bs} = \frac{I_s(R_0', \theta', \varphi')}{I_{inc}(R, \theta, \varphi)} \quad 3.43$$

El valor de σ_{bs} depende de la forma, el tamaño y la composición del dispersor, así como de su absorción o reflectividad y la frecuencia.

Para un blanco individual que dispersa la energía de forma isotrópica, se cumple que

$$\sigma_{bs} = \frac{\sigma_s}{4 \cdot \pi} \quad 3.44$$

La Ecuación 3.43 es adecuada cuando la onda transmitida por el transductor es una señal continua. Sin embargo, cuando se emite un pulso de duración limitada la idoneidad de la expresión de onda continua dependerá de la longitud del pulso. Si el pulso es suficientemente largo la intensidad en el punto medio del pulso será una buena aproximación al caso de onda continua. Mientras que para pulsos cortos será necesario tener en cuenta la respuesta en frecuencia del sistema y la dependencia de la dispersión acústica del blanco con la frecuencia. Según Foote (1982) y Simmonds & MacLennan (2005) la sección transversal de retrodispersión eficaz $\sigma_{bs,ef}$ es el valor promediado ponderado de σ_{bs} en función de la frecuencia sobre el ancho de banda del sónar

$$\sigma_{bs,ef} = \frac{\int_0^{\infty} \sigma_{bs}(\omega) \cdot P(\omega) \cdot d\omega}{\int_0^{\infty} P(\omega) \cdot d\omega} \quad 3.45$$

donde $\sigma_{bs}(\omega)$ es la sección transversal de retrodispersión en función de la frecuencia, y $P(\omega)$ es la respuesta en frecuencia del sistema definida en potencia de forma bidireccional.

La presión de la onda retrodispersada que vuelve al transductor a una distancia R' del dispersor puede obtenerse a partir de las Ecuaciones 3.1, 3.3, 3.17 y 3.42. Considerando que $R = R'$ y $R_0 = R_0'$, se tiene que la amplitud de la onda de presión que llega al transductor es

$$p_{bs}(R', \theta', \varphi') = p_{inc}(R_0, 0, 0) \left(\frac{R_0}{R} \right)^2 e^{-2\beta(R-R_0)} \sqrt{D(\theta, \varphi)} \sqrt{\sigma_{bs}} \quad 3.46$$

La sección transversal de retrodispersión puede expresarse de forma logarítmica y pasa a denominarse potencia del blanco o target strength TS , que se define como (Urlick, 1983)

$$TS = 10 \log \frac{I_{bs}(R_0', \theta', \varphi')}{I_{inc}(R, \theta, \varphi)} = 10 \log \sigma_{bs} \quad 3.47$$

El TS también puede expresarse en función de la denominada longitud de retrodispersión L_{bs} , de forma que

$$TS = 10 \log |L_{bs}|^2 \quad 3.48$$

La longitud de retrodispersión tiene unidades de longitud y da una idea del tamaño aparente del blanco (Medwin & Clay, 1997).

Los peces son blancos acústicos complejos debido a su anatomía y comportamiento. La forma en que un pez dispersa la energía acústica depende de su tamaño, forma y composición, así como de comportamientos de locomoción y agregación que influyen en la orientación del pez, densidades y distribuciones verticales (Ehrenberg *et al.*, 1981; Dahl & Mathisen, 1983; Clay & Heist, 1984). Sin embargo, la presencia o la ausencia de la vejiga natatoria es la característica más influyente en la dispersión acústica de un pez, ya que es responsable de hasta el 90% de la energía dispersada (Medwin & Blue, 2005). Aun considerando la misma especie y talla, la dispersión de un pez es muy variable debido a numerosos factores como cambios en su orientación, el estado fisiológico de la vejiga y otros posibles factores. En régimen de dispersión geométrica la orientación del pez tiene gran influencia en la porción de sonido dispersado, obteniendo una potencia dispersora máxima cuando la superficie de la vejiga más próxima a la fuente es perpendicular a la dirección de la onda incidente. Además, el aumento del tamaño del pez respecto a la longitud de onda hace que el pez se vuelva más directivo, aumentando

así la variabilidad del TS . El volumen de la vejiga puede verse reducido hasta un 90% por el llenado de las vísceras y hasta un 35% por la producción de gónadas (Ona, 1990b), afectando al TS observado. En cuanto al comportamiento en grupo, los individuos que se mueven de una forma más coordinada presentan intensidades de eco menos variables que agrupaciones más descoordinadas. Las reacciones de huida afectarán a la medida del TS debido a variaciones en la orientación de los individuos, la densidad del banco y las trayectorias de los peces a través del haz. Por todos estos motivos, resulta conveniente considerar la σ_{bs} o el TS como un proceso estocástico.

La dependencia del TS de los peces con su longitud se ha hallado de forma experimental para diferentes especies, comparando los resultados obtenidos en estudios acústicos con capturas. Esta dependencia es válida en el rango de frecuencias en que se observa dispersión geométrica ($L/\lambda \gg 1$), es decir, para peces relativamente grandes o altas frecuencias (Moszyński, 2005). Normalmente, se tiene una dependencia lineal del valor promedio del TS con la L en escala logarítmica y puede expresarse como

$$\overline{TS} = m \cdot \log \frac{L}{L_0} + b_m \quad 3.49$$

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. Habitualmente m toma valores próximos a 20, puesto que el TS es proporcional al área de la sección transversal del pez insonificado por el haz del transductor, que a su vez depende de L^2 más que de su volumen. 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.*, 1996; McClatchie *et al.*, 2003).

3.1.3.2. MÚLTIPLES DISPERSORES

Cuando dos o más dispersores se encuentran muy próximos sus ecos se superponen, no es posible diferenciar el eco procedente de cada uno de los blancos, y la amplitud de la señal de ecos se vuelve variable debido a la diferencia de fase de los ecos. Además si los blancos se encuentran en movimiento la amplitud variable de la señal de ecos también cambiará entre sucesivos pings. Aun así la amplitud del eco puede emplearse para estimar la densidad de dispersores insonificados por el haz del transductor (Simmonds & MacLennan, 2005).

Considerando una multitud de dispersores distribuidos en un volumen extenso, la potencia dispersora de esta agrupación dependerá del volumen muestreado V_s por el haz del transductor, que a su vez estará limitado por la apertura del haz y la duración del pulso acústico transmitido. El volumen muestreado es el volumen del haz del

transductor, situado en campo lejano de la fuente, que contiene múltiples dispersores distribuidos aleatoriamente y contribuye al nivel del eco en un instante dado. V_s corresponde al volumen de un casquete esférico con espesor igual a media longitud de pulso. Aproximando la porción del casquete insonificado por el pulso transmitido en un instante dado a un cilindro, V_s se puede calcular como

$$V_s = \frac{c \cdot \tau}{2} \cdot \psi \cdot R^2 \quad 3.50$$

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

Se asume que los dispersores se encuentran distribuidos aleatoriamente en V_s de forma que sus correspondientes ecos presentan fase aleatoria, y además se encuentran en continuo movimiento por lo que las fases en cada transmisión también son aleatorias. De igual modo se asume que los efectos de dispersión múltiple e interacción entre objetos y el exceso de absorción debido al apantallamiento del haz pueden despreciarse. Por estos motivos y según el principio de linealidad la intensidad retrodispersada por el volumen de muestreo será la suma incoherente de la intensidad del eco de cada dispersor individual (Simmonds & MacLennan, 2005; Lunde *et al.*, 2013). Por tanto, la potencia dispersora del volumen de muestreo viene dada por la suma de las secciones transversales de retrodispersión de cada dispersor situado en V_s , de forma que

$$s_v = \frac{\sum_{i=1}^N \sigma_{bs}}{V_s} \quad 3.51$$

siendo s_v es el coeficiente volumétrico de retrodispersión y N el número de dispersores. s_v representa la energía retrodispersada por unidad de volumen debida a una porción de volumen de un casquete esférico, o volumen de muestreo, de espesor igual a media longitud del pulso transmitido promediado en una dirección angular dada mediante el patrón de radiación del transductor, que se representa mediante el ángulo equivalente del haz. Dentro de un mismo ping se calcula el valor medio del s_v en la capa densa de peces definida de R_1 a R_2 . Y puesto que la amplitud varía de un ping a otro, la densidad de peces se calcula a partir del promedio de s_v para un número elevado de pings,

$$\bar{s}_v = \frac{\sum_{j=1}^K s_{vj}}{K} \quad 3.52$$

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

$$S_V = 10 \log \frac{S_v}{S_{v,ref}} \quad 3.53$$

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

Integrando 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

$$s_a = \int_{R_1}^{R_2} s_v \cdot dR \quad 3.54$$

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

$$s_A = 4 \cdot \pi \cdot 1852^2 \cdot s_a \quad 3.55$$

El principio de linealidad asume una distribución aleatoria de los dispersores en el volumen insonificado y variable de un ping a otro, y la ausencia de efectos de dispersión múltiple y apantallamiento del haz. En caso de que los peces se encuentren distribuidos de forma ordenada la energía devuelta por el conjunto podría verse alterada de forma notable. Si los peces se encuentran alineados y espaciados a intervalos de media longitud de onda, los ecos serán recibidos en fase y la energía recibida aumentará con el cuadrado del número de blancos, aunque este hecho es poco probable a las frecuencias empleadas habitualmente para la detección de peces. Las suposiciones de ausencia de efectos de dispersión múltiple y apantallamiento dejan de cumplirse para densidades de dispersores muy elevadas, por lo que tal vez puedan darse en jaulas de acuicultura. Para densidades muy elevadas la onda incidente en una nube de dispersores es dispersada repetidamente por diferentes blancos, de forma que el campo dispersado por un blanco se debe a la dispersión de la onda incidente que viaja directa desde el transductor y las ondas dispersadas por blancos cercanos. Cuando los campos dispersados por blancos próximos se vuelven dominantes es necesario considerar el efecto de dispersión múltiple. Este efecto se puede visualizar en el ecograma como una cola difusa más allá de los ecos procedentes del cardumen de peces debido a la prolongación de la señal de ecos. El efecto de apantallamiento consiste en la atenuación de la energía acústica por los dispersores más cercanos al transductor en cardúmenes muy densos, de forma que los peces más distantes contribuyen en menor medida a la señal recibida. En tal caso el principio de linealidad deja de cumplirse y se produce una subestimación de la energía de la señal de ecos. La atenuación debida al apantallamiento de la onda acústica puede cuantificarse *in situ* mediante la sección transversal de extinción σ_e , que mide la cantidad de energía incidente que es absorbida por cada dispersor (Simmonds & MacLennan, 2005).

3.1.4. ECUACIÓN DEL SÓNAR

Una ecosonda se encarga de generar un pulso eléctrico de corta duración, formado por varios ciclos de una señal sinusoidal a una frecuencia dada. Esta señal es amplificada y transmitida al medio en forma de onda acústica mediante un transductor electroacústico, que radia el sonido en un haz direccional. La onda acústica se propaga a través del agua y cuando se encuentra con un blanco la energía del pulso es reflejada o dispersada, y parte de la energía incidente en el dispersor vuelve hacia atrás en dirección al transductor. Este eco, o energía retrodispersada, es detectado por el transductor y transformado en una señal eléctrica.

En esta Sección se describe la ecuación de balance de potencias electroacústicas, tanto para un dispersor individual como para un dispersor múltiple, empleada para determinar las características de retrodispersión acústica de un blanco situado en campo lejano del transductor a partir de las respuestas del transductor durante la radiación y recepción, y de las características de propagación de la onda acústica en el medio. En el caso de múltiples dispersores se asume que los ecos dispersados por los diferentes blancos localizados en V_s presentan fase aleatoria, los efectos de dispersión múltiple e interacción entre objetos puede despreciarse, y el exceso de absorción debido al apantallamiento del haz es despreciable (Lunde *et al.*, 2013).

3.1.4.1. DISPERSOR INDIVIDUAL

Se considera un transductor acústico trabajando en régimen lineal, que radia una onda armónica en un medio fluido homogéneo, y un dispersor individual situado en campo lejano de la fuente.

La potencia eléctrica que proporciona el transductor durante la recepción de ecos W_{Rx} , debida a la incidencia de la onda acústica retrodispersada por un blanco individual en la cara activa del transductor, puede estimarse a partir de la impedancia eléctrica de entrada del circuito receptor y la lectura de la tensión registrada en bornes del receptor, según

$$W_{Rx} = \frac{1}{2} |I_{Rx}|^2 \cdot R_L = \frac{|V_{Rx}|^2 \cdot R_L}{2 \cdot |Z_L|^2} \quad 3.56$$

donde I_{Rx} y V_{Rx} son la corriente y la tensión registradas en el circuito receptor, y Z_L es la impedancia eléctrica de entrada del circuito receptor con parte real R_L ($Z_L = R_L + jX_L$) (Figura 3.4).

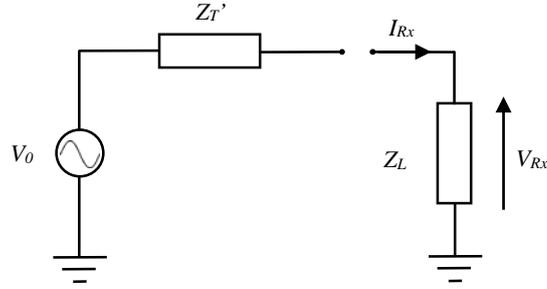


Figura 3.4. Circuito equivalente de Thevenin durante la recepción de ecos.

La relación entre la potencia eléctrica suministrada que se transfiere al transductor durante la transmisión de ondas acústicas y la potencia eléctrica que proporciona el transductor al circuito receptor durante la recepción de ecos, viene dada por la siguiente expresión

$$W_{Rx} = W_{Tx} \cdot g(\theta, \varphi) \cdot \left(\frac{e^{-2\beta R}}{4 \cdot \pi \cdot R^2} \right) \cdot \sigma_s \cdot \left(\frac{e^{-2\beta R}}{4 \cdot \pi \cdot R^2} \right) \cdot \left(\frac{\lambda^2 \cdot g(\theta, \varphi)}{4 \cdot \pi} \right) \cdot F_Z \quad 3.57$$

donde W_{Tx} es la potencia eléctrica transferida al transductor durante la transmisión de la onda acústica, g es la ganancia del transductor, y F_Z es un factor debido a la relación de impedancias eléctricas entre el transductor y el circuito receptor (Pedersen, 2006).

La potencia eléctrica suministrada al transductor durante la transmisión de ondas acústicas cumple que

$$W_{Tx} = \frac{1}{2} |I_{Tx}|^2 \cdot R_T = \frac{|V_{Tx}|^2 \cdot R_T}{2 \cdot |Z_T|^2} \quad 3.58$$

donde I_{Tx} y V_{Tx} son la corriente y la tensión eléctrica en bornes del transductor durante la transmisión de la onda acústica, y Z_T es la impedancia eléctrica de entrada del transductor con parte real R_T ($Z_T = R_T - jX_T$) (Figura 3.5).

La ganancia del transductor tiene en cuenta tanto la conversión de la energía eléctrica en energía acústica como las propiedades directivas del transductor, y se define como

$$g(\theta, \varphi) = \eta \cdot Q(\theta, \varphi) = \eta \cdot Q_{m\acute{a}x} \cdot D(\theta, \varphi) \quad 3.59$$

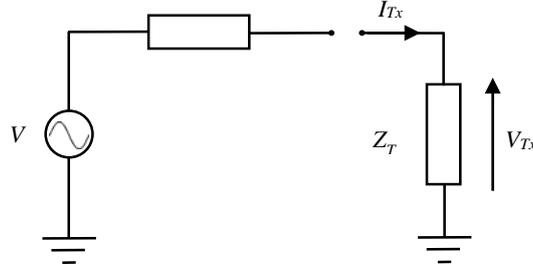


Figura 3.5. Circuito equivalente de Thevenin durante la transmisión de la onda acústica.

El área de recepción efectiva del transductor A se emplea para describir las propiedades de recepción del transductor y se relaciona con la ganancia según

$$A = \frac{\lambda^2 \cdot g(\theta, \varphi)}{4 \cdot \pi} \quad 3.60$$

El factor F_Z se debe a la relación entre la impedancia de entrada y salida del transductor y la impedancia de entrada del circuito receptor, y se calcula como

$$F_Z = \frac{4 \cdot R_T \cdot R_L}{|Z_T' + Z_L|^2} \quad 3.61$$

donde Z_T' es la impedancia eléctrica de salida del transductor. En caso de que el transductor y el circuito receptor estén diseñados para máxima transferencia de potencia y la impedancia eléctrica entrada del receptor sea igual al conjugado complejo de la impedancia de salida del transductor se tiene que $F_Z = 1$, suponiendo que la impedancia de entrada y salida del transductor son iguales.

La sección transversal de retrodispersión de un blanco individual puede obtenerse reordenando la Ecuación 3.57, de forma que

$$\sigma_{bs} = \frac{\sigma_s}{4 \cdot \pi} = \frac{W_{Rx}}{W_{Tx}} \cdot \frac{16 \cdot \pi^2 \cdot R^4}{e^{-4 \cdot \beta \cdot R}} \cdot \frac{1}{\lambda^2 \cdot g^2(\theta, \varphi)} \cdot \frac{1}{F_Z} \quad 3.62$$

De igual modo se puede estimar el TS expresando la Ecuación 3.62 de forma logarítmica, por lo que

$$TS = 10 \log W_{Rx} + 40 \log R + 2 \cdot \alpha \cdot R - 10 \log \left(\frac{W_{Tx} \cdot \lambda^2 \cdot g^2(\theta, \varphi) \cdot F_Z}{16 \cdot \pi^2} \right) \quad 3.63$$

3.1.4.2. MÚLTIPLES DISPERSORES

Se consideran múltiples blancos distribuidos de manera homogénea en el volumen muestreado por el pulso acústico, de forma que s_v será la contribución a la energía retrodispersada por los dispersores presentes en un elemento de volumen dV_s ,

$$s_v = \frac{d\sigma_{bs}}{dV_s} \quad 3.64$$

donde $d\sigma_{bs}$ corresponde a la sección transversal de retrodispersión de los dispersores situados en el volumen dV_s .

Puesto que los dispersores se distribuyen de manera uniforme en el volumen muestreado, la energía retrodispersada por los dispersores será la misma independientemente de su situación dentro del haz acústico, y según la Ecuación 3.57 se cumple que

$$W_{Rx} = \int_{V_s} W_{Tx} \cdot g(\theta, \varphi) \cdot \left(\frac{e^{-2\beta R}}{4 \cdot \pi \cdot R^2} \right)^2 \cdot \frac{d\sigma_s}{dV_s} \cdot \left(\frac{\lambda^2 \cdot g(\theta, \varphi)}{4 \cdot \pi} \right) \cdot F_Z \cdot dV_s \quad 3.65$$

Para una fuente pulsada el volumen muestreado corresponde a un casquete esférico de espesor $c \cdot \tau / 2$, y el volumen dV_s puede considerarse como una parte elemental de ese casquete. Cuando la longitud del pulso es pequeña dV_s puede aproximarse mediante la siguiente expresión

$$dV_s = \frac{c \cdot \tau}{2} R^2 \cdot d\Omega \quad 3.66$$

Sustituyendo la Ecuación 3.66 en la Ecuación 3.65 se tiene que

$$W_{Rx} = W_{Tx} \cdot \left(\frac{e^{-2\beta R}}{4 \cdot \pi \cdot R^2} \right)^2 \cdot \frac{d\sigma_s}{dV_s} \cdot \left(\frac{\lambda^2}{4 \cdot \pi} \right) \cdot F_Z \cdot \frac{c \cdot \tau}{2} \cdot R^2 \int_{4\pi} g^2(\theta, \varphi) \cdot d\Omega \quad 3.67$$

Y teniendo en cuenta la Ecuación 3.36 se cumple que

$$W_{Rx} = W_{Tx} \cdot \left(\frac{e^{-2\beta R}}{4 \cdot \pi \cdot R^2} \right)^2 \cdot \frac{d\sigma_s}{dV_s} \cdot \left(\frac{\lambda^2}{4 \cdot \pi} \right) \cdot F_z \cdot \frac{c \cdot \tau}{2} \cdot R^2 \cdot \psi \cdot g^2(0,0) \quad 3.68$$

Reordenando la Ecuación 3.68 se tiene que el coeficiente de retrodispersión volumétrico viene dado por

$$S_v = \frac{d\sigma_s/dV_s}{4 \cdot \pi} = \frac{W_{Rx}}{W_{Tx}} \cdot \frac{32 \cdot \pi^2 \cdot R^2}{e^{-4\beta R}} \cdot \frac{1}{\lambda^2 \cdot g^2(0,0) \cdot c \cdot \tau \cdot \psi} \cdot \frac{1}{F_z} \quad 3.69$$

Expresando la Ecuación 3.69 de forma logarítmica se obtiene la potencia de dispersión volumétrica S_v

$$S_v = 10 \log W_{Rx} + 20 \log R + 2 \cdot \alpha \cdot R - 10 \log \left(\frac{W_{Tx} \cdot g^2(0,0) \cdot \lambda^2 \cdot c \cdot \tau \cdot \psi \cdot F_z}{32 \cdot \pi^2} \right) \quad 3.70$$

3.1.5. ESTIMACIÓN DE LA TALLA Y LA BIOMASA

La talla media de los peces puede obtenerse a partir de la medida directa del TS mediante la expresión empírica que relaciona el valor medio del TS y la longitud total del pez (Ecuación 3.49). Una vez conocida la relación entre ambas variables para una especie y una frecuencia dadas, es posible estimar la talla de los peces a partir de la medida del TS aplicando la siguiente ecuación

$$L = L_0 \cdot 10^{\overline{TS} - b_m/m} \quad 3.71$$

donde \overline{TS} corresponde al valor medio de la distribución del TS .

Assumiendo que todos los dispersores situados dentro del volumen de muestreo son iguales, se puede calcular la densidad numérica de dispersores en el volumen insonificado ρ_v como el cociente del S_v y el valor medio de la σ_{bs} de los dispersores,

$$\rho_v = \frac{S_v}{\sigma_{bs}} \quad 3.72$$

El valor medio de la σ_{bs} se deriva del análisis las detecciones de ecos procedentes de blancos individuales, y corresponde al promedio de las distribuciones del TS expresado

de forma lineal. La densidad media puede calcularse a partir de las muestras comprendidas entre el intervalo de distancias en la que se encuentran los dispersores desde R_1 hasta R_2 , y para un número elevado de pings sucesivos. Este método resulta adecuado cuando la densidad de peces es suficientemente elevada como para disponer de detecciones de múltiples blancos en todos los volúmenes de muestreo.

La estimación de la abundancia se obtiene multiplicando la densidad observada por el volumen ocupado por los peces, y la biomasa multiplicando el número de peces por la masa M promedio.

3.2. CONSIDERACIONES EN EL USO DE LA ECOSONDA EK60

3.2.1. EXPRESIONES EMPLEADAS

La EK60 de Simrad almacena el nivel de potencia eléctrica de la señal de ecos en un fichero .RAW. La señal de ecos recibida es muestreada con una frecuencia fija de 500 kHz, y tras ser filtrada paso banda se diezma de forma que se almacenan 4 muestras por duración de pulso. El valor del nivel de potencia de cada muestra se almacena en 2 bytes, pero previamente se comprime y se redondea a un número entero. Para obtener los valores correctos de la potencia recibida, se debe aplicar la descompresión de los valores almacenados según la siguiente ecuación

$$LW_{Rx} = LW_{Rx,comp} \frac{10 \log(2)}{256} \quad 3.73$$

donde LW_{Rx} es el nivel de potencia recibida en dB, $LW_{Rx,comp}$ es el nivel de potencia comprimido y almacenado con un número entero (Simrad, 2008).

El vector distancia al transductor se halla a partir resolución espacial dR , que a su vez depende de la relación entre la velocidad del sonido y el resolución temporal dt ,

$$dR = \frac{c \cdot dt}{2} \quad 3.74$$

La resolución temporal se obtiene como la inversa de la frecuencia de muestreo f_s . La ecosonda EK60 tiene una frecuencia de muestreo variable con la duración de pulso, de forma que

$$f_s = \frac{1}{dt} = \frac{4}{\tau} \quad 3.75$$

Simrad utiliza un vector de distancia diferente para el cálculo del TS y el S_v . El vector correspondiente a la medida del TS , R_{TS} , se define como

$$R_{TS} = i \cdot dR \quad 3.76$$

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

El valor del TS resultante de no compensar el patrón de directividad del transductor, TS_u , se calcula a partir de la siguiente expresión,

$$TS_u = 10 \log W_{R_x} + 40 \log R_{TS} + 2 \cdot \alpha \cdot R_{TS} - 10 \log \frac{W_{T_x} \cdot \lambda^2}{16 \cdot \pi^2} - 2 \cdot G_{TS} \quad 3.77$$

donde 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 (Ecuación 3.59) y se extrae directamente del fichero .RAW generado por la ecosonda,

$$G_{TS} = 10 \log g(0,0) \quad 3.78$$

En la Ecuación 3.77 se supone adaptación de impedancias entre el transceptor y el transductor, de forma que $F_z = 1$.

Para el cálculo del S_v se emplea un vector distancia R_{S_v} con un retardo respecto a R_{TS} igual a la mitad de la longitud del pulso en el agua, de forma que

$$R_{S_v} = R_{TS} - \frac{c \cdot \tau}{4} \quad 3.79$$

Para el tratamiento de los datos generados por la EK60 en Sonar5 los vectores distancia se calculan de igual modo, aplicando un retardo en la distancia empleada en el análisis del S_v , tal y como recomienda Simrad.

Se emplea un parámetro de ganancia diferente para el cálculo del S_v , G_{S_v} , derivado de la ganancia G_{TS} y el factor de corrección $Sa,corr$, que se obtiene según

$$G_{S_v} = G_{TS} + Sa,corr \quad 3.80$$

El parámetro $Sa,corr$ se obtiene mediante la calibración de la ecosonda, y la relación entre su valor en lineal y en dB viene dada por

$$Sa,corr = 10 \log s_{a,corr} \quad 3.81$$

El valor del S_v para cada muestra se calcula a partir de la siguiente expresión

$$S_v = 10 \log W_{R_x} + 20 \log R_{S_v} + 2 \cdot \alpha \cdot R_{S_v} - 10 \log \left(\frac{W_{T_x} \cdot \lambda^2 \cdot c \cdot \tau}{32 \cdot \pi^2} \right) - 2G_{S_v} - \Psi \quad 3.82$$

Puesto que se emplea un vector distancia y una ganancia diferentes para el cálculo del TS y del S_v , la equivalencia entre el ambos parámetros no es inmediata. La correspondencia entre los datos de TSu y S_v que proporciona la EK60 viene dada por

$$TSu = S_v + 10 \log \frac{R_{TS}}{R_{S_v}} + 2 \cdot \alpha \cdot \frac{R_{TS}}{R_{S_v}} + 10 \log \frac{c \cdot \tau \cdot \psi \cdot R_{S_v}}{2} + 2Sa,corr \quad 3.83$$

La envolvente del eco se ve alterada por un ancho de banda limitado del sistema, deja de ser un pulso rectangular y el instante de inicio del eco queda indeterminado. Cuando se detecta un eco procedente de un blanco individual se estima la distancia al blanco a partir de la determinación del instante inicial del eco, calculado como el centro de gravedad. En primer lugar se determina la distancia $R_{máx}$ en la que se detecta el máximo valor del TSu de las muestras que conforman el eco. A continuación se obtiene la distancia al blanco $R_{TS,corr}$ como el centro de gravedad del eco menos la mitad de la longitud del pulso ($c\tau / 4$). 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 $R_{máx}$ (Calise, 2009), de forma que

$$R_{TS,corr} = \frac{\sum_{i=R_{máx}-\frac{c\tau}{4}}^{R_{máx}+\frac{c\tau}{4}} i \cdot 10^{TSu_i/10}}{\sum_{i=R_{máx}-\frac{c\tau}{4}}^{R_{máx}+\frac{c\tau}{4}} 10^{TSu_i/10}} - \frac{c \cdot \tau}{4} \quad 3.84$$

donde i es el número de muestra y TSu_i es el valor del TSu de la i -ésima muestra. Sonar5 calcula la distancia al blanco para los datos registrados por la EK60 del mismo modo que sugiere Simrad.

Cuando se detecta un eco procedente de un blanco individual se le asigna un valor del TSu , TSu_{corr} , que corresponde al valor del TSu a la distancia en la que se detecta el blanco $R_{TS,corr}$. Según la Ecuación 3.77 el TSu del eco se obtiene según (Balk & Lindem, 2011)

$$TSu_{corr} = 10 \log W_{Rx} + 40 \log R_{TS,corr} + 2 \cdot \alpha \cdot R_{TS,corr} - 10 \log \frac{W_{Tx} \cdot \lambda^2}{16 \cdot \pi^2} - 2G_{TS} \quad 3.85$$

Para eliminar la dependencia del nivel del eco con la dirección de las detecciones procedentes de direcciones diferentes al eje del transductor es necesario compensar el patrón de radiación del transductor. El valor de TS del eco se obtiene a partir del parámetro compensación de ganancia CG en una dirección, que corresponde a la función directividad del transductor, de forma que

$$TS = TSu_{corr} + 2GC(\beta_1, \beta_2) \quad 3.86$$

donde la CG en función de la dirección se expresa normalmente en función de los ángulos longitudinal β_1 y transversal β_2

$$CG(\beta_1, \beta_2) = D_{dB}(\beta_1, \beta_2) \quad 3.87$$

La relación entre los ángulos β_1 y β_2 y las coordenadas esféricas θ y φ viene dada por las siguientes expresiones (Ona, 1999)

$$\sin \theta = \sqrt{\cos^2 \beta_1 + \cos^2 \beta_2} \quad 3.88$$

$$\tan \varphi = \frac{\cos \beta_1}{\cos \beta_2} \quad 3.89$$

Para ángulos pequeños las Ecuaciones 3.88 y 3.89 se pueden aproximar a

$$\theta = \sqrt{\beta_1^2 + \beta_2^2} \quad 3.90$$

$$\tan \varphi = \frac{\beta_1}{\beta_2} \quad 3.91$$

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)

$$CG(\beta_1, \beta_2) = 3 \left[\left(\frac{\beta_1}{\frac{\theta_{-3dB, \beta_1}}{2}} \right)^2 + \left(\frac{\beta_2}{\frac{\theta_{-3dB, \beta_2}}{2}} \right)^2 - 0.18 \left(\frac{\beta_1}{\frac{\theta_{-3dB, \beta_1}}{2}} \right) \left(\frac{\beta_2}{\frac{\theta_{-3dB, \beta_2}}{2}} \right) \right] \quad 3.92$$

donde los valores angulares se expresan en grados.

La dirección de llegada del eco queda definida por los ángulos longitudinal y transversal, que son almacenados por la ecosonda en forma de fase eléctrica medida en pasos. Se utilizan dos bytes para almacenar los valores angulares, un byte para guardar los valores de β_1 y otro byte para β_2 , por lo que se dispone de 256 valores o pasos para almacenar los 360° de la fase eléctrica, valores enteros situados entre -128 y 127. A partir de la sensibilidad angular del transductor $SensAng$ puede determinarse la resolución angular del sistema $d\beta_i$, medida en grados por paso según

$$d\beta_i = \frac{180}{128} \cdot \frac{1}{SensAng_{\beta_i}} \quad 3.93$$

donde el subíndice i hace referencia a la dirección longitudinal (1) o transversal (2). La sensibilidad angular del transductor se define como la relación entre la fase eléctrica ϕ y el ángulo β ,

$$SensAng_{\beta_i} = \frac{\phi_{\beta_i}}{\beta_i} \quad 3.94$$

donde ϕ_{β_i} se expresa en grados eléctricos y β_i en grados mecánicos.

Los ángulos β_1 y β_2 pueden obtenerse a partir de la siguiente expresión

$$\beta_i = d\beta_i \cdot \phi_{\beta_i, N} - Offset_{\beta_i} \quad 3.95$$

donde $\phi_{\beta_i, N}$ es la fase eléctrica expresada en pasos, y $Offset_{\beta_i}$ es la desviación del eje acústico del transductor respecto a la normal en la dirección i , determinada durante el proceso de calibración y expresado en grados mecánicos.

La EK60 trabajando a 200 kHz presenta una sensibilidad angular de 23, por lo que consigue discriminar posiciones con una resolución angular de 0.0611° . Para una desviación del eje nula en las direcciones longitudinal y transversal, la ecosonda es capaz de almacenar valores de fase correspondientes a ángulos de $\pm 7.7^\circ$, que suponen la aplicación de una compensación de ganancia de 16.5 dB para la compensación del patrón de directividad del transductor.

3.2.2. CALIBRACIÓN

La calibración supone una práctica para el control de los datos acústicos proporcionados por la ecosonda y de gran importancia para la obtención de resultados cuantitativos que permitan la estimación fiable de la talla y/o la abundancia. Actualmente la calibración se realiza siguiendo el método del blanco estándar descrito por Foote *et al.* (1987), que reduce considerablemente los errores debidos al sistema de medida formado por el transceptor y el transductor. Se emplea una esfera de calibración de propiedades acústicas bien conocidas, que se mueve a través del haz acústico del transductor split-beam, y se comparan los valores observados con los valores esperados para corregir los parámetros de calibración de la ecosonda.

La ecosonda EK60 dispone del software *Calibration.exe* para realizar la calibración del sistema, que permite corregir la ganancia en el eje acústico y los parámetros del patrón de radiación del transductor.

Las esferas de calibración más empleadas son las fabricadas a base de cobre (Cu) o carburo de tungsteno (WC). Simrad prefiere proporcionar con sus ecosondas esferas de cobre, pues pueden fabricarse electrolíticamente con gran pureza. El tamaño de la esfera depende de la frecuencia de trabajo y se elige de forma que se minimice la dependencia del *TS* con la temperatura (Simrad, 2008). Se recomienda situar la esfera a una distancia mínima de unos 10 m por regla general. 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. No obstante, debido a la proximidad de los blancos al transductor en los trabajos realizados en esta tesis ha sido de obligado cumplimiento calibrar a distancias menores que la distancia mínima aconsejada, cubriendo el mismo rango de distancias en que se encuentran los peces. A distancias próximas al transductor se ha de tener en cuenta que los resultados de la calibración pueden verse comprometidos por la incertidumbre asociada a la medida del *TS* a cortas distancias, ya que puede llegar a ser significativa (Ona *et al.*, 1996).

El proceso de calibración consiste en mover la esfera lentamente a través del haz del transductor, consiguiendo detecciones a través de toda la sección del haz acústico y asegurando cierto número de detecciones cercanas al eje. El programa ajusta dos modelos del haz, el modelo EK (Ona, 1990a) y el modelo polinómico, a los niveles de eco registrados por la ecosonda mediante el método de mínimos cuadrados. A partir del ajuste del modelo EK se obtienen los parámetros de calibración: G_{TS} , $Sa,corr$, θ_{-3dB,β_i} y $Offset_{\beta_i}$. Se recomienda que el error cuadrático medio cometido en el ajuste del modelo sea inferior a 0.2 dB, aunque se considera aceptable errores de hasta 0.4 dB (Simrad, 2008).

La ganancia corregida $G_{TS,corr}$ se obtiene comparando el *TS* medido con el *TS* teórico, de forma que

$$G_{TS,corr} = G_{TS,act} + \frac{TS_{med} - TS_{teór}}{2} \quad 3.96$$

donde $G_{TS,act}$ es el valor actual de la ganancia, TS_{med} es el valor medido del TS , y $TS_{teór}$ es el valor teórico del TS de la esfera de calibración (Simrad, 1997; Balk & Lindem, 2011). El valor teórico se calcula a partir de las propiedades del material, las dimensiones de la esfera, la frecuencia, la velocidad del sonido en el agua y la duración del pulso (Foote, 1982; MacLennan, 1982; Foote & MacLennan, 1984). Para obtener un valor exacto del TS teórico es necesario el cálculo preciso de la velocidad de propagación del sonido, a partir de los datos de temperatura, salinidad y profundidad, empleando la ecuación de Mackenzie (1981).

El parámetro $S_{a,corr}$ se aplica para corregir el suavizado de la subida y la caída de la envolvente del eco. Se calcula la media del S_v de las muestras que forman el eco y se compara con el valor teórico obtenido restando al $TS_{teór}$ el $10\log V_s$ a la distancia en que se detecta el blanco. En el cálculo tan solo se incluyen las detecciones registradas cercanas al eje, y de forma análoga a la Ecuación 3.96 se tiene que

$$G_{Sv,corr} = G_{Sv,act} + \frac{Sv_{med} - Sv_{teór}}{2} \quad 3.97$$

donde $G_{Sv,corr}$ es el valor corregido de la ganancia empleada en el cálculo del S_v , $G_{Sv,act}$ es el valor actual de la ganancia, Sv_{med} es el valor medido del S_v , $Sv_{teór}$ es el valor teórico del S_v de la esfera. Teniendo en cuenta la Ecuación 3.80 el valor del parámetro $S_{a,corr}$ obtenido en la calibración, $S_{a,corr,corr}$, será igual a

$$S_{a,corr,corr} = G_{Sv,corr} - G_{TS,corr} \quad 3.98$$

Simrad (2008) recomienda repetir el proceso de calibración para cada combinación de duración de pulso, potencia transmitida y frecuencia de trabajo que se va a emplear durante las mediciones.

Tras una calibración exitosa es posible actualizar los parámetros de calibración del transductor, quedando almacenados en el fichero *trlist.ini* que maneja el programa de control de la EK60. Se modifican los valores de G_{TS} , $S_{a,corr}$, θ_{-3dB,β_i} y $Offset_{\beta_i}$, sin embargo quedan inalterados los parámetros $SensAng$, por ser un valor contante para un transductor dado, y ψ . En cierto modo la determinación del valor corregido de ψ queda cubierto por la calibración del parámetro $S_{a,corr}$. Para detecciones en el eje, el TS y el S_v tan solo se diferencian en el V_s , que puede calcularse según

$$V_s = \frac{c \cdot \tau}{2} R^2 \cdot \psi (2 \cdot s_{a,corr}) \quad 3.99$$

Por tanto, la calibración del parámetro $S_{a,corr}$ lleva implícita la calibración de ψ .

3.3. CONSIDERACIONES EN EL USO DE LA ECOSONDA DT-X

3.3.1. EXPRESIONES EMPLEADAS

La ecosonda DT-X de Biosonics genera ficheros .DT4 que almacenan los valores de tensión eficaz y los valores angulares en las direcciones longitudinal y transversal de las muestras en formato binario (Biosonics Inc., 2010).

La resolución espacial obtenida depende de la velocidad de propagación del sonido y de la frecuencia de muestreo del conversor A/D de la ecosonda utilizada para muestrear la envolvente de la señal de ecos, de forma que

$$dR = \frac{c}{2 \cdot f_s} \quad 3.100$$

A diferencia de la EK60, que presenta una frecuencia de muestreo efectiva dependiente de la longitud del pulso, la DT-X utiliza una frecuencia de muestreo de 41667 Hz en la mayoría de sus transductores. Para una velocidad de propagación del sonido de 1500 m/s, la resolución espacial de la DT-X es de 1.8 cm. Esta resolución es ligeramente inferior a la máxima conseguida con la EK60 cuando se emplea un pulso de 64 μ s, que es de 1.2 cm. Sin embargo, el uso de pulsos más largos con la EK60 reduce notablemente la resolución espacial.

El vector de distancias viene dado por la siguiente expresión

$$R = \min R + i \cdot dR \quad 3.101$$

donde $\min R$ es la distancia mínima almacenada en el fichero, e i es el número de muestra. A diferencia del tratamiento que se realiza a los datos de la EK60, Biosonics no introduce retardo alguno en el cálculo de la distancia empleada para el análisis del S_v . De igual modo, Sonar5 sigue las recomendaciones del fabricante para los datos registrados por la DT-X en el cálculo del S_v . No obstante, en el cálculo de la distancia a un blanco individual emplea la Ecuación 3.84, tanto para los datos registrados por la EK60 como por la DT-X.

Para el cálculo del TS_u y el S_v se emplean las siguientes expresiones

$$TS_u = V_{R_x, dB} - S_{R_x, dB} - SL - TPRL - 2 \cdot TL - Corr \quad 3.102$$

$$S_v = V_{R_x, dB} - S_{R_x, dB} - SL - TPRL - 2TL - V_{s, dB} - Corr \quad 3.103$$

donde $V_{R_x, dB}$ es el valor de la tensión V_{R_x} expresada en dB ref. a 1 V, $S_{R_x, dB}$ es la sensibilidad del transductor en recepción expresada de forma logarítmica, $V_{s, dB}$ es el

volumen de muestreo expresado en dB, $TPRL$ es la reducción del nivel de la potencia transmitida, y $Corr$ es el factor de corrección obtenido en la calibración de la ecosonda (Balk & Lindem, 2011).

El nivel de eco viene dado por la diferencia de la tensión recibida en bornes del transductor y la sensibilidad del transductor durante la recepción (Ecuación 3.14), ambas expresadas de forma logarítmica

$$V_{Rx,dB} = 20 \log V_{Rx} \quad 3.104$$

$$S_{Rx,dB} = 20 \log S_{Rx} \quad 3.105$$

El nivel de fuente de cada transductor viene determinado por los datos de la última calibración, y es fijo para un transductor dado. La potencia acústica transmitida al medio puede variarse mediante el parámetro $TPRL$, que permite trabajar a alta potencia (0 dB) o a baja potencia (-10 dB).

Las pérdidas que sufre la onda acústica durante la propagación se corrigen según la aproximación

$$TL = 40 \log R + 2 \cdot \alpha \cdot R \quad 3.106$$

Como se ha comentado anteriormente en la detección de blancos individuales se emplea la Ecuación 3.84 para el cálculo de la distancia al blanco.

El volumen de muestreo expresado de forma logarítmica viene dado por la siguiente expresión

$$V_{s,dB} = 10 \log \left(\frac{c \cdot \tau}{2} \right) + \Psi + 20 \log R \quad 3.107$$

El ángulo equivalente Ψ puede estimarse a partir de la apertura del haz en las direcciones longitudinal y transversal según la Ecuación 3.39.

3.4. CONSIDERACIONES EN EL USO DE ECOSONDAS CIENTÍFICAS A CORTAS DISTANCIAS

En algunas aplicaciones es necesario detectar blancos y calibrar la ecosonda a distancias próximas al transductor, como sucede en estudios en ríos, aguas someras o jaulas de piscifactoría. Una variedad de efectos dependientes de la distancia pueden resultar problemáticos en la detección a cortas distancias, como la compensación de las pérdidas

que sufre la onda acústica durante su propagación y la compensación del patrón de directividad del transductor, pudiendo producir valores inciertos del TS .

3.4.1. COMPENSACIÓN DE PÉRDIDAS POR PROPAGACIÓN

La función TVG tiene como propósito compensar las pérdidas por propagación de la onda acústica, debidas a la divergencia geométrica del haz y la absorción del medio de propagación, eliminando así la dependencia del nivel de eco con la distancia al transductor. Para un blanco individual la función TVG expresada en dB viene dada por

$$TVG(R) = 2TL = 40 \log \frac{R}{R_0} + 2 \cdot \alpha \cdot R \quad 3.108$$

y de forma lineal por

$$tvG^2(R) = \left(\frac{R}{R_0} \right)^4 \cdot e^{4 \cdot \beta \cdot R} \quad 3.109$$

Estas expresiones tan solo proporcionan una compensación exacta a distancias infinitas o para duraciones de pulso infinitamente cortas. En la compensación de las pérdidas por propagación se cometen fundamentalmente dos errores, la estimación de la distancia al blanco y el uso de la aproximación asintótica del TVG , que se vuelven significativos a cortas distancias. De igual modo, el uso de un valor incorrecto de la absorción puede afectar a los resultados.

3.4.1.1. DISTANCIA AL BLANCO

El cálculo de la distancia al blanco se realiza en función del tiempo de vuelo del eco y de la velocidad de propagación del sonido. La estimación del instante de llegada del eco se ve afectada por el uso de sistemas electroacústicos limitados en ancho de banda, tanto en la emisión como en la recepción de señales, y la respuesta en frecuencia del dispersor, que producen un ensanchamiento del pulso. De igual modo, se produce un error en la estimación del inicio temporal del eco debido a la superposición de ruido a la señal de ecos y la digitalización de la señal analógica. La superposición de ruido puede dificultar la estimación del instante inicial del eco, sobretodo en condiciones de baja relación señal a ruido. Igualmente, la superposición de ecos procedentes de blancos indeseados puede considerarse ruido, y también puede dificultar la estimación del instante inicial del eco procedente del blanco deseado. En la digitalización de la señal analógica se produce la pérdida de información entre muestras, que añade una incertidumbre en la estimación

del inicio del eco y de la posición del máximo. La incertidumbre en la estimación del instante inicial del eco puede expresarse mediante un tiempo de retardo, que puede despreciarse a grandes distancias pero resulta notable a distancias próximas al transductor (MacLennan, 1986; Foote *et al.*, 1987; Ona *et al.*, 1996; Furusawa *et al.*, 1999; Moszyński & Stepnowski, 2002). El procedimiento recomendado para estimar la distancia al blanco es medir 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, y corregirla mediante un retardo t_{del}

$$R = \frac{c}{2}(t - t_{del}) \quad 3.110$$

A cortas distancias es conveniente corregir este retardo para evitar una sobreestimación del nivel de eco detectado, mientras que a grandes distancias el retardo se vuelve insignificante y puede obviarse su corrección. El retardo aumenta con la duración del pulso y al reducir el ancho de banda del sistema, y puede estimarse a partir de la teoría de la formación del eco y el conocimiento de la electrónica, aunque los cálculos no son sencillos (Foote *et al.*, 1987). Se ha realizado el cálculo teórico del retardo del sistema en función de la frecuencia para la EK60, que incluye el retardo de hardware (GPT) y el retardo atribuible al transductor. Se estima que el retardo total del sistema es $7/f$ para transductores no composite, y $6/f$ para transductores composite. Sin embargo, estos retardos no se han verificado experimentalmente. La ecosonda EK60 no implementa la corrección del retardo del sistema, alternativamente calcula la distancia al blanco como el centro de gravedad menos la mitad de la duración del pulso (Korneliussen *et al.*, 2008).

Normalmente se determina el instante de llegada del eco como el instante correspondiente a la reflexión en la cara del blanco más cercana al transductor. Sin embargo, podría resultar más conveniente la determinación de la distancia al centro acústico del dispersor (Ona *et al.*, 1996).

La velocidad del sonido depende de temperatura del agua, la salinidad y la profundidad. No obstante, es una práctica común asumir un valor de la velocidad de propagación independiente de la distancia e invariante durante largos intervalos temporales de medida, introduciendo una nueva fuente de error en la estimación de la posición del blanco, que se vuelve más significativo a grandes distancias (MacLennan, 1990; Ona *et al.*, 1996). A cortas distancias el uso del valor promediado en el rango de distancias al transductor puede minimizar el error (Simmonds & MacLennan, 2005).

3.4.1.2. APROXIMACIÓN ASINTÓTICA DEL TVG

Una aproximación típica para expresar la función TVG en función del tiempo se obtiene al sustituir la distancia por $c \cdot t / 2$, que es la llamada aproximación asintótica

$$tv_g(t) = \left(\frac{c \cdot t}{2}\right)^2 \cdot e^{-\frac{2 \cdot \beta \cdot c \cdot t}{2}} \quad 3.111$$

Esta aproximación tan solo compensa las pérdidas de forma exacta cuando la distancia es mucho mayor que la longitud del pulso, es decir, cuando el pulso transmitido es infinitamente corto o cuando el blanco se encuentra en el infinito. Sin embargo, a cortas distancias produce una sobrecompensación de las pérdidas y su efecto puede ser significativo, por lo que se recomienda usar la función exacta o una aproximación más precisa.

Debido al ancho de banda limitado del sistema y a la respuesta en frecuencia de la dispersión del blanco, la equivalencia entre las expresiones de la función *TVG* en función de la distancia y el tiempo no es trivial. Según MacLennan (1986), la función exacta dependiente del tiempo para un dispersor individual viene dada por

$$tv_g(t) = (c \cdot t)^2 \cdot e^{-\frac{2 \cdot \beta \cdot c \cdot t}{2}} \sqrt{1 + \sum_{i=1}^4 a_i \left(\frac{\tau}{t}\right)^i} \quad 3.112$$

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 $V(t)$,

$$\begin{aligned} a_1 &= -4I_1 \\ a_2 &= -6I_2 + 12I_1^2 \\ a_3 &= -4I_3 + 24I_1I_2 - 24I_1^3 \\ a_4 &= -I_4 + 8I_1I_3 + 6I_2^2 - 36I_1^2I_2 + 24I_1^4 \end{aligned} \quad 3.113$$

Los momentos I_m se definen como

$$I_m = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} t^m \cdot e^{2 \cdot \beta \cdot c \cdot t} \cdot |V(t)|^2 \cdot dt}{\tau^m \int_{-\infty}^{\infty} e^{2 \cdot \beta \cdot c \cdot t} \cdot |V(t)|^2 \cdot dt} \quad 3.114$$

La Ecuación 3.112 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).

Para blancos múltiples o distribuidos la función exacta viene dada por

$$tvg(t) = (c \cdot t) \cdot e^{\frac{2\beta \cdot c \cdot t}{2}} \cdot \sqrt{1 + \sum_{i=1}^2 b_i \cdot \left(\frac{\tau}{t}\right)^i} \quad 3.115$$

donde los coeficientes b_i son

$$\begin{aligned} b_1 &= -2I_1 \\ b_2 &= 2I_1^2 - I_2 \end{aligned} \quad 3.116$$

La Ecuación 3.115 puede aproximarse mediante la función TVG retardada, de forma que la función exacta puede aproximarse introduciendo un retardo T_0

$$tvg_0(t) = c \cdot (t - T_0) \cdot e^{\frac{2\beta \cdot c \cdot t}{2}} \quad 3.117$$

Donde

$$\begin{aligned} T_0 &= T_1 + \frac{2R}{c} - \sqrt{\left(\frac{2R}{c}\right)^2 - T_2^2} \\ T_1 &= \tau \cdot I_1 \\ T_2 &= \tau \cdot \sqrt{I_2 - I_1} \end{aligned} \quad 3.118$$

El retardo T_0 es el instante de inicio óptimo de la función TVG y se encuentra entre T_1 y $T_1 + T_2$, y T_1 y T_2 aun dependen de la envolvente del eco. Este retardo es al menos igual a la mitad de la duración del pulso (Simmonds & MacLennan, 2005). Se recomienda el uso de esta aproximación para distancias al transductor superiores a 1 m.

3.4.1.3. COEFICIENTE DE ABSORCIÓN DEL MEDIO

Al igual que sucede con la velocidad del sonido se suele asumir un valor de la absorción del sonido contante, sin tener en cuenta las variaciones de temperatura, salinidad, profundidad y pH con la distancia al transductor y el tiempo.

Normalmente se fija un valor medio del coeficiente de absorción en la columna de agua y para un intervalo de tiempo dado, contribuyendo a obtener una compensación errónea de las pérdidas por propagación.

En el mar Mediterráneo las variaciones de temperatura pueden ser elevadas en los primeros metros y muy cambiantes a lo largo del día, siendo más acusadas durante los meses de más calor.

3.4.2. COMPENSACIÓN DEL PATRÓN DE RADIACIÓN

La compensación del patrón de radiación del transductor puede verse influenciada por la estimación de la posición angular del blanco, debido principalmente al tamaño finito del blanco a cortas distancias, y a la posible detección del eco en el campo próximo del pez.

3.4.2.1. POSICIÓN ANGULAR

Se considera una celda a 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, obteniendo mayores resoluciones a distancias próximas al transductor.

A cortas distancias la esfera de calibración puede tener un tamaño varias veces superior al tamaño de una celda. Igualmente un pez próximo al transductor, o su vejiga natatoria, puede llegar a ocupar una gran parte de la sección del haz del transductor, e incluso abarcar un diámetro superior al definido por el ángulo a -3 dB. En estos supuestos el dispersor deja de ser puntual y puede llegar a cometerse un error significativo en la estimación de la posición angular, y en casos extremos puede resultar imposible seguir la trayectoria del pez, ya que cuando un blanco ocupa más de una celda se aplica un único valor de la compensación de ganancia para compensar el efecto del patrón de radiación (Ona *et al.*, 1996; Dawson *et al.*, 2000).

En ríos donde los blancos se detectan a cortas distancias con haces dirigidos horizontalmente, el uso de haces elípticos permite obtener trayectorias menos ambiguas debido a que se ajustan mejor a la forma de la sección transversal del pez vista por el haz. Sin embargo, el error cometido en la estimación del ángulo aun es significativo (Dawson *et al.*, 2000; Mulligan, 2000).

Kieser *et al.* (2000) y Fleischman & Burwen (2000) observaron como el error en la estimación de los ángulos se vuelve más significativo a cortas distancias, al aumentar la distancia al eje del transductor, y al reducir la relación señal a ruido.

Por estos motivos, resulta conveniente establecer la distancia mínima al transductor a partir de la cual un blanco dado puede considerarse puntual. Aproximando la superficie esférica de la celda a una superficie plana, el tamaño de la celda a una distancia R del transductor viene dada por

$$L_{celda} = R \cdot \tan d\beta \quad 3.119$$

donde L_{celda} es el tamaño o lado de la celda. Asumiendo que la resolución angular es igual en las direcciones longitudinal y transversal, se tiene que la diagonal de la celda D_{celda} es

$$D_{celda} = \sqrt{2} \cdot L_{celda} \quad 3.120$$

La relación entre el tamaño del dispersor y la diagonal de la celda permite determinar si un determinado blanco se puede considerar puntual a una cierta distancia del transductor, o estimar la mínima distancia a partir de la cual un dispersor puede ser considerado puntual. Cuando el blanco presenta un tamaño superior a la diagonal de la celda se produce un error en la estimación de su posición y, por tanto, en la compensación del patrón de radiación del transductor, haciéndose más patente a cortas distancias.

3.4.2.2. CAMPO CERCANO DEL PEZ

También hay que tener en cuenta que a cortas distancias el transductor probablemente se encuentre en el campo cercano del pez y el campo dispersado se vuelve complejo, pudiendo afectar a la estimación del ángulo. El efecto de campo cercano de blancos complejos, como son los peces, aumenta a distancias muy próximas al transductor. Puesto que un pez es un dispersor complejo el uso de la expresión típica para determinar la distancia a campo lejano da estimaciones no realistas (Dawson *et al.*, 2000).

3.4.2.3. 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).

4

Medida del *TS* de la dorada a cortas distancias

El conocimiento del *TS* es crucial para la evaluación indirecta de la biomasa total de peces en el interior de una jaula de piscifactoría mediante técnicas ultrasónicas no invasivas. El *TS* proporciona una estimación indirecta del tamaño o la masa individual de los peces mediante el uso de ecosondas científicas. Este tipo de ecosondas son ampliamente empleadas para evaluar el stock pesquero presente en océanos y caladeros.

Actualmente no se conoce en la literatura estudios del *TS* de la dorada, y pocos son los ensayos llevados a cabo en jaulas marinas flotantes para otras especies de interés piscícola. Knudsen *et al.* (2004) halló la dependencia entre el *TS* ventral y la longitud total del salmón común (*Salmo salar*) en jaulas flotantes a unas frecuencias de 120 y 200 kHz. La detección de los peces fue realizada a cortas distancias, donde el tamaño de los peces era superior al diámetro del haz acústico definido por una caída de -3 dB del patrón de directividad respecto al máximo y la vejiga natatoria ocupaba una proporción substancial de la sección transversal del haz. El estudio reflejó una inexistente correlación entre el *TS* y la longitud para las mediciones dorsales, así como la aparición de distribuciones de *TS* bimodales y trimodales. Se caracterizaron 5 tamaños de salmón diferentes, comprendidos entre 20 y 78 cm, empleando una ecosonda split-beam EK60. Zhao (1996) y Ona (2003) estudiaron el *TS* dorsal del arenque (*Clupea harengus*) en jaulas de piscifactoría mediante una ecosonda split-beam EK500 trabajando a unas frecuencias de 18, 38 y 120 kHz, y hallaron una dependencia del *TS* con el estado de desarrollo de las gónadas. Nielsen & Lundgren (1999) midieron en jaula el aspecto dorsal del *TS* de ejemplares juveniles de bacalao (*Gadus morhua*) de 7 a 10 cm y de 15 a 20 cm

con una ecosonda split-beam EY500 trabajando a 120 kHz. Jørgensen (2004) estudió el *TS* dorsal del capelán (*Mallotus villosus*) en una jaula flotante, y su dependencia con la masa de las gónadas y el ángulo de inclinación del pez. Kang estudió el *TS* dorsal en jaula del pargo japonés (*Pagrus major*) y el pargo negro (*Acanthopagrus schlegelii*), ambos pertenecientes a la familia de la dorada (espáridos) y de morfología similar a esta. Obtuvo una relación entre el *TS* y la longitud total de los peces a unas frecuencias de 38, 120 y 200 kHz para el pargo japonés, empleando una ecosonda split-beam EK500 a 38 y 120 kHz y una ecosonda split-beam DT5000 a 200 kHz. Además obtuvo una expresión para el pargo negro mediante una ecosonda split-beam EK500 a 38 y 120 kHz. En ambos estudios se compararon los datos experimentales con el modelo de Helmholtz-Kirchhoff (Kang & Hwang, 2003; Kang *et al.*, 2004).

En este Capítulo se estudia la viabilidad del uso de ecosondas científicas split-beam en la estimación indirecta del tamaño o la masa de ejemplares individuales de dorada a partir de la medida directa del *TS*. El uso de ecosondas para la medida del *TS* a cortas distancias adquiere cierta problemática, por lo que se considera necesario evaluar su aplicación para la caracterización acústica de la dorada a distancias muy próximas al transductor. Entre otros, el efecto de campo cercano de los peces, los errores cometidos en la compensación de las pérdidas debidas a la propagación de la onda, los errores en la estimación de los ángulos y la alteración de la envolvente debido al tamaño finito de los peces, dificultan este tipo de aplicaciones. Sin embargo, la detección de peces a cortas distancia resulta inevitable en jaulas flotantes de granjas marinas, donde a pocos metros del transductor se vuelve muy difícil la obtención de detecciones procedentes de ejemplares individuales debido a la elevada densidad del cardumen de peces en el interior de una jaula en condiciones de producción.

El objetivo final es la estimación indirecta de la talla o la masa promedio de ejemplares individuales de dorada a partir de mediciones acústicas, llevadas a cabo con una ecosonda split-beam. Para ello es necesario encontrar una relación entre el *TS* y algún parámetro biométrico, como puede ser la longitud o la masa de la dorada. La estimación precisa del tamaño de los peces es un aspecto muy importante en la gestión de piscifactorías, y el establecimiento de relaciones entre parámetros acústicos y biométricos puede resultar una herramienta eficaz para la estimación de tallas mediante la aplicación de técnicas no invasivas.

La elección del parámetro biométrico a relacionar con el *TS* dependerá de su aplicación final. Será interesante obtener la relación lineal clásica entre el *TS* y el logaritmo en base 10 de la longitud total del pez descrita por la Ecuación 3.49 para obtener resultados comparables con los obtenidos en estudios previos. Sin embargo, al personal de una piscifactoría puede resultarle más ventajoso disponer de una expresión que relacione el *TS* y la masa del pez, pues es el parámetro biométrico más empleado en la gestión de este tipo de empresas.

Para estimar la dependencia del *TS* con el tamaño de los peces se han establecido 5 grupos diferentes en función de la longitud total, abarcando casi todo el rango de tallas que se manejan en una piscifactoría de engorde de dorada.

Se ha caracterizado la energía acústica retrodispersada por ejemplares individuales de dorada ventral y dorsalmente para las diferentes tallas establecidas, empleando una ecosonda split-beam a 200 kHz y mediante el seguimiento de la trayectoria de peces aislados en una jaula a escala.

4.1. MATERIALES Y MÉTODOS

En esta Sección se describe cómo se ha llevado a cabo la medición de diferentes parámetros biométricos y la clasificación de los peces por tallas, la configuración experimental empleada para la medición del aspecto ventral y dorsal del *TS* de ejemplares individuales de dorada, y la configuración empleada durante la calibración de la ecosonda acústica. De igual modo, se explica el procesado de los datos biométricos y acústicos empleado para obtener tanto las relaciones entre los diferentes parámetros biométricos evaluados, que caracterizan la especie, como las relaciones entre parámetros acústicos y biométricos, que permitirán estimar el tamaño de los peces de forma indirecta empleando una técnica acústica no invasiva.

4.1.1. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

La campaña de medida del *TS* de la dorada se llevó a cabo en el Puerto de Gandia (Valencia), desde marzo de 2013 hasta julio de 2013 y desde enero de 2014 hasta mayo de 2014. Los ensayos se realizaron en una jaula flotante de piscifactoría a escala, instalada en una lámina de agua situada enfrente del muelle frutero, donde se introdujeron unos pocos ejemplares de dorada.

El montaje experimental llevó mucho tiempo, pues fue necesario conseguir la autorización de ocupación del tinglado y la reserva de la lámina de agua por parte de la Autoridad Portuaria de Valencia. Además fue necesario adecuar el tinglado para el desarrollo de diferentes trabajos de investigación, tareas que han incluido entre otras la instalación de las acometidas de luz y agua, un módulo prefabricado, y un enlace wifi entre el tinglado y la Cofradía de Pescadores que permitía el acceso a una conexión de internet. Se participó en la elaboración del proyecto de ocupación del tinglado, y se redactaron numerosas solicitudes para la autorización de las instalaciones pertinentes para el correcto funcionamiento del laboratorio, la reserva de la lámina de agua, y la realización de tareas de montaje y mantenimiento de la jaula desde superficie.

4.1.1.1. LUGAR DE MEDIDA

Las mediciones biométricas y acústicas se llevaron a cabo en el tinglado nº 3 del Puerto de Gandia, sede de la Unidad Mixta formada por el Instituto Español de Oceanografía (IEO) y la Universidad Politécnica de Valencia (UPV), llamada Unidad de Tecnología de Estudios Marinos (UTEM). La jaula experimental para la realización de los ensayos acústicos de la dorada se instaló en la lámina de agua situada enfrente del tinglado entre los norayes 16 y 17 del muelle frutero, con una superficie aproximada de 98 m² (Figura 4.1).

El tinglado nº 3 está situado en el muelle frutero del Puerto de Gandia y posee una superficie de 302 m². Dentro del tinglado se instaló un módulo prefabricado de 6 x 4.80 m, que alberga el laboratorio de hidroacústica. En el interior del laboratorio se colocaron todos los dispositivos electrónicos y los ordenadores necesarios para la realización de los ensayos. Se dispuso de un enlace wifi entre el tinglado nº 3 y la Cofradía de Pescadores, que permitía la conexión a internet en el laboratorio y el seguimiento remoto del experimento.



Fuente: maps.google.es (junio 2014)

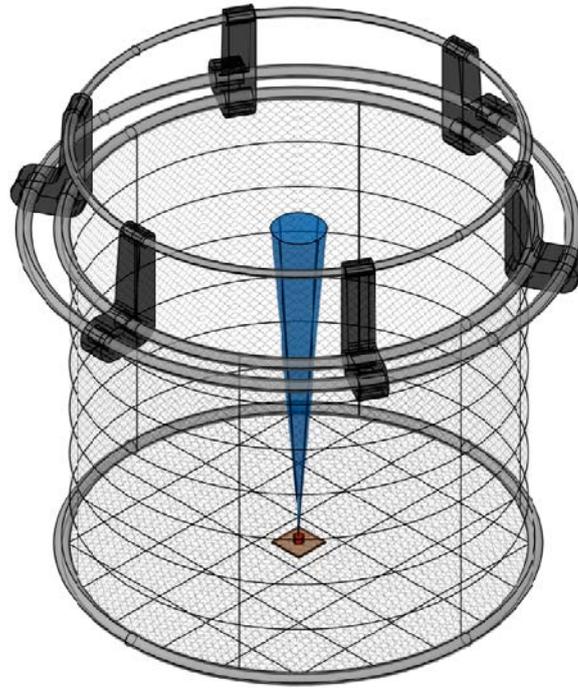
Figura 4.1. Fotografía por satélite del Puerto de Gandia (parte superior), y detalle del tinglado nº 3 y la lámina de agua reservada entre los norayes 16 y 17 que aparecen remarcados en rojo (parte inferior).

La lámina de agua reservada posee un calado de unos 4.8 m y un fondo de tipo lodoso, al igual que el resto del canal del Puerto, debido al aporte de sedimentos que proporcionan las aguas recogidas por el barranco de San Nicolás anexo al canal del Puerto. Se observó que la corriente en el interior del canal era variable, circulando en sentido de tierra a mar o en sentido opuesto según las condiciones atmosféricas. El agua del canal se encontraba bastante turbia debido a una elevada cantidad de sólidos en suspensión. Además se encontraron objetos de naturaleza y dimensiones muy variables, como fauna (medusas, pepinos de mar, varias especies de peces, etc.), residuos varios (trozos de madera, cañas, bolsas de plástico, cubos, etc.), tripas y descartes de peces que van a parar al agua, etc.

La jaula a escala presentaba un diámetro de 5 m y una profundidad de 4 m, confiriéndole un volumen reducido de aproximadamente de 78.5 m³ que ha permitido la detección acústica de ejemplares aislados al introducir una reducida cantidad de peces. Se ha considerado como un modelo a escala, pues las jaulas empleadas en granjas de engorde de dorada presentan diámetros entre 12 y 15 m, con profundidades máximas comprendidas entre 10 y 25 m. La jaula estaba formada por dos anillos concéntricos de flotación unidos entre sí mediante 6 candeleros en forma de L, un anillo anticorriente y la red. Además un anillo insertado en la parte superior de los candeleros hacía la función de barandilla (Figura 4.2 y Figura 4.3).

Los anillos de flotación y el anillo anticorriente se construyeron con tubo de polietileno de 160 mm de diámetro y 10 atmósferas (PN10), y el anillo de la barandilla con tubo de polietileno de 110 mm de diámetro y 10 atmósferas. Los candeleros empleados están diseñados para ser utilizados con tubos de 200 mm, por lo que fue necesario encasquillarlos soldando un trozo de polietileno en los anillos flotantes a ambos lados del candelero. Se introdujo una anilla en el interior del anillo anticorriente que le confería un peso de 1000 kg, con el fin de actuar como lastre y darle estabilidad a la jaula. Se practicaron agujeros a lo largo de todo el anillo anticorriente para facilitar la entrada y salida de agua durante su inmersión o su extracción a superficie, y evitar que la presencia de aire en su interior le confiriera flotabilidad. El anillo anticorriente quedó fijado mediante 12 cabos de 17 mm de diámetro al anillo flotante interior, a una profundidad de unos 4 m. La red se fijó en superficie al anillo flotante interior por 12 cabos de 17 mm de diámetro, en el fondo al anillo anticorriente por otros 12 cabos de igual grosor, y a la barandilla mediante 12 cabos de 12 mm diámetro.

La red estaba tejida con hilo de 1.5 mm de grosor, formando una malla con 4.7 mm de lado, y fue tratada con pintura antifouling para minimizar los cambios de red debido a la rápida incrustación de flora y fauna. Aun así fue necesario realizar varios cambios de red debido a la elevada cantidad de organismos que se le adhieren, aportando un peso extra y reduciendo la circulación de agua dentro de la jaula, que puede llegar a ocasionar una deficiente oxigenación del agua.



Fuente: Propia

Figura 4.2. Esquema de la jaula a escala de 5 m de diámetro y 4 m de alto.



Fuente: Propia

Figura 4.3. Jaula a escala amarrada entre los norayes 16 y 17 del muelle frutero del Puerto de Gandia.

Para mantener la jaula en una posición más o menos fija y centrada en la lámina de agua se amarró el anillo de flotación externo a los dos norayes contiguos con cabos de 26 mm y a 4 puntos situados alrededor de la jaula donde se instalan pesos en el fondo, formados por 5 cubos de hormigón de unos 20 kg cada uno, con cabos de 17 mm. Este sistema de fijación sirvió para alejar la jaula del muelle y evitar así daños por fricción, permitiendo cierto movimiento para evitar roturas en condiciones ambientales adversas (temporal, marejadas, etc.). Fue necesario reubicar los pesos a su posición original en repetidas ocasiones, pues quedaron desplazados hacia el muelle debido el paso de embarcaciones por el canal y a condiciones climáticas hostiles.

Se señaló debidamente la jaula mediante boyas y luces de horizonte. Se colocaron dos boyas próximas a los vértices exteriores de la lámina de agua, fijadas a los muertos mediante un cabo. Las luces de horizonte se situaron en la barandilla de la jaula y permitieron su posicionamiento durante la noche.

El diseño y la construcción de la estructura flotante y el anillo anticorriente se encargó a la empresa Suministros Pesqueros y Acuícolas S.L., antes llamada Quintas & Quintas España S.L. Sin embargo, la colocación en el agua del anillo flotante, la instalación del anillo anticorriente y la red, así como los sucesivos cambios de red y las operaciones de mantenimiento de la jaula fueron realizados por cuenta propia con ayuda de otros trabajadores del Campus de Gandia de la UPV.

Se confeccionó una estructura secundaria para facilitar la instalación del transductor en el fondo de la jaula y la extracción de los peces al finalizar las mediciones acústicas de cada talla (Figura 4.4).



Fuente: Propia

Figura 4.4. Detalle de la estructura secundaria empleada para la instalación de los transductores en el fondo de la jaula y facilitar la extracción de los peces.

Esta estructura estaba formada por un anillo de 5 m de diámetro, montado con tubo de polietileno de 50 mm de diámetro y 2 atmósferas, circunscribiendo una cruz montada con tubo de PVC de 50 mm. La estructura se envolvió con una red con malla tipo *gamberet* cosida en forma de cilindro y cerrada por un extremo, que se introdujo dentro de la red que da forma a la jaula. La red estaba tejida con hilo de 1 mm de grosor, formando una malla de 4.7 mm de lado.

Para no entorpecer la actividad normal del muelle y evitar el deterioro de los cables, se encargó instalar un tubo de acero que conectara el interior del tinglado con la pared vertical que delimita el muelle con el agua en las proximidades de la jaula. Además se instaló una arqueta próxima al agua para facilitar las tareas a la hora de pasar los cables. Los cables del transductor se pasaron a través del tubo desde la jaula experimental hasta el laboratorio.

Se instalaron en el tinglado dos tanques de 3000 litros para el mantenimiento de las doradas transportadas desde una piscifactoría. Debido al mal estado de los tanques fue necesario repararlos con fibra de vidrio, evitando así fugas de agua. Se montó un circuito de recirculación de agua con dos ramales, uno permitía la oxigenación por recirculación del agua del tanque y el otro transportaba agua a un filtro biológico, que una vez filtrada se devolvía de nuevo al tanque. El filtro biológico estaba formado por biobolas contenidas en un pequeño tanque de 200 litros (Figura 4.5).



Fuente: Propia

Figura 4.5. Detalle de los dos tanques instalados en el tinglado para el mantenimiento de las doradas. Al fondo se puede observar el tanque con biobolas empleado como filtro biológico.

Inicialmente se colocó una bomba de superficie CKm 50 de Pedrolo para alimentar a los dos tanques, que proporcionaba un caudal máximo de 50 l/min, permitiendo trabajar a

presiones máximas de 6 bares y elevar agua hasta 9m, con un consumo de 370W. Esta bomba no resultó adecuada debido a las condiciones de elevada humedad y salinidad que se dan en el tinglado, que limitaron precipitadamente su vida útil. La bomba de superficie fue sustituida por dos bombas sumergibles Ecosub 420A de Leader Pumps, que permitió independizar los circuitos de cada uno de los tanques y realizar el llenado y el vaciado de los tanques con agua del mar. Estas bombas tienen una potencia de 750W, proporcionan un caudal máximo de 250 l/min y permiten elevar agua hasta 9 m. Se instaló un temporizador para alternar el encendido y apagado de las bombas cada 15 minutos, ya que no están diseñadas para trabajar de forma continua durante meses. En un principio se instaló un compresor de aire para mejorar la oxigenación del agua, pero se tuvo que desmontar debido a quejas por ruido del vecindario. La mayoría del material empleado en el montaje de los tanques fue cedido por el Laboratorio de Ciencia Animal del Campus de Gandía de la UPV.

4.1.1.2. DEFINICIÓN DE LAS TALLAS A MEDIR

Se han definido 5 grupos diferentes en función de la longitud total del pez, procurando cubrir todo el rango de tallas que se manejan en una explotación piscícola dedicada al engorde de dorada, desde el alevín que se siembra inicialmente hasta la talla comercial obtenida en los despesques. Para ello se ha seguido un criterio de diferencia del *TS* entre grupos sucesivos y de dispersión del *TS* dentro de un mismo grupo. Para el cálculo de la diferencia de niveles promedio entre grupos se ha empleado la expresión teórica que relaciona el *TS* con la longitud del pez

$$TS \approx 20 \cdot \log L + cte \quad 4.1$$

Inicialmente se establecieron 5 grupos con diferencias de talla entre grupos sucesivos de forma que las variaciones del *TS* fueran de 1.50 dB, correspondiendo a incrementos de aproximadamente el 18.9% de la longitud entre grupos sucesivos. El rango de longitudes para cada grupo se definió en base a la dispersión del *TS*, aceptando dispersiones de ± 0.14 dB respecto al valor central en cada uno de los grupos que suponen variaciones de $\pm 1.6\%$ en la longitud. Si en lugar de emplear la Ecuación 4.1 se utiliza la expresión de Love (Love, 1977), se previeron diferencias de 1.437 dB entre grupos y dispersiones de ± 0.134 dB dentro de un mismo grupo. En la Tabla 4.1 se recogen los valores central, máximo y mínimo de la longitud total para cada grupo, y el *TS* calculado según la ecuación de Love.

Las doradas bajo ensayo se encargaron a una piscifactoría. Para el cálculo de la masa correspondiente a las longitudes deseadas se realizó un cálculo aproximado de la masa correspondiente a cada grupo a partir de la expresión que relaciona la masa y la longitud total de la dorada, obtenida a partir de datos parciales de los muestreos llevados a cabo por Pablo Mayer para la elaboración de su tesis, aun en redacción y avalada por los

artículos (Mayer *et al.*, 2008; Mayer *et al.*, 2009; Mayer *et al.*, 2012). Estos datos proceden de muestreos realizados a ejemplares cultivados en la piscifactoría extinta Granja Marina Safor S.L., que estaba ubicada a pocas millas de la costa de Gandia. La expresión obtenida a partir del muestreo de 2796 ejemplares es

$$M(g) = 0.006046 \cdot L(cm)^{3.33989} \quad 4.2$$

con un coeficiente de determinación R^2 igual a 0,9748. Según la Ecuación 4.2 las variaciones de 1.50 dB entre grupos suponen variaciones de masa de 57.9%, y la dispersión de ± 0.14 dB dentro de cada grupo implican dispersiones en la masa de $\pm 5.4\%$. Los valores de masa calculados según la Ecuación 4.2 a partir de las longitudes predefinidas para cada grupo se recogen en la Tabla 4.1.

Se eligió una cantidad de 20 ejemplares para formar cada uno de los grupos, asumiendo que este número era suficientemente reducido como para evitar la detección de ecos procedentes de múltiples blancos, pero lo bastante elevado como para poder observar un número considerable de ecos procedentes de peces aislados. A pesar de la tendencia a la formación de pequeños bancos o agrupaciones, se presupuso que debido a la baja densidad de peces en el interior de la jaula en caso de formar grupos estos presentarían una baja densidad, de forma que aun así resultaría viable la detección de ecos procedentes de peces aislados. Para favorecer todavía más el registro de ecos de blancos individuales se optó por emplear un pulso acústico de corta duración como señal de excitación, que permitiera discriminar blancos próximos.

Tabla 4.1. Definición inicial de los grupos de dorada: longitudes media, mínima y máxima para una dispersión de ± 0.140 dB dentro de cada grupo calculado mediante la Ecuación 4.1, masa media estimada según la Ecuación 4.2, y media del TS calculada según la expresión de Love.

Grupo	L media (cm)	L mín (cm)	L máx (cm)	M media (g)	TS_{Love} (dB)
1	13.2	13.0	13.4	33.4	-42.7
2	15.7	15.4	16.0	59.6	-41.2
3	18.7	18.4	19.0	106.4	-39.8
4	22.2	21.8	22.6	189.7	-38.4
5	26.4	26.0	26.8	338.4	-36.9

En caso de contar con un número insuficiente de ejemplares para formar un grupo se escogió aquella porción de peces con longitudes próximas a las deseadas que presentara un número suficiente de individuos, reduciendo al máximo la dispersión de tallas y alejándose lo máximo posible al grupo más cercano. Si aun así no se disponía de

suficientes ejemplares, se aumentaba el rango de longitudes que definía el grupo. En todo caso se procuró que la dispersión de masas fuera lo más reducida posible.

4.1.1.3. MUESTREOS BIOLÓGICOS

Las doradas bajo estudio se obtuvieron de la empresa Maremar S.L. (la actual Bersolaz S.L.), una piscifactoría de engorde de dorada y lubina situada en el Puerto de Sagunto (Valencia). Los peces fueron transportados cuidadosamente en furgoneta desde el Puerto de Sagunto hasta el tinglado nº 3 del Puerto de Gandía en una cuba con oxigenación. Durante el transporte se controló continuamente los niveles de concentración y saturación de oxígeno con un oxímetro Handy Polaris de OxyGuard, pues un déficit de oxígeno supondría la asfixia de los peces y un exceso puede provocar la enfermedad de la burbuja, o también llamada embolia gaseosa, a causa de una sobresaturación de gases. En general se recomiendan concentraciones de oxígeno entre 5 y 7.5 mg/l, evitando niveles inferiores a 2 y superiores a 9 mg/l.

Se realizaron un total de 6 transportes fructíferos desde febrero de 2013 hasta abril de 2014, en los que se trasladaron entre 150 y 320 ejemplares en cada viaje según el tamaño de los peces, siendo reducida la mortalidad debida al traslado. Después de cada viaje se realizó un muestreo inicial de todos los ejemplares para evaluar la distribución de tamaños. A continuación se realizaron sucesivos muestreos para clasificar los individuos que iban a formar parte de cada uno de los grupos predefinidos. Antes de realizar el primer muestreo es muy recomendable dejar un periodo de al menos dos o tres días desde el transporte para que los peces puedan disminuir el nivel de estrés y reducir así la mortalidad tras el muestreo.



Fuente: Propia

Figura 4.6. Fotografía realizada durante un muestreo.

Habitualmente la diferencia entre el tamaño deseado y el tamaño real de los peces transportados desde Maremar S.L. ha sido elevada, a causa de la gran dispersión de tamaños existente en una jaula de piscifactoría, la dificultad de estimar a ojo su talla promedio y posiblemente a que la Ecuación 4.2 no describa fielmente a la población de dorada de Maremar S.L. Por estos motivos, se creyó conveniente el encargo de un gran número de peces que permitiera, tras sucesivos muestreos, hallar una pequeña porción con una dispersión de talla reducida para la formación de los diferentes grupos. Se decidió encargar entre 100 y 200 ejemplares de cada talla.

Al finalizar la toma de datos acústicos de cada grupo se realizó un último muestreo, que servía para comprobar el crecimiento nulo de los peces durante el intervalo de medida, validando así los datos registrados con la ecosonda. Los datos registrados durante el verano de 2013 para la menor talla fueron descartados al observar un crecimiento significativo a lo largo del periodo de ensayo.

La masa es el dato comúnmente manejado por empresas piscícolas para la gestión de sus procesos, mientras que en estudios acústicos se suele relacionar la energía acústica retrodispersada por un pez con su longitud total, o en algunos casos con la altura. Por este motivo, en los muestreos se decidió anotar los datos correspondientes a la longitud total, la altura máxima y la masa de cada ejemplar. Se utilizó un ictiómetro con una precisión de 1 mm para medir las dimensiones del pez, y una báscula con una precisión de 0,1 g para medir su masa. Los peces fueron anestesiados ligeramente con un poco de sedante para facilitar las labores del muestreo.

4.1.1.4. SISTEMA ACÚSTICO

Para la medida directa del *TS* de la dorada se utilizó una ecosonda científica EK60 de Simrad junto con un transductor split-beam modelo ES200-7C de Simrad, que posee una haz estrecha con una apertura de 7°, una frecuencia de trabajo de 200 kHz, y una longitud de cable de 42 m. La ecosonda fue controlada mediante un portátil Vostro 1510 de Dell, comunicados entre sí mediante el puerto Ethernet, que además se empleó para el almacenamiento de los datos. Todo el equipamiento electrónico se situó en el interior del laboratorio de hidroacústica, ubicado en el tinglado nº 3 (Figura 4.7).

El transductor se montó en el centro de la jaula, en el fondo y dirigido verticalmente hacia arriba para la medida ventral del *TS*, y en la superficie orientado hacia abajo para la medida del aspecto dorsal. Para facilitar su instalación y su orientación vertical, se instaló el transductor en una plataforma de tablero marino barnizado. Durante los registros dorsales se mantuvo la plataforma a flote con ayuda de dos flotadores tipo donuts, y se situó en el centro de la jaula con la ayuda de 4 cabos amarrados al anillo de flotación interior. Durante las grabaciones ventrales se fijó la plataforma a la cruz de la estructura secundaria, que se colocó en el interior de la red que da forma a la jaula (Figura 4.2 y Figura 4.4).



Fuente: Propia

Figura 4.7. Transceptor de la ecosonda científica split-beam EK60 de Simrad y portátil empleado para el control de la ecosonda y el almacenamiento de datos.

Debido a la complejidad del montaje experimental se creyó conveniente aprovechar el esfuerzo para medir con diferentes tipos de configuraciones, que serán objeto de futuros análisis más allá de los objetivos fijados para esta tesis doctoral. Se montaron en la plataforma el transductor split-beam ES200-7C para la medida directa del TS , y 3 transductores single-beam para la medida indirecta del TS (Figura 4.8), de forma que las caras radiantes estuvieran situadas todas a la misma altura. Se instalaron un transductor 200-28 CM de Simrad de gran apertura, un TC2122 de Reson bifrecuencia y un Z1 de Zunibal con una apertura de haz intermedia. En la Tabla 4.2 se resumen el tipo de haz empleado, la frecuencia de operación y la apertura del haz a -3 dB para los diferentes transductores empleados.

Tabla 4.2. Tipo de transductor, frecuencia de operación y apertura del haz a -3dB de los diferentes transductores montados en la plataforma para la medida directa e indirecta del TS .

<i>Marca</i>	<i>Modelo</i>	<i>Tipo</i>	<i>f (kHz)</i>	<i>θ_{-3dB} (°)</i>
Simrad	ES200-7C	Split-beam	200	7
Simrad	200-28 CM	Single-beam	200	30
Reson	TC2122	Single-beam	33 / 200	22 / 9.5
Zunibal	Z1	Single-beam	135.7	15



Fuente: Propia

Figura 4.8. Detalle de la plataforma utilizada para montar los diferentes transductores: ES200-7C de Simrad (naranja), 200-28 CM de Simrad (blanco), Z1 de Zunibal (negro) y TC2122 de Reson (gris).

En la Tabla 4.3 se resumen las siguientes especificaciones del transductor split-beam ES200-7C evaluadas por técnicos de Simrad: frecuencia de operación, sensibilidad en emisión definida en tensión y en corriente, sensibilidad en recepción, factor de directividad e índice de directividad en la dirección de máxima radiación, apertura del haz a -3dB en las direcciones longitudinal y transversal, ángulo equivalente del haz expresado en lineal y en dB, rendimiento electroacústico, módulo $|Z_T|$ y fase $\theta(Z_T)$ de la impedancia eléctrica del transductor a la frecuencia de trabajo, y potencia máxima que se puede emplear funcionando en modo pulsado $W_{Tx,máx}$.

Se introdujeron unos pocos ejemplares de dorada en la jaula flotante a escala, donde nadaban *libremente*. El número de peces de un mismo grupo introducido en la jaula fue reducido, entre 20 y 25 según el grupo, para evitar la detección de ecos procedentes de múltiples blancos que pudieran falsear la medida del *TS* (Ona, 1999). Antes de comenzar las mediciones se esperó al menos una hora, de forma que los peces tuvieran un cierto periodo para su acomodación al nuevo entorno. La alimentación de los peces del grupo a introducir en la jaula se suspendió desde el día anterior al inicio de las mediciones acústicas hasta finalizar la grabación de datos, para prevenir que la variación del volumen de la vejiga debida a la compresión por parte del estómago lleno de alimento pudiera afectar al valor del *TS* registrado. No obstante, en la jaula se observó la existencia de diversos organismos que podían servir de alimento a las doradas (clochinas, cangrejos, pequeños peces, algas, etc.).

Tabla 4.3. Especificaciones de la hoja de calibración del transductor split-beam ES200-7C de Simrad.

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>	<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
Tipo	<i>Split-beam</i>	$\theta_{-3dB,\beta 1}$ (°)	7.2
Nº serie	420	$\theta_{-3dB,\beta 2}$ (°)	7.0
f (kHz)	200	ψ^1	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^4	0.75
S_{Rx} (dB ref. 1 V/ μ Pa) ²	190.0	$ Z (\Omega)$	17.9
$Q_{m\acute{a}x}^3$	660.7	$\theta(Z)$ (°)	-8.7
$ID_{m\acute{a}x}$ (dB)	28.2	$W_{Tx,m\acute{a}x}$ (W) ⁴	1000

Se empleó un nivel de fuente de 217.2 dB ref. 1 μ Pa @ 1m (equivalente a una potencia de transmisión de 90 W), una longitud de pulso de 64 μ s y un intervalo entre pings de 50 ms. La elección del nivel de fuente aseguraba una buena relación señal a ruido, de forma que los ecos presentaban un gran nivel por encima del ruido de fondo, y evitaba la aparición de efectos no lineales (Tichy *et al.*, 2003; Pedersen, 2006). La duración del pulso empleada era la menor que permite seleccionar la ecosonda, y se comprueba que es capaz de resolver dos peces próximos de la menor talla ensayada. 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 64 μ s sería capaz de resolver dos peces espaciados al menos una distancia de 4.8 cm, calculado para una velocidad de propagación del sonido de 1500 m/s. Y según Partridge (1982) la distancia entre peces vecinos es característica de la especie y depende del tamaño de los peces, siendo comúnmente la tercera parte de la longitud de los peces. Siguiendo este criterio la distancia mínima de separación entre las doradas de menor tamaño debía ser de aproximadamente 4.4 cm. Por tanto, un pulso de 64 μ s de duración sería capaz de resolver hasta los peces de menor tamaño incluidos en el estudio. Se comprobó que la longitud del pulso conseguía abarcar toda la altura del pez, incluso para los ejemplares de mayor tamaño. Se estableció un intervalo entre pings de 50 ms, alcanzando un compromiso entre el número de ecos que forma una traza (entendida como la unión de ecos consecutivos procedentes de un mismo blanco) y el

¹ Calculado a partir de la apertura del haz a -3 dB según la Ecuación 3.39

² Calculado según la Ecuación 3.16

³ Calculado a partir de la apertura del haz a -3 dB según la Ecuación 3.34.

⁴ Dato procedente de la hoja de especificaciones del transductor. No es un dato de calibración

espacio necesario para el almacenamiento de los datos registrados. La tasa de repetición de pings elegida no generaba ruido de reverberación en las mediciones, favorecido por las múltiples reflexiones en las interfaces agua-aire y agua-fondo y por la naturaleza lodosa del fondo, que presenta una gran capacidad de absorción de la energía acústica.

En la Tabla 4.4 se recogen los datos del diámetro, el área de la sección transversal y el volumen insonificado por el haz acústico en función de la distancia al transductor, calculados para la apertura nominal a -3 dB de 7°. El volumen insonificado se ha aproximado mediante el cálculo del volumen de un cono. De igual modo se ha determinado la dependencia con la distancia de la resolución espacial y el área cubierta por cada celda, calculada a partir de la resolución angular de la ecosonda. Una celda se entiende como la mínima área de la sección transversal que es capaz de resolver el transductor, en función de la resolución angular y la distancia a este. El transductor ES200-7C tiene una sensibilidad angular de 23.0 y una resolución de fase eléctrica de 180°/128, que proporcionan una resolución angular de 0.061°. A distancias próximas al transductor, donde el tamaño de los peces o su vejiga era relativamente grande en comparación con el tamaño de la celda y podía llegar a abarcar un elevado número de celdas, tal vez se produjera un error en la estimación del ángulo de detección del blanco y, por tanto, el patrón de radiación del transductor no fuera corregido de forma adecuada.

Tabla 4.4. Dependencia con la distancia al transductor del diámetro, el área de la sección transversal y el volumen insonificado por el haz del transductor ES200-7C con un ángulo de apertura a -3 dB de 7°, y dependencia de la resolución espacial (tamaño de la celda) con la distancia debida a la resolución angular de la ecosonda.

<i>R (m)</i>	<i>Ø (m)</i>	<i>Área (m²)</i>	<i>Volumen (m³)</i>	<i>Celda</i>		
				<i>Lado (cm)</i>	<i>Diagonal (cm)</i>	<i>Área (cm²)</i>
1	0.122	0.012	0.004	0.11	0.15	0.01
2	0.245	0.047	0.031	0.21	0.30	0.05
3	0.367	0.106	0.106	0.32	0.45	0.10
4	0.489	0.188	0.251	0.43	0.60	0.18

4.1.1.5. CALIBRACIÓN

Para que los ensayos acústicos proporcionen medidas precisas, es necesario que la ecosonda esté correctamente calibrada. Por ese motivo el sistema acústico fue calibrado en diferentes momentos de la campaña de medida, en particular antes, durante y después de las mediciones.

Se ha seguido el procedimiento descrito por Simrad en el manual de la ecosonda para calibrar el sistema mediante el método del blanco estándar (Simrad, 2008), empleando la aplicación *Calibration* implementada en el programa ER60 de control de la ecosonda. 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, como se ha descrito en la Sección 3.2.2. El programa de calibración ajusta dos modelos diferentes a los datos registrados, 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 deberían repetirse.

A partir del registro de ecos procedentes de un 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, por lo que se emplearon los valores de fábrica.

Se ha utilizado una esfera estándar de calibración de cobre con un diámetro de 13.7 mm y un *TS* en torno a -45 dB a 200 kHz, proporcionada por Simrad junto con la ecosonda. El valor del *TS* de la esfera depende de sus dimensiones, la frecuencia, el material de la esfera, la duración del pulso y la velocidad de propagación de la onda acústica en el agua. La calibración se llevó a cabo en el interior de la jaula, en ausencia de peces u otros dispersores, y asegurando cierta separación entre el blanco de referencia y otros blancos indeseados, de forma que los ecos procedentes de blancos indeseados no interfirieran en la detección del blanco estándar. A diferencia de las calibraciones convencionales en las que el transductor se orienta verticalmente hacia el fondo y se cuelga la esfera por debajo del transductor mediante tres líneas, se colocó el transductor en el fondo de la jaula orientado hacia la superficie y se empleó una caña de pescar para mover la esfera a través del haz del transductor. Está se suspendió mediante un hilo de nailon de 0.30 mm y antes de introducirla en el agua se sumergió en una solución jabonosa para evitar que posibles burbujas de aire quedaran adheridas a la esfera, pues pueden interferir en el proceso de calibración. El blanco estándar se situó a una distancia de unos 3 metros del transductor, a una profundidad de aproximadamente 1 m, y fue movido a través del haz de forma que se obtuvieran detecciones en los cuatro cuadrantes de la sección del haz definida por la

apertura a -3 dB. Se midió la temperatura del agua a una profundidad de 1 m para el cálculo de la velocidad de propagación, y poder obtener así una estimación teórica del *TS* de la esfera a la frecuencia de trabajo y para la duración de pulso empleada a partir la hoja de especificaciones proporcionada por Simrad. Durante la calibración se registraron los datos en un fichero RAW.

Se ha de tener en cuenta que al situar la esfera a una distancia de 3 m del transductor esta no puede considerarse un blanco puntual, pues la diagonal de la celda definida por la resolución angular de la ecosonda tan solo cubre el 33% del diámetro de la esfera. Es necesario situar la esfera a una distancia mínima de 9 m para que el diámetro de esta sea igual o inferior a la diagonal de una celda. Sin embargo, debido a las dimensiones de la jaula resulta inevitable calibrar a distancias muy próximas al transductor, en un rango de unos 3 m, donde el blanco estándar llega a ocupar 3 y 4 celdas. Además, como se verá más adelante, la distancia media a la que se detectan peces se encontraba en torno a 3 m. A pesar de la problemática existente en la calibración a cortas distancias, se consideró oportuno practicar la calibración en el mismo rango de distancias en que se iba a detectar peces en la jaula a escala, que además resultó similar al rango de distancias de detección observado en jaulas en condiciones de producción como se verá en el Capítulo 5.

El sistema fue calibrado para una duración de pulso de 64 μ s y una potencia de 90 W, pues fue la configuración empleada en las mediciones del *TS*. Las calibraciones se llevaron a cabo para dos configuraciones con diferente intervalo entre pings, 1 s y 50 ms. Un intervalo de 1 s es el recomendado por Simrad para minimizar la interferencia entre pings sucesivos, mientras que 50 ms fue el intervalo utilizado en el ensayo. Se decidió calibrar con diferentes tasas de repetición de ping debido a las diferencias observadas en los parámetros de calibración obtenidas en los trabajos publicados por Zhao (1996) y Jørgensen & Olsen (2002). Zhao (1996) observó que la desviación del parámetro *transducer gain* de la ecosonda EK500 de Simrad alcanzaba valores de hasta -1.5 dB para intervalos entre pings de unos 240 ms respecto a los valores obtenidos a 800 ms y 1 s a una frecuencia de 38 kHz. Y en Jørgensen & Olsen (2002) obtuvieron desviaciones de -0.57 dB del *transducer gain* con la ecosonda EY500 de Simrad usando tasas de repetición de 130 ms respecto a las obtenidas a 1 s a una frecuencia de 38 kHz.

En la Tabla 4.5 se resumen los parámetros de configuración de la ecosonda empleados durante la calibración del sistema acústico y la medición del *TS*, así como los valores de fábrica de los parámetros de calibración de la ecosonda científica EK60 funcionando con el transductor ES200-7C cuando trabaja con una duración de pulso de 64 μ s. Se muestran los siguientes parámetros de configuración de la ecosonda: frecuencia, longitud de onda, distancia a campo lejano $R_{c.lej}$, potencia transmitida, duración del pulso, longitud del pulso L_{τ} , resolución espacial, ancho de banda del receptor B y criterio empleado para la elección del ancho de banda del receptor $B \cdot \tau$. Para el cálculo de λ , $R_{c.lej}$, L y dR se emplea una velocidad del sonido de 1500 m/s. Seguidamente se muestran los valores de fábrica de los parámetros de calibración que aparecen en el fichero de configuración de la

ecosonda *trlist.ini* para el transductor ES200-7C cuando trabaja con un pulso de 64 μ s de duración.

Tabla 4.5. Parámetros de configuración del sistema acústico empleados durante la calibración (a la izquierda) y parámetros de calibración de fábrica (a la derecha) para la ecosonda EK60 funcionando con el transductor ES200-7C para una duración de pulso de 64 μ s.

<i>Parám. configuración</i>	<i>Valor</i>	<i>Parám. calibración</i>	<i>Valor</i>
f (kHz)	200	G_{TS} (dB)	25.5
λ (mm)	7.5	Sa_{corr} (dB)	0.0
$R_{c.lej}$ (m)	0.5	$\theta_{-3dB,\beta1}$ (°)	7.0
W_{Tx} (W)	90	$\theta_{-3dB,\beta2}$ (°)	7.0
τ (us)	64	$Offset_{\beta1}$ (°)	0.0
L_{τ} (cm)	9.6	$Offset_{\beta2}$ (°)	0.0
dR (cm)	1.2	Ψ (dB)	-20.7
B (kHz)	18.76	$SensAng_{\beta1}$	23.0
$B \cdot \tau$	1.20	$SensAng_{\beta2}$	23.0

4.1.1.6. RECOGIDA DE DATOS ACÚSTICOS

La campaña de medidas acústicas se extendió desde marzo de 2013 hasta mayo de 2014, con una interrupción desde julio de 2013 hasta enero de 2014 por cuestiones medioambientales y técnicas. El manejo de animales vivos fue un tanto delicado y estuvo sujeto a imprevistos de carácter ambiental y patológico. Se registraron elevadas tasas de mortalidad en algunos traslados de peces, desde la piscifactoría hasta el Puerto de Gandia, por motivos inciertos y durante su almacenamiento en el tinglado por la aparición de enfermedades en los tanques de mantenimiento. Durante los meses de más calor fue necesario interrumpir las mediciones, ya que la longitud y el peso de los peces aumentaban de forma significativa en pocos días debido a la elevada temperatura del agua.

Se tomaron registros de ecos de dorada durante aproximadamente 72 horas para cada talla y posición del transductor (en el fondo de la jaula y en superficie). Los datos RAW registrados durante la medición del TS se almacenaron en el disco duro del portátil para su posterior procesado.

Además de los datos registrados con la ecosonda split-beam, se tomaron datos con la ecosonda EK60 funcionando en modo single-beam y registros de la forma de onda

completa con un sistema de adquisición de elevada frecuencia de muestreo. Se empleó un transductor 200-28 CM de Simrad junto con la ecosonda EK60 para la realización de medidas single-beam que permiten la estimación indirecta del *TS*. Y se registró la forma de onda de los ecos con un sistema de generación y adquisición PXI de National Instruments, junto con los transductores single-beam 200-28 CM, TC2122 de Reson y Z1 de Zumbal. El transductor TC2122 se descartó por no adecuarse a las necesidades de las mediciones. Se utilizaron dos señales de excitación, un pulso de una señal sinusoidal y un pulso tipo sine sweep. El análisis de los datos single-beam y de forma de onda completa no se incluyen en la redacción de esta tesis, y permitirá en futuras investigaciones evaluar la influencia de la apertura del haz de transductores single-beam y el uso de pulsos modulados en frecuencia en la estimación de la talla de la dorada a cortas distancias.

Durante los ensayos acústicos se midió diariamente la temperatura del agua a una profundidad de 1 m, empleando una sonda de temperatura Testo 110. Estos registros se realizaron de forma puntual, y se han empleado para el cálculo de la velocidad de propagación de sonido y el coeficiente de absorción del agua del mar. Resulta más conveniente una medida continua de la temperatura a mitad de altura de la jaula, que permita una estimación más precisa de la absorción y la velocidad de propagación del sonido a lo largo del intervalo de medida, pero no se dispuso de la instrumentación necesaria.

4.1.2. PROCESADO DE DATOS

4.1.2.1. ANÁLISIS DE LOS DATOS BIOMÉTRICOS

Se ha estudiado la relación entre parejas de datos de los diferentes parámetros biométricos masa, longitud y altura H anotados durante los muestreos iniciales que se realizaron a los ejemplares recién transportados desde la piscifactoría, mediante el programa estadístico Statgraphics y Matlab. En particular se han estudiado las correlaciones existentes entre $M - L$, $M - H$ y $L - H$, y se ha evaluado qué modelo de regresión se ajusta mejor a los datos por el método de mínimos cuadrados. Se ha incluido la altura máxima en estos ajustes para comprobar la correlación con las otras dos variables, ya que este parámetro puede estimarse a partir del registro del eco con una elevada f_s como se discute en el Capítulo 6.

Se han descrito estadísticamente los parámetros biométricos de los ejemplares que forman cada uno de los grupos clasificados por talla. Además se ha evaluado la variación de los parámetros durante las mediciones acústicas, comparando los datos del muestreo realizado antes y después de las mediciones acústicas, lo que permite comprobar el crecimiento nulo de los peces y validar así las mediciones acústicas.

4.1.2.2. TRATAMIENTO Y ANÁLISIS DE LOS DATOS ACÚSTICOS

Los datos registrados con la ecosonda científica split-beam han sido procesados mediante el programa Sonar5-Pro versión 6.0.2 (Balk & Lindem, 2011) y los resultados exportados a ficheros de texto, que son analizados en Matlab para la obtención de diferentes resultados.

La primera tarea a realizar con Sonar5-Pro es la conversión de ficheros de la ecosonda (.RAW) al formato de ficheros utilizado por el programa (.UUU). Hay que indicar qué archivos se desea convertir, la función TVG a emplear para compensar las pérdidas por propagación, el rango de distancias a extraer, los parámetros de calibración, los datos para el cálculo de la velocidad del sonido y el coeficiente de absorción, los parámetros de detección de ecos individuales, el umbral empleado para la conversión de formatos, el tipo de aplicación (ventral, dorsal o lateral), y la resolución y el margen dinámico a utilizar expresadas en dB. Durante la conversión se pueden introducir unos parámetros de calibración diferentes a los almacenados por la ecosonda durante las mediciones. Para la EK60 el programa permite configurar los siguientes parámetros: G_{TS} , Sa_{corr} , $\theta_{.3dB,\beta1}$, $\theta_{.3dB,\beta2}$, $SensAng_{\beta1}$, $SensAng_{\beta2}$ y Ψ . También se pueden cambiar los valores de la velocidad del sonido y el coeficiente de absorción almacenados en los ficheros .RAW, introduciendo nuevos datos de temperatura, salinidad, pH y profundidad. Sonar5-Pro calcula la velocidad del sonido con la fórmula de 19 términos de Del Grosso (1974), que presenta una precisión de 0.05 m/s para temperaturas entre 0 y 35°C, salinidades entre 0 y 45 ppm, y profundidades de hasta 1000 m. 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. Se ha de configurar el detector de ecos individuales, o también llamado SED (Single Echo Detector), que se encarga de seleccionar los ecos procedentes de blancos individuales basándose en diferentes criterios de amplitud, duración y fase del eco. Un eco se acepta como válido si cumple todos y cada uno de los criterios establecidos. En primer lugar la longitud de eco (LE), entendida como la distancia entre las muestras que se encuentran a -6 dB respecto al valor máximo antes y después de este, se ha de encontrar dentro de un rango. Se definen la mínima longitud de eco (mLE) y la máxima longitud de eco (MLE) relativas a la longitud del pulso transmitido. Una vez definida la longitud de eco se estima el valor del TS del eco como el valor máximo de todas las muestras que conforman el eco, y ha de superar un umbral mínimo (TS_{min}) para que el eco sea aceptado. A continuación se aplica el criterio de supresión de múltiples picos (SMP), que acepta o rechaza ecos en función de la diferencia entre máximos y mínimos locales dentro de un eco. Este criterio se puede configurar de forma que se acepten todos los ecos independientemente de la existencia de picos múltiples (*off*), que solo se acepten ecos con mínimos locales entre picos inferiores a 1.5 dB (*medium*), o que se rechacen todos los ecos que presenten múltiples picos (*strong*). Seguidamente se aplica el criterio de la máxima desviación de fase (MDF), de forma que la desviación estándar de los valores angulares de las muestras que forman el eco tiene

que ser inferior a ese valor, tanto en la dirección longitudinal como en la transversal. Y por último, se comprueba que el eco cumple el criterio de la máxima compensación de ganancia (*MCG*) definida en una dirección, que determina el rango de ángulos de detección de blancos, expresado como la caída en dB del patrón de directividad respecto al eje. Aunque el SED se define durante la conversión de los archivos es posible redefinirlo más adelante.

Puesto que se ha realizado un análisis del *TS*, la función $40\log$ ha sido empleada en la conversión de los archivos, a pesar de las consideraciones ya realizadas en la Sección 3.4 respecto a 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 5 m desde el transductor. Se han introducido los datos de calibración para cada día, obtenidos mediante la interpolación lineal de calibraciones sucesivas, con el fin de obtener unos resultados más precisos. Los valores de los parámetros expresados en dB se han transformado a magnitudes lineales, interpolado y vuelto a transformar a dB. Se han definido los valores de temperatura para cada día tomando una temperatura promedio a lo largo del día. Los datos de salinidad, pH y profundidad se han mantenido constantes durante el periodo de medida de cada una de las tallas. Se ha configurado una salinidad de 36 ppm, un pH de 8, y se ha elegido una profundidad de 2 m para el cálculo de la velocidad del sonido por corresponder a la profundidad media de la jaula. El uso de valores de temperatura constantes a lo largo del día, y de salinidad y pH a lo largo del intervalo de medida introduce un error en la estimación del *TS*. Sin embargo, no fue posible un seguimiento continuo de estas variables ya que no se dispuso de la instrumentación necesaria. El detector de ecos individuales se ha configurado de igual forma para la medida del aspecto ventral y dorsal del *TS*. La configuración del SED empleada se recoge en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6. Parámetros del detector de ecos individuales (SED) empleados en Sonar5-Pro.

<i>Parámetros</i>	<i>Valor</i>
<i>TS_{min}</i> (dB)	-55
<i>mLE</i>	0.5
<i>MLE</i>	2.0
<i>MDF</i> (°)	1.0
<i>MCG</i> (dB)	12
<i>SMP</i>	medium

Un estudio previo de las características de los ecos que forman trazas definidas de forma manual, ha permitido definir los parámetros del SED evitando la pérdida de detecciones válidas que dificulten el seguimiento de la trayectoria de los peces.

Antes de comenzar el análisis se ha delimitado el rango de distancias al transductor a considerar. La distancia mínima quedaba determinada por la distancia a campo lejano del transductor, que es la distancia a partir la cual se evitan los efectos de campo cercano del transductor. Esta distancia es calculada automáticamente por Sonar5-Pro y se encontraba en torno a 70 cm del transductor, dependiendo de la temperatura del agua. La distancia máxima al transductor quedaba definida por la superficie del mar en los registros ventrales, y por el fondo de la jaula en las grabaciones dorsales. Esta distancia máxima es variable de un ping a otro, por lo que se ha empleado la herramienta de detección de fondos (*Bottom detector*) para definirla. El detector de fondos suele emplearse para detectar de forma automática el eco del fondo observado bajo el haz de un transductor orientado verticalmente hacia abajo, y crea un archivo .BOTTOM donde se almacena el perfil detectado. Esta herramienta puede emplearse para la detección del eco de la superficie del mar en los registros ventrales, quedando así definido el perfil de superficie. Se ha empleado un umbral de -40 dB para la detección de la línea del fondo de la jaula en los registros dorsales y un umbral de -30 dB para definir la línea de superficie del mar en las grabaciones ventrales, ambos aplicados sobre el ecograma *Amp* que representa el *TSu*. En ocasiones ha sido necesario variar ligeramente este umbral tanto en las medidas ventrales como en las dorsales debido al cambiante estado del mar. Se ha empleado un mayor umbral para la detección del eco de superficie que para la detección del eco del fondo de la jaula, debido a que la interface agua-aire supone un cambio de impedancias más brusco que la interface agua-red o agua-tubo, por lo que ha resultado algo más fácil la detección de la línea de superficie.

Por último, se ha realizado un seguimiento automático de la trayectoria de los peces, comúnmente llamado *tracking* en acústica para la estimación de biomasa. Este método consiste en combinar ecos sucesivos procedentes de un mismo blanco para formar una traza y ecos que provienen de blancos diferentes en trazas separadas. Se emplea la herramienta *Advanced Multiple Target Tracking (MTT)* para la detección de las trazas, aceptando como traza válida aquella sucesión de ecos individuales que abarquen como mínimo una distancia angular dada y con un número máximo de pings consecutivos perdidos. Durante la formación de una traza el detector de trazas predice la posición del siguiente eco, donde se centra una ventana definida por un rango de número de pings, un rango de distancias, y un rango angular en las direcciones transversal y longitudinal. Si se halla un eco dentro de esa ventana pasa a formar parte de la traza, y en caso contrario se anota una detección perdida. En caso de observar algún conflicto, como que dos o más ecos se encuentren dentro de la ventana o que varias trazas compitan por uno o varios ecos, se aplican los parámetros de asociación para decidir qué eco formará parte de una traza o qué traza de incorporará un eco a su formación. Estos parámetros consisten en ponderaciones aplicadas al número de ping, la distancia, los ángulos transversal y

longitudinal, y el *TS*, de forma que cuanto mayor sea el peso mayor será la importancia de ese dominio. Cuando se predice la siguiente posición de un eco, también se predicen los ecos siguientes. Al evaluar la traza se calcula la distancia euclidiana entre el eco predicho y los ecos observados aplicando las ponderaciones, y la distancia más reducida será la que defina qué eco formará parte de la traza. Se han evaluado cuatro configuraciones diferentes del detector de trazas para los registros ventrales y dorsales, que difieren en la longitud angular de las trazas. Se han aceptado como trazas válidas aquellas sucesiones de ecos individuales que abarquen como mínimo una longitud de 2, 3, 4 y 5°, con un máximo de dos pings sucesivos perdidos. Inicialmente se han estudiado las trazas con longitudes de 3, 4 y 5 grados, ya conseguían minimizar el número de trazas incompletas o divididas en varios tramos, sin embargo ha resultado imprescindible analizar trazas de 2° debido al escaso número de trazas detectadas dorsalmente. Se ha optado por definir la longitud de la traza mediante una distancia angular, en lugar de usar la definición clásica en función del número de pings, debido a que las trazas obtenidas eran de mayor calidad, se minimizaba el número de trazas divididas en varios segmentos por la pérdida de detecciones y la detección de trazas procedentes de blancos indeseados, y se favorecía la detección de trazas procedentes de trayectorias de peces que atraviesan el haz independientemente de la distancia al transductor. Se ha elegido el algoritmo de predicción tipo *Zero velocity*, que centra la ventana en la misma posición que ocupa el actual eco en la traza en formación. Es un método de predicción simple, aunque frecuentemente es el que mejor trabaja de los diferentes métodos implementados en Sonar5 Pro. Se ha configurado una ventana de 1 ping, de 1 cm y de 1° en las direcciones longitudinal y transversal, de forma que el siguiente eco observado se ha de hallar entre esos rangos respecto a la posición predicha para ser incluido en la traza. Se ha configurado una ponderación de 50 para el número de ping, 10 para distancia, y de 1 para los dos ángulos y el *TS*. Las trazas detectadas fueron almacenadas en *fish baskets*, divididas en ecos y exportadas en formato de texto.

En la Figura 4.9 se muestra un ecograma de ejemplo registrado para la dorada de talla media de forma ventral. La mínima distancia incluida en el análisis del *TS* queda determinada por la línea naranja, que corresponde a la distancia al campo lejano del transductor determinada por Sonar5. Y la máxima distancia queda definida por la línea roja, que se obtiene mediante la herramienta de detector de fondos. En el ecograma de arriba se representa la envolvente de la señal de ecos (*Amp*) y en el ecograma de abajo se muestran las detecciones procedentes de blancos aislados (*SED*), empleado para la detección de trazas de forma automática en la capa de interés. En los pings centrales se puede apreciar la detección de una traza a unos 3 m del transductor, marcada con una línea roja, y a la derecha se muestra la trayectoria angular que ha seguido el pez a lo largo de la traza detectada, donde el área delimitada por la línea verde representa la apertura del haz a -3 dB. Se puede apreciar que la traza obtenida es de gran calidad.

Los datos exportados fueron analizados en Matlab. En primer lugar se clasificaron los ecos según su calidad, definiendo unos criterios del detector de ecos más estrictos que

los utilizados anteriormente. El uso de criterios menos estrictos ha facilitado la definición de trazas al reducir el número de ecos rechazados, disminuyendo así la cantidad de pings perdidos en una traza. Sin embargo, para una estimación precisa de la talla ha resultado más conveniente restringir el análisis a los ecos de mayor calidad. Tan solo los ecos con una longitud entre 0.7 y 1.5 y una máxima desviación de fase de 0.3° han sido aceptados. Se han comparado resultados para una máxima compensación de ganancia en una dirección de 3, 6 y 12 dB.

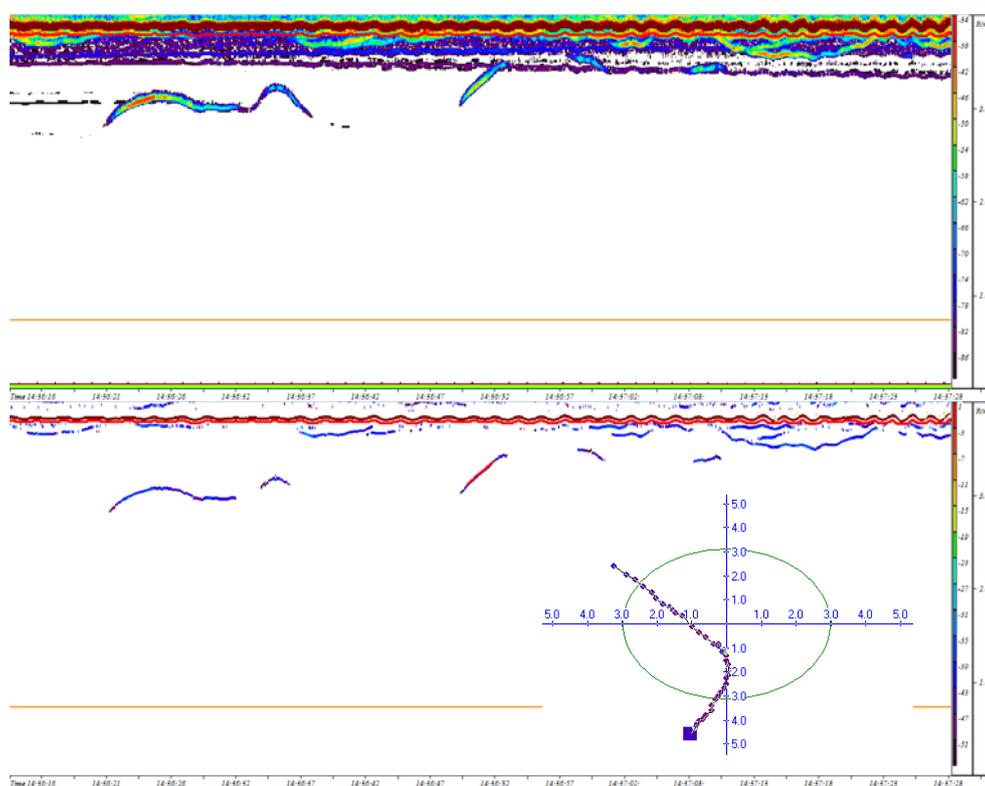


Figura 4.9. Ejemplo de ecograma registrado ventralmente para la dorada de talla intermedia. La línea naranja corresponde a la mínima distancia incluida en el análisis del *TS* y la línea roja a la distancia máxima determinada mediante el detector de fondos. Arriba se representa el ecograma de la envolvente del eco (*Amp*) y abajo el ecograma de detecciones individuales (*SED*), donde se puede apreciar en rojo la detección de una traza y la posición angular de los ecos que la forman.

Los ecos definidos como ecos de calidad se emplearon en el cálculo de diferentes estadísticos del *TS* de las trazas. En particular se ha valorado el uso del máximo, la media, la moda y los percentiles 25, 50 y 75 del *TS* de las trazas en la estimación de la talla.

Se obtuvo la distribución de probabilidad de los diferentes estadísticos del TS de las trazas, quedando caracterizados mediante la media μ y la desviación típica σ de los datos. El valor medio del TS se ha calculado promediando los valores transformados a su magnitud lineal y convirtiendo el valor medio lineal a dB según

$$\mu(TS) = 10 \log \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{TS_i / 10} \right] \quad 4.3$$

Se han obtenido las relaciones existentes entre el TS y la longitud y la masa de la dorada, resolviendo qué estadístico de las trazas y las distribuciones proporcionaban mejores resultados. Se ha establecido una relación lineal entre el TS y el logaritmo en base 10 de la longitud de la dorada según la Ecuación 3.49, por ser la expresión clásica empleada en acústica para la estimación de biomasa. De igual modo se ha determinado la relación entre el TS y el logaritmo en base 10 de la masa de la dorada, por ser la masa el parámetro biométrico más empleado en la gestión de piscifactorías. Puesto que la masa y la longitud guardan una relación de tipo potencial, el TS y el logaritmo de la masa también guardan una relación lineal. Se ha valorado la idoneidad de los ajustes para los diferentes parámetros de las distribuciones: media, moda y percentiles 25, 50 y 75. No se ha evaluado el valor máximo de las distribuciones por considerarlo muy sensible a la detección de blancos indeseados o de múltiples blancos. Se ha considerado el coeficiente de determinación, el p-valor del análisis de la varianza y el error medio en la estimación del TS a partir de los datos de longitud o masa para evaluar la bondad del ajuste y establecer qué configuración resulta más apropiada. Además se determinaron las expresiones que relacionan la longitud y la masa con el TS , que permiten estimar la talla o la masa a partir de la medida del TS y los errores asociados.

Se ha estudiado el ajuste de diferentes modelos de probabilidad a las distribuciones de la longitud de retrodispersión, pues puede resultar útil la reducción de las medidas experimentales de la energía retrodispersada por los peces a uno o dos parámetros de una función densidad de probabilidad (en inglés Probability Density Function, *PDF*) conocida para describir la distribución de probabilidad empírica. Entre otros, se ha estudiado el modelo de Rice, pues Clay & Heist (1984) observaron que era apropiado para describir la amplitud del eco de peces individuales vivos.

En base a las distribuciones de TS se ha determinado cuál es el mínimo número de registros necesarios para obtener unos resultados precisos. La estimación del tamaño muestral presenta una gran importancia, pues permite ajustar el tiempo de medida necesario para la estimación indirecta de la talla a partir de los datos acústicos.

Se ha estudiado la evolución del TS promedio por capas para evaluar la existencia de algún indicio sobre la dependencia del TS con la distancia al transductor dentro de un rango de distancias al transductor de 0.5 a 4 m.

4.2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta Sección se incluyen las relaciones biométricas halladas entre los diferentes parámetros anotados en los muestreos, la descripción de los grupos formados para la medida del TS en función de la talla, los resultados obtenidos tras la calibración, y los resultados del análisis del TS. Se estudia la densidad de probabilidad del TS de las trazas, la relación entre el TS y la longitud y la masa, el ajuste de modelos teóricos a la distribución de la longitud de retrodispersión, la dependencia del TS con la distancia, y se determina el tamaño mínimo de la muestra.

4.2.1. RELACIONES BIOMÉTRICAS

Se muestrearon manualmente un total de 1263 ejemplares supervivientes a los traslados a los pocos días de su llegada al Puerto de Gandía, anotando datos de longitud y masa de todos los ejemplares, y datos de longitud, masa y altura de 1019 peces.

Además se ha calculado el factor de condición, que es un índice que relaciona la longitud y la masa empleado por biólogos pesqueros para cuantificar el estado de nutrición de un pez (Ricker, 1975). Un elevado FC indica que el pez es robusto para su longitud, mientras que un valor bajo supone un pez delgado. Para una especie dada depende de la edad del ejemplar, la maduración de las gónadas y de otros factores como la alimentación, la estación del año o el área de distribución. El FC se obtiene a partir de la siguiente expresión

$$FC = \frac{M}{L^3} \cdot 100 \quad 4.4$$

donde M se expresa en gramos y L en centímetros. El FC de la dorada de piscifactoría normalmente varía desde 1.7 para los juveniles hasta 2 para los de tamaño comercial, mientras que los animales salvajes presentan un FC más bajo (García, 1995).

Los ejemplares bajo ensayo mostraron longitudes comprendidas entre 10.3 y 33.7 cm, alturas entre 3.0 y 11.0 cm, y masas entre 18.3 y 689.9 g. El FC variaba entre 0.93 y 2.44, con un valor promedio de 1.62. El 25% de los ejemplares de la muestra poseía un FC inferior a 1.50, y el 75% de los individuos presentaban valores inferiores a 1.74.

Se han estudiado las correlaciones existentes entre $M - L$, $M - H$, $L - H$ y $FC - L$ mediante el método de mínimos cuadrados. Se ha observado una interdependencia clara entre las diferentes parejas de datos, a excepción del FC frente a la longitud que ha mostrado una correlación relativamente débil. La dependencia de las diferentes dimensiones evaluadas se ha descrito fielmente mediante el modelo potencial, o también llamado multiplicativo, cuya expresión es

$$y = a \cdot x^b \quad 4.5$$

Los datos de L y H también se han ajustado mediante un modelo lineal, puesto que igualmente presentaba una elevada correlación. Se ha empleado la siguiente expresión

$$y = a + b \cdot x \quad 4.6$$

Sin embargo, no se ha hallado un modelo que se ajuste bien a los datos del FC frente a la L , tan solo se ha observado que existe cierta tendencia a aumentar el FC con la longitud de la dorada.

El modelo potencial ha sido linealizado para su resolución mediante mínimos cuadrados, de forma que el modelo ajustado ha sido

$$\ln y = \ln a + b \cdot \ln x \quad 4.7$$

Las expresiones resultantes se han obtenido a partir las dimensiones expresadas en centímetros y la masa expresada en gramos. En la Tabla 4.7 se resumen los resultados obtenidos para los diferentes ajustes. Se presentan los estimadores a y b , el coeficiente de determinación, el error absoluto medio (EAM) y el error relativo medio (ERM).

Tanto el EAM como el ERM son una medida de la desviación promedio de los valores estimados respecto a los valores observados. Puesto que se realiza una transformación de las variables para ajustar el modelo a los datos, ha sido necesario calcular estos errores para las variables no transformadas. En la Tabla 4.7 se muestran los errores calculados para el modelo potencial sin transformar, que se calculan a partir de las siguientes expresiones

$$EAM = \frac{\sum_{i=0}^N |y_{medido,i} - y_{estimado,i}|}{N} \quad 4.8$$

$$ERM = \frac{\sum_{i=0}^N \frac{|y_{medido,i} - y_{estimado,i}|}{|y_{estimado,i}|}}{N} \cdot 100 \quad 4.9$$

donde y_{medido} es el valor medido, $y_{estimado}$ es el valor estimado a partir del modelo ajustado, y N es el tamaño de la muestra.

Tabla 4.7. Resultados de los ajustes del modelo potencial para los pares de datos $M - L$, $M - H$, $L - H$ y $FC - L$; y del modelo lineal para $L - H$.

Modelo	$M = a \cdot L^b$	$M = a \cdot H^b$	$L = a \cdot H^b$	$L = a + b \cdot H$	$FC = L^b$
a	0.0102	0.7557	4.0462	2.4801	-
b	3.1521	2.7773	0.8666	2.7630	0.1583
R^2	0.9715	0.9777	0.9730	0.9722	0.0733
EAM	13.9336	11.1540	0.5623	0.5469	0.1365
ERM (%)	8.4739	7.3281	2.7288	2.6517	8.4750

Las diferentes relaciones de las dimensiones de la dorada presentan un coeficiente de correlación muy próximo a la unidad, por lo que se puede afirmar que existe una relación relativamente fuerte entre las variables y los modelos se ajustan fielmente a los datos. Aunque no se incluye en la Tabla 4.7, el p-valor obtenido en el análisis de la varianza fue igual a cero, y puesto que presenta valores inferiores a 0.05 se puede afirmar que los modelos son adecuados para describir los datos observados y existe una relación estadísticamente significativa entre cada par de variables con un nivel de confianza del 95%, resultando consistente con los elevados valores del coeficiente de correlación.

El modelo potencial también se ha ajustado de forma apropiada a los datos de masa y altura máxima de la dorada. El coeficiente de determinación es prácticamente igual al obtenido en la relación $M - L$, aunque el error en la estimación de la masa a partir de la altura se reduce ligeramente, apenas un 1.1% respecto al valor obtenido a partir de la longitud.

No se ha observado una variación significativa entre los ajustes potencial y lineal para los pares de datos $L - H$, puesto que los valores del coeficiente de determinación, y los errores estimados son prácticamente idénticos.

No se ha hallado un modelo que describa la dependencia del FC respecto a la L de la dorada debido a la elevada dispersión de valores del FC para una longitud dada, al igual que sucede con otras especies, quedando reflejada en la obtención de un amplio rango de predicción (Figura 4.10.d). Se ajusta el modelo potencial a los datos del FC frente a la longitud total debido a la definición del FC y a la relación potencial que guarda la M frente a la L . El p-valor correspondiente al término $\ln a$ de la Ecuación 4.7 linealizada es de 0.6862. Puesto que es mayor que 0.05 no se puede descartar la hipótesis de que este término sea nulo con un nivel de confianza del 95%, por lo que se considera un parámetro no significativo. Se ha fijado su valor a 0 para obtener un ajuste más robusto, ajustando el siguiente modelo a los datos

$$y = x^b \quad 4.10$$

En la Figura 4.10 se representan los datos observados y los modelos potenciales ajustados que se incluyen en la Tabla 4.7. Los valores medidos se muestran con puntos azules, el modelo ajustado con una línea continua verde, el intervalo de confianza para la media (*IC*) en rojo y el intervalo de predicción (*IP*) en gris. Tanto el *IC* como el *IP* se calculan para un nivel de confianza del 95%. El intervalo de confianza para la media indica que se tiene un 95% de confianza de que el valor medio estimado se encuentre dentro de este rango y describe cómo de adecuadamente se ajusta el modelo a los datos. Y el intervalo de predicción indica que hay un 95% de confianza de que las observaciones futuras caigan dentro de ese intervalo.

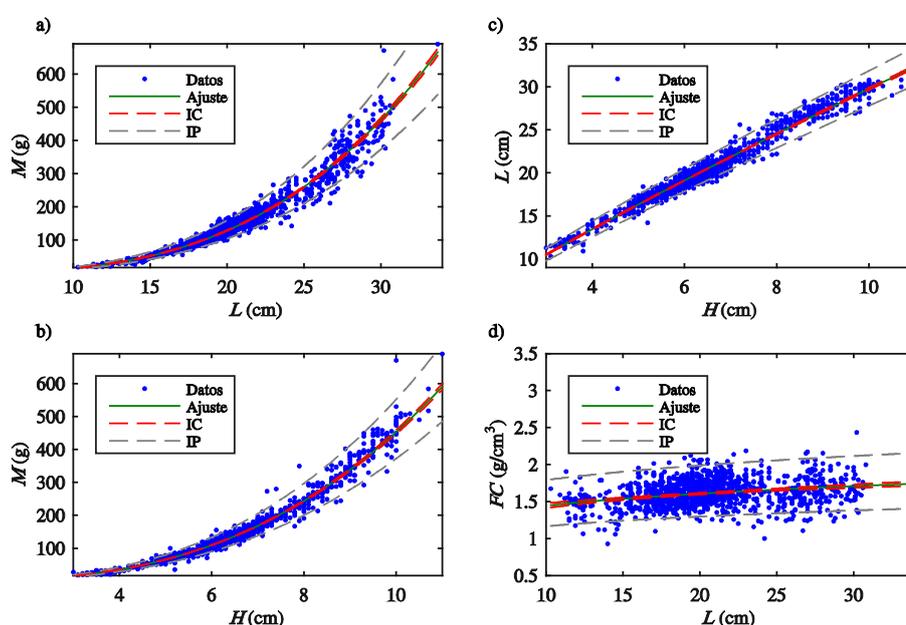


Figura 4.10. Representación de los datos registrados en los muestreos y los ajustes del modelo potencial en a), b) y c), y del modelo lineal en d). En a) se representa los datos de la masa frente a la longitud total, en b) la masa frente a la altura máxima, en c) la longitud total frente a la altura máxima, y en d) el factor de condición frente a la longitud. Se muestra el intervalo de confianza para la media y el intervalo de predicción para un nivel de confianza del 95%.

Se puede apreciar que el modelo potencial describe de forma adecuada la relación entre la masa y la longitud de la dorada (Figura 4.10.a) y entre la masa y la altura (Figura 4.10.b). La expresión obtenida para describir la relación entre la masa y la longitud difiere ligeramente de la Ecuación 4.2, derivada de los datos de Pablo Mayer de ejemplares de dorada procedentes de la piscifactoría Gramasa, ya que presenta una pendiente algo mayor aunque un coeficiente de determinación muy similar. Para

ejemplares de unos 16 cm la masa promedio observada en ambos casos es prácticamente idéntica. Los peces de Maremar S.L. presentan una masa ligeramente mayor para tallas menores a 16 cm, y algo inferiores para individuos de mayor tamaño, pudiendo alcanzar una diferencia del 9% para peces de unos 300 g. La obtención de valores de determinación similares implica una variabilidad semejante de la masa en ambas muestras.

La relación hallada entre la longitud total y la altura máxima queda bien definida tanto por el modelo potencial como por el modelo lineal, ya que presentan un coeficiente de determinación y un error promedio prácticamente iguales. Sin embargo, los límites de predicción del modelo potencial se ajustan mejor a los valores observados, y por tanto su poder predictivo es mayor que el de los límites de predicción derivados del modelo lineal (Figura 4.10.c).

El modelo potencial no es el que mejor se ajusta a los datos del *FC* frente a la longitud según el coeficiente de determinación, aunque otros modelos no presentan resultados notablemente mejores. El coeficiente de determinación próximo a cero muestra una relación débil entre ambas variables y explica la gran variabilidad de los valores del *FC* para una longitud dada (Figura 4.10.d).

Se ha conseguido hallar una relación significativa entre los diferentes pares de variables, con elevado coeficiente de determinación y errores relativamente reducidos, a excepción del factor de condición en función de la longitud de la dorada. En todos los casos se obtiene unos intervalos de confianza para la media muy estrechos, que indica que estas expresiones son robustas para la estimación de la media. Existen algunos datos que se encuentran fuera de los intervalos de predicción, siendo normal debido a que la dorada es un organismo vivo y como tal presenta cierta variabilidad en sus dimensiones y masa.

4.2.2. CLASIFICACIÓN DE LOS PECES POR TALLAS

En este apartado se analizan los datos correspondientes a los muestreos biológicos de los 5 grupos formados en función de la longitud total de los peces. En la Tabla 4.8, la Tabla 4.9 y la Tabla 4.10 se muestran el promedio μ , la desviación típica σ , el coeficiente de variación *CV*, el valor mínimo, el valor máximo y el rango para la longitud total, la altura máxima, la masa y el factor de condición de cada uno de los grupos establecidos. Las dimensiones se muestran en centímetros y la masa en gramos. El factor de condición se calcula según la Ecuación 4.4, siendo sus unidades g/cm^3 .

En la Tabla 4.8 se recoge la descripción de los grupos 1 y 2, que corresponden a los peces de menor talla. Estos dos grupos han presentado una talla ligeramente superior a la predefinida, pues no se dispuso de suficientes ejemplares de menor tamaño. No obstante, los peces clasificados se eligieron de forma que el rango de longitudes de dos los grupos estuvieran lo más alejado posible entre sí y respecto al grupo 3.

Tabla 4.8. Longitud, altura, masa y factor de condición del grupo 1 y 2 empleados en la medida del TS. Se muestran los datos de los muestreos realizados justo antes y después de las mediciones acústicas, así como la variación de los parámetros.

Grupo	1			2			
	Antes	Después	Variación	Antes	Después	Variación	
Fecha	10/02/2014	10/03/2014	28	10/03/2014	09/04/2014	30	
N total	22	12	-10	20	20	0	
L (cm)	μ	15.27	15.04	-0.23	16.76	16.67	-0.09
	σ	0.35	0.28	-0.07	0.21	0.27	0.06
	CV (%)	2.31	1.85	-0.46	1.23	1.59	0.36
	Mín	14.50	14.50	0.00	16.40	16.00	-0.40
	Máx	15.70	15.50	-0.20	17.00	17.10	0.10
	Rango	1.20	1.00	-0.20	0.60	1.10	0.50
H (cm)	μ	4.63	4.63	0.01	5.06	5.15	0.08
	σ	0.19	0.18	-0.01	0.09	0.08	-0.01
	CV (%)	4.12	3.94	-0.18	1.74	1.60	-0.14
	Mín	4.30	4.30	0.00	4.90	5.00	0.10
	Máx	4.90	4.90	0.00	5.20	5.30	0.10
	Rango	0.60	0.60	0.00	0.30	0.30	0.00
M (g)	μ	49.39	51.45	2.06	69.05	68.48	-0.57
	σ	5.93	5.51	-0.42	4.81	4.86	0.05
	CV (%)	12.01	10.71	-1.29	6.96	7.10	0.13
	Mín	40.10	40.70	0.60	62.00	61.90	-0.10
	Máx	59.50	59.80	0.30	77.60	79.50	1.90
	Rango	19.40	19.10	-0.30	15.60	17.60	2.00
FC	μ	1.38	1.51	0.12	1.47	1.48	0.01
	σ	0.12	0.12	0.00	0.08	0.09	0.01
	CV (%)	8.33	7.79	-0.54	5.52	6.00	0.48
	Mín	1.16	1.33	0.17	1.37	1.34	-0.03
	Máx	1.59	1.67	0.08	1.64	1.74	0.10
	Rango	0.43	0.34	-0.09	0.27	0.40	0.13

Fue necesario aumentar el rango de longitudes de 0.5 a 1.2 cm en el grupo de menor talla para poder disponer de un número suficiente de ejemplares, consiguiendo una dispersión en la masa de 19.4 g. Esta talla sufrió un 45.5% de bajas durante el intervalo temporal en que se realizaron las mediciones acústicas. A pesar de ello el promedio de las diferentes variables anotadas apenas varió durante el intervalo de medida. La longitud media disminuyó un 1.48%, la altura media aumentó un 0.13% y la masa media aumentó apenas 2 g, suponiendo un aumento del 4.17% de su peso corporal. Sin embargo, el factor de condición promedio sufrió una variación significativa del 9.03%. El grupo 2 mantuvo

el rango inicial de longitudes de 0.6 cm, logrando dispersiones en la masa de 15.6 g. No se produjeron bajas durante el intervalo de medida. El promedio de todas las variables muestreadas permaneció casi invariable, la longitud media aumentó un 0.51%, la altura media disminuyó un 1.68%, la masa se incrementó un 0.83%, y el factor de condición se redujo un 0.73%.

Tabla 4.9. Longitud, altura, masa y factor de condición del grupo 3 y 4 empleados en la medida del TS. Se muestran los datos de los muestreos realizados justo antes y después de las mediciones acústicas, así como la variación de los parámetros.

Grupo	3			4			
	Antes	Después	Variación	Antes	Después	Variación	
Fecha	22/01/2014	12/02/2014	21	31/05/2013	27/06/2013	27	
N total	24	20	-4	20	20	0	
L (cm)	μ	18.70	18.35	-0.36	22.24	22.63	0.39
	σ	0.20	0.22	0.02	0.29	0.44	0.15
	CV (%)	1.06	1.18	0.12	1.32	1.96	0.64
	Mín	18.40	17.80	-0.60	21.80	21.80	0.00
	Máx	19.00	18.70	-0.30	22.80	23.50	0.70
	Rango	0.60	0.90	0.30	1.00	1.70	0.70
H (cm)	μ	5.96	5.93	-0.03		7.11	
	σ	0.12	0.10	-0.02		0.28	
	CV (%)	2.03	1.65	-0.38		3.87	
	Mín	5.60	5.80	0.20		6.50	
	Máx	6.20	6.10	-0.10		7.50	
	Rango	0.60	0.30	-0.30		1.00	
M (g)	μ	100.38	100.86	0.48	169.65	158.75	-10.90
	σ	4.87	6.11	1.24	4.92	10.73	5.80
	CV (%)	4.85	6.06	1.21	2.90	6.76	3.85
	Mín	91.80	92.80	1.00	163.00	140.30	-22.70
	Máx	109.40	114.10	4.70	179.00	173.50	-5.50
	Rango	17.60	21.30	3.70	16.00	33.20	17.20
FC	μ	1.54	1.63	0.10	1.54	1.37	-0.17
	σ	0.07	0.09	0.02	0.07	0.06	0.00
	CV (%)	4.65	5.68	1.02	4.34	4.71	0.37
	Mín	1.40	1.49	0.08	1.40	1.23	-0.17
	Máx	1.69	1.82	0.12	1.65	1.46	-0.20
	Rango	0.29	0.33	0.04	0.25	0.22	-0.03

En la Tabla 4.9 se muestran los datos para los grupos 3 y 4. La formación del grupo 3 fue fiel a la definición original, logrando dispersiones en la masa de 17.6 g. Sin embargo fue necesario ampliar el rango de longitudes del grupo 4 de 0.8 a 1.0 cm para poder disponer de al menos 20 ejemplares, consiguiendo una dispersión en la masa de tan solo 16 g.

El grupo 3 experimentó un 16.67% de bajas durante el intervalo de medida del *TS*. La longitud total media disminuyó un 1.90%, la altura máxima media se redujo un 0.55%, la masa aumentó un 0.48%, y el factor de condición promedio se incrementó un 6.42%.

El grupo 4 no sufrió ninguna baja durante las mediciones acústicas. Las dimensiones de los peces de este grupo no variaron de forma significativa, sin embargo se observó una ligera reducción de la masa. La longitud promedio aumentó un 1.75%, la masa promedio se redujo un 6.42%, y el factor de condición disminuyó un 11.30%. No se anotaron datos de la altura de los peces al inicio de las mediciones.

En la Tabla 4.10 se recogen los resultados del grupo 5, el de mayor tamaño, que se formó con un rango de longitudes 1 mm más ajustado que la definición original. Se tuvo un 85.7% de bajas durante el ensayo, posiblemente debido a una falta de oxígeno por un aumento brusco de la temperatura durante el periodo de medida y a que los peces más grandes son más sensibles a las variaciones de su entorno (temperatura, salinidad, etc.) y presentan una menor capacidad de adaptación que los alevines. A pesar de la elevada mortalidad, las dimensiones y la masa promedio apenas variaron. La longitud media disminuyó un 3.75%, la altura media aumentó un 1.20%, la masa media se redujo un 0.65%, y el factor de condición medio se incrementó un 11,36%.

Las pequeñas desviaciones observadas entre los datos registrados en los muestreos anteriores y posteriores a los ensayos acústicos pueden deberse a los errores cometidos en la medida de las dimensiones y la masa, originados por la precisión de los instrumentos de medida o factores humanos en la lectura del valor. Se ha de tener en cuenta la complejidad de las medidas debido a que los peces se encontraban vivos durante el muestreo, aunque ligeramente sedados. Resulta conveniente aportar la mínima cantidad de sedante para que los peces se encuentren lo suficientemente calmados como para pesarlos en la báscula y medir sus dimensiones, ya que un exceso de sedante puede aumentar de forma considerable la probabilidad de mortandad tras el muestreo.

Se puede considerar que las dimensiones y la masa de los peces no variaron de forma significativa durante el ensayo, a excepción del grupo 4 en el que la masa media se vio reducida casi un 11%. En el grupo de mayor tamaño no se registraron variaciones notables, sin embargo hay que tener en cuenta que esta conclusión se basa en datos de los 3 ejemplares supervivientes.

Tabla 4.10. Datos biométricos de los grupos 5 empleados para la medida del TS. Se muestran los datos de los muestreos realizados antes y después de las mediciones acústicas, así como la variación de los parámetros.

Grupo	5			
	Antes	Después	Variación	
Fecha	09/04/2014	12/05/2014	33	
N total	21	3	-18	
L (cm)	μ	26.42	25.43	-0.99
	σ	0.23	0.15	-0.07
	CV (%)	0.85	0.60	-0.25
	Mín	26.10	25.30	-0.80
	Máx	26.80	25.60	-1.20
	Rango	0.70	0.30	-0.40
H (cm)	μ	8.30	8.40	0.10
	σ	0.44	0.20	-0.24
	CV (%)	5.33	2.38	-2.95
	Mín	6.60	8.20	1.60
	Máx	8.80	8.60	-0.20
	Rango	2.20	0.40	-1.80
M (g)	μ	288.79	286.90	-1.89
	σ	7.27	30.81	23.55
	CV (%)	2.52	10.74	8.22
	Mín	279.40	251.70	-27.70
	Máx	304.00	309.00	5.00
	Rango	24.60	57.30	32.70
FC	μ	1.57	1.74	0.18
	σ	0.06	0.19	0.13
	CV (%)	3.99	10.89	6.90
	Mín	1.48	1.54	0.05
	Máx	1.67	1.91	0.23
	Rango	0.20	0.37	0.17

En este apartado se han descrito detalladamente los diferentes grupos establecidos según la talla, en cuanto a longitud, altura máxima, masa y factor de condición. En general no se han observado diferencias acusadas de los diferentes parámetros evaluados antes y después de las mediciones acústicas, por lo que se puede asumir que no deben apreciar variaciones del TS durante el intervalo de medición debidas a cambios en las dimensiones de los peces. Los datos de los peces de mayor tamaño hay que manejarlos con cautela, debido a la elevada mortalidad que presenta este grupo.

4.2.3. CALIBRACIÓN

El sistema acústico se calibró empleando la misma duración de pulso y potencia de transmisión empleada durante las mediciones, 64 μ s y 90 W, y para diferente intervalo entre pings, 50 ms y 1 s. El proceso de calibración se llevó a cabo al inicio, durante y al final de la campaña de medida.

En la Tabla 4.11 se resume la configuración empleada durante las calibraciones y los resultados obtenidos para los dos intervalos entre pings utilizados. El valor de la velocidad del sonido se calcula para una profundidad de un metro, que es la profundidad promedio a la que se sitúa el blanco estándar, a partir de la medida de temperatura en el momento de la calibración, y para una salinidad de 36 ppm y un pH de 8. Se reúnen los valores del intervalo entre pings T_{ping} , la velocidad de propagación del sonido, el coeficiente de absorción del agua del mar, los parámetros para la detección del blanco estándar, los parámetros de detección de ecos procedentes de blancos individuales, el número de detecciones registradas, el error RMS obtenido, y los parámetros del transductor derivados de la calibración. Los parámetros empleados para la detección del blanco estándar son el valor teórico del TS de la esfera de calibración estimado según la velocidad del sonido y la duración del pulso, la desviación del TS admitida para el blanco estándar TS_{dev} que permite desechar ecos indeseados, y el rango de distancias en que se espera detectar el blanco de calibración definido por las distancias mínima R_m y máxima R_M . Los parámetros empleados para la detección de ecos individuales son el umbral de detección, las longitudes mínima y máxima de eco, la máxima desviación de fase expresada en pasos de la fase eléctrica, la máxima compensación de ganancia en una dirección, y el mínimo espaciado entre ecos relativo a la longitud del pulso emitido ($EE_{mín}$).

El sistema es ligeramente inestable, pues los resultados en las sucesivas calibraciones presentan cierta variabilidad. Estas variaciones pueden deberse a las diferentes condiciones de temperatura, salinidad y/o pH en los momentos en que se realizaron los trabajos de calibración, así como a la incertidumbre en la medida del TS de blancos detectados a cortas distancias.

El error cuadrático medio se sitúa entre 0.19 y 0.53. Los resultados de calibración obtenidos el 11 de marzo de 2013 para un intervalo entre pings de 50 ms pueden considerarse más que aceptables, por poseer un error inferior a 0.20 dB. La calibración realizada ese mismo día con un intervalo entre pings de 1 s y la realizada el 20 de mayo para un intervalo de 50 ms pueden considerarse aceptables, puesto que su error medio se encuentra entre 0.2 y 0.4. Las calibraciones que se llevan a cabo el 20 de mayo de 2013 para un intervalo entre pings de 1 s y el 2 de junio de 2014 para un intervalo de 50 ms presentan valores ligeramente superiores a 0.4, por lo que en principio no serían aceptables y deberían volverse a repetir. Sin embargo, los resultados mostrados son los que mejor se ajustan después de realizar varias repeticiones.

Tabla 4.11. Configuración durante la calibración de la EK60 junto con el transductor ES200-7C y resultados obtenidos. Calibraciones realizadas antes, durante y después de la medida del TS de la dorada en el Puerto de Gandía, para un pulso de 64 μ s, una potencia de 90 W y diferentes intervalos entre pings (50 ms y 1 s), empleando una esfera de cobre de 13.7 mm.

<i>Fecha</i>	<i>11/03/2013</i>	<i>11/03/2013</i>	<i>20/05/2013</i>	<i>20/05/2013</i>	<i>02/06/2014</i>
T_{ping} (s)	0.050	1	0.050	1	0.050
c (m/s)	1505.5	1505.5	1519.3	1519.3	1530.7
α (dB/km)	60.2	60.2	70.4	70.4	79.3
<i>Blanco</i>					
$TS_{teór}$ (dB)	-44.5	-44.5	-45.5	-45.5	-45.5
TS_{desv} (dB)	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
<i>estándar</i>					
R_m (m)	2	2	2	2	2
R_M (m)	3.7	3.7	3.6	3.6	3.6
<i>Parámetros</i>					
TS_{min} (dB)	-60.0	-60.0	-60.0	-60.0	-60.0
mLE	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
<i>Detección</i>					
MLE	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
<i>Ecos</i>					
MDF	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0
<i>Individuales</i>					
MCG (dB)	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
EE_{min}	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
N° detecciones	233	135	221	200	180
<i>Error RMS</i>					
$Error_{RMS}$	0.19	0.24	0.39	0.47	0.43
<i>Parámetros</i>					
G_{TS} (dB)	24.42	24.05	24.03	24.21	24.46
$S_{d_{corr}}$ (dB)	-0.43	-0.44	-0.52	-0.82	-0.44
$\theta_{-3dB,\beta1}$ (°)	6.28	6.42	6.60	6.26	6.15
$\theta_{-3dB,\beta2}$ (°)	6.43	6.49	6.15	6.29	5.84
<i>Parámetros</i>					
$Offset_{\beta1}$ (°)	-0.08	-0.04	0.01	0.01	-0.00
<i>Transductor</i>					
$Offset_{\beta2}$ (°)	0.04	0.00	-0.11	0.00	-0.05
Ψ (dB)	-20.7	-20.7	-20.7	-20.7	-20.7
$\Psi_{calculado}$ (dB) ⁵	-21.57	-21.44	-21.55	-21.68	-22.08
$SensAng_{\beta1}$	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0
$SensAng_{\beta2}$	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0

⁵ Calculado según la Ecuación 3.39, empleada por Simrad para estimar el valor de Ψ a partir de la medida de la apertura del haz a -3 dB.

Prácticamente el error RMS de las calibraciones se sitúa entre 0.2 y 0.4, por lo que se considera con las condiciones durante el proceso de calibración no fueron muy adecuadas, pero aun así pueden considerarse aceptables. El elevado valor del error RMS puede deberse a los errores cometidos en la detección a cortas distancias, la detección de ecos procedentes de blancos indeseables, las corrientes existentes en el canal del puerto, etc. La esfera de calibración no se comporta como un blanco puntual cuando es detectada a distancias muy próximas al transductor. En este entorno el registro de detecciones procedentes de blancos indeseables es inevitable, debido a la gran cantidad de biota y residuos existentes en el agua del Puerto de Gandia. Cabe destacar que el error RMS asociado a las calibraciones realizadas en un mismo día es mayor cuando se emplea un intervalo entre pings de 1 s.

Normalmente se recomienda realizar las prácticas de calibración con un intervalo entre pings de 1 s, de forma que interferencia entre pings consecutivos sea mínima. Sin embargo, se ha optado por actualizar los datos de calibración de la ecosonda empleando los parámetros obtenidos para un intervalo entre pings de 50 ms debido a que se ha comprobado que no existe interferencia entre pings consecutivos, y se han observado variaciones significativas de los parámetros en función del intervalo empleado entre calibraciones realizadas el mismo día y una reducción del error asociado para el menor dicho intervalo entre pings. El G_{TS} obtenido para el menor intervalo entre pings ha alcanzado variaciones de hasta -0.37 dB respecto al resultado obtenido para 1 s, entre las dos configuraciones empleadas para calibrar el sistema, y de 0.30 dB para el Sa_{corr} . No se ha observado una dependencia clara de la apertura del haz, la desviación del haz respecto al eje y el Ψ calculado con el intervalo entre pings.

Se han estimado los parámetros de calibración para los días intermedios entre sucesivas calibraciones mediante la interpolación lineal de los datos. Los valores de los parámetros expresados en dB se han convertido a lineal, interpolado mediante una interpolación de tipo lineal, y convertido otra vez a dB.

4.2.4. MEDIDA DEL TS

En este apartado se presentan los resultados del TS de ejemplares individuales de dorada, tanto para el aspecto ventral como para el dorsal. Se muestra la densidad de probabilidad del TS de las trazas para las cinco tallas ensayadas, y la relación entre el valor medio de las distribuciones del TS y la longitud y la masa de los peces. Se han ajustado diferentes modelos de distribución teóricos a los datos de L_{bs} y evaluado la correlación entre algún parámetro del modelo y la longitud y la masa de los peces. Además se ha determinado la mínima cantidad de trazas necesarias para la obtención de resultados precisos, y estudiado la dependencia del TS en función de la distancia.

Puesto que la vejiga es el principal elemento dispersor de la dorada y considerando su máxima dimensión para las tallas ensayadas (≈ 10 cm), la distancia mínima a campo

lejano de los peces pudo hallarse próxima a 1.3 m. Teniendo esto en cuenta, en principio sería posible evaluar la dependencia del *TS* con la longitud en la jaula a escala en un rango de 1.3 a 4 m.

4.2.4.1. DENSIDAD DE PROBABILIDAD DEL *TS* POR TALLAS

Se ha estudiado el efecto de la longitud de las trazas en la estimación de la talla a partir de los datos acústicos. Ventralmente se ha detectado un elevado número de trazas, permitiendo evaluar el efecto de la longitud de las trazas. Sin embargo, el número de trazas registradas de forma dorsal ha sido muy reducido, limitando el estudio a trazas de 2°. Inicialmente se consideraba que la detección de trazas completas, con una mayor trayectoria a través del haz del transductor, proporcionaría mejores resultados.

Una vez detectadas las trazas se emplean unos criterios más estrictos para seleccionar los ecos de mayor calidad, que se utilizarán para en la estimación de biomasa. Se ha fijado la *LE* entre 0.7 y 1.5, y la *MDF* en 0.3°, comparando resultados para una *MCG* de 3, 6 y 12 dB. El rango de longitudes de ecos se ha delimitado de forma que se incluyeran todos los valores posibles de la longitud de los ecos procedentes de la dorada. Una *MDF* de 0.3° es un valor recomendado en condiciones normales, no demasiado ruidosas, y ha permitido incluir una gran parte de los ecos detectados. Se muestran los resultados de los dos casos extremos de la *MCG*, 3 y 12 dB. Tan solo se pueden comparar los resultados ventrales y dorsales para una *MCG* de 12 dB, ya que al disminuir la apertura del haz el número de trazas observadas dorsalmente es muy reducido. Una compensación de 3 dB implica aceptar ecos en una apertura de unos 7°, y una compensación de 12 dB aumentar la apertura hasta aproximadamente 12°. Se ha de tener en cuenta que la calibración tan solo abarca la apertura angular definida por una compensación de 6 dB, que supone aproximadamente 9° de apertura, y al aumentar el ángulo de detección se incrementa el error en la estimación del ángulo y, por tanto, la compensación del patrón de directividad se vuelve más imprecisa.

Se ha observado un aumento de la longitud del eco promedio con la talla de los peces, así como una mayor dispersión de valores y una moda próxima a 0.9. De igual modo, se ha apreciado un aumento en la media y la dispersión de la desviación de la fase para los registros de las dos tallas mayores, mientras que ventralmente no se observan cambios.

A partir de los ecos de calidad se han calculado de nuevo los estadísticos de las trazas. Se ha evaluado la idoneidad del máximo, la media, la moda, y los percentiles 25, 50 y 75 del *TS* de las trazas para la estimación la talla a partir de los datos acústicos. Además se ha estudiado el uso del máximo y la media del *TS_u* de las trazas, obtenidos a partir de los niveles de ecos sin compensación de la directividad del transductor, con el fin de valorar la posible aplicación de ecosondas single-beam para la estimación de la talla. Y por último, se ha determinado la densidad de probabilidad del *TS* de las trazas para las 5 tallas diferentes, quedando definidas por la media y la desviación típica.

A continuación se resumen los resultados obtenidos a partir de trazas de 2° de longitud, ya que es la configuración que mejores resultados ha proporcionado en base al grado de correlación entre el *TS* y la longitud de los peces como se verá más adelante; para una *LE* entre 0.7 y 1.5, una *MDF* de 0.3° y una *MCG* de 3 y 12 dB; y para los siguientes estadísticos de las trazas: máximo ($TS_{Máx}$), media (TS_{Medio}) y percentil 75 (TS_{P075}) del *TS*, y máximo del *TSu* ($TSu_{Máx}$), por ser los estadísticos que han aportado ajustes más robustos cuando se correlacionan con la longitud de la dorada.

Los registros ventrales muestran distribuciones unimodales para todas las tallas. Mientras que los histogramas obtenidos dorsalmente podrían presentar bimodalidad para alguna talla, aunque tal vez pueda deberse a la escasez de trazas detectadas. Las distribuciones correspondientes a las dos tallas que presentan un mayor número de detecciones son unimodales, por lo que tal vez las distribuciones obtenidas ventralmente también resulten unimodales si se dispone de un elevado número de trazas. La unimodalidad de las distribuciones puede deberse a una reducida directividad de la vejiga de la dorada a 200 kHz, de forma que la detección de los lóbulos laterales se vuelva insignificante. También puede suceder que los lóbulos laterales queden enmascarados por el ruido ambiental o se encuentren en una dirección muy lejana al eje, reduciendo la probabilidad de detección. Estos resultados coinciden parcialmente con lo observado por Knudsen *et al.* (2004), que obtuvieron distribuciones unimodales de forma ventral y bi o trimodales dorsalmente.

Las distribuciones de probabilidad se han descrito mediante la media y la desviación típica de los datos. En la Tabla 4.12 se incluyen los resultados para los 4 estadísticos del *TS* de las trazas para trazas con una longitud angular de 2°, formadas por ecos con diferente máxima compensación de ganancia. Los resultados para una *MCG* de 3 y 12 dB aparecen en la parte izquierda y en derecha de la Tabla, respectivamente. En la parte superior se muestran los resultados para el aspecto ventral del *TS* y en la parte inferior para el aspecto dorsal.

En las grabaciones ventrales el número de trazas detectadas se incrementa de forma considerable (entre 54 y 88%) al aumentar la *MCG* de 3 a 12 dB, puesto que casi se duplica en rango angular en que se aceptan ecos.

Como era de esperar, la media de los diferentes estadísticos ventrales presenta una tendencia creciente al aumentar la talla de los peces, a pesar de los posibles errores cometidos en la medida del *TS* a tan corta distancia. La desviación típica de las distribuciones también posee cierta tendencia a aumentar con el tamaño de los peces, como sugieren Clay & Heist (1984). Este ensanchamiento de las distribuciones con la talla es debido a la posibilidad de detectar un mayor rango de nivel de eco para los peces de mayor tamaño.

Tabla 4.12. Longitud media, número de trazas detectadas y media y desviación típica de los diferentes estadísticos de las trazas: máximo, media y percentil 75 del T , y máximo del TSu . Resultados para los registros ventrales en la parte superior de la tabla y para las grabaciones dorsales en la parte inferior. Las trazas poseen una longitud angular mínima de 2° y están formadas por ecos con una LE entre 0.7 y 1.5, una MDF de 0.3°, y una MCG variable. Se comparan los resultados para una MCG de 3 dB y 12 dB, que se muestran en la parte izquierda y derecha de la tabla respectivamente.

L(cm)	TS ventral (dB) – MCG 3 dB										TS ventral (dB) – MCG 12 dB										
	$TS_{Máx}$		TS_{Medio}		TS_{p075}		$TS_{Máx}$		TS_{Medio}		TS_{p075}		$TS_{Máx}$		TS_{Medio}		TS_{p075}		$TS_{Máx}$		
	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	
15.27	20476	-35.63	3.19	-37.73	3.10	-36.82	3.15	-38.36	3.85	31543	-34.67	2.97	-37.44	2.89	-36.39	2.93	-39.82	6.23			
16.76	12234	-34.60	3.52	-36.53	3.36	-35.64	3.43	-37.53	4.15	22906	-33.54	3.29	-36.24	3.18	-35.15	3.24	-39.63	6.88			
18.70	50177	-32.72	3.30	-34.70	3.12	-33.78	3.19	-35.59	4.94	85081	-31.80	3.02	-34.43	2.90	-33.34	2.96	-37.38	6.60			
22.24	21536	-31.68	3.70	-33.68	3.41	-32.70	3.53	-34.41	4.31	40466	-31.38	3.50	-34.10	3.21	-32.90	3.32	-36.65	7.42			
26.40	11168	-30.06	3.80	-32.35	3.50	-31.34	3.60	-32.87	4.43	20263	-29.34	3.50	-32.21	3.27	-31.03	3.35	-34.97	7.24			

L(cm)	TS dorsal (dB) – MCG 3 dB										TS dorsal (dB) – MCG 12 dB										
	$TS_{Máx}$		TS_{Medio}		TS_{p075}		$TS_{Máx}$		TS_{Medio}		TS_{p075}		$TS_{Máx}$		TS_{Medio}		TS_{p075}		$TS_{Máx}$		
	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	
15.27	62	-37.11	4.09	-40.16	3.47	-38.69	3.71	-39.77	4.96	112	-36.31	3.06	-40.06	2.77	-38.52	2.98	-41.74	6.73			
16.76	465	-37.34	4.17	-39.48	3.72	-38.48	3.89	-39.77	4.61	632	-36.57	3.92	-39.27	3.42	-38.03	3.58	-40.86	6.75			
18.70	1717	-36.97	3.86	-39.65	3.40	-38.48	3.56	-39.94	4.46	2853	-35.88	3.26	-39.04	2.97	-37.68	3.13	-41.60	6.50			
22.24	1413	-36.70	3.58	-38.57	3.29	-37.66	3.37	-39.39	4.14	2262	-36.01	3.59	-38.26	3.37	-37.24	3.42	-40.98	6.36			
26.40	107	-35.84	4.46	-38.14	3.92	-36.75	4.22	-38.99	4.81	180	-34.50	4.59	-37.45	4.00	-36.11	4.19	-40.50	6.29			

En general, la media de los diferentes estadísticos del *TS* de las trazas registradas ventralmente tienden a aumentar ligeramente al incrementar la *MCG* y la desviación típica se ve reducida en algunos casos hasta un 8.5%, tal vez debido a una inadecuada sobrecompensación del patrón de directividad para las posiciones angulares más distantes del eje del transductor a causa del aumento de la imprecisión en la estimación del ángulo. Este efecto resulta más notable para el *TS* máximo de las trazas. Sin embargo, la media del *TSu* máximo de las trazas decrece al aumentar la *MCG* y la dispersión de valores aumenta de forma notable, con incrementos de hasta el 72% en la desviación típica, ya que se aceptan ecos más débiles procedentes de ángulos mayores que contribuyen a aumentar el rango de niveles de eco hacia menores valores.

En la configuración dorsal el número de registros aumenta entre un 36 y un 8% al incrementar la *MCG* de 3 a 12 dB, aunque hay que tener en cuenta que el número de trazas detectadas es generalmente escaso, sobre todo en los grupos 1, 2 y 5.

La media y la desviación típica de los datos obtenidos dorsalmente muestran cierta tendencia creciente al aumentar la talla de los peces, aunque para algunos estadísticos de forma menos evidente que para los registros ventrales. Esta dependencia con la talla se manifiesta de forma más clara al aumentar la *MCG*, pudiendo indicar que el número de trazas detectadas para una *MCG* de 3 dB es insuficiente para la obtención de resultados fiables. La desviación típica del *TSu* máximo de las trazas no sigue esta tendencia.

Al igual que sucede ventralmente, al incrementar la *MCG* aumenta ligeramente la media del *TS*, con diferencias mayores para el *TS* máximo, y el *TSu* máximo decrece. En cuanto a la desviación típica del *TS*, no se percibe una pauta tan definida en comparación con los registros ventrales, pues aumenta o decrece de forma indistinta al aumentar la *MCG*. Si bien, el *TSu* máximo tiene un comportamiento similar al caso ventral, pues se ve incrementado entre un 36 y un 54% al aumentar la *MCG* de 3 a 12 dB.

Debido a la falta de detecciones no se consideran muy representativos los resultados obtenidos para los registros dorsales. Sería interesante disponer de una mayor cantidad de detecciones dorsales que permitiera extraer resultados más concluyentes sobre qué parámetro es más idóneo para la estimación de la talla de la dorada en jaulas de forma dorsal.

En general, para la configuración dorsal se obtienen valores medios de *TS* entre un 1.4 y 6.1 dB inferiores a los registrados ventralmente. Cuanto mayor es el tamaño de los peces más difiere el *TS* obtenido de forma ventral y dorsal. Tal vez dorsalmente se obtengan menores valores debido al apantallamiento de la vejiga por la espina dorsal.

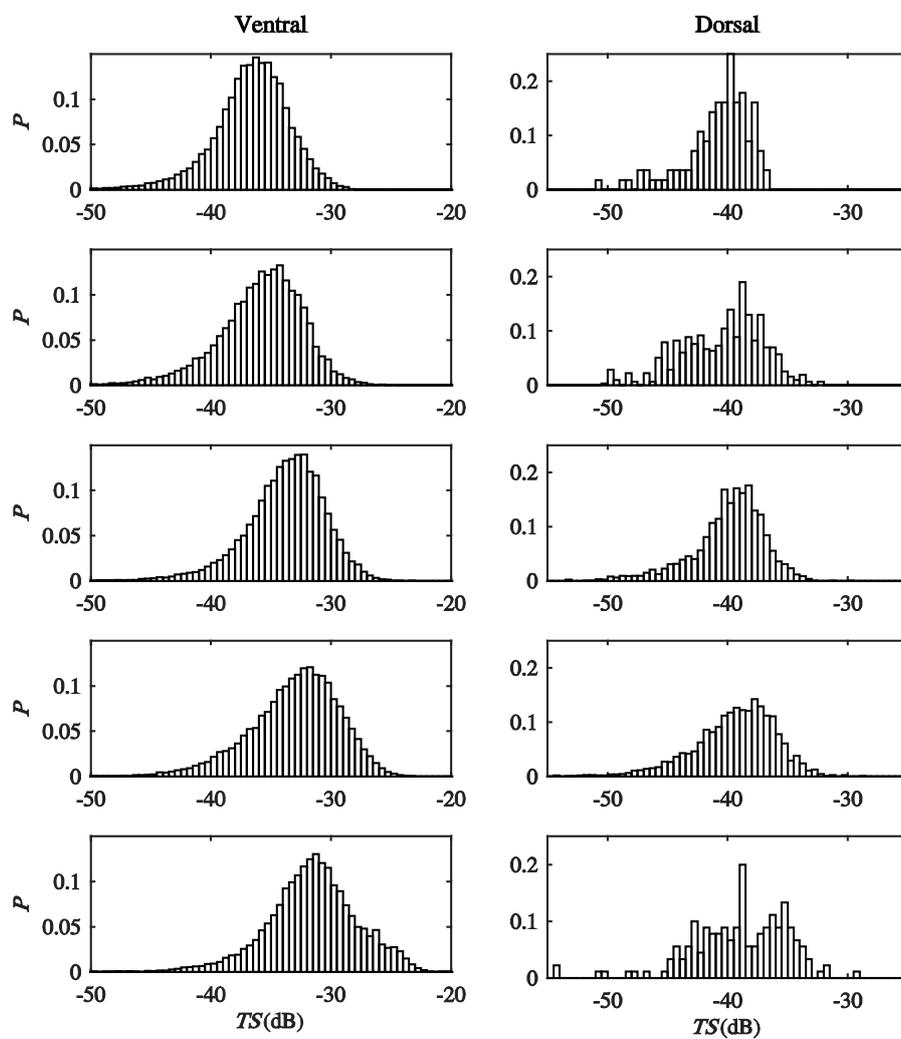


Figura 4.11. Densidad de probabilidad del TS máximo de las trazas para los registros ventrales (izquierda) y del TS medio de las trazas para los registros dorsales (derecha) a una frecuencia de 200 kHz. Las trazas poseen una longitud angular mínima de 2° y están formadas por ecos con una LE entre 0.7 y 1.5, MDF de 0.3° , y una MCG de 3 dB para los registros ventrales y de 12 dB para los registros dorsales. Los datos se muestran ordenados de arriba a abajo de menor a mayor talla.

En la Figura 4.11 se representa la densidad de probabilidad del *TS* de las trazas para las diferentes tallas a intervalos de 0.5 dB. En la parte izquierda se muestran los histogramas del *TS* máximo de las trazas obtenido de forma ventral a partir de la detección de ecos con una *MCG* de 3 dB, por ser la configuración que proporciona mejores correlaciones con la longitud de los peces como se verá más adelante. Y a la derecha se muestran las distribuciones del *TS* medio de las trazas obtenidas dorsalmente a partir de los ecos definidos con una *MCG* de 12 dB, ya que es la configuración que proporciona un mayor grado de correlación cuando se relaciona el valor medio de las distribuciones con la longitud de la dorada. Los resultados se encuentran ordenados de arriba a abajo de menor a mayor tamaño. De aquí en adelante las representaciones gráficas de los resultados para las diferentes tallas irán ordenados de esta misma forma.

Los histogramas obtenidos ventralmente presentan un perfil muy similar para las diferentes tallas, que se va ensanchando hacia valores más altos del *TS* al aumentar el tamaño de los peces. El rango de valores muestra diferencias en el *TS* máximo de las trazas próximos a 25 dB. La distribución de los datos correspondientes a los peces de mayor tamaño difiere ligeramente del resto de tallas, tal vez debido a un comportamiento distinto de los peces relacionado con la elevada tasa de mortalidad de este grupo durante las mediciones acústicas.

Se puede apreciar que los histogramas obtenidos dorsalmente son unimodales para los dos grupos que presentan un mayor número de trazas detectadas, mientras que para el resto de clases la unimodalidad no queda tan claramente definida debido a la escasez de datos registrados.

4.2.4.2. RELACIÓN ENTRE EL TS Y LA LONGITUD

Se ha estudiado la dependencia lineal del valor medio de las distribuciones del *TS* con el logaritmo en base 10 de la longitud de la dorada, según la expresión clásica empleada en acústica activa para la estimación de biomasa, mediante el método de mínimos cuadrados. La bondad de los ajustes se evalúa en base al coeficiente de determinación, al p-valor del análisis de la varianza, y del error medio cometido en la estimación del *TS*. El error en la estimación tan solo resulta interesante para determinar qué ajuste resulta más robusto, pues resulta más interesante el error asociada a la estimación de la longitud a partir de la medida directa del *TS*.

Se han comparado los ajustes obtenidos a partir de trazas con una longitud mínima de 2, 3, 4 y 5°, formadas por ecos de calidad con una *LE* constante entre 0.7 y 1.5, una *MDF* de 0.3, 0.5 y 1.0°, y una *MCG* de 3, 6 y 12 dB. Ventralmente se ha registrado un elevado número de trazas y se ha podido observar que para trazas más cortas, menor *MDF* y menor *MCG* se obtienen mejores resultados. Sin embargo, ha sido necesario configurar la longitud mínima de la traza a 2° y aumentar la *MCG* a 12 dB para maximizar el número de detecciones debido a la escasa cantidad de detecciones registradas dorsalmente, ya

que son los dos parámetros que más afectan al número de detecciones. Para poder comparar resultados ventrales y dorsales, se muestran tabulados los resultados obtenidos para trazas con una longitud mínima de 2°, una *MDF* de 0.3° y una *MCG* de 3 y 12 dB.

Las correlaciones más robustas entre el *TS* y el tamaño de los peces se obtienen para el máximo, la media y el percentil 75 del *TS*, y el *TSu* máximo de las trazas, como se ha adelantado en el Apartado 4.2.4.1, y para la media de las distribuciones, seguido generalmente por el percentil 75.

En las grabaciones ventrales existe una tendencia clara a obtener unos mejores ajustes al reducir la longitud angular mínima de la traza, la *MDF* y la *MCG*. La *MCG* es el factor más influyente en el coeficiente de determinación y el error cometido en la estimación, pero también es el que más afecta al número de trazas detectadas junto con la longitud de la traza. Por ejemplo, para trazas de 2° de longitud y una *MDF* de 0.3°, una *MCG* de 3 dB conlleva un aumento del 2.23 % del coeficiente de determinación y una reducción del 0.19% del ERM respecto a una *MCG* de 12 dB. Las variaciones debidas a la longitud de la traza y de la *MDF* son muy poco significativas. Por ejemplo, para una *MDF* de 0.3 y una *MCG* de 3 dB, una longitud de la traza de una longitud mínima de 2° supone un aumento del 0.32% en el coeficiente de determinación y una reducción de 0.16% en el ERM respecto a trazas de 5°. Y para trazas de 2° de longitud y una *MCG* de 3 dB, el uso de una *MDF* de 0.3° implica un incremento de 0.33% en el coeficiente de determinación y una reducción del 0.02% del ERM respecto a una *MDF* de 1.0°. La *LE* es el parámetro menos influyente, por lo que se fija entre 0.7 y 1.5. La elección de unos criterios del detector de ecos individuales más o menos restrictivos dependerá de la cantidad de trazas que se desea detectar. Es decir, cuando se disponga de un elevado número de trazas se considerará oportuno definir unos criterios más restrictivos que proporcionen ajustes algo más robustos, y cuando escaseen las detecciones se podrá utilizar criterios más permisivos que permitan obtener un mayor número de registros.

Los datos dorsales presentan un comportamiento algo distinto a los ventrales y cada estadístico presenta una tendencia diferente. Dorsalmente el estadístico de las trazas que logra mejores resultados es el *TS* medio, seguido del percentil 75. El *TS* medio de las trazas, al contrario que sucede con todos los estadísticos evaluados ventralmente, proporciona ajustes más robustos al aumentar la *MDF* y la *MCG*. Sin embargo, el percentil 75 del *TS* de las trazas logra mejores resultados al reducir la *MDF* y para una *MCG* de 6 dB, seguida de una *MCG* de 12 y 3 dB. El efecto que produce el aumento de la *MCG* en el *TS* máximo y el *TSu* máximo de las trazas es similar al que se produce en las grabaciones ventrales, pero de forma más acusada y con correlaciones más débiles, obteniendo un coeficiente de determinación máximo de 0.84. Este comportamiento puede deberse fundamentalmente a la falta de detecciones, ocasionando resultados sesgados, por lo que estos no se pueden considerar concluyentes.

En la Tabla 4.13 se recogen los parámetros del ajuste lineal del valor medio del *TS* frente al logaritmo de la longitud, obtenidos a partir de los 4 estadísticos del *TS* de las trazas

evaluados para trazas con una longitud mínima de 2°. En la parte izquierda de la Tabla se muestran los resultados obtenidos al configurar una *MCG* de 3 dB y en la parte derecha para una *MCG* de 12 dB, y en la parte superior se muestran los resultados para los registros ventrales y en la parte inferior para los dorsales.

La pendiente obtenida para los cuatro estadísticos a partir de los registros ventrales toma valores próximos a 20 y la ordenada en el origen en torno a -60, encontrándose ambos valores dentro de los rangos esperados.

En todos los casos el coeficiente de determinación indica que existe una relación estadísticamente significativa entre las variables, quedando confirmado por los p-valores inferiores a 0.05.

Teniendo en cuenta el coeficiente de determinación, el p-valor y el error medio en la estimación del *TS*, el *TS* máximo de las trazas detectadas de forma ventral es el estadístico que ofrece un ajuste más robusto, aunque no presenta diferencias importantes respecto a la media y el percentil 75 del *TS*. El uso del *TSu* máximo de las trazas también parece adecuado, debido a que presenta un coeficiente de determinación, un p-valor y un error ligeramente mejor que el resto de estadísticos del *TS*, aunque las diferencias no son notables.

A pesar del reducido número de trazas detectadas dorsalmente se ha hallado una correlación entre el *TS* y la longitud, a diferencia de lo observado por Knudsen *et al.* (2004), pues no consiguieron hallar una relación entre ambas variables. Sin embargo las pendientes obtenidas presentan valores inferiores a los esperados, que normalmente se aproximan a 20 en la detección a mayores distancias, aunque pueden alcanzar valores entre 18 y 30 según McClatchie *et al.* (2003). Las ordenadas en el origen también presentan valores inusuales, más altos de los esperados. Se ha de tener en cuenta que los valores esperados corresponden a aplicaciones donde los blancos se detectan a distancias más lejanas del transductor, por lo que tal vez los valores habituales sean diferentes a distancias tan próximas al transductor.

Según el p-valor existe una correlación significativa para el *TS* máximo, medio y percentil 75 de las trazas, debido a que el p-valor es inferior a 0.05. El parámetro que mejor funciona dorsalmente con poca cantidad de registros es el *TS* medio de las trazas, especialmente cuando se configura la *MCG* a 12 dB pues maximiza la cantidad de trazas detectadas y se obtiene un coeficiente de determinación próximo a 1. El percentil 75 del *TS* de las trazas también proporciona un buen ajuste, con parámetros muy similares al *TS* medio. El *TS* máximo y el *TSu* máximo presentan un menor grado de correlación, que a diferencia de la media y el percentil 75 disminuye al incrementar la *MCG*.

El error medio corrobora el uso del *TS* medio o el percentil 75 para lograr ajustes más robustos, reduciéndose casi a la mitad al disminuir la *MCG* de 12 a 3 dB.

Tabla 4.13. Resultados del ajuste lineal de la media del TS máximo, medio y percentil 75, y el TS_{U} máximo de las trazas frente al logaritmo de la longitud de la dorada a una frecuencia de 200 kHz, para los registros ventrales (parte superior) y dorsales (parte inferior). Las trazas poseen una longitud angular mínima de 2° y están formadas por ecos con una LE entre 0.7 y 1.5, una MDF de 0.3°, y una MCG variable. Se comparan los resultados para una MCG de 3 dB y 12 dB que se muestran en la parte izquierda y derecha de la tabla, respectivamente.

	$TS (dB) = a \cdot \log L (cm) + b$									
	Ventral – MCG 3 dB					Ventral – MCG 12 dB				
	$TS_{Máx}$	TS_{Medio}	TS_{P075}	$TS_{UMáx}$		$TS_{Máx}$	TS_{Medio}	TS_{P075}	$TS_{UMáx}$	
<i>a</i>	23.0616	22.1557	22.6549	23.2216		20.9982	20.4949	21.119	20.9627	
<i>b</i>	-62.6812	-63.5751	-63.2723	-65.701		-59.2284	-61.3200	-60.9997	-64.7283	
R^2	0.9745	0.9617	0.9647	0.9777		0.9522	0.9403	0.9465	0.9508	
<i>p</i> -valor	0.0017	0.0032	0.0028	0.0014		0.0045	0.0063	0.0053	0.0047	
EAM (dB)	0.2506	0.2955	0.2930	0.2339		0.3049	0.3276	0.3206	0.3103	
ERM (%)	0.7534	0.8395	0.8555	0.6486		0.9439	0.9303	0.9404	0.8111	
	Dorsal – MCG 3 dB					Dorsal – MCG 12 dB				
	$TS_{Máx}$	TS_{Medio}	TS_{P075}	$TS_{UMáx}$		$TS_{Máx}$	TS_{Medio}	TS_{P075}	$TS_{UMáx}$	
<i>a</i>	5.5458	8.3223	8.1454	3.4739		7.2569	10.3418	9.4338	4.0253	
<i>b</i>	-43.9427	-49.9330	-48.5182	-44.0513		-45.2132	-52.1565	-49.6841	-46.3245	
R^2	0.8419	0.9297	0.9261	0.7592		0.7460	0.9813	0.9675	0.5427	
<i>p</i> -valor	0.0281	0.0081	0.0087	0.0543		0.0592	0.0011	0.0025	0.1556	
EAM (dB)	0.1947	0.1682	0.1764	0.1307		0.3268	0.0896	0.1076	0.2590	
ERM (%)	0.5294	0.4272	0.4645	0.3300		0.9155	0.2271	0.2911	0.6276	

Se representa en la Figura 4.12 el ajuste de la media los valores del TS máximo de las trazas obtenidas ventralmente frente al logaritmo en base 10 de la longitud total de la dorada, y el ajuste del promedio del TS medio de las trazas registradas dorsalmente frente al logaritmo de la longitud. Las trazas evaluadas poseen una longitud mínima de 2° y están formadas por ecos con una longitud entre 0.7 y 1.5, una MDF de 0.3° y una MCG de 3 dB para las trazas ventrales y de 12 dB para las dorsales, por ser las configuraciones que proporcionan ajustes más robustos.

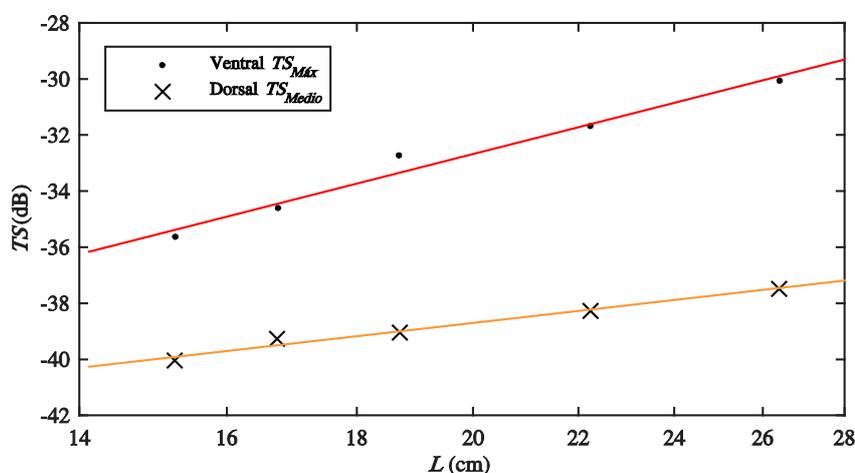


Figura 4.12. Relación lineal entre la media del TS máximo de las trazas y el logaritmo de la longitud de la dorada para registros ventrales ($TS = 23.06 \log L - 62.58$, en rojo), y la media del TS medio de las trazas y el logaritmo de la longitud para las grabaciones dorsales ($TS = 10.34 \log L - 52.16$, en naranja) a una frecuencia de 200 kHz. Las trazas poseen una longitud angular mínima de 2° y están formadas por ecos con una LE entre 0.7 y 1.5, MDF de 0.3°, y una MCG de 3 dB para los registros ventrales y de 12 dB para los dorsales.

Gráficamente se puede apreciar una fuerte correlación entre el TS y el logaritmo de la longitud tanto para el aspecto ventral como para el dorsal, como sucede para otras muchas especies de peces. A pesar del reducido número de trazas detectadas dorsalmente, también ha sido posible establecer un fuerte grado de correlación entre ambas variables.

Resulta interesante disponer de una expresión que permita estimar la longitud de la dorada a partir de la medida del TS , por lo que se ha obtenido la relación que describe la dependencia de la longitud de la dorada frente al valor medio del TS , así como el error medio cometido en la estimación de la longitud. Puesto que existe una relación lineal entre el TS y el logaritmo en base 10 de la longitud, se puede demostrar que existe una relación de tipo potencial entre la longitud y el TS , de forma que

$$L = a \cdot 10^{b \cdot TS} \quad 4.11$$

Se ha resuelto por mínimos cuadrados el modelo linealizado de la Ecuación 4.11, que se puede expresar según

$$\log L = \log a + b \cdot TS \quad 4.12$$

Al igual que en ajustes anteriores, se ha evaluado la bondad del ajuste en función del coeficiente de determinación, el p-valor del análisis de la varianza, y el error medio del estimador. El error medio cometido en la estimación de la longitud se ha calculado a partir de la expresión del modelo potencial.

A continuación se presentan los ajustes de la longitud frente al valor medio del *TS*. En la Tabla 4.14 se resumen los resultados para los cuatro estadísticos del *TS* de las trazas, empleando la misma longitud de traza y la misma configuración del detector de ecos individuales que en la Tabla 4.13, comparando las soluciones para una *MCG* de 3 (izquierda) y 12 dB (derecha). Se muestran los resultados para el aspecto ventral en la parte superior y para el aspecto dorsal en la parte inferior.

Los valores del coeficiente de determinación y el p-valor del análisis de la varianza son idénticos a los recogidos en la Tabla 4.13, pues se trata del mismo ajuste donde se intercambian las variables dependiente e independiente, e indican que existe un alto grado de correlación entre ambas variables para los diferentes estadísticos.

El error cometido en la estimación de la longitud a partir de la medida del *TS* es inferior al 4% para los diferentes estadísticos de las trazas registradas ventralmente. El error se minimiza cuando tan solo se emplean las detecciones más próximas al eje acústico del transductor, reduciéndose a un 2.5% cuando se configura una *MCG* de 3 dB. La precisión mejora ligeramente al emplear los datos del *TS* máximo de las trazas, e incluso algo más cuando se emplea el *TSu* máximo. La precisión conseguida en un rango de distancias de 0 a 4 m es similar a la proporcionada por sistemas de cámaras estereoscópicas como Vicass de Akva Group o AM100 de AQ1 Systems, o sistemas tipo marco como Biomass Counter de Vaki o Biomass Estimator de Storvik cuando funcionan bajo óptimas condiciones. El sistema AM100, que emplea cámaras Gigabit Ethernet, asegura una precisión de hasta el 1-2 % de la longitud hasta distancias de unos 8 metros. Storvik y Vaki garantizan desviaciones de hasta el 2% para sus sistemas tipo marco.

Los ajustes obtenidos dorsalmente para el *TS* medio y el percentil 75, empleando una *MCG* de 3 dB para la detección de ecos, presentan un coeficiente de determinación un 3.5% inferior al obtenido ventralmente y un error un 2% superior. Sin embargo, los resultados obtenidos al aumentar la *MCG* a 12 dB son ligeramente mejores a los obtenidos con una compensación de 3 dB de forma ventral para el *TS* medio, con un coeficiente de determinación un 4% mayor y un ERM un 1.5% menor, y para el percentil 75, con un coeficiente de determinación un 2% mayor y un error un 1% menor.

Tabla 4.14. Resultados del ajuste potencial de la longitud de la dorada frente a la media del TS máximo, medio y percentil 75, y el TSu máximo de las trazas a una frecuencia de 200 KHz, para los registros ventrales (parte superior) y dorsales (parte inferior). Las trazas poseen una longitud angular mínima de 2° y están formadas por ecos con una LE entre 0.7 y 1.5, una MDF de 0.3°, y una MCG variable. Se comparan los resultados para una MCG de 3 dB y 12 dB que se muestran en la parte izquierda y derecha de la tabla, respectivamente.

	$L(cm) = a \cdot 10^{b \cdot TS(db)}$											
	Ventral - MCG 3 dB					Ventral - MCG 12 dB						
	$TS_{Máx}$	TS_{Medio}	TS_{P075}	$TSu_{Máx}$	$TS_{Máx}$	TS_{Medio}	TS_{P075}	$TSu_{Máx}$	$TS_{Máx}$	TS_{Medio}	TS_{P075}	$TSu_{Máx}$
a	480.3779	664.2282	549.3905	623.6230	559.1176	776.9031	635.0602	998.6486				
b	0.0423	0.0434	0.0426	0.0421	0.0453	0.0459	0.0448	0.0454				
R^2	0.9745	0.9617	0.9647	0.9777	0.9522	0.9403	0.9465	0.9508				
p -valor	0.0017	0.0032	0.0028	0.0014	0.0045	0.0063	0.0053	0.0047				
EAM (cm)	0.4953	0.5752	0.5545	0.4506	0.6574	0.7784	0.7403	0.7275				
ERM (%)	2.4538	2.8152	2.7202	2.2443	3.2627	3.6274	3.6503	3.7802				
	Dorsal - MCG 3 dB						Dorsal - MCG 12 dB					
	$TS_{Máx}$	TS_{Medio}	TS_{P075}	$TSu_{Máx}$	$TS_{Máx}$	TS_{Medio}	TS_{P075}	$TSu_{Máx}$				
a	$7.4993 \cdot 10^6$	$4.6654 \cdot 10^5$	$4.0870 \cdot 10^5$	$8.6572 \cdot 10^9$	$9.4472 \cdot 10^4$	$9.3950 \cdot 10^4$	$1.3717 \cdot 10^5$	$6.8429 \cdot 10^6$				
b	0.1518	0.1117	0.1137	0.2185	0.1028	0.0949	0.1026	0.1348				
R^2	0.8419	0.9297	0.9261	0.7592	0.7460	0.9813	0.9675	0.5427				
p -valor	0.0281	0.0081	0.0087	0.0543	0.0592	0.0011	0.0025	0.1556				
EAM (cm)	1.2137	0.8564	0.9226	1.4075	1.4273	0.0000	0.0001	2.3332				
ERM (%)	6.3758	4.3736	4.9136	7.9364	7.6606	2.0405	2.7293	11.5038				

Según los resultados obtenidos ventralmente, donde el número de detecciones es muy elevado, se puede concluir que en caso de registrar una suficiente cantidad de trazas sería posible lograr una mayor precisión en la estimación de la talla definiendo trazas cortas y restringiendo los criterios del detector de ecos individuales, sobre todo descartando las detecciones más lejanas al eje.

En la Figura 4.13 se muestra la longitud de la dorada frente a la media del *TS* de las trazas y el ajuste del modelo potencial a los datos. Se emplea el *TS* máximo de las trazas para los registros ventrales formados por ecos con una *MCG* de 3 dB y el *TS* medio de las trazas para las grabaciones dorsales formadas por ecos con una *MCG* de 12 dB. Al igual que sucede en la Figura 4.12, se aprecia un fuerte grado de correlación entre las variables tanto para las mediciones realizadas ventral como dorsalmente.

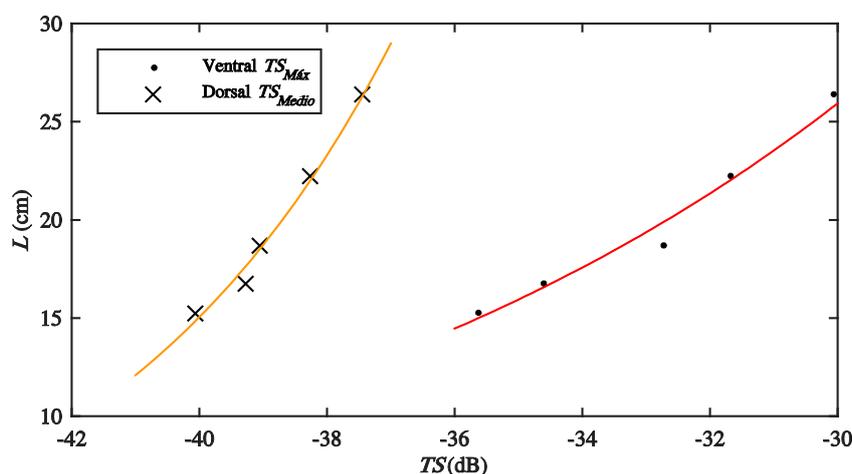


Figura 4.13. Relación potencial entre la longitud total de la dorada y la media del *TS* de las trazas. Se representa el *TS* máximo para los registros ventrales ($L = 480.38 \cdot 10^{0.0437S}$, en rojo) y el *TS* medio para las grabaciones dorsales ($L = 9.40 \cdot 10^4 \cdot 10^{0.0957S}$, en naranja) a una frecuencia de 200 kHz. Las trazas poseen una longitud angular mínima de 2° y están formadas por ecos con una *LE* entre 0.7 y 1.5, *MDF* de 0.3° , y una *MCG* de 3 dB para las detecciones ventrales y de 12 dB para las dorsales.

4.2.4.3. RELACIÓN ENTRE EL *TS* Y LA MASA

La masa es el parámetro biométrico más empleado en la gestión de piscifactorías, por lo que resulta conveniente hallar una expresión que relacione el *TS* y la masa de los peces para su aplicación directa en este tipo de explotaciones. Puesto que la masa y la longitud guardan una relación de tipo potencial, se puede deducir una expresión análoga a la

clásica empleada en acústica para la estimación de biomasa (Ecuación 3.49) que relacione el TS y la masa total de los peces, de forma que

$$TS = a \cdot \log M + b \quad 4.13$$

Al igual que en el Apartado 4.2.4.2 se ha determinado la relación potencial de la masa frente al TS , que permite estimar la masa de los peces y la precisión correspondiente a partir de los datos acústicos, de forma que

$$M = a \cdot 10^{b \cdot TS} \quad 4.14$$

Se ha ajustado un modelo potencial a los datos de los 4 estadísticos del TS de las trazas (máximo, medio, percentil 75 del TS , y máximo del TSu) frente al logaritmo en base 10 de la masa mediante el método mínimos cuadrados. Los ajustes de la masa frente al TS presentan el mismo comportamiento frente a las variaciones de la longitud mínima de la traza, la MDF y la MCG que los ajustes de la longitud frente al TS . Los parámetros de detección de los ecos individuales y las trazas permanecen sin cambios respecto a los usados para hallar la relación entre la longitud y el TS .

En la Tabla 4.15 se resumen los parámetros del ajuste del modelo potencial a los datos de la masa frente a la media del TS para los diferentes estadísticos de las trazas evaluados. En la parte superior se muestran los resultados correspondientes a los registros ventrales y en la parte inferior a los dorsales. De igual modo, se comparan el efecto del uso de diferentes MCG , a la izquierda se muestran los resultados para 3 dB y a la derecha para 12 dB.

Al igual que se observa en la relación entre la longitud y el TS de la dorada, ventralmente se obtienen ajustes más robustos entre la masa y el TS al reducir la longitud de las trazas, la MDF y la MCG , obteniendo variaciones más notables al descartar las detecciones más lejanas al eje. Los estadísticos que funcionan de una forma más deseable siguen siendo el TS máximo y el TSu máximo de las trazas.

Se observa un mayor grado de correlación entre el TS y la masa que el hallado entre el TS y la longitud, pues el coeficiente de determinación es ligeramente mayor, generalmente un 1% superior, y el p-valor es algo menor.

El error en la estimación de la masa es inferior al 11% en todos los estadísticos evaluados ventralmente, y se minimiza al emplear el máximo del TS de las trazas o el promedio del TSu de las trazas, logrando errores en torno a un 6%. Estas relaciones pueden ser de gran utilidad en piscifactorías para convertir los datos que proporciona la ecosonda en datos de biomasa. La estimación de la masa de forma directa a partir de las expresiones recogidas en la Tabla 4.15 minimiza el error de las estimas, si se compara con el error acumulado resultante de estimar la masa a partir de las relaciones L vs. TS (Tabla 4.14) y M vs. L (Tabla 4.7), que puede verse incrementado un 2%.

Tabla 4.15. Resultados del ajuste potencial de la masa de la dorada frente a la media del TS máximo, medio y percentil 75, y el TSu máximo de las trazas a una frecuencia de 200 kHz, para los registros ventrales (parte superior) y dorsales (parte inferior). Las trazas poseen una longitud angular mínima de 2° y están formadas por ecos con una LE entre 0.7 y 1.5, una MDF de 0.3°, y una MCG variable. Se comparan los resultados para una MCG de 3 dB y 12 dB que se muestran en la parte izquierda y derecha de la tabla, respectivamente.

	$M(g) = a \cdot 10^{b \cdot TS(\text{dB})}$					
	Ventral – MCG 3 dB			Ventral – MCG 12 dB		
	$TS_{Máx}$	TS_{Medio}	TS_{P075}	$TS_{Máx}$	TS_{Medio}	TS_{P075}
<i>a</i>	$3.3167 \cdot 10^6$	$8.6787 \cdot 10^6$	$5.1789 \cdot 10^6$	$7.6089 \cdot 10^6$	$1.5961 \cdot 10^7$	$8.3177 \cdot 10^6$
<i>b</i>	0.1359	0.1398	0.1371	0.1353	0.1459	0.1444
R^2	0.9823	0.9726	0.9750	0.9839	0.9613	0.9578
<i>p</i> -valor	0.0010	0.0019	0.0017	0.0009	0.0033	0.0037
EAM (dB)	8.7830	11.0621	10.5729	7.8261	11.2915	13.3989
ERM (%)	6.4743	7.6337	7.3500	5.8528	8.6934	9.8204
	Dorsal – MCG 3 dB			Dorsal – MCG 12 dB		
	$TS_{Máx}$	TS_{Medio}	TS_{P075}	$TS_{Máx}$	TS_{Medio}	TS_{P075}
<i>a</i>	$5.4896 \cdot 10^{19}$	$1.0928 \cdot 10^{16}$	$5.8145 \cdot 10^{15}$	$1.7574 \cdot 10^{19}$	$7.1811 \cdot 10^{13}$	$2.2488 \cdot 10^{14}$
<i>b</i>	0.4810	0.3570	0.3609	0.6874	0.3266	0.328
R^2	0.8237	0.9254	0.9097	0.7321	0.7341	0.9649
<i>p</i> -valor	0.0333	0.0088	0.0118	0.0644	0.0636	0.0028
EAM (dB)	24.1942	16.9877	18.9627	232.2987	26.2955	15.4682
ERM (%)	21.5589	14.4580	17.3860	27.2066	26.0296	10.0761

Al igual que sucede al relacionar la longitud con el aspecto dorsal del *TS*, los estadísticos que proporcionan mejores resultados son el *TS* medio y percentil 75 de las trazas, especialmente al aumentar la *MCG* a 12 dB.

En general, los ajustes obtenidos para el aspecto dorsal del *TS* frente a la masa presentan un menor grado de correlación, dado que el coeficiente de correlación es levemente menor, y el p-valor es algo mayor. Sin embargo, el *TS* medio proporciona unos resultados ligeramente mejores cuando se configura la *MCG* a 12 dB.

El error cometido en las estimaciones de la masa son relativamente significativos para todos los estadísticos evaluados dorsalmente, excepto cuando se utiliza el *TS* medio o percentil 75 de las trazas para ecos definidos con una *MCG* de 12 dB, en cuyo caso se tienen errores del 6 y del 10% respectivamente.

En la representación gráfica de la masa frente al valor medio del *TS* de las trazas se puede apreciar un fuerte grado de correlación entre ambas variables, tanto ventral como dorsalmente (Figura 4.14). Se relaciona el *TS* máximo de las trazas para los registros ventrales y el *TS* medio para los dorsales.

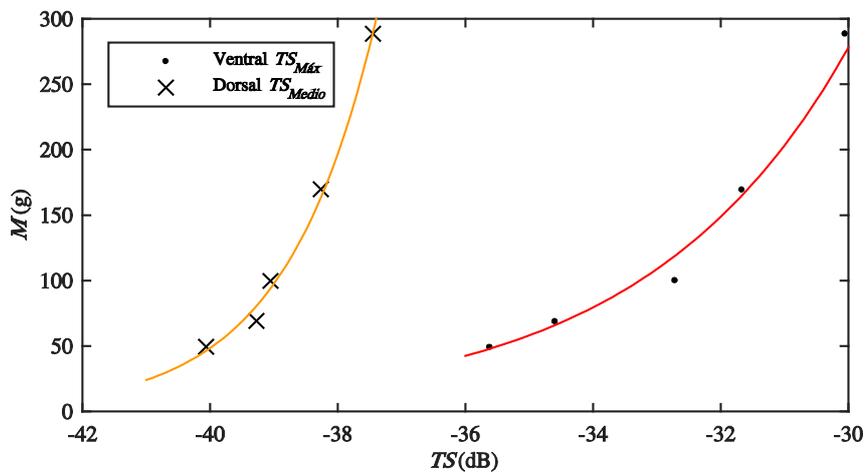


Figura 4.14. Relación potencial entre la masa de la dorada y la media del *TS* de las trazas. Se representa el *TS* máximo para los registros ventrales ($M = 3.32 \cdot 10^6 \cdot 10^{0.1367TS}$, en rojo) y el *TS* medio para los dorsales ($M = 7.18 \cdot 10^{13} \cdot 10^{0.3047TS}$, en rojo) a una frecuencia de 200 kHz. Las trazas poseen una longitud angular mínima de 2° y están formadas por ecos con una *LE* entre 0.7 y 1.5, *MDF* de 0.3° , y una *MCG* de 3 dB para las detecciones ventrales y de 12 dB para las detecciones dorsales.

4.2.4.4. DENSIDAD DE PROBABILIDAD DE LA LBS POR TALLAS Y AJUSTE A MODELOS TEÓRICOS

Puede resultar conveniente el ajuste de una *PDF* conocida a las densidades de probabilidad del nivel de eco registrada, ya que bastaría con la determinación de uno o dos parámetros del modelo teórico de la *PDF* para describir los datos experimentales.

Clay & Heist (1984) observaron que la *PDF* de Rice describe bien la amplitud de los ecos de peces individuales vivos registrados con una ecosonda single-beam. Además propusieron un modelo de dispersión de los peces formado por una componente concentrada σ_c , que corresponde a la dispersión de la vejiga, y otra componente distribuida σ_d , que representa la dispersión del esqueleto, de forma que la sección transversal de retro dispersión puede estimarse como la suma de las dos componentes

$$\sigma_{bs} = \sigma_c + \sigma_d \quad 4.15$$

La sección transversal de retrodispersión concentrada puede calcularse como la media al cuadrado de la L_{bs}

$$\sigma_c = \mu^2 (|L_{bs}|) \quad 4.16$$

Y la sección transversal de retrodispersión distribuida se obtiene como la varianza σ^2 de la L_{bs} , y hace referencia a las variaciones en la amplitud del eco respecto a la media debidas al movimiento de los peces,

$$\sigma_d = \sigma^2 (|L_{bs}|) \quad 4.17$$

La amplitud del eco o la L_{bs} puede considerarse como un proceso estocástico, ya que presentan cierta variabilidad debido al comportamiento y la compleja anatomía de los peces. Para una variable aleatoria L_{bs} , la varianza de los datos se define de la siguiente manera

$$\sigma^2 (|L_{bs}|) = \mu (|L_{bs}|^2) - \mu^2 (|L_{bs}|) \quad 4.18$$

A partir del cociente entre ambas componentes Clay & Heist (1984) definieron el parámetro gamma γ , que puede emplearse para identificar diferentes especies o cuantificar diferencias en el comportamiento para una misma especie, ya que depende de la morfología y el comportamiento del pez.

$$\gamma = \frac{\sigma_c}{\sigma_d} \quad 4.19$$

Los peces pequeños se caracterizan por tener una componente concentrada dominante, mientras que en peces grandes la componente distribuida se vuelve más significativa. Para un mismo estado de actividad, los peces de menor tamaño tendrán un valor de γ más elevado que peces más grandes. En cuanto al estado de actividad de los peces, ejemplares más calmados tendrán valores de γ más elevados pues domina la componente concentrada, mientras que peces en libertad poseerán menores valores debido a la mayor dispersión de valores de la σ_{bs} .

Se han estudiado los modelos teóricos de Rice, Rayleigh y Valores Extremos propuestos en Medwin & Clay (1997) como los que mejor se ajustan a las distribuciones de la amplitud del eco o la L_{bs} de los peces, obtenida para cada eco detectado según la Ecuación 3.48. Además se ha estudiado el ajuste de la distribución Gamma por ser uno de los modelos teóricos que mejor se ajustan a las distribuciones de la amplitud del eco observadas para la dorada. Puesto que el estudio de Clay & Heist (1984) fue llevado a cabo con una ecosonda single-beam, se estudia el ajuste de las diferentes distribuciones teóricas a las amplitudes del eco con y sin compensación del patrón de directividad de los transductores.

La PDF de Rice, con parámetros s_{Rice} (no centralidad) y σ_{Rice} (escala), se define para valores de $x \geq 0$ según:

$$f(x) = I_0 \cdot \left(\frac{x \cdot s_{Rice}}{\sigma_{Rice}^2} \right) \cdot \left(\frac{x}{\sigma_{Rice}} \right) \cdot e^{-\frac{(x^2 + s_{Rice}^2)}{2 \cdot \sigma_{Rice}^2}} \quad 4.20$$

con s_{Rice} y σ_{Rice} mayores o iguales a cero. I_0 es la función de Bessel modificada de primera especie de orden cero. La media y la varianza de la distribución se calculan como

$$\mu(x) = \sigma_{Rice} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot L_{1/2} \cdot \left(\frac{-s_{Rice}^2}{2 \cdot \sigma_{Rice}^2} \right) \quad 4.21$$

$$\sigma^2(x) = 2 \cdot \sigma_{Rice}^2 + s_{Rice}^2 - \frac{\pi \cdot \sigma_{Rice}^2}{2} \cdot L_{1/2}^2 \cdot \left(\frac{-s_{Rice}^2}{2 \cdot \sigma_{Rice}^2} \right) \quad 4.22$$

donde $L_{1/2}$ es el polinomio de Laguerre. Cuando s_{Rice} se aproxima a 0 se puede afirmar que la distribución de Rice tiende a la distribución de Rayleigh.

La distribución de Rayleigh, con parámetro b_{Ray} , se define para valores de $x \geq 0$:

$$f(x) = \frac{x}{b_{Ray}^2} \cdot e^{-\frac{x^2}{2 \cdot b_{Ray}^2}} \quad 4.23$$

El valor medio y la varianza de la distribución de Rayleigh se definen como

$$\mu(x) = b_{Ray} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}} \quad 4.24$$

$$\sigma^2(x) = \frac{4 - \pi}{2} \cdot b_{Ray}^2 \quad 4.25$$

La *PDF* Gamma, con parámetros a_γ (forma) y b_γ (escala), se define para valores de $x > 0$:

$$f(x) = \frac{1}{b_\gamma^{a_\gamma} \cdot \Gamma(a_\gamma)} \cdot x^{a_\gamma-1} \cdot e^{-\frac{x}{b_\gamma}} \quad 4.26$$

con a_γ y b_γ mayores que cero, y donde Γ es la función Gamma. La media y la varianza de la distribución se determinan de la siguiente manera

$$\mu(x) = a_\gamma \cdot b_\gamma \quad 4.27$$

$$\sigma^2(x) = a_\gamma \cdot b_\gamma^2 \quad 4.28$$

Y la *PDF* de Valores Extremos Máximos, o también llamada de Gumbel, con parámetros α_G (localización) y β_G (escala), se define para todo x como:

$$f(x) = \frac{1}{\beta_G} \cdot e^{-\frac{(x-\alpha_G)}{\beta_G}} \cdot e^{-e^{-\frac{(x-\alpha_G)}{\beta_G}}} \quad 4.29$$

Los valores de la media y la varianza de la distribución se pueden obtener como

$$\mu(x) = \alpha_G + \beta_G \cdot \gamma_{E-M} \quad 4.30$$

$$\sigma^2(x) = \frac{\beta_G^2 \cdot \pi^2}{6} \quad 4.31$$

donde γ_{E-M} es la constante de Euler-Mascheroni.

La bondad del ajuste de los modelos de probabilidad teóricos a los datos ha sido evaluada mediante el logaritmo natural de la función de verosimilitud, el p-valor del test de Kolmogorov-Smirnov y el coeficiente de determinación. El criterio de log verosimilitud permite verificar qué modelo se ajusta mejor a unos datos, aunque no deja comparar diferentes muestras ya que depende del tamaño de la muestra. El p-valor del test de Kolmogorov-Smirnov da una idea de la posibilidad de que unos datos puedan proceder de una distribución teórica con un 95% de nivel de confianza, pero también depende del tamaño de la muestra. Un p-valor mayor o igual a 0.05 indica que no se puede rechazar la idea de que los datos procedan de la distribución seleccionada, y un p-valor inferior a 0.05 indica que los datos no proceden del modelo teórico. El coeficiente de determinación proporciona un parámetro de bondad del ajuste independiente al tamaño de la muestra, con un comportamiento parejo al criterio de log verosimilitud. El coeficiente de determinación se calcula según la siguiente expresión

$$R^2 = 1 - \frac{\sum [PDF_n(x)_i - PDF(x)_i]^2}{\sum [PDF_n(x)_i - \mu(PDF(x)_i)]^2} \quad 4.32$$

donde $PDF_n(x)_i$ es la función densidad de probabilidad observada, $PDF(x)_i$ es la función densidad de probabilidad teórica, y $\mu(PDF_n(x)_i)$ es la media de la función densidad de probabilidad observada.

Se ha evaluado la relación entre los parámetros de las distribuciones teóricas y la longitud o la masa de la dorada. No se incluyen los resultados por no obtener una mejora notable respecto a los ajustes de la media de los datos del *TS* frente a la longitud y la masa. Por tanto, el uso de la media de los datos se considera apropiado para su correlación con los parámetros biométricos.

En la Tabla 4.16 se recogen la media, la desviación típica y el parámetro γ de la L_{bs} máxima de las trazas en función de la talla para los registros ventrales, así como los parámetros de los modelos teóricos de Rice, Rayleigh, Gamma y Valores Extremos Máximos ajustados a los datos, la función log-verosimilitud, el p-valor del test de Kolmogorov-Smirnov, el coeficiente de determinación, la media y la desviación típica obtenidas a partir del modelo, y el error relativo en la estima la media y la desviación. Se muestran los resultados para la L_{bs} máxima de las trazas ya que a partir de ella se deriva el *TS* máximo de las trazas, que es el estadístico más útil en la estimación de la talla o la masa de la dorada de forma ventral, para trazas con una longitud mínima de 2° y ecos con una longitud entre 0.7 y 1.5, una *MDF* de 0.3 y una *MCG* de 3 dB. En la Tabla 4.17 se resumen los resultados obtenidos a partir de las mediciones dorsales. Se evalúa la L_{bs} media de las trazas obtenidas a partir de detecciones con una *MCG* de 12 dB.

La media y la desviación típica de los datos de la L_{bs} obtenida ventralmente presentan una tendencia creciente con el aumento de la talla de los peces, al igual que sucede con el aspecto ventral del TS máximo de las trazas.

El valor de γ depende tanto de la morfología del pez como de su estado de actividad, que puede verse afectado por una variedad de factores como la temperatura, el estado de madurez, el factor condición, etc. El parámetro γ toma valores entre 5.5 y 8.6, y parece guardar cierta relación con la temperatura del agua y la talla de los peces. Los valores de γ más altos, que corresponden a estados de menor actividad, coinciden con las medidas realizadas en los meses más fríos. Mientras que los valores más bajos, que indican un mayor estado de actividad, coinciden con las mediciones llevadas a cabo en los meses más cálidos. El efecto combinado de la talla con la temperatura, podría indicar que los peces de mayor tamaño presentan γ más bajos. No obstante, sería conveniente independizar los diferentes factores para poder estudiar el efecto de cada uno sobre γ .

El modelo teórico que mejor se ajusta a los datos de la L_{bs} máxima de las trazas es la distribución Gamma, según el criterio de log-verosimilitud y el coeficiente de determinación, seguida de cerca por el modelo de Rice y de Valores Extremos Máximos, obteniendo en todos los casos coeficientes próximos superiores a 0.90. El modelo de Rayleigh no describe tan fielmente la distribución de los datos, presentando coeficientes de determinación con un promedio de 0.80.

Se ha observado que los modelos teóricos se ajustan más fielmente a los datos al reducir el ángulo de apertura del transductor en que se aceptan ecos, es decir, cuando se reduce la MCG.

Para todos los modelos evaluados el p-valor del test Kolmogorov-Smirnov es igual a cero, y al ser inferior a 0.05 no se puede aceptar la hipótesis de que los datos procedan de alguno de los modelos estudiados con un nivel de confianza del 95%.

Aunque la distribución Gamma es el modelo que mejor se ajusta a los datos según el criterio de log-verosimilitud y el coeficiente de determinación, la distribución de Rice es la que ofrece una estimación de la media y la desviación típica más precisa, con un EAM de 0.05% en la estimación de la media y del 0.29% en la estima de la desviación típica. La distribución Gamma determina la media de forma precisa con un 0.0% de error, aunque presenta un error medio de 2.47% en la estimación de la desviación típica. Los modelos de Valores Extremos Máximos y de Rayleigh presentan una mayor desviación en la determinación tanto de la media como de la desviación típica, siendo de 0.89 y 8.76% para la distribución de Valores Extremos Máximos y de 5.56 y 23.98% para la distribución de Rayleigh.

Dorsalmente la media y la desviación de los datos de la L_{bs} media de la trazas presentan una tendencia a aumentar conforme se incrementa la talla de los peces.

Tabla 4.16. Media y desviación típica de la L_{ms} máxima de las trazas, parámetro γ , parámetros de las distribuciones de Rayleigh (b_{Ray}), Rice (σ_{Rice} , σ_{Rice^2}), Valores Extremos Máximos (α_G , β_G) y Gamma (a_γ , b_γ) por tallas, función log-vevrosimilitud, p-valor del test de Kolmogorov-Smirnov, coeficiente de determinación, estimación de la media y la desviación típica a partir del modelo, y error relativo en la estimación de ambos. Los valores de L y L_{ms} se expresan en cm y los errores en %. Resultados para trazas registradas de forma ventral a 200 kHz, con una longitud mínima de 2°, formadas por ecos con una LE entre 0.7 y 1.5, una MDF de 0.3 y una MCG de 3 dB.

Datos			Distribución de Rayleigh						Distribución de Rice											
L	$\mu(L_{\text{ms}})$	$\sigma(L_{\text{ms}})$	γ	b_{Ray}	log-v	p-valor	R^2	$\mu(L_{\text{ms}})$	$\sigma(L_{\text{ms}})$	ERM $_{\mu}$	ERM $_{\sigma}$	σ_{Rice}	σ_{Rice^2}	log-v	p-valor	R^2	$\mu(L_{\text{ms}})$	$\sigma(L_{\text{ms}})$	ERM $_{\mu}$	ERM $_{\sigma}$
15.27	1.5657	0.5348	8.57	1.1700	-19000.0	0	0.7199	1.4663	0.7665	6.78	30.22	1.4517	0.5614	-16113.0	7.9·10 ⁻³⁰	0.9712	1.5658	0.5346	0.00	0.04
16.76	1.7431	0.6533	7.12	1.3163	-13082.0	9.4·10 ⁻²⁰	0.8341	1.6497	0.8623	5.66	24.24	1.5764	0.7000	-12017.1	4.6·10 ⁻¹¹	0.9870	1.7429	0.6538	0.01	0.09
18.70	2.1827	0.7594	8.26	1.6341	-63598.6	0	0.7532	2.0481	1.0706	6.57	29.07	2.0153	0.7998	-57060.6	1.1·10 ⁻⁴³	0.9847	2.1827	0.7593	0.00	0.01
22.24	2.4276	0.9514	6.51	1.8437	-30581.8	3.1·10 ⁻²⁴	0.8697	2.3107	1.2079	5.06	21.23	2.1574	1.0354	-29182.9	4.1·10 ⁻¹⁶	0.9850	2.4265	0.9542	0.05	0.29
26.40	2.8878	1.2346	5.47	2.2208	-18156.0	5.1·10 ⁺⁴⁰	0.8308	2.7833	1.4549	3.75	15.14	2.4299	1.4070	-17896.9	7.7·10 ⁻⁶²	0.8912	2.8824	1.2472	0.19	1.01

Distribución de Valores Extremos Máximos						Distribución Gamma											
α_G	β_G	log-v	p-valor	R^2	$\mu(L_{\text{ms}})$	$\sigma(L_{\text{ms}})$	ERM $_{\mu}$	ERM $_{\sigma}$	a_γ	b_γ	log-v	p-valor	R^2	$\mu(L_{\text{ms}})$	$\sigma(L_{\text{ms}})$	ERM $_{\mu}$	ERM $_{\sigma}$
1.3125	0.4725	-160989.8	0.0000	0.9655	1.5853	0.6061	1.23	11.75	8.1843	0.1913	-15852.6	4.9·10 ⁻¹⁸	0.9823	1.5657	0.5473	0.00	2.28
1.4354	0.5651	-11913.2	0.0000	0.9750	1.7615	0.7247	1.05	9.86	6.7956	0.2565	11812.8	5.2·10 ⁻⁷	0.9876	1.7431	0.6687	0.00	2.30
1.8207	0.6752	-57375.8	0.0000	0.9667	2.2104	0.8660	1.25	12.31	7.7605	0.2813	-56731.0	3.6·10 ⁻³²	0.9850	2.1827	0.7835	0.00	3.08
1.9767	0.8164	-29061.6	0.0000	0.9783	2.4480	1.0471	0.83	9.14	6.1574	0.3943	-28871.8	1.2·10 ⁻⁸	0.9899	2.4276	0.9783	0.00	2.75
2.3311	0.9698	-17236.7	0.0000	0.9841	2.8909	1.2439	0.11	0.74	5.6858	0.5079	-17301.3	5.1·10 ⁻¹⁶	0.9712	2.8878	1.2111	0.00	1.94

Tabla 4.17. Media y desviación típica de la L_{bs} media de las trazas, parámetro γ , parámetros de las distribuciones de Rayleigh (b_{Ray}), Rice (s_{Rice} , σ_{Rice}), Valores Extremos Máximos (α_G , β_G) y Gamma (a_γ , b_γ) por tallas, función log-verosimilitud, p-valor del test de Kolmogorov-Smirnov, coeficiente de determinación, estimación de la media y la desviación típica a partir del modelo, y error relativo en la estimación de ambos. Los valores de L y L_{bs} se expresan en cm y los errores en %. Resultados para trazas registradas de forma dorsal a 200 kHz, con una longitud mínima de 2°, formadas por ecos con una LE entre 0.7 y 1.5, una MDF de 0.3 y una MCG de 12 dB.

Datos		Distribución de Rayleigh						Distribución de Rice												
L	$\mu(L_{bs})$	$\sigma(L_{bs})$	γ	b_{Ray}	$\log-v$	p -valor	R^2	$\mu(L_{bs})$	$\sigma(L_{bs})$	ERM_μ	ERM_σ	s_{Rice}	σ_{Rice}	$\log-v$	p -valor	R^2	$\mu(L_{bs})$	$\sigma(L_{bs})$	ERM_μ	ERM_σ
15.27	0.8918	0.2545	12.29	0.6558	-35.5	$2.7 \cdot 10^{-6}$	0.0531	0.8219	0.4296	8.51	40.78	0.8505	0.2616	-5.6	0.9172	0.9204	0.8919	0.2544	0.00	0.01
16.76	0.9824	0.3636	7.30	0.7407	-309.3	$6.5 \cdot 10^{-13}$	0.8256	0.9284	0.4853	5.82	25.07	0.8918	0.3886	-250.8	0.0608	0.9651	0.9822	0.3641	0.02	0.12
18.70	1.0195	0.3191	10.21	0.7554	-1350.5	$5.9 \cdot 10^{-107}$	0.6782	0.9468	0.4949	7.69	35.51	0.9603	0.3310	-781.1	0.0190	0.9877	1.0196	0.3191	0.00	0.02
22.24	1.1223	0.4039	7.72	0.8434	-1388.2	$3.2 \cdot 10^{-47}$	0.7980	1.0571	0.5526	6.17	26.90	1.0273	0.4286	-1140.1	0.1331	0.9926	1.1222	0.4041	0.01	0.04
26.40	1.1854	0.4889	5.88	0.9067	-130.6	0.0061	0.9060	1.1364	0.5940	4.31	17.69	1.0270	0.5429	-123.1	0.4440	0.9756	1.1846	0.4909	0.07	0.41

Datos		Distribución de Valores Extremos Máximos						Distribución Gamma									
α_G	β_G	$\log-v$	p -valor	R^2	$\mu(L_{bs})$	$\sigma(L_{bs})$	ERM_μ	ERM_σ	a_γ	b_γ	$\log-v$	p -valor	R^2	$\mu(L_{bs})$	$\sigma(L_{bs})$	ERM_μ	ERM_σ
0.7640	0.2475	-13.4	0.3465	0.7462	0.9069	0.3174	1.66	19.84	10.8928	0.0819	-8.9	0.6750	0.8498	0.8918	0.2702	0.00	5.84
0.8100	0.3084	-241.7	0.1274	0.9283	0.9881	0.3956	0.58	8.07	7.1106	0.1382	-235.0	0.3322	0.9599	0.9824	0.3684	0.00	1.30
0.8649	0.2950	-865.6	$5.8 \cdot 10^{-11}$	0.9261	1.0352	0.3784	1.51	15.65	9.4776	0.1076	-792.3	$2.9 \cdot 10^{-6}$	0.9633	1.0195	0.3312	0.00	3.63
0.9305	0.3536	-1137.6	0.0020	0.9600	1.1346	0.4535	1.08	10.93	7.3409	0.1529	-1109.7	0.0656	0.9811	1.1223	0.4142	0.00	2.48
0.9576	0.4106	-119.6	0.8638	0.9627	1.1946	0.5266	0.77	7.16	5.3255	0.2107	-119.4	0.9600	0.9768	1.1854	0.4998	0.00	2.18

El parámetro γ toma valores entre 5.9 y 12.4, y tal vez dorsalmente también pueda verse afectado por la temperatura y la talla de los peces. Estos valores no son comparables con los obtenidos ventralmente, pues al aumentar la apertura del haz en que se aceptan ecos se ven modificadas la media y la desviación típica de los datos proporcionando en general γ mayores.

Los modelos teóricos que mejor se ajustan a los datos de la L_{bs} media de las trazas medidos dorsalmente son las distribuciones de Rice y Gamma según los parámetros de bondad de los ajustes, seguida por la distribución Valores Extremos Máximos y en último lugar por el modelo de Rayleigh.

En general los errores cometidos en la estimación de la media de la L_{bs} media de las trazas se minimizan cuando se evalúan las detecciones derivadas de una *MCG* de 12 dB. La estima obtenida a partir del modelo de Rice es bastante precisa, con un error medio de 0.02% para la media y de 0.12% para la desviación típica. Estos errores son de 0.00 y 3.09% para el modelo Gamma, de 1.12 y 12.33% para la distribución de Valores Extremos Máximos, y de 6.50 y 29.19% para la distribución de Rayleigh.

Los p-valor indican que en ningún caso los datos pueden proceder de una distribución de Rayleigh, los registros de todas las tallas excepto la de tamaño intermedio pueden provenir de una distribución de Rice o Gamma, o pueden pertenecer a una distribución de Valores Extremos Máximos las dos tallas de menor tamaño y la de mayor tamaño.

En la Figura 4.15 y la Figura 4.16 se muestra la densidad de probabilidad de la L_{bs} de las trazas a intervalos de 0.1 cm, la *PDF* empírica y el ajuste a las diferentes distribuciones teóricas. A la izquierda se representan los resultados para la L_{bs} máxima de las trazas obtenidos a partir de los registros ventrales, y a la derecha los resultados para la L_{bs} media de las trazas obtenidas dorsalmente. En la Figura 4.15 se muestra el ajuste teórico a las distribuciones de Rice y Rayleigh, y en la Figura 4.16 a los modelos Gamma y de Valores Extremos Máximos.

Tanto ventral como dorsalmente las distribuciones de Rice, Gamma y Valores Extremos Máximos se ajustan bastante bien a los datos, a excepción del modelo de Rice para las grabaciones ventrales de los peces de mayor tamaño. El modelo de Rayleigh no se adecua tan bien a los datos, aunque el ajuste mejora al aumentar el tamaño de los peces.

En la Tabla 4.18 se compara el valor medio del *TS* de las trazas obtenido a partir de los datos de la L_{bs} y la σ_{bs} de los ecos proporcionados por la ecosonda, y los obtenidos a partir de los ajustes de los modelos teóricos a los datos de la L_{bs} . Se evalúa el *TS* máximo de las trazas para los registros ventrales y el *TS* medio para los dorsales. La media de las distribuciones del *TS* se obtiene de forma lineal según la siguiente expresión

$$\mu(TS) = 10 \log [\mu(\sigma_{bs})] \quad 4.33$$

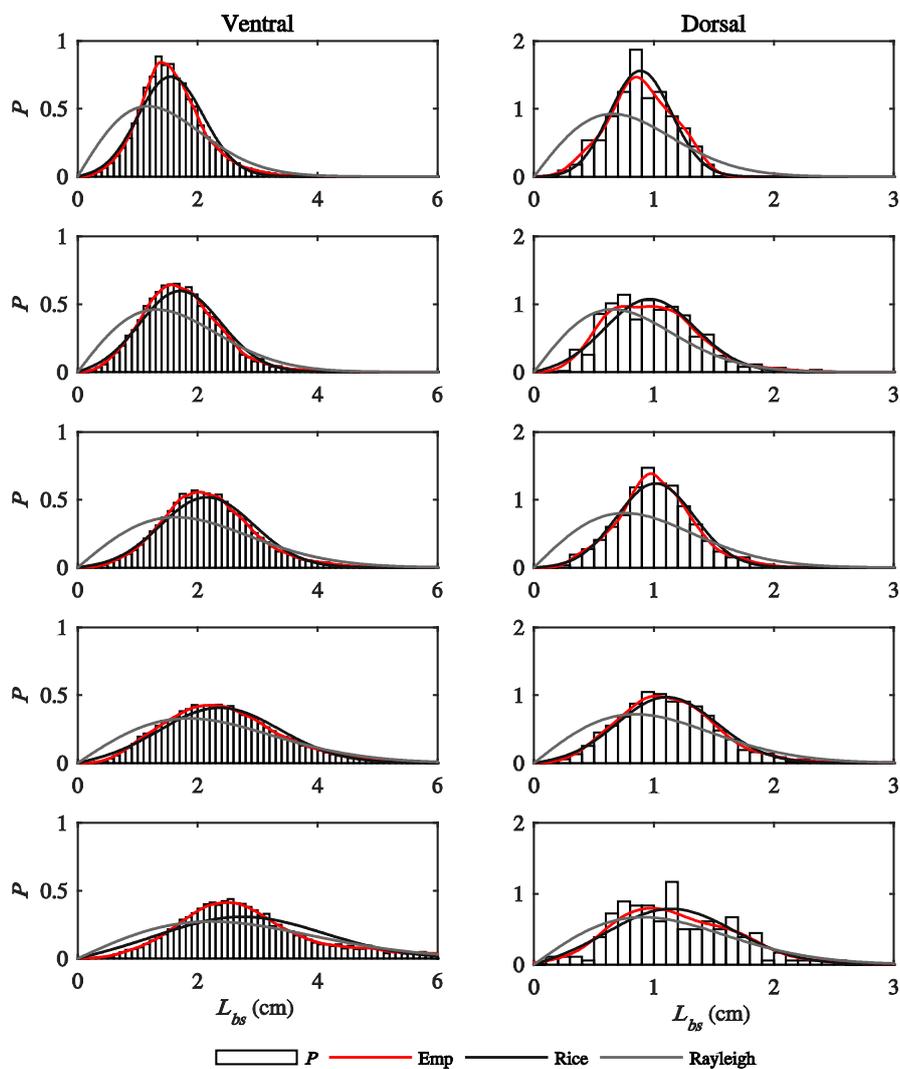


Figura 4.15. Distribución de probabilidad de la L_{bs} de las trazas a una frecuencia de 200 kHz, PDF empírica, y ajuste a las PDF de Rice y Rayleigh. Se representa la L_{bs} máxima para los registros ventrales y la media para los dorsales. Las trazas poseen una longitud angular mínima de 2° y están formadas por ecos con una LE entre 0.7 y 1.5, MDF de 0.3° , y una MCG de 3 dB para los registros ventrales y de 12 dB para los dorsales.

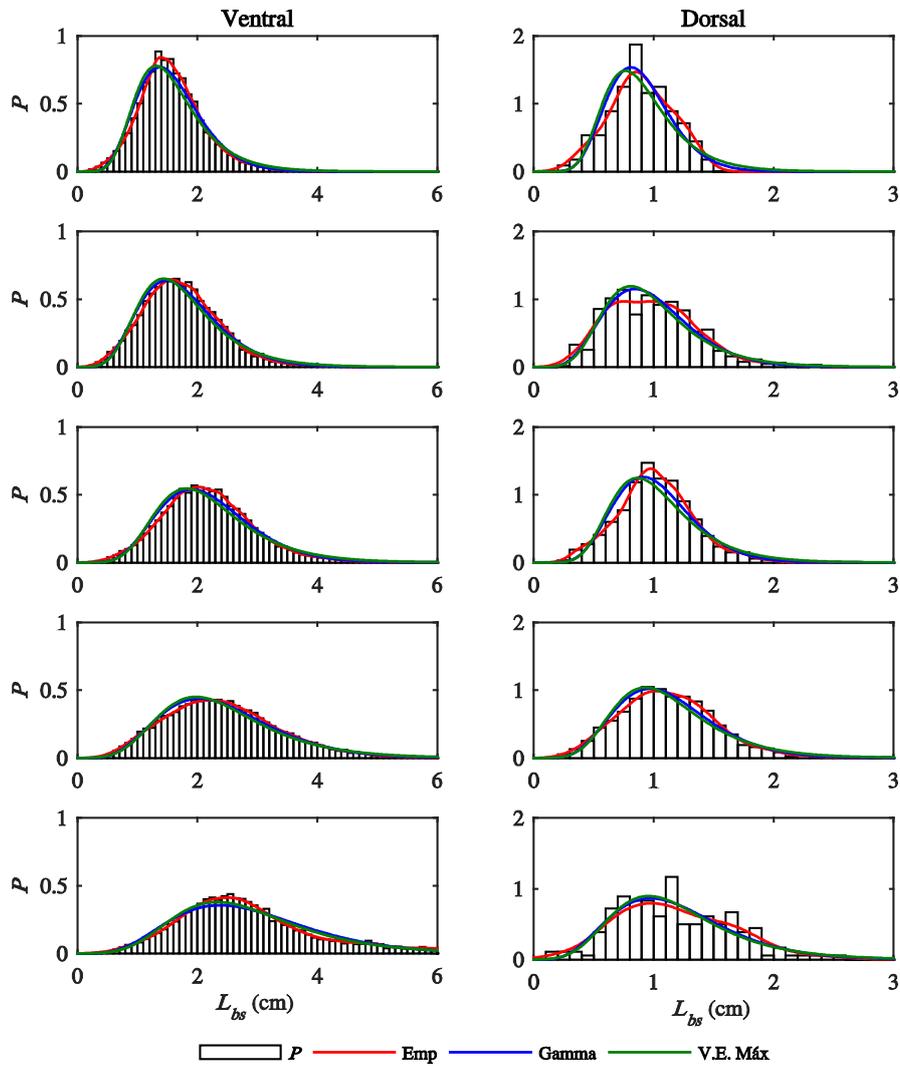


Figura 4.16. Distribución de probabilidad de la L_{bs} de las trazas a una frecuencia de 200 kHz, PDF empírica, y ajuste a las PDF Gamma y de Valores Extremos Máximos. Se representa la L_{bs} máxima para los registros ventrales y la media para los dorsales. Las trazas poseen una longitud angular mínima de 2° y están formadas por ecos con una LE entre 0.7 y 1.5, MDF de 0.3° , y una MCG de 3 dB para los registros ventrales y de 12 dB para los dorsales.

Tabla 4.18. Comparación del promedio del *TS* máximo de las trazas en función de la talla para los registros ventrales y del *TS* medio de las trazas para las grabaciones dorsales, calculado a partir de los datos de L_{bs} y σ_{bs} , y del promedio obtenido a partir de los ajustes de los modelos de Rice, Rayleigh, Gamma y Valores Extremos Máximos a los datos de L_{bs} . Resultados para trazas con una longitud angular mínima de 2° formadas por ecos con una LE entre 0.7 y 1.5, MDF de 0.3°, y una MCG de 3 dB para los registros ventrales y de 12 dB para los registros dorsales.

<i>L</i> (cm)	<i>TS ventral</i> (dB)						<i>TS dorsal</i> (dB)					
	Datos		Modelos teóricos				Datos		Modelos teóricos			
	σ_{bs}	L_{bs}	Rice	Ray	Gam	VEM	σ_{bs}	L_{bs}	Rice	Ray	Gam	VEM
15.27	-35.63	-35.63	-35.63	-35.63	-35.60	-35.41	-40.06	-40.65	-40.65	-40.65	-40.61	-40.35
16.76	-34.60	-34.60	-34.60	-34.60	-34.58	-34.40	-39.27	-39.60	-39.60	-39.60	-39.58	-39.46
18.70	-32.72	-32.72	-32.72	-32.72	-32.69	-32.49	-39.04	-39.43	-39.43	-39.43	-39.40	-39.16
22.24	-31.68	-31.68	-31.68	-31.68	-31.64	-31.49	-38.26	-38.47	-38.47	-38.47	-38.44	-38.26
26.40	-30.06	-30.06	-30.06	-30.06	-30.09	-30.04	-37.45	-37.84	-37.84	-37.84	-37.81	-37.68

donde la media de σ_{bs} se obtiene a partir de los datos de la L_{bs} según la Ecuación 4.18, de forma que

$$\mu(\sigma_{bs}) = \mu^2(|L_{bs}|) + \sigma^2(|L_{bs}|) \quad 4.34$$

El valor medio del *TS* máximo de las trazas ventrales derivado de los datos de la L_{bs} máxima coincide con el obtenido a partir de los datos de la σ_{bs} máxima. Las distribuciones de Rice y Rayleigh proporcionan un valor exacto del *TS* medio, a pesar de no ser los modelos que mejor se ajustan a los datos según el coeficiente de determinación y presentar cierto error en la estima de la media y la desviación típica. La distribución Gamma, que es la que mejor se ajusta a los datos, presenta un error medio en la estima del *TS* relativamente pequeño, de 0.03 dB. Y el modelo de Valores Extremos Máximos, que en principio se ajusta bastante bien a los datos, es el que presenta una mayor desviación en la determinación del *TS*, con una media de 0.17 dB. Por tanto, los cuatro modelos evaluados proporcionan estimaciones precisas de la media de las distribuciones del *TS* máximo de las trazas, obteniendo muy buenos resultados con la distribución de Rice y de Rayleigh, y buenos con la distribución Gamma.

En base al error cometido en la estimación de la media y de la desviación típica de las distribuciones de la L_{bs} máxima de las trazas, necesarios para el cálculo del parámetro γ , y a la precisión resultante en el cálculo de la media de las distribuciones del *TS* máximo, se considera apropiado el uso del modelo de Rice para una descripción sencilla de los datos acústicos registrados ventralmente.

Dorsalmente los valores del *TS* medio de las trazas obtenido a partir de los datos de la σ_{bs} media y de la L_{bs} media de las trazas y de los ajustes a las *PDF* teóricas se contrastan

en la Tabla 4.18. En primer lugar hay que destacar el TS obtenido a partir de los datos de la σ_{bs} media y la L_{bs} media no coinciden, a diferencia del TS derivado de los valores máximos de las trazas que sí que coinciden, observándose variaciones medias de 0.38 dB. Los modelos de Rice y Rayleigh proporcionan un valor exacto del TS en comparación del TS derivado de los datos de la L_{bs} , mientras que el modelo de Gamma presenta un error medio de 0.03 dB y el modelo de Valores Extremos Máximos de 0.22 dB.

Puesto que las distribuciones de Rice y Gamma presentan un buen ajuste según el criterio de log-verosimilitud y el coeficiente de determinación, parece recomendable usar estos modelos para describir los datos del aspecto dorsal la L_{bs} media de los peces. Sin embargo cabe destacar que el uso de la L_{bs} media de las trazas no proporciona un valor exacto de la σ_{bs} media, por lo que el cálculo del TS medio será sesgado. Esto se debe a que la Ecuación 4.34 no se está cumpliendo, pues la σ_{bs} media de una traza difiere del cuadrado de la L_{bs} media.

A continuación se muestran los resultados de los ajustes de las diferentes PDF teóricas a los datos de la $L_{bs,u}$ de las trazas de dorada en los que no se ha compensado el efecto del patrón de directividad del transductor. En la Tabla 4.19 se recogen los resultados obtenidos ventralmente para la $L_{bs,u}$ máxima de las trazas y en la Tabla 4.20 los correspondientes a la $L_{bs,u}$ media registrada dorsalmente. Se incluye la media y la desviación típica de los datos, el parámetro γ , los parámetros de los diferentes modelos teóricos evaluados, la función log-verosimilitud, el p-valor del test de Kolmogorov-Smirnov, el coeficiente de determinación, la media y la desviación típica obtenidas a partir del modelo, y el error relativo en % en la estima de la media y la desviación típica.

Al igual que sucede con los datos compensados, la media y la desviación típica de las distribuciones empíricas observadas ventralmente presentan valores crecientes con la longitud de los peces.

Para las amplitudes de eco en las que no se ha compensado del patrón de radiación del transductor, el parámetro γ toma valores entre 4.0 y 6.1 y mantiene la misma relación con la temperatura del agua y la talla observada con los datos compensados.

Atendiendo al criterio de log-verosimilitud y al coeficiente de determinación, las distribuciones Gamma y de Valores Extremos Máximos son las que mejor se ajustan a los datos con bondades muy similares, seguidas por la PDF de Rice y en último lugar por el modelo de Rayleigh. El p-valor es inferior a 0.05 en todos los casos, por lo que no puede aceptar la hipótesis de que los datos procedan de alguno de los modelos estudiados.

La PDF de Rice es el modelo que logra una estimación más precisa de la media y la desviación típica para las mediciones ventrales, con un error medio de 0.35% en la estimación de la media y de 1.52% para la desviación típica. El modelo Gamma estima de forma exacta la media, pero comete un error medio del 2.20% en el valor de la

desviación. El modelo de Valores Extremos Máximos comete un error medio de 0.58% en la estima de la media y de 5.72% en la desviación típica. El modelo de Rayleigh es el menos exacto ya que presenta unos errores de 5.86 y 18.69% para la media y la desviación típica respectivamente.

La media y la desviación típica de los datos observados dorsalmente no presentan una tendencia tan clara como la que presentan las amplitudes de eco compensadas por el patrón de directividad del transductor o los datos sin compensar registrados ventralmente.

El parámetro γ adopta valores muy similares para todas las tallas, comprendidos entre 2.4 y 2.7, muy inferiores a los obtenidos a partir de los datos compensados.

Las distribuciones Gamma y de Valores Extremos Máximos son las que proporcionan mejores resultados según el criterio de log-verosimilitud y el coeficiente de determinación, seguidos por el modelo de Rice y Rayleigh que proporcionan ajustes muy similares debido a que el parámetro s_{Rice} del modelo de Rice es próximo a cero. Tan solo para las tallas de mayor y menor tamaño ajustadas con los modelos Gamma y de Valores Extremos Máximos se obtienen p-valores superiores a 0.05, de forma que en la mayoría de los casos no puede aceptar la hipótesis de que los datos procedan de alguno de los modelos con un 95% de confianza.

En general, una *MCG* reducida influye de forma positiva en la reducción de errores en la estima de la media y la desviación típica a partir de los modelos teóricos. La distribución de Valores Extremos Máximos es la que proporciona resultados más precisos, con un error medio para la media de 0.86% y de 2.78% para la desviación típica. El modelo Gamma presenta errores de 0.00 y 4.40% para la media y la desviación típica, y las distribuciones de Rice y Rayleigh muestran desviaciones de 4.46 y 14.83%.

En la Figura 4.17 y la Figura 4.18 se muestran las distribuciones de probabilidad de la $L_{bs,u}$ de las trazas a intervalos de 0.1 cm para los registros ventrales y dorsales, la *PDF* empírica y el ajuste las distribuciones teóricas de Rice, Rayleigh, Gamma y Valores Extremos. Se muestran los resultados para el $L_{bs,u}$ máximo de las trazas detectadas ventralmente y para el $L_{bs,u}$ medio de las trazas registradas de forma dorsal. En las representaciones se puede observar que los modelos Gamma y de Valores Extremos Máximos se ajustan fielmente a los datos, seguidos del modelo de Rice que también se ajusta bastante bien para todas las tallas excepto para los peces de mayor tamaño. Se puede apreciar que para los registros dorsales y ventrales de mayor talla la distribución de Rice coincide con el modelo de Rayleigh, ya que el parámetro de no centralidad del modelo de Rice es muy próximo a 0.

En la Tabla 4.21 se contrastan el valor medio del *TSu* de las trazas obtenido a partir de los datos con la media asociada a los modelos teóricos, empleando el máximo de las trazas para los registros ventrales y la media para los dorsales.

Tabla 4.19. Media y desviación típica de la L_{Max} máxima de las trazas, parámetro γ , parámetros de las distribuciones de Rayleigh (b_{Ray}), Rice (σ_{Rice} , σ_{Rice}^2), Valores Extremos Máximos (α_G , β_G) y Gamma (a_γ , b_γ) por tallas, función log-veerosimilitud, p-valor del test de Kolmogorov-Smirnov, coeficiente de determinación, estimación de la media y la desviación típica a partir del modelo, y error relativo en la estimación de ambos. Los valores de L y L_{Max} se expresan en cm y los errores en %. Resultados para trazas registradas de forma ventral a 200 KHz, con una longitud mínima de 2°, formadas por ecos con una LE entre 0.7 y 1.5, una MDF de 0.3 y una MCG de 3 dB.

Datos			Distribución de Rayleigh							Distribución de Rice										
L	$\mu(L_{Max})$	$\sigma(L_{Max})$	γ	b_{Ray}	log-v	p-valor	R^2	$\mu(L_{Max})$	$\sigma(L_{Max})$	ERM $_{\mu}$	ERM $_{\sigma}$	σ_{Rice}	σ_{Rice}^2	log-v	p-valor	R^2	$\mu(L_{Max})$	$\sigma(L_{Max})$	ERM $_{\mu}$	ERM $_{\sigma}$
15.27	1.1189	0.4532	6.10	0.8536	-13514.1	8.5·10 ⁻²⁹	0.8683	1.0698	0.5592	4.59	18.96	0.9792	0.4993	-12495.8	9.1·10 ⁻²³	0.9778	1.1182	0.4548	0.06	0.36
16.76	1.2169	0.5357	5.16	0.9402	-9591.9	1.2·10 ⁻⁷⁰	0.9287	1.1784	0.6160	3.27	13.03	0.9977	0.6215	-9365.0	1.4·10 ⁻¹⁰	0.9804	1.2143	0.5416	0.21	1.08
18.70	1.5350	0.6348	5.85	1.1746	-49479.5	0	0.8883	1.4721	0.7695	4.27	17.50	1.3271	0.7064	-47417.6	3.2·10 ⁻⁴⁴	0.9810	1.5337	0.6378	0.08	0.47
22.24	1.7301	0.7942	4.75	1.3461	-24954.1	8.4·10 ⁻⁷⁴	0.9550	1.6871	0.8819	2.55	9.94	1.3289	0.9638	-24774.5	4.7·10 ⁻²²	0.9837	1.7233	0.8089	0.40	1.82
26.40	2.0358	1.0125	4.04	1.6077	-15197.4	3.9·10 ⁻³⁶	0.9309	2.0150	1.0533	1.03	3.87	0.1225	1.6056	-15.1974	4.4·10 ⁻³⁶	0.9308	2.0153	1.0534	1.02	3.89

Distribución de Valores Extremos Máximos							Distribución Gamma										
α_G	β_G	log-v	p-valor	R^2	$\mu(L_{Max})$	$\sigma(L_{Max})$	ERM $_{\mu}$	ERM $_{\sigma}$	a_γ	b_γ	log-v	p-valor	R^2	$\mu(L_{Max})$	$\sigma(L_{Max})$	ERM $_{\mu}$	ERM $_{\sigma}$
0.9062	0.3849	-12241.6	0.0000	0.9826	1.1284	0.4937	0.84	8.21	5.7850	0.1934	-12152.0	4.1·10 ⁻⁹	0.9898	1.1189	0.4652	0.00	2.58
0.9687	0.4418	-9115.0	0.0000	0.9837	1.2237	0.5667	0.55	5.43	4.9820	0.2443	-9077.9	3.4·10 ⁻⁵	0.9896	1.2169	0.5452	0.00	1.74
1.2377	0.5370	-46758.3	0.0000	0.9818	1.5476	0.6887	0.82	7.82	5.5469	0.2767	-45563.1	8.0·10 ⁻²⁵	0.9883	1.5350	0.6517	0.00	2.60
1.3623	0.6448	-24371.7	0.0002	0.9919	1.7344	0.8270	0.25	3.96	4.6060	0.3756	-24272.3	0.0342	0.9969	1.7301	0.8061	0.00	1.48
1.5857	0.7653	-14748.5	0.0211	0.9969	2.0275	0.9816	0.41	3.15	4.2565	0.4783	-14770.4	3.1·10 ⁻⁵	0.9909	2.0358	0.9867	0.00	2.61

Tabla 4.20. Media y desviación típica de la $L_{bs,\mu}$ media de las trazas, parámetro γ , parámetros de las distribuciones de Rayleigh (b_{Ray}), Rice (σ_{Rice}), Valores Extremos Máximos (α_G, β_G) y Gamma (a_γ, b_γ) por tallas, función log-verosimilitud, p-valor del test de Kolmogorov-Smirnov, coeficiente de determinación, estimación de la media y la desviación típica a partir del modelo, y error relativo en la estimación de ambos. Los valores de L y L_{bs} se expresan en cm y los errores en %. Resultados para trazas registradas de forma dorsal a 200 kHz, con una longitud mínima de 2°, formadas por ecos con una LE entre 0.7 y 1.5, una MDF de 0.3 y una MCG de 12 dB.

Datos		Distribución de Rayleigh						Distribución de Rice												
L	$\mu(L_{bs,n})$	$\sigma(L_{bs,n})$	γ	b_{Ray}	$\log-v$	p -valor	R^2	$\mu(L_{bs,n})$	$\sigma(L_{bs,n})$	ERM_μ	ERM_σ	σ_{Rice}	$\log-v$	p -valor	R^2	$\mu(L_{bs,n})$	$\sigma(L_{bs,n})$	ERM_μ	ERM_σ	
15.27	0.3805	0.2322	2.69	0.3152	13.3	0.0330	0.3767	0.3950	0.2065	3.68	12.44	0.0147	0.3150	13.3	0.0329	0.3768	0.3950	0.2065	3.68	12.44
16.76	0.5203	0.3261	2.55	0.4342	-148.1	$2.9 \cdot 10^{-7}$	0.7100	0.5441	0.2844	4.39	14.64	0.0164	0.4340	-148.1	$2.9 \cdot 10^{-7}$	0.7100	0.5442	0.2845	4.40	14.64
18.70	0.4294	0.2739	2.46	0.3601	-106.7	$1.5 \cdot 10^{-27}$	0.8932	0.4513	0.2359	4.87	16.09	0.0069	0.3601	-106.7	$1.5 \cdot 10^{-27}$	0.8932	0.4514	0.2359	4.87	16.09
22.24	0.5174	0.3215	2.59	0.4307	-446.7	$1.5 \cdot 10^{-14}$	0.9215	0.5399	0.2822	4.16	13.94	0.0095	0.4307	-446.7	$1.4 \cdot 10^{-14}$	0.9215	0.5399	0.2822	4.16	13.94
26.40	0.5101	0.3291	2.40	0.4292	-37.4	0.0043	0.8693	0.5579	0.2812	5.18	17.02	0.0154	0.4291	-37.4	0.0043	0.8693	0.5380	0.2812	5.18	17.01

Datos		Distribución de Valores Extremos Máximos						Distribución Gamma									
α_G	β_G	$\log-v$	p -valor	R^2	$\mu(L_{bs,n})$	$\sigma(L_{bs,n})$	ERM_μ	ERM_σ	a_γ	b_γ	$\log-v$	p -valor	R^2	$\mu(L_{bs,n})$	$\sigma(L_{bs,n})$	ERM_μ	ERM_σ
0.2709	0.1850	10.6	0.3263	0.4811	0.3777	0.2373	0.74	2.15	2.3851	0.1595	15.3	0.4791	0.5501	0.3805	0.2464	0.00	5.76
0.3671	0.2613	-154.3	0.0149	0.8325	0.5179	0.3351	0.46	2.68	2.1547	0.2415	-131.7	0.0416	0.8640	0.5203	0.3544	0.00	8.00
0.3047	0.2089	-88.4	$4.0 \cdot 10^{-6}$	0.9439	0.4253	0.2680	0.96	2.22	2.2842	0.1880	5.7	0.0047	0.9764	0.4294	0.2841	0.00	3.59
0.3710	0.2469	-439.5	0.0027	0.9521	0.5135	0.3167	0.75	1.52	2.3955	0.2160	-382.2	0.0211	0.9751	0.5174	0.3343	0.00	3.81
0.3626	0.2436	-34.8	0.3556	0.9375	0.5032	0.3124	1.37	5.33	2.3617	0.2160	-28.7	0.8979	0.9689	0.5101	0.3319	0.00	0.86

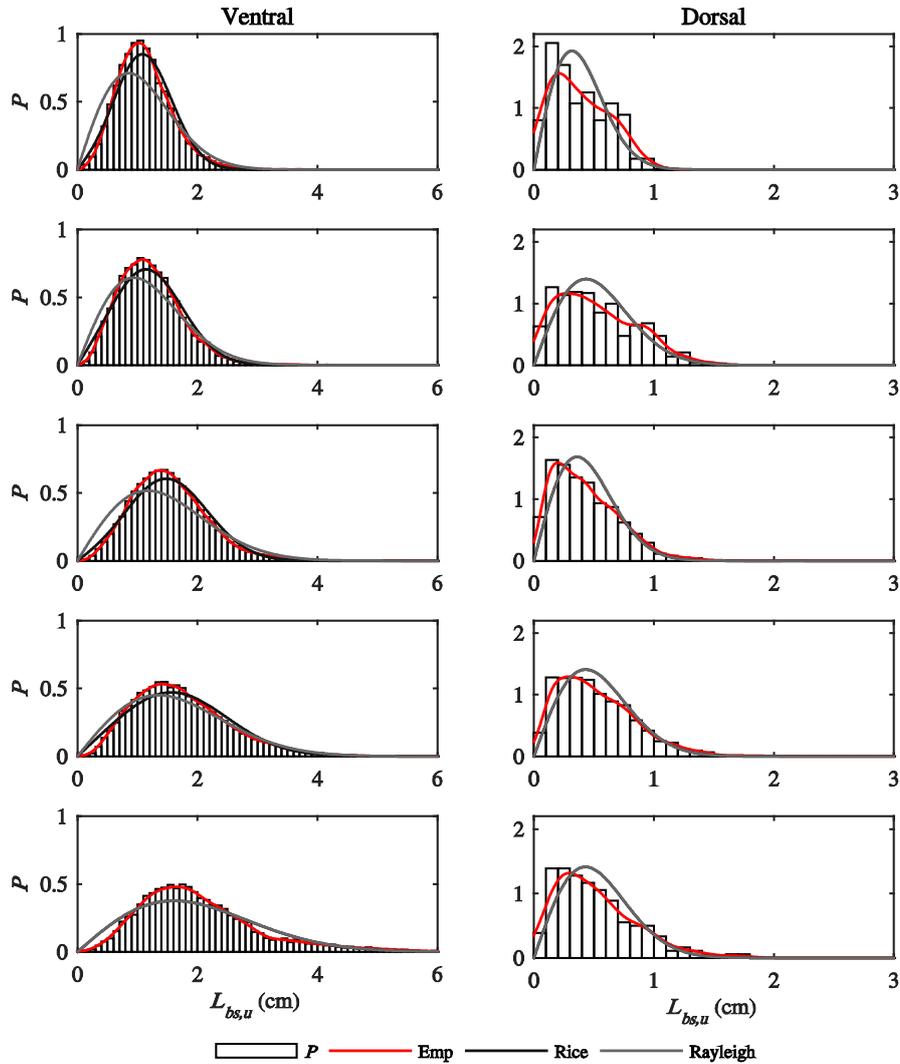


Figura 4.17. Distribución de probabilidad para el aspecto ventral y dorsal de la $L_{bs,u}$ máxima y media, respectivamente, de las trazas a una frecuencia de 200 kHz, PDF empírica, y ajuste a las PDF de Rice y Rayleigh. Las trazas poseen una longitud angular mínima de 2° y están formadas por ecos con una LE entre 0.7 y 1.5, MDF de 0.3° , y una MCG de 3 dB para los registros ventrales y 12 dB para los dorsales.

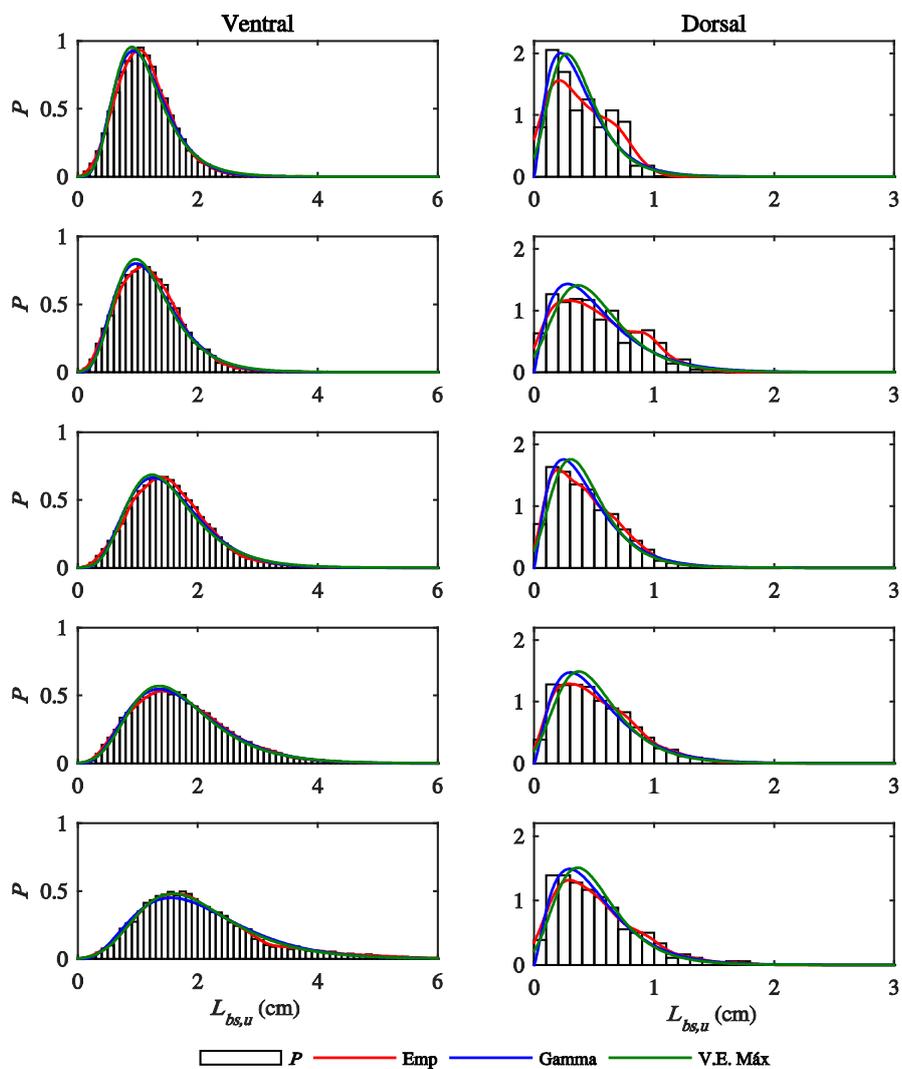


Figura 4.18. Distribuci3n de probabilidad para el aspecto ventral y dorsal de la $L_{bs,u}$ máxima y media, respectivamente, de las trazas a una frecuencia de 200 kHz, PDF empírica, y ajuste a las PDF Gamma y de Valores Extremos Máximos. Las trazas poseen una longitud angular mínima de 2° y están formadas por ecos con una LE entre 0.7 y 1.5, MDF de 0.3° , y una MCG de 3 dB para los registros ventrales y 12 dB para los dorsales.

Tabla 4.21. Comparación del promedio del TSu máximo de las trazas en función de la talla para los registros ventrales y del TSu medio de las trazas para las grabaciones dorsales, calculado a partir de los datos de $L_{bs,u}$ y $\sigma_{bs,u}$, y del promedio obtenido a partir de los ajustes de los modelos de Rice, Rayleigh, Gamma y Valores Extremos Máximos a los datos de $L_{bs,u}$. Resultados para trazas con una longitud angular mínima de 2° formadas por ecos con una LE entre 0.7 y 1.5, MDF de 0.3° , y una MCG de 3 dB para los registros ventrales y de 12 dB para los registros dorsales.

L (cm)	TSu ventral (dB)						TSu dorsal (dB)					
	Datos		Modelos teóricos				Datos		Modelos teóricos			
	σ_{bs}	L_{bs}	Rice	Ray	Gam	VEM	σ_{bs}	L_{bs}	Rice	Ray	Gam	VEM
15.27	-38.36	-38.36	-38.36	-38.36	-38.33	-38.18	-46.12	-47.02	-47.02	-47.02	-46.87	-47.01
16.76	-37.53	-37.53	-37.53	-37.53	-37.50	-37.40	-43.84	-44.24	-44.24	-44.24	-44.02	-44.20
18.70	-35.59	-35.59	-35.59	-35.59	-35.56	-35.42	-45.35	-45.86	-45.86	-45.86	-45.77	-45.97
22.24	-34.41	-34.41	-34.41	-34.41	-34.39	-34.33	-43.90	-44.31	-44.31	-44.31	-44.21	-44.39
26.40	-32.87	-32.87	-32.86	-32.87	-32.91	-32.95	-43.81	-44.34	-44.34	-44.34	-44.31	-44.55

Los valores del TSu máximo de las trazas obtenidos a partir de los datos de $L_{bs,u}$ máximo y $\sigma_{bs,u}$ máximo coinciden para los registros ventrales. El TSu obtenido a partir de los modelos de Rice y Rayleigh es prácticamente idéntico al obtenido a partir de los datos. La estimación obtenida a partir del ajuste al modelo Gamma presenta un error medio de tan solo 0.03 dB, mientras que al usar el modelo de Valores Extremos Máximos el error aumenta a 0.13 dB.

Teniendo en consideración el error cometido en la estimación de la media y la desviación típica de la $L_{bs,u}$ máxima de las trazas, y en el promedio del TS máximo, se considera apropiado el uso del modelo de Rice para una descripción sencilla de las amplitudes del eco registradas ventralmente para la dorada de forma ventral en las que no se ha compensado el efecto del patrón de directividad del transductor.

Los valores de TSu medios obtenidos dorsalmente a partir de los datos de la $L_{bs,u}$ media difieren una media de 0.55 dB respecto a los derivados de los valores de la $\sigma_{bs,u}$ media. Los modelos de Rice y Rayleigh permiten una estimación exacta del TS medio respecto al obtenido a partir de los datos de $L_{bs,u}$, la distribución Gamma genera una desviación media de 0.12 dB en la estima del TSu medio y el modelo de Valores Extremos Máximos de 0.09 dB.

La distribución Gamma presenta un buen ajuste según el criterio de log-verosimilitud, el coeficiente de determinación y el p-valor, por lo que parece recomendable usar este modelo para describir los datos de la $L_{bs,u}$ media de los peces. Sin embargo, cualquiera de los otros tres modelos evaluados proporciona un error más exacto del TS medio de las trazas.

Se ha de tener en cuenta que el uso de la $L_{bs,u}$ media de las trazas proporciona un valor sesgado de la $\sigma_{bs,u}$ media para los registros dorsales, ya que es necesario conocer también la desviación típica de la $L_{bs,u}$ de las trazas para un cálculo exacto. Por tanto, si el manejo de un mayor volumen de datos sugiere que el aspecto dorsal del TSu máximo de las trazas de dorada tiene un buen grado de correlación con la longitud o la masa, se recomienda el ajuste de la $L_{bs,u}$ máxima de las trazas para describir de forma sencilla los datos.

4.2.4.5. DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO MÍNIMO DE LA MUESTRA

Resulta interesante determinar cuál ha de ser el mínimo número de trazas necesario para poder obtener unos resultados precisos. La estimación del tamaño muestral presenta una gran importancia ya que permite ajustar el tiempo de medida necesario para la estimación indirecta de la talla a partir de los datos acústicos.

Según el teorema central del límite si se toman muestras de una población con media μ y desviación típica σ de un tamaño n superior a 30, las medias \bar{X} de estas muestras se distribuyen de forma normal según

$$\bar{X} \sim N\left(\mu, \frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right) \quad 4.35$$

Aunque no se puede considerar que los datos procedan de una distribución Normal, la estimación de los intervalos de confianza para la media de la muestra es bastante robusta para muestras muy grandes, pues se puede trabajar con la hipótesis de que la media muestral es normal.

Se puede demostrar que el intervalo de confianza para la media de una población con desviación típica desconocida y un nivel de confianza del $(1 - \alpha) \cdot 100$ es

$$\bar{X} \pm Z_{\alpha/2} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \quad 4.36$$

siendo $Z_{\alpha/2}$ es la variable normal tipificada y s la desviación típica de la muestra. De la Ecuación 4.36 se deduce que

$$Z_{\alpha/2} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \leq EA \quad 4.37$$

donde EA es el error absoluto admisible. Por tanto, el tamaño mínimo de la muestra para que el intervalo de confianza para la media con un nivel de confianza dado tenga una cota de error conocida ha de ser

$$n \geq \left(Z_{\alpha/2} \cdot \frac{s}{EA} \right)^2 \quad 4.38$$

Puesto que la media de las distribuciones resulta un parámetro adecuado para su correlación con las dimensiones de la dorada, se considera oportuno determinar el tamaño de la muestra necesario para la inferencia de la media poblacional a partir del intervalo de confianza de la media.

Aunque el TS es el parámetro más empleado para describir las características acústicas de los ecos, la magnitud física que se maneja realmente es la σ_{bs} , por lo que la estimación del tamaño muestral se calcula en base a esta variable.

Un error del 2% en la estimación de la talla de la dorada se considera aceptable, según los métodos actuales de estimación de talla y los productores consultados. El error en la estima de la longitud $\varepsilon(L)$ depende del error del TS $\varepsilon(TS)$ y este a su vez del error de σ_{bs} $\varepsilon(\sigma_{bs})$. Según la teoría de propagación de errores y las Ecuaciones 3.47 y 4.11 se tiene que

$$\varepsilon(L) = \frac{\partial L}{\partial TS} \cdot \varepsilon(TS) = a \cdot b \cdot \ln 10 \cdot 10^{b \cdot TS} \cdot \varepsilon(TS) \quad 4.39$$

$$\varepsilon(TS) = \frac{\partial TS}{\partial \sigma_{bs}} \cdot \varepsilon(\sigma_{bs}) = \frac{10}{\ln 10} \cdot \frac{1}{\sigma_{bs}} \cdot \varepsilon(\sigma_{bs}) \quad 4.40$$

Según las Ecuaciones 4.38, 4.39 y 4.40, el tamaño mínimo de la muestra para lograr un error determinado en la estima de la longitud dependerá de la talla de los peces, ya que de esta depende la desviación típica de la σ_{bs} y el error en la estima de la media de σ_{bs} .

A continuación se muestra la media del TS y la σ_{bs} de las trazas en función de la talla, así como los errores absolutos estimados para la longitud, el TS y la σ_{bs} para lograr una precisión del 2% en la estimación de la longitud (Ecuaciones 4.39 y 4.40). En la Tabla 4.22 se muestran los resultados para los registros ventrales, derivados a partir del TS máximo de las trazas para ecos definidos con una MCG de 3 dB (Tabla 4.14), y las soluciones para las grabaciones dorsales, obtenidas a partir del TS medio de las trazas para ecos con una MCG de 12 dB (Tabla 4.14).

Ventralmente es necesario alcanzar variaciones de ± 0.2 dB en la media del TS para conseguir una precisión de 2% en la talla de los peces, mientras que para los registros dorsales la exactitud del TS se reduce a ± 0.09 dB debido a la menor pendiente.

Tabla 4.22. Número de trazas registradas y cálculo de la media del TS y de la σ_{bs} de las trazas a partir de talla media de los grupos, el error absoluto de cada una de las variables, la desviación típica de los datos de σ_{bs} de las trazas y el tamaño mínimo de la muestra para lograr una precisión del 2% en la estimación de la longitud. En la parte superior se muestran los resultados para los registros ventrales donde se evalúa el valor máximo de las trazas, y en la parte inferior se resumen los resultados obtenidos a partir del valor promedio de las trazas para las grabaciones dorsales

<i>Ventrales</i>								
<i>Nº trazas</i>	<i>L (cm)</i>	$\varepsilon(L)$	$TS_{M\acute{a}x}$ (dB)	$\varepsilon(TS)$	σ_{bs} (cm ²)	$\varepsilon(\sigma_{bs})$	$s(\sigma_{bs})$	<i>n</i>
20476	15.27	0.305	-35.380	0.204	2.897	0.136	1.918	761
11234	16.76	0.335	-34.457	0.205	3.591	0.169	2.702	978
50177	18.70	0.374	-33.350	0.205	4.623	0.219	3.757	1136
21536	22.24	0.445	-31.614	0.206	6.896	0.327	5.328	1017
11168	26.40	0.528	-29.897	0.207	10.241	0.488	9.056	1321
<i>Dorsales</i>								
<i>Nº trazas</i>	<i>L (cm)</i>	$\varepsilon(L)$	$TS_{M\acute{a}x}$ (dB)	$\varepsilon(TS)$	σ_{bs} (cm ²)	$\varepsilon(\sigma_{bs})$	$s(\sigma_{bs})$	<i>n</i>
112	15.27	0.305	-39.914	0.091	1.020	0.021	0.485	1972
632	16.76	0.335	-39.495	0.091	1.123	0.024	0.858	5071
2853	18.70	0.374	-39.003	0.091	1.258	0.026	0.759	3152
2262	22.24	0.445	-38.225	0.092	1.505	0.032	1.084	4461
180	26.40	0.528	-37.455	0.092	1.797	0.038	1.527	6175

El mínimo número de trazas necesario para alcanzar la precisión deseada aumenta con la talla de los peces, y es notablemente mayor para los registros dorsales. A pesar de que dorsalmente se detectan valores de σ_{bs} con una menor desviación típica, el reducido error de la σ_{bs} necesario para estimar la longitud con una precisión del 2% obliga a registrar un elevado número de trazas, hasta casi 5 veces más que ventralmente. A partir del registro de algo menos de 1500 trazas de forma ventral se logra la precisión deseada, mientras que dorsalmente es necesario algo más de 6000 trazas, en ningún caso logradas en este ensayo.

Dado el elevado número de trazas detectadas ventralmente se considera aceptable la estimación del mínimo número de trazas necesarias para obtener resultados fiables. Sin embargo, la estima a partir de las grabaciones dorsales se basa en un reducido número de detecciones, por lo que el resultado obtenido se ha de tomar como dato orientativo, aunque hay que tener en cuenta que a a pesar del reducido número de trazas detectadas

dorsalmente ha sido posible hallar una fuerte relación entre el TS y la longitud de la dorada.

Igualmente se ha estudiado la evolución del valor promedio del aspecto ventral TS máximo de las trazas calculado para conjuntos de 2000 trazas a intervalos de 100 trazas. En la Figura 4.19 se puede apreciar que la media del TS oscila en torno al promedio de todos los datos, con variaciones de hasta 1.5 dB respecto a la media e incluso de hasta 2 dB para los peces de mayor tamaño. Estas oscilaciones seguramente se deban a las variaciones de temperatura a lo largo de los días, como sugieren Demer & Renfree (2008), ya que se pueden llegar a observar variaciones de varios grados a lo largo de un mismo día.

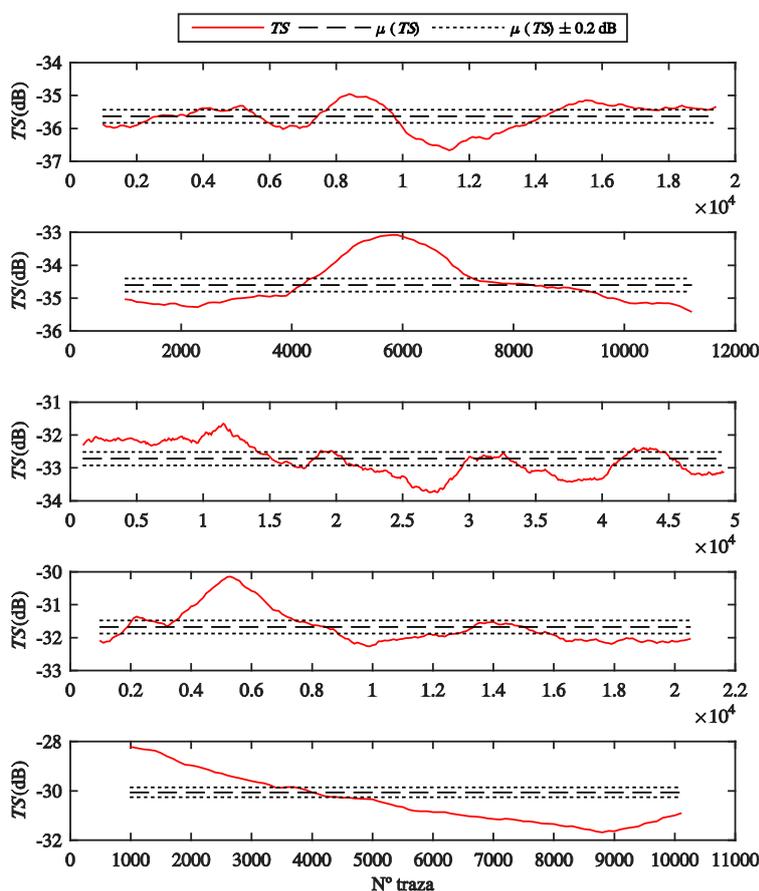


Figura 4.19. Evolución de la media del aspecto ventral TS máximo de las trazas calculada para conjuntos de 2000 trazas a intervalos de 100 trazas.

4.2.4.6. DEPENDENCIA DEL TS CON LA DISTANCIA AL TRANSDUCTOR

Se ha analizado la evolución del TS promedio por capas para evaluar si existe algún indicio de la dependencia del TS con la distancia al transductor. Para ello se ha calculado la media del TS de las trazas por capas de 50 cm.

En la Figura 4.20 se representa el valor medio del aspecto ventral del TS máximo y el aspecto dorsal del TS medio de las trazas, respectivamente, frente a la altura media de la capa. Los marcadores rojos señalan los promedios obtenidos en aquellas capas donde se ha detectado un mínimo de 1000 trazas. La línea discontinua representa la media de todos los datos, y las líneas de punto muestran una variación de ± 0.2 dB respecto a la media para los registros ventrales y variaciones de ± 0.09 dB para las grabaciones dorsales, que corresponden a una precisión del 2% en la estimación de la talla. La distancia de la trazas se calcula como el centro de gravedad o la distancia media de la traza.

El TS medio obtenido por capas para los registros ventrales se ajusta bastante bien al promedio de todos los datos, a excepción de los peces de mayor tamaño, por lo que en principio el TS no parece depender de la distancia al transductor en este rango de 0.5 a 4 m. En aquellas capas donde se superan las 1000 detecciones se tienen desviaciones máximas respecto a la media de ± 0.05 dB en el grupo de menor talla, de ± 0.23 dB en la segunda talla, en la tercera de ± 0.34 dB y en la cuarta de ± 0.30 dB si no se tiene en cuenta la última capa donde el TS medio es 1.98 dB inferior a la media global. La talla de mayor tamaño es la que mayores desviaciones presenta, con oscilaciones de hasta ± 0.95 dB.

Debido a la escasa detección de trazas de forma dorsal tan solo se superan las 1000 detecciones en la capa que se extiende 3.5 a 4 m para la talla intermedia, donde el valor del TS de la capa coincide con el promedio global, pues la gran mayoría de las trazas se han detectado en esa capa. En el resto de capas y para el resto de tallas las detecciones son insuficientes para evaluar la dependencia del TS con la distancia al transductor.

La mayoría de las trazas proceden de peces situados a las distancias más lejanas del transductor, tanto para los registros ventrales como para los dorsales, concentrándose en mayor medida entre 2.5 y 4 m. Puesto que las trazas se definen mediante una distancia angular en lugar de un número de ecos, la falta de detecciones a las distancias más próximas al transductor no van ligadas a la definición de las trazas, si no que parece ser que los peces preferían moverse a distancias más alejadas del transductor, tanto para las medidas ventrales como para las dorsales. Es más, teniendo en cuenta que los registros dorsales se realizaron posteriormente los ventrales, el reducido número de trazas detectadas ventralmente lleva a pensar que con los días los peces tienden a huir del haz del transductor.

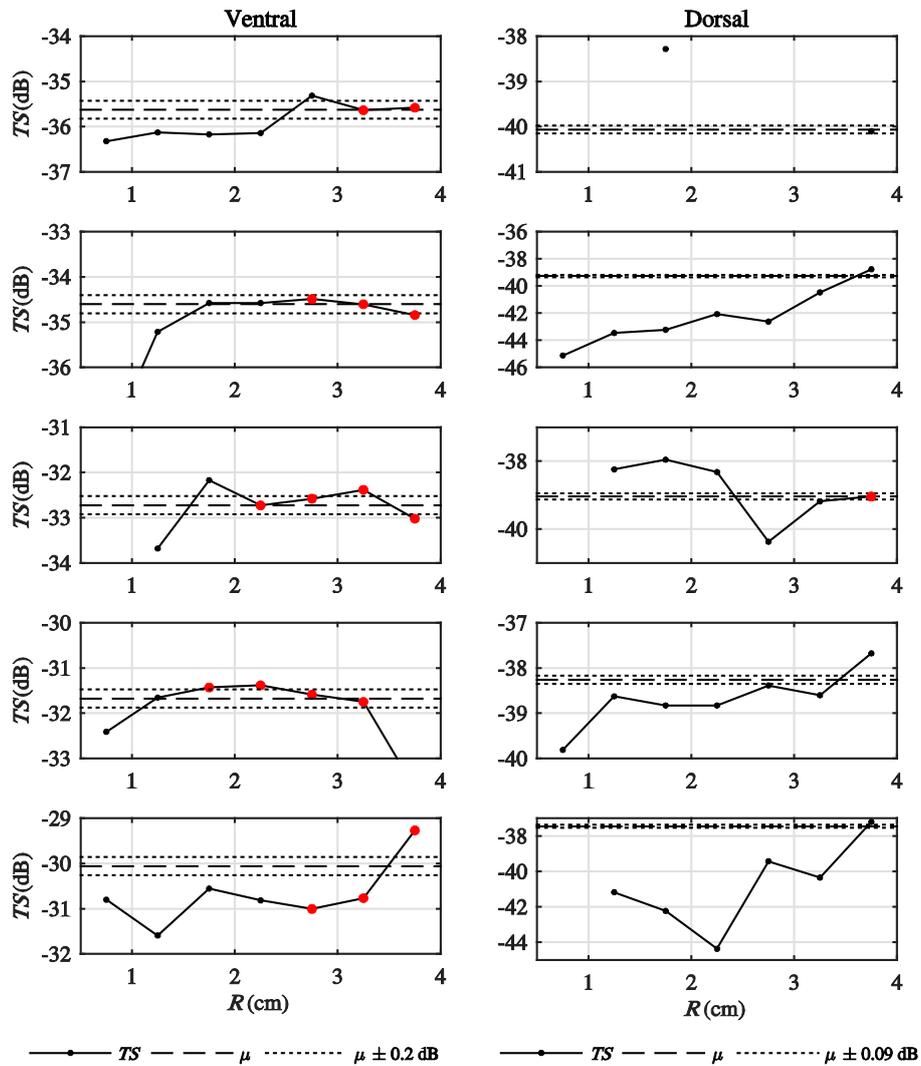


Figura 4.20. Valor medio del TS de las trazas en capas de 50 cm de altura, del TS máximo para los registros ventrales y del TS medio para los dorsales. Las marcas rojas muestran los valores medios calculados en aquellas capas donde se han detectado al menos 1000 trazas. La línea discontinua muestra el valor medio de todos los datos y la línea de puntos una desviación de ± 0.2 dB respecto a la media para los registros ventrales y de ± 0.09 dB para los dorsales.

4.3. CONCLUSIÓN

Las relaciones entre las principales variables biométricas de la dorada han quedado caracterizadas mediante la determinación de las expresiones que relacionan la longitud, la altura y la masa, obteniendo fuertes grados de correlación. Las fórmulas obtenidas a partir de ejemplares de dos piscifactorías diferentes difieren ligeramente.

Pese a la proximidad del blanco estándar al transductor, se han logrado calibraciones exitosas. Tal vez sea conveniente emplear durante la calibración el mismo intervalo entre pings a usar durante las mediciones del *TS*, siempre que se asegure la ausencia de interferencia entre pings sucesivos, ya que se ha podido observar que los parámetros de calibración varían de forma significativa.

De igual modo, se ha conseguido determinar la dependencia del *TS* con la longitud de la dorada con un buen grado de correlación tanto ventral como dorsalmente, a pesar de la gran problemática que presenta la medida del *TS* a distancias muy próximas al transductor. Se puede asumir que las distribuciones observadas son unimodales, pudiendo significar que en todo momento se detecta el lóbulo principal del patrón de directividad de los peces. Los valores del *TS* registrados ventralmente son superiores a los obtenidos de forma dorsal, seguramente debido al apantallamiento de la vejiga por la espina dorsal del animal. Ventralmente el *TS* máximo de las trazas y la media de las distribuciones son los estadísticos que ofrecen un ajuste más robusto para la estimación de la talla. De igual modo, se ha podido comprobar en los registros ventrales que la aceptación de los ecos procedentes de las posiciones angulares más cercanas al eje del transductor mejora la bondad de los ajustes. El valor de la pendiente de la expresión que relaciona el *TS* y el logaritmo de la longitud presenta un valor próximo a 20 ventralmente, sin embargo se reduce hasta en torno a 10 para los registros dorsales. Se han obtenido las relaciones entre el *TS* y la longitud, que permiten estimar la talla y el error asociado a partir de las mediciones acústicas. Los resultados obtenidos se consideran válidos para un rango de distancias de detección entre 2 y 4 metros, pues la mayoría de las detecciones proceden de ese rango de distancias. Además este suele ser el rango de detección en condiciones de producción debido a que a mayores distancias resulta difícil discriminar blancos individuales por la elevada densidad del cardumen. En el rango de distancias evaluado no se aprecia indicio alguno de la dependencia del *TS* con la distancia al transductor.

Probablemente se han obtenido relaciones lineales entre el *TS* y el logaritmo de la longitud de los peces a causa de que el rango de distancias evaluado es muy estrecho, de forma que los diferentes factores de corrección que pueden aplicarse para compensar los efectos debidos a la proximidad de los dispersores al transductor sean muy similares en este rango. La utilización de pulsos de muy corta duración puede disminuir los errores cometidos por el uso de la aproximación asintótica del *TVG* y en la estimación del instante inicial del eco, pues la distancia de detección es mucho mayor que la longitud del pulso. Para comprobar la influencia de la distancia en el *TS* será necesario desarrollar

un experimento que permita detectar trazas en un rango de distancias más amplio. Aun así hay que tener en cuenta que la estimación del TS en jaulas en condiciones de producción se ha de llevar a cabo en un rango de distancias muy reducido y similar al de esta experiencia, aunque tal vez resulte conveniente estudiar la dependencia del TS con la distancia y la aplicación de los posibles factores de corrección para una correcta estimación del S_v y por tanto de la biomasa presente en el haz acústico. Por otro lado, considerando las dimensiones de la vejiga como el principal elemento dispersor, posiblemente las detecciones se hayan realizado en el campo lejano de los peces, siendo consistente con la correlación hallada entre el TS y la longitud o la masa de la dorada.

Igualmente se ha comprobado que existe una dependencia lineal entre el TS y el logaritmo de la masa de los peces, pudiendo resultar muy útil en su aplicación directa a la gestión de piscifactorías.

Se han observado oscilaciones en la evolución de la media del TS , probablemente debidos a los grandes cambios de temperatura que se producen a lo largo del día en los primeros metros. La monitorización continua de la temperatura puede resultar una práctica recomendable, pues permite calcular la velocidad de propagación del sonido y el coeficiente de absorción del medio de forma más precisa, mejorando la compensación de las pérdidas sufridas durante propagación y la determinación del instante de llegada del eco.

Teniendo en cuenta los resultados del TS_u , en principio parece viable la determinación del tamaño a partir de medidas realizadas con una ecosonda single-beam y, aunque será necesario evaluar la configuración óptima de los parámetros para la definición del SED y la detección de trazas, resulta interesante para la implantación de sistemas de bajo coste en piscifactorías.

5

Medida del TS y el S_v de dorada y lubina en condiciones de producción

Para lograr una gestión eficiente de una explotación piscícola es necesario disponer de una tecnología que permita determinar de forma precisa tanto la talla media de los peces como su abundancia, facilitando la elaboración de la estrategia de alimentación, desdobles, etc. Como se ha comentado anteriormente, actualmente se disponen de algunos sistemas que permiten estimar con relativa precisión el tamaño medio de los peces. En el Capítulo 4 se ha demostrado que los métodos acústicos basados en el uso de ecosondas científicas a cortas distancias pueden proporcionar buenos resultados en la estimación de la talla de los peces, pues se ha podido comprobar la existencia de un fuerte grado de correlación entre el TS y la longitud y la masa de ejemplares individuales de dorada. Sin embargo, aun no se dispone de una metodología capaz de determinar la abundancia de peces en el interior de una jaula flotante de forma precisa. La estimación del número de individuos se realiza teniendo en cuenta los ejemplares introducidos y las bajas observadas apoyándose en las inspecciones visuales de los buzos, pero resulta prácticamente imposible tener en cuenta todas las bajas. Por tanto, la estima de la abundancia está sometida a una incertidumbre significativa, pudiendo alcanzar valores de hasta el 50% en una jaula de engorde.

El uso de ecosondas en jaulas flotantes en condiciones de producción presenta algunas particularidades, debido a la elevada densidad del cardumen de peces y la gran proximidad de los peces al transductor, que obligan a evaluar la idoneidad de la aplicación de las técnicas acústicas en este entorno. En este Capítulo se evalúa la viabilidad de la estimación de la masa promedio de los peces y la abundancia en jaulas

flotantes de dorada y lubina de granjas de engorde, mediante el uso de ecosondas científicas split-beam de forma dorsal. En el Capítulo 4 se ha podido comprobar que es posible determinar de forma precisa la talla de peces individuales con una dispersión de tamaños reducida. No obstante, se desea comprobar si es posible la detección de ejemplares individuales jaulas en condiciones de producción que permita estimar la talla media de los peces, e incluso obtener una relación *in situ* conociendo de antemano el tamaño promedio de los peces, aun cuando la dispersión de tamaños sea elevada. De igual forma, se ha estudiado la aplicabilidad de técnicas acústicas en la estimación de la abundancia de peces en jaula mediante el posicionamiento del cardumen en el perfil de la jaula y la evaluación del Sv.

El objetivo final del presente estudio es la estimación de la biomasa total de peces en jaulas marinas, gracias a la determinación del tamaño promedio de los peces y la abundancia empleando una ecosonda científica split-beam.

Según la literatura el uso de técnicas acústicas permite obtener mediante una misma configuración datos sobre la talla promedio de los peces y su abundancia, además de permitir monitorizar el comportamiento de los peces, pudiendo identificar conductas anómalas debidas a fugas, presencia de depredadores, etc.

Con el fin de valorar el uso de ecosondas científicas en jaulas en condiciones de producción para la estimación de biomasa, se han llevado a cabo dos campañas de medida en jaulas de engorde de dorada y lubina de dos granjas diferentes, desarrolladas bajo el proyecto “Diseño de la tecnología para el cálculo de la biomasa total de peces en instalaciones off-shore” (ARM/1790/010), financiado por las ayudas al Desarrollo Tecnológico Pesquero y Acuícola del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, dentro de la línea de mejora de la competitividad del sector acuícola. El proyecto fue realizado desde diciembre de 2011 a diciembre de 2013 por la Asociación Empresarial de Productores de Cultivos Marinos (Apromar), el Centro Tecnológico de la Acuicultura (Ctaqua) y la Universitat Politècnica de València (UPV).

5.1. MATERIALES Y MÉTODOS

En esta Sección se describe la configuración experimental empleada en las dos campañas de medidas. La primera de ellas se llevó a cabo en septiembre de 2012 en la granja Culmarex, situada en Águilas (Murcia), empresa del grupo empresarial Culmarex. El diseño de las experiencias fue elaborado por la empresa Biosonics Inc. junto con Ctaqua. Se realizaron mediciones acústicas a dos frecuencias, 123 y 201 kHz con una ecosonda científica DT-X de Biosonics y transductores split-beam de haz estrecho desde una perspectiva dorsal. Se registraron datos para tres tallas diferentes de lubina, con una masa promedio de 60, 484 y 1319 g, y una única talla de dorada con una masa media de 433 g. La segunda campaña de medidas se ejecutó en septiembre de 2013 en la planta de Piagua situada en Aguadulce (Almería), que también forma parte del grupo Culmarex.

En esta ocasión se participó en el diseño de la experiencia y se decidió repetir la configuración empleada por Biosonics en Águilas para poder comparar resultados. Se realizaron mediciones con una ecosonda científica EK60 de Simrad y un transductor split-beam ES200-7C de haz estrecho trabajando a 200 kHz. En esta ocasión se ensayó en una jaula destinada a venta con una única talla de dorada (541 g) y tres cantidades diferentes de biomasa.

5.1.1. CULMAREX

Las mediciones se llevaron a cabo durante 6 días en jaulas de la granja marina Culmarex, situada a unos 700 m de la línea de costa y a 2.5 millas del Puerto de Águilas (Murcia). Culmarex es la planta productora de lubina más importante en España y una de las mayores piscifactorías en mar abierto.



Fuente: Culmarex (2015)

Figura 5.1. Fotografía de las instalaciones de Culmarex en Águilas (Murcia).

Se realizaron ensayos en cuatro jaulas, tres de lubina con tallas muy diferentes y una de dorada de talla comercial. Las jaulas presentaban dos tamaños diferentes, mayor para las jaulas destinadas a cría y menor para las destinadas a ventas. Estaban formadas por dos anillos flotación concéntricos unidas por candeleros, un anillo anticorriente y la red. Presentaban una forma aproximadamente cilíndrica desde superficie hasta la profundidad del anillo anticorriente y más o menos cónica desde al anillo anticorriente hasta el fondo del copo de la red en ausencia de corrientes, según la información proporcionada por la empresa. En la Tabla 5.1 se recogen los datos de las jaulas bajo estudio proporcionados por la empresa: la especie y la masa media de los peces, el diámetro de la jaula, y una estimación de la profundidad del anillo anticorriente y la

máxima profundidad del copo. La masa media se estimó mediante muestreos manuales de una muestra de la población de la jaula. No se obtuvieron de datos de la longitud de los peces.

Tabla 5.1. Jaula bajo ensayo, especie y masa media de los ejemplares, y diámetro de la jaula, profundidad del anillo anticorriente y profundidad máxima del copo de la jaula.

<i>Jaula</i>	<i>Especie</i>	<i>M (g)</i>	<i>Ø (m)</i>	<i>Prof. Anticorr. (m)</i>	<i>Prof. Máx. (m)</i>
CB23	Lubina	60	25.5	15	20 – 23
C4	Lubina	484	16.0	8	13 – 15
C2	Lubina	1319	16.0	8	13 – 15
CB20	Dorada	433	25.5	15	20 – 23

Se emplearon dos ecosondas científicas DT-X de Biosonics junto a un transductor split-beam de 123 kHz y otro de 201 kHz, controladas por ordenadores portátiles mediante el puerto Ethernet. Los dos transductores empleados eran de haz estrecho, con una apertura a -3 dB de 7.5° para el transductor de 123 kHz y de 6.6° para el de 201 kHz. Las ecosondas se montaron en una maleta estanca que se amarró a la barandilla de la jaula (Figura 5.3), y los transductores se instalaron en una plataforma de madera fijada a flotadores salvavidas (Figura 5.2) que les proporcionaba flotabilidad. Se colocó un único transductor por jaula, situado en la superficie a un tercio del diámetro de la jaula y orientado hacia el fondo (Figura 5.4).



Fuente: Ctaqua (2013)

Figura 5.2. Detalle del montaje del transductor sobre una plataforma de madera fijada a un flotador salvavidas.



Fuente: Ctaqua (2013)

Figura 5.3. Detalle de la instalación de la ecosonda en la barandilla y las baterías en los anillos flotantes de la jaula.



Fuente: Ctaqua (2013)

Figura 5.4. Detalle de la instalación del transductor en el interior de la jaula.

En la Tabla 5.2 se recogen las especificaciones de los dos transductores split-beam empleados en las mediciones, procedentes de la calibración realizada por técnicos de Biosonics. Se incluyen la frecuencia de operación, el nivel de fuente, la sensibilidad en recepción, el nivel de ruido *NL*, la apertura del haz a -3 dB, el ángulo equivalente y la frecuencia de muestreo. El *SL* de esta ecosonda corresponde al máximo nivel que se puede transmitir, en todo caso se puede reducir pero nunca aumentar. El *NL* hace referencia al nivel de ruido generado por el propio equipo expresado como el *TS* en el eje a 1 m de distancia, y corresponde al menor *TS* que es capaz de detectar la ecosonda a distancias próximas.

Tabla 5.2. Datos de calibración de los transductores split-beam de Biosonics.

<i>Transductor ID</i>	<i>T126P029</i>	<i>T206P083</i>
<i>f</i> (kHz)	123	201
<i>SL</i> (dB ref. 1 μ Pa)	220.5	222.8
<i>S_{Rx}</i> (dB ref. 1 V/ μ Pa)	-127.2	-120.22
<i>NL</i> (dB ref. 1 μ Pa)	-143.9	-151.3
<i>θ_{-3dB}</i> (°)	7.5	6.6
<i>Ψ</i> (dB)	-20.12	-21.23
<i>f_s</i> (Hz)	41667	41667

Cada ecosonda fue alimentada mediante una batería de gran capacidad, de 12 V y 180 Ah, que permitía suministrar energía a los equipos durante largos periodos de tiempo. Se utilizó un convertor de 12 V a 220 V para alimentar los ordenadores portátiles. La batería y el convertor se introdujeron en una caja de plástico para protegerlos de salpicaduras, que se situó encima de los anillos flotantes de la jaula (Figura 5.3).

Se configuró un nivel de fuente de 220.5 dB a 123 kHz y de 222.8 dB a 201 kHz, que aseguraba una buena relación señal a ruido y evitaba la aparición de efectos no lineales (Simmonds & MacLennan, 2005). La duración del pulso utilizada variaba con la frecuencia, siendo de 200 μ s para 123 kHz y de 300 μ s para 201 kHz, a excepción de la medida del día 18 en la jaula de dorada que se empleó una duración de pulso de 200 μ s a una frecuencia de 201 kHz. Se eligieron pulsos relativamente cortos con la idea de que permitieran discriminar peces individuales para la estimación la talla media, pero no excesivamente cortos para que poseyeran suficiente energía para atravesar el denso cardumen de peces. Puesto que las frecuencias más altas se ven más atenuadas debido a la absorción del medio de propagación y teniendo en cuenta que la energía del pulso depende de su duración se eligió un pulso ligeramente más largo para la mayor frecuencia, de forma que pudiera atravesar el cardumen y ser recibido en el transductor con una relación señal a ruido adecuada. Se eligió un intervalo entre pings de 200 ms, igual para ambas frecuencias.

Se realizaron grabaciones diarias continuas entre 17 y 24 horas según la jaula y el día, dependiendo de la carga de las baterías y del convertor, que falló en alguna ocasión. Las mediciones comenzaron todos los días entre las 8 y las 14 h. Los datos fueron grabados en ficheros .RPTX, que se generaban cada 15 minutos y se almacenaban en el ordenador. A partir del registro de series diarias se ha evaluado la dependencia del comportamiento de los animales a lo largo del día, en función de las condiciones de iluminación y las

actividades propias de la piscifactoría, y su influencia en la evaluación de la talla media y la abundancia a partir de las mediciones acústicas.

Se solicitó a Culmarex información sobre las condiciones ambientales (estado del mar, meteorología, temperatura del agua, etc.) y las actividades de la planta (horarios de alimentación, horarios y cantidades pescadas, etc.) con el fin de analizar los datos correctamente y facilitar la interpretación de los resultados. En la Tabla 5.3 se recogen los datos de la frecuencia empleada en cada jaula, las estimaciones de la masa media, el número de peces y la biomasa total *BM*, la fecha y hora de inicio y finalización de las mediciones acústicas, y la fecha y hora de las actividades de alimentación y pesca que se llevaron a cabo en el intervalo temporal de medida.

Se ha podido comprobar que las estimaciones de la masa promedio realizadas por parte de la empresa fueron relativamente precisas, sin embargo en la evaluación de la abundancia se cometieron y se suele cometer grandes errores. La jaula C4, que contenía lubina de tamaño intermedio, fue la única de la que se dispuso de datos exactos de la abundancia y la masa durante las mediciones, obtenidos a partir de las cantidades extraídas en sucesivos despesques realizados hasta vaciar completamente la jaula. Comparando los datos reales con las estimaciones iniciales realizadas por el personal de la planta se comprobó que los errores cometidos en el número de peces eran de hasta el $\pm 25\%$. Tan solo se dispuso de valores aproximados de la abundancia de las tres jaulas restantes procedentes de las estimaciones realizadas por parte de la empresa.

Los datos registrados han permitido evaluar si la configuración empleada resulta adecuada para obtener una relación entre el *TS* y la talla para la lubina en jaulas en condiciones de producción, mediante la detección de ejemplares individuales situados por encima del cardumen denso de peces a distancias próximas al transductor. No obstante, no ha sido posible establecer una relación entre el *TS* y la talla de la dorada debido a que solo se realizaron grabaciones para un único tamaño de dorada. Además los resultados del *TS* no han permitido la comparación directa con los resultados obtenidos en el Capítulo 4, ya que el uso de una longitud de pulso cuatro veces mayor y ecosondas diferentes puede afectar a los resultados.

La estimación de la abundancia a partir de la medida del *Sv* ha podido abordarse de forma cualitativa, pudiendo en todo caso definir directrices para su evaluación, pues se pudo comprobar que los datos de abundancia eran poco precisos. Ha sido posible comparar resultados logrados a ambas frecuencias para la dorada (CB20) y la lubina de menor tamaño (CB23), ya que son las jaulas que mantienen constante el número de ejemplares. Mientras que tan solo ha sido posible evaluar la dependencia del *Sv* con la biomasa en la jaula de lubina de mayor tamaño (C2) a 201 kHz, pues ha sido la única jaula de la que se ha podido disponer de registros acústicos para dos biomosas diferentes a una misma frecuencia, teniendo en cuenta que los datos de la abundancia son una mera aproximación.

Tabla 5.3. Frecuencia ensayada en cada jaula, estimaciones de la masa media, el número de peces y la biomasa total, fecha y hora de inicio y finalización de las mediciones acústicas, y fecha y hora de las actividades de alimentación y pesca que se dan de forma simultánea a las mediciones acústicas

Jaula	f (KHz)	M (g)	Nº peces	BM (Tn)	Mediciones acústicas				Procesos de producción				
					Fecha inicio	Hora inicio	Fecha fin	Hora fin	Fecha	Hora Alim	Hora Pesca	Hora Trasp	
CB23	123	60	317970	19.08	15/09/2012	09:29	16/09/2012	07:56	15/09/2012	12:11	16:57		
CB23	201	60	317970	19.08	17/09/2012	13:17	18/09/2012	08:07	17/09/2012	13:28			
C4	123	484	8244	3.99	16/09/2012	09:55	17/09/2012	12:12	17/09/2012			05:45-06:55	11:00-12:30
C4	201	484	39071	18.91	12/09/2012	14:15	13/09/2012	09:30	12/09/2012	17:00			
C2	123	1319	14000	18.50	12/09/2012	12:45	13/09/2012	09:23	12/09/2012	17:20			
C2	201	1319	11000	14.51	14/09/2012	12:03	15/09/2012	07:53	14/09/2012	17:20			
C2	201	1319	11000	14.51	16/09/2012	09:21	17/09/2012	12:00	16/09/2012	16:45			
C2	201	1319	7000	9.23	18/09/2012	09:52	19/09/2012	08:34					
CB20	123	433	278000	120.37	14/09/2012	11:17	15/09/2012	08:05					
CB20	123	433	278000	120.37	17/09/2012	12:48	18/09/2012	08:31					
CB20	201	433	278000	120.37	15/09/2012	08:20	16/09/2012	01:26	15/09/2012	11:52			
CB20	201	433	278000	120.37	18/09/2012	08:50	19/09/2012	01:55	18/09/2012	10:48			

5.1.2. PIAGUA

La campaña de medidas se llevó a cabo en la planta de Piagua, situada a 400 m de la línea de costa, a 1.2 millas del Puerto de Aguadulce (Almería) y a 3.2 millas del Puerto de Almería. Piagua es la piscifactoría marina más grande de Andalucía, una de las de mayor producción del litoral español, y la única de la península dedicada a la producción ecológica de dorada y lubina. Consta de 36 jaulas de engorde de dorada y lubina, y una plataforma de alimentación.



Fuente: EFE (marzo 2013)

Figura 5.5. Fotografía de las instalaciones de Piagua en Aguadulce (Almería).

Las mediciones se realizaron en la jaula comercial C5 de dorada ecológica, que presentaba una masa promedio de 541 g. La estructura de la jaula era igual a la descrita en la Sección 5.1.1, formada por dos anillos flotantes y un anillo anticorriente que le confería una forma aproximadamente cilíndrica desde la superficie hasta la profundidad donde se hallaba el anillo flotante. Poseía un diámetro de 12.7 m, el anillo anticorriente se encontraba a una profundidad de unos 8 m y el copo tenía una profundidad máxima entre 13 y 15 m, según datos proporcionados por la empresa.

Se realizó un trasvase de dorada desde una jaula de engorde a la jaula comercial C5 con el fin de ir realizando sucesivos despesques para su venta, que se llevó a cabo el día 12 de septiembre entorno a las 08.30 h. El personal de planta estimó inicialmente que se habían introducido 15800 peces con una biomasa total de 8400 kg y una masa media de 529 g. Más tarde, después extraer la totalidad de los peces tras sucesivos despesques la empresa proporcionó los datos reales del número de peces y la biomasa total. Con esta información ha sido posible determinar las cantidades precisas de la abundancia y la biomasa presente en la jaula durante las mediciones para contrastarlas con los datos obtenidos acústicamente.

Se realizaron un total de 4 despesques hasta vaciar completamente la jaula el día 24 de septiembre, aunque tan solo fue posible registrar datos acústicos desde el 12 hasta el 18 de septiembre, abarcando tres valores de biomasa diferentes. En la Tabla 5.4 se recogen los datos de los despesques, que permiten calcular la abundancia y la biomasa presente en la jaula en todo momento.

Tabla 5.4. Fecha y hora de los despesques, y número de peces, biomasa y masa media de los ejemplares extraídos

<i>Fecha</i>	<i>Hora</i>	<i>Nº peces</i>	<i>BM (kg)</i>	<i>M (g)</i>
16/09/2013	01:35 – 02:14	2423	1295.62	535
17/09/2013	22:00 – 22:25	2632	1433.23	545
22/09/2013	23:55 – 00:20	2509	1357.33	541
24/09/2013	23:55 – 00:10	3863	2098.41	543
<i>Total pescas</i>		11427	6184.59	541

Comparando los datos reales con las estimaciones se ha comprobado que se produjo una sobreestimación del 38% en la abundancia y del 36% en la biomasa total, y que la masa media fue subestimada con una diferencia de tan solo el 2.2%.

Las mediciones acústicas se realizaron con una ecosonda científica EK60 de Simrad y un transductor split-beam ES200-7C de haz estrecho. Se instaló un enlace wifi entre la jaula y la Torre de Control del Puerto Deportivo de Aguadulce con antenas NanoStation 5 Pro de Ubiquiti, que permitía el control remoto de la ecosonda desde cualquier dispositivo con acceso a internet así como el almacenamiento de los datos registrados por la ecosonda en un servidor seguro situado en la Torre de Control. Los equipos instalados en la jaula fueron alimentados mediante dos baterías en paralelo de 12 V y 55 Ah. El transductor se situó en superficie a un tercio del diámetro de la jaula y orientado hacia el fondo, fijado a un salvavidas que le proporcionaba flotabilidad. La ecosonda se instaló en una maleta estanca, que se colocó amarrada a la barandilla de la jaula, y el resto de electrónica y las baterías se colocaron en una caja estanca encima de un palé fijado a los anillos de flotación. La antena wifi de la jaula se ancló a un mástil que se fijó al candelero más próximo a la maleta y la caja de baterías. La otra antena wifi se instaló en la terraza superior de la Torre del Control del Puerto Deportivo de Aguadulce, y el servidor en una sala del último piso. En la Figura 5.6 y la Figura 5.7 se puede apreciar el montaje experimental instalado en la jaula.

Con el fin de poder contrastar los resultados obtenidos en la campaña de medidas realizada por Biosonics el año anterior, en estas mediciones se empleó una configuración lo más parecida a la de mayor frecuencia empleada en Culmarex en septiembre de 2012.

Se empleó un transductor split-beam con una apertura de 7° y una frecuencia de trabajo de 200 kHz. Se configuró un nivel de fuente de 217.2 dB correspondiente a una potencia de transmisión de 90W, una tasa de ping máxima y una duración del pulso transmitido de 256 μ s. Se optó por elegir una tasa de repetición de ping máxima con la intención de registrar trazas de mayor calidad que permitiera una medida del *TS* más precisa.



Fuente: Propia (septiembre 2013)

Figura 5.6. Detalle de la instalación de la maleta de la ecosonda, la caja de las baterías y la antena wifi.



Fuente: Propia (septiembre 2013)

Figura 5.7. Detalle de la colocación del transductor en la jaula.

Antes de comenzar los registros acústicos se calibró el sistema tal como recomienda Simrad, siguiendo el proceso descrito en la Sección 4.1.1.5. En esta ocasión se colocó el transductor flotando en superficie y orientado hacia el fondo, y se suspendió la esfera de calibración mediante una caña de pescar. En la calibración se empleó la misma configuración utilizada durante las mediciones. En la Tabla 5.5 se resumen los parámetros de fábrica del transductor para una duración de pulso de 256 μ s, y los parámetros corregidos obtenidos tras la calibración a una potencia de 90 W.

Tabla 5.5. Parámetros de fábrica y parámetros obtenidos mediante calibración para la ecosonda EK60 funcionando con el transductor ES200-7C para una duración de pulso de 256 μ s.

<i>Parámetro</i>	<i>Fábrica</i>	<i>Calibración</i>
G_{TS} (dB)	27.00	24.97
$Sacorr$ (dB)	0.00	-0.73
$\theta_{-3dB,\beta1}$ (°)	7.00	6.68
$\theta_{-3dB,\beta2}$ (°)	7.00	6.76
$Offset_{\beta1}$ (°)	0.00	-0.06
$Offset_{\beta2}$ (°)	0.00	-0.06
Ψ (dB)	-20.7	-20.7
$\Psi_{calculado}$ (dB)	-20.7	-20.7
$SensAng_{\beta1}$	23.0	23.0
$SensAng_{\beta2}$	23.0	23.0
N° detecciones		238
$Error_{RMS}$		0.24

La adquisición de datos se realizó de forma continua durante siete días. Debido a la baja capacidad de las baterías fue necesario cambiarlas diariamente, realizándose por la mañana entre las 08:00 y las 10:00 h por parte de técnicos de Ctaqua. A pesar de la reposición diaria de las baterías, se produjeron algunas interrupciones debido al agotamiento de las baterías, la desconexión del enlace wifi entre la jaula y la Torre de Control, y/o a un comportamiento anómalo de la ecosonda. El comportamiento irregular del enlace wifi produjo la variabilidad del intervalo entre pings, por lo que se recomienda el almacenado de datos de forma local, y el control del sistema de forma remota mediante el enlace wifi. De esta forma la pérdida del enlace no interferirá en el registro de datos.

A partir de los datos recogidos en la Tabla 5.4 y la información suministrada por la empresa sobre los horarios de alimentación se elabora la Tabla 5.6, que recoge

información sobre la jaula bajo estudio, los datos reales de la abundancia, la biomasa total y la masa media de los peces, los intervalos en que se registran datos acústicos, y los instantes de suministro de pienso simultáneos a los registros.

Tabla 5.6. Frecuencia ensayada en cada jaula, datos reales de la masa media, el número de peces y la biomasa total, fecha y hora de inicio y finalización de las mediciones acústicas, y fecha y hora de las actividades de alimentación que se dan de forma simultánea a las mediciones acústicas.

<i>Jaula</i>	<i>f (kHz)</i>	<i>M (g)</i>	<i>Nº peces</i>	<i>BM (Tn)</i>	<i>Mediciones acústicas</i>				<i>Procesos de producción</i>	
					<i>Fecha inicio</i>	<i>Hora inicio</i>	<i>Fecha fin</i>	<i>Hora fin</i>	<i>Fecha</i>	<i>Hora Alim</i>
C5	200	541	11427	6.185	12/09/2013	13:13	13/09/2013	00:01	12/09/2013	19:26
C5	200	541	11427	6.185	13/09/2013	08:59	14/09/2013	09:38		
C5	200	541	11427	6.185	14/09/2013	13:23	16/09/2013	01:25	14/09/2013	19:02
C5	200	541	9004	4.889	16/09/2013	08:51	17/09/2013	21:36	16/09/2013	17:05
C5	200	541	6372	3.456	18/09/2013	08:31	18/09/2013	08:21		

Antes de llevar a cabo las tareas de pesca el personal de Piagua desconectaba las baterías para evitar daños en el transductor, y lo retiraba a un lado de la jaula para evitar que interfiriera en el proceso de pesca.

Aunque fue posible medir tres valores de biomasa diferentes, el número de horas registrado para cada valor ha sido muy dispar. Se registraron un total de 69 horas para el mayor valor de biomasa, 37 horas para el valor intermedio, pero tan solo 2 horas y media para el menor valor.

La empresa ha proporcionado valores de la temperatura del agua a una profundidad entre 7 y 8 m, que coincide con la profundidad media de la jaula. Asimismo los técnicos de Ctaqua recogieron parámetros ambientales adicionales en relación al viento y el estado del mar, que pueden facilitar la interpretación de los ecogramas registrados.

5.1.3. TRATAMIENTO Y ANÁLISIS DE LOS DATOS ACÚSTICOS

Los datos acústicos obtenidos con ecosondas científicas han sido tratados con el programa de postprocesado Sonar5 Pro y los resultados exportados a ficheros de texto, y más tarde analizados estadísticamente en Matlab.

En la Figura 5.8 se muestra un ejemplo de un ecograma donde se representa el Sv registrado en la jaula que contiene la lubina de menor tamaño (CB23) a una frecuencia de 123 kHz. Se puede apreciar un banco denso y detecciones de ecos procedentes de ejemplares individuales situados por encima de este, que permiten incluso la detección de trazas.

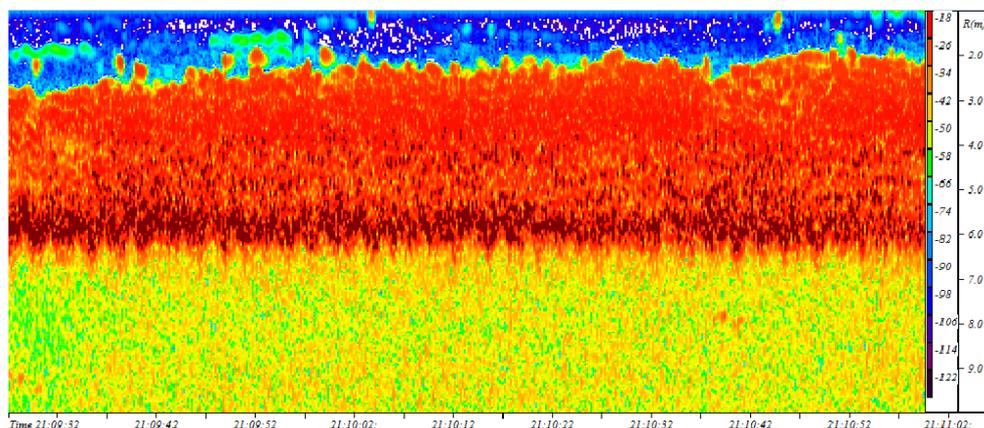


Figura 5.8. Ecograma del Sv registrado en la jaula de lubina de menor tamaño (CB23) a 123 kHz el 15 de septiembre de 2012.

Con el fin de estimar de forma indirecta la talla de los peces es necesario relacionar el TS medido con la longitud y/o la masa, como se ha comentado anteriormente. En primer lugar se han convertido los datos de la ecosonda al formato empleado por Sonar5 Pro, empleando la función TVG 40log y definiendo los ecos procedentes de blancos individuales aquellos que poseen un TS mínimo de -70 dB, una longitud de eco de 0.5 a 2.0, una MDF de 10° y una MCG de 12 dB. La MDF es elevada ya que se han observado valores elevados de la desviación de fase a ambas frecuencias superiores a las observadas en el Capítulo 4 a 200 kHz, debido en gran parte a la utilización de pulsos de mayor longitud. Para el cálculo de la velocidad del sonido y del coeficiente de absorción del medio se han empleado unos valores constantes de temperatura, salinidad y pH para los diferentes días de medición. Se consideran 24 °C, 36 ppm y un pH de 7.

Se han encontrado detecciones procedentes de blancos individuales en toda la columna de agua, con valores excesivamente elevados en la zona correspondiente al denso cardumen. A falta de un detector de ecos que descarte de forma más eficiente los ecos procedentes de múltiples blancos, ha sido necesario delimitar el rango de profundidades a analizar. La distancia mínima se ha fijado a 1 m para evitar los efectos de campo cercano del transductor, y la distancia máxima se ha definido con ayuda de la herramienta de detección de fondos implementada en Sonar5. Puesto que la cuestión a resolver es la talla de los peces, se considera interesante el uso de un nivel umbral constante para todas las jaulas. Se ha empleado a ambas frecuencias un umbral de -35 dB sobre el ecograma del Sv para la determinación de la línea de superficie, que delimita la distancia máxima a la que se extiende el análisis del TS.

Una vez delimitado el rango de distancias de interés, con una distancia máxima variable de ping a ping, se ha aplicado el detector de trazas limitando la máxima distancia de detección a 4 m. Como se ha comentado en el Capítulo 4, en este rango de distancias se ha observado una relación lineal entre el TS y el logaritmo de la longitud o la masa de la dorada, y los resultados obtenidos son independientes de la distancia al transductor, por lo que se ha asumido que este hecho fuera siendo válido para la lubina. Se han aceptado aquellas trazas con una longitud mínima de 3° y un máximo de 2 pings consecutivos perdidos. Se ha empleado el algoritmo de predicción *Zero velocity* con una ventana de 1 ping, 5 cm, y 2° en la dirección longitudinal y transversal. Se ha utilizado una ponderación de 50 para el número de ping, 10 para la distancia y 1 para los dos ángulos y el TS. Ha sido necesario modificar los criterios del algoritmo de predicción respecto a los utilizados en el Capítulo 4 debido a diferencias en el intervalo entre pings utilizado. Las trazas detectadas han sido almacenadas en *fish baskets*, divididas en ecos y exportadas en formato de texto.

Los ecos exportados han sido filtrados en Matlab, empleando una MDF algo más estricta que permitiera la obtención de ajustes más robustos entre el TS y la talla de los peces. Se han desechado aquellos ecos registrados en Culmarex a 123 kHz con una desviación de fase superior a 7° y superior a 5° para los ecos registrados 201 kHz. En Piagua la MDF ha podido reducirse hasta 3°, debido al uso de la ecosonda EK60 junto al transductor

ES200-7C y un pulso ligeramente más corto. No ha resultado conveniente restringir mucho más los parámetros del SED debido a que la cantidad de detecciones registradas en general ha sido escasa. Los ecos aceptados tras el filtrado se han empleado para estimar los estadísticos de las trazas. Se han evaluado el valor medio, máximo y percentil 75 del TS , y el valor medio del TSu de las trazas en base a los resultados obtenidos en el Capítulo 4. A diferencia de los resultados anteriores se elige la media del TSu en lugar del máximo por proporcionar ajustes más robustos frente al logaritmo de la longitud para la lubina. Por último, se ha estudiado la relación entre el valor promedio de las distribuciones de los diferentes estadísticos de las trazas y la longitud y la masa de los peces.

Para el análisis del S_v ha sido necesario determinar el rango de distancias del análisis. Para ello se han definido la línea de superficie y la línea de fondo, correspondientes al límite superior y al límite inferior del banco en la posición del transductor, mediante el detector de fondos empleando un umbral de -45 dB sobre el ecograma del S_v . El volumen del haz ocupado por el banco de peces ha quedado entonces determinado por los límites superior e inferior en un instante dado. A continuación se han exportado en formato de texto los ecogramas y las líneas de superficie y fondo para ser tratados en Matlab.

En un primer paso se ha umbralizado el S_v a -80 dB, tal como se recomienda en Parker-Stetter (2009) para la reducción del nivel de ruido.

Se ha obtenido el centro de masas CM del banco para cada ping a partir de las muestras comprendidas entre las distancias mínima y máxima incluidas en el análisis, según

$$CM = \frac{\sum_i s_{v_i} \cdot R_i}{\sum_i s_{v_i}} \quad 5.1$$

donde i es el número de muestra envuelta en el cálculo. Junto con los límites del banco, el CM ha proporcionado una orientación sobre la posición vertical del banco, y sus desviaciones típicas en un intervalo de tiempo han dado información sobre la variabilidad de la profundidad a la que se encuentra el centro del cardumen. En la Figura 5.9 se muestra un ejemplo de ecograma del S_v registrado en la jaula de dorada el 15 de septiembre a una frecuencia de 123 kHz. Se representa la línea de superficie en morado, la línea de fondo en rojo y el centro de masas en azul, promediados cada 50 pings.

Se ha calculado el valor medio del s_v para cada ping en el rango de distancias en que se encuentra el banco. Debido a que la amplitud varía entre pings sucesivos, se ha calculado la densidad de peces en el volumen insonificado a partir del promedio del s_v a intervalos de una hora según las Ecuaciones 3.52 y 3.72. Se ha empleado el valor medio de las distribuciones del TS medio de las trazas para escalar el S_v y estimar así la densidad de peces en el volumen insonificado.

La densidad observada en el haz del transductor se ha comparado con la densidad estimada en la jaula a partir de del número total de peces presente en la jaula y el volumen de la jaula ocupado por los peces, suponiendo en el cálculo que el banco se distribuye verticalmente de forma uniforme en toda la jaula.

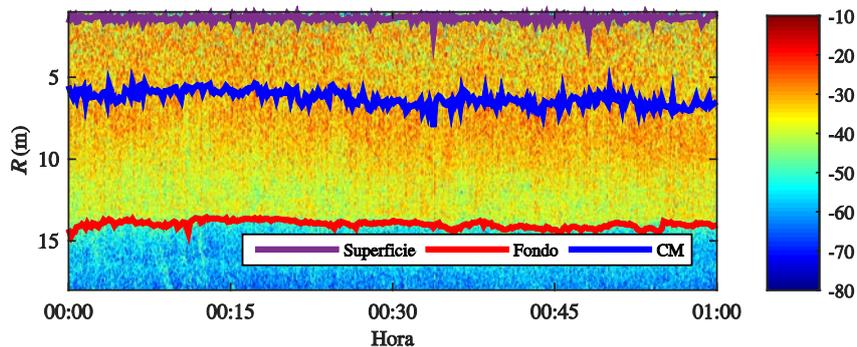


Figura 5.9 Ecograma del Sv registrado en la jaula de dorada (CB20) a 123 kHz el 15 de septiembre de 2012. La línea de superficie y fondo corresponden a los límites superior e inferior del cardumen, y junto al centro de masas dan una idea de la distribución vertical de los peces.

La abundancia se ha obtenido multiplicando la densidad observada en el haz por el volumen de la jaula ocupada por los peces, suponiendo que la densidad promedio es la misma en toda la jaula y el volumen de la jaula ocupado por los peces presenta la misma distribución vertical observada en la posición del transductor.

El principal aspecto a resolver es determinar qué condiciones resultan óptimas para la estimación de la abundancia.

5.2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En primer lugar se presentan los resultados de la medida directa del aspecto dorsal del TS en condiciones de producción, y su relación con la talla promedio de los peces. Y a continuación se muestra la estimación de la abundancia de peces en el volumen insonificado por el haz del transductor y se compara con datos reales del número total de peces presente en la jaula, suponiendo para el cálculo del volumen ocupado por el banco en la totalidad de la jaula que el rango de profundidades sobre el que se extiende es uniforme en todo el volumen.

5.2.1. ESTIMACIÓN DE LA TALLA

En esta Sección se incluyen las relaciones entre diferentes estadísticos del *TS* de las trazas y la longitud y la masa para la lubina obtenidos a partir de los datos registrados para tres tallas muy espaciadas. Para la dorada tan solo ha sido posible medir dos tallas, aunque empleando dos ecosondas diferentes en instalaciones diferentes.

5.2.1.1. LUBINA

A continuación se muestran los resultados obtenidos a partir de la medida del *TS* de la lubina llevada a cabo en Culmarex a 123 y 201 kHz para tres tamaños diferentes. Se determina la densidad de probabilidad para las diferentes tallas, y las relaciones entre el valor medio de las distribuciones y la longitud y la masa de los peces que permitirán estimar de forma indirecta la talla de los peces a partir de la medida directa del *TS*. Se ha de tener en cuenta que los valores de masa para cada tamaño ensayado fueron proporcionados por la empresa a partir de sus estimaciones, y los valores de longitud han sido derivados de los valores de masa mediante la expresión de Boulineau-Coatanea (1969) que relaciona ambas variables.

En la Tabla 5.7 se recoge la masa y la longitud media de los peces, el número de trazas registradas dorsalmente, y la media y la desviación típica de las distribuciones del *TS* de los diferentes estadísticos de las trazas (el máximo, la media y el percentil 75 del *TS*, y el valor medio del *TS_u*). En la parte superior de la Tabla se muestran los resultados para la frecuencia de 123 kHz y en la parte inferior para 201 kHz. A la menor frecuencia se dispone de un ciclo diario de medida para cada una de las tres tallas ensayadas, y a la mayor frecuencia se dispone de un ciclo para las dos tallas menores y de tres ciclos para la mayor talla. Los resultados mostrados se obtienen a partir de la definición de trazas de 3° de longitud angular formadas por ecos con una longitud entre 0.5 y 2.0, una *MCG* de 12 dB, y una *MDF* de 7° para los registros a 123 kHz y de 5° y para los registros a 201 kHz.

El valor medio de las distribuciones presenta una tendencia creciente con el tamaño de los peces para cada uno de los cuatro estadísticos y frecuencias evaluadas. A 201 kHz el *TS* medio de los tres ciclos diarios registrados para la mayor talla presenta valores muy similares, con variaciones máximas de 0.6 dB para el valor máximo del *TS* de las trazas y variaciones menores de 0.2 dB para el promedio y el percentil 75 del *TS*. Tan solo se observa una tendencia creciente de la desviación típica de las distribuciones con la talla a 123 kHz como sugirieron Clay & Heist (1984). A 201 kHz tal vez no se observe dicho comportamiento debido a la escasez de trazas detectadas para las dos tallas menores.

El número de trazas registradas ha sido muy variable y escaso en algunos casos. Las detecciones que forman las trazas presentan una longitud de eco algo mayor a 123 kHz, correspondiendo con la configuración de menor duración de pulso. Puesto que la longitud del pulso es una medida relativa a la longitud del pulso transmitido, un dispersor

de un tamaño dado producirá una mayor elongación del pulso al emplear menores duraciones de pulso. A 201 kHz se ha observado que la longitud del eco aumenta con la talla de los peces, mientras que a 123 kHz no resulta tan evidente. La mayor cantidad de detecciones proceden de la parte central del haz, y va decayendo al aumentar la distancia al eje. Se observan detecciones con una desviación de fase de hasta 5° para los datos registrados a 201 kHz, y de hasta 7° para los registros a 123 kHz, siendo en ambos casos muy superiores a los obtenidos en el Capítulo 4 debido en gran parte al uso de pulsos de mayor duración.

Tabla 5.7. Masa media, longitud media, número de trazas detectadas y media y desviación típica de los diferentes estadísticos de las trazas (máximo, media y percentil 75 del TS, y media del TSu) en función de la talla para las grabaciones dorsales de lubina a 123 y 201 kHz en la parte superior e inferior de la tabla, respectivamente.

		123 kHz									
		<i>TS_{Máx}</i>		<i>TS_{Medio}</i>		<i>TS_{P075}</i>		<i>TS_{UMedio}</i>			
<i>M</i> (g)	<i>L</i> (cm)	<i>Nº trazas</i>	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	
60	17.7	1023	-42.58	5.77	-45.46	5.50	-44.17	5.54	-53.77	6.38	
484	35.9	10866	-34.08	5.92	-37.33	5.72	-35.96	5.74	-45.24	7.30	
1319	50.4	341	-33.53	6.25	-36.49	6.02	-34.94	6.11	-45.72	5.99	

		201 kHz									
		<i>TS_{Máx}</i>		<i>TS_{Medio}</i>		<i>TS_{P075}</i>		<i>TS_{UMedio}</i>			
<i>M</i> (g)	<i>L</i> (cm)	<i>Nº trazas</i>	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	
60	17.7	263	-40.11	8.68	-42.71	8.54	-41.44	8.69	-48.77	9.40	
484	35.9	267	-35.36	5.59	-38.47	5.37	-36.89	5.44	-45.07	6.07	
1319	50.4	16066	-32.28	5.91	-35.82	5.59	-34.32	5.63	-42.30	6.90	

Las trazas registradas no son de gran calidad, tal vez a causa del intervalo entre pings elegido. Una configuración con un menor intervalo entre ping, e incluso con una menor duración de pulso, podría proporcionar trazas de mayor calidad y en mayor cantidad, facilitando en gran medida la medida del TS. Aun así se han conseguido detectar trazas, aunque usando criterios del detector de trazas menos restrictivos.

En la Figura 5.10 se muestran las densidades de probabilidad del TS medio de las trazas a intervalos de 1 dB para las diferentes tallas y frecuencias ensayadas. A la izquierda se muestran los resultados a 123 kHz y a la derecha las distribuciones obtenidas a 201 kHz. Al igual que se ha observado para la dorada en la Sección 4.2.4.1, se puede apreciar que las distribuciones son unimodales para todas las tallas y ambas frecuencias. Las

distribuciones obtenidas para el resto de estadísticos de la traza presentan un perfil muy similar a las distribuciones de TS medio. Se puede apreciar el efecto del reducido número de trazas registradas en las distribuciones de la mayor talla a 123 kHz y de las dos tallas menores a 201 kHz. Aun así el valor medio de las distribuciones supone un buen estimador a correlacionar con la longitud y la masa.

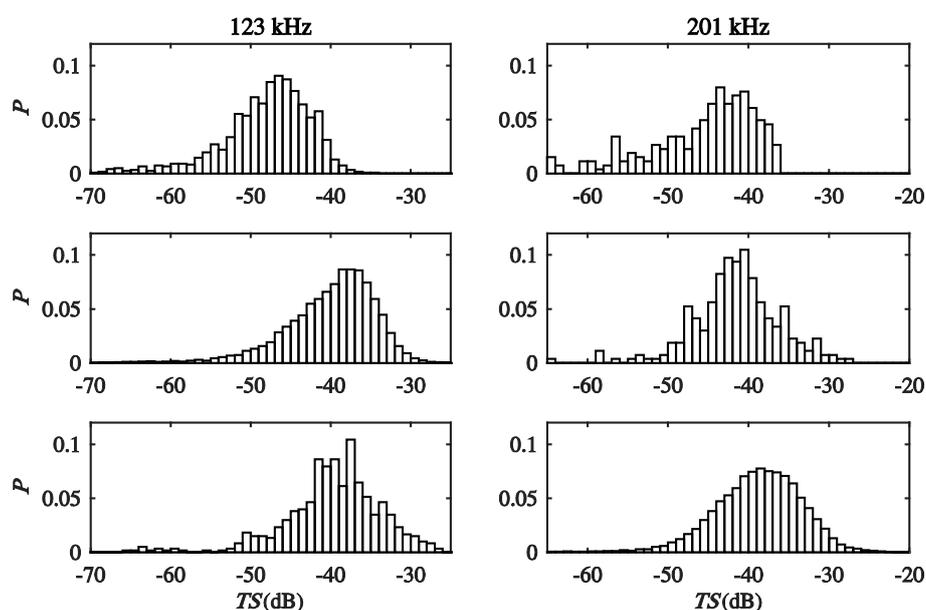


Figura 5.10. Densidad de probabilidad para el aspecto dorsal del TS medio de las trazas de lubina a dos frecuencias y para las tres tallas ensayadas en Culmarex. En la columna izquierda se representan las distribuciones obtenidas a 123 kHz y a la derecha se muestran las distribuciones a 201 kHz. Se muestran de arriba abajo los resultados para los peces de menor a mayor talla.

No se han apreciado cambios en la variabilidad del TS con la frecuencia ni múltiples modas en las distribuciones que puedan indicar un aumento de la directividad de los peces a la mayor frecuencia.

Se ha hallado la relación lineal clásica entre el valor medio de las distribuciones de los diferentes estadísticos del TS de las trazas y el logaritmo en base 10 de la longitud de los peces mediante mínimos cuadrados. La bondad de los ajustes realizados se ha evaluado según el coeficiente de determinación, el p-valor del análisis de la varianza, y los errores medios del estimador, absoluto y relativo. Los resultados de los ajustes se resumen en la Tabla 5.8, donde se muestran los coeficientes a y b , y los diferentes parámetros de

bondad del ajuste. En la parte de la izquierda se muestran los resultados para la menor frecuencia y a la derecha para la mayor frecuencia.

Tabla 5.8. Resultados del ajuste lineal de la media del *TS* máximo, medio y percentil 75 y el *TSu* medio de las trazas frente al logaritmo de la longitud total de la lubina para los registros dorsales a 123 y 201 kHz.

Modelo		$TS(dB) = a \cdot \log L(cm) + b$							
Frecuencia		123 kHz				201 kHz			
Estad. Trz.		$TS_{Máx}$	TS_{Medio}	TS_{P075}	TSu_{Medio}	$TS_{Máx}$	TS_{Medio}	TS_{P075}	TSu_{Medio}
<i>a</i>		21.1306	20.7923	21.5995	19.2814	16.9783	14.9935	16.7163	13.9248
<i>b</i>		-68.4758	-71.0003	-70.5222	-77.2096	-61.4261	-61.5282	-62.2365	-66.3002
R^2		0.9296	0.9439	0.9596	0.8665	0.9940	0.9955	1.0000	0.9864
<i>p</i> -valor		0.1710	0.1522	0.1289	0.2381	0.0494	0.0426	0.0034	0.0745
<i>EAM</i> (dB)		1.0159	0.8856	0.7746	1.3215	0.2305	0.1755	0.1560	0.2858
<i>ERM</i> (%)		2.87	2.30	2.11	2.81	0.66	0.46	0.04	0.64

La pendiente obtenida a 123 kHz toma valores próximos a 20 para los diferentes estadísticos, encontrándose dentro del rango esperado. Sin embargo, a 201 kHz se tienen pendientes algo inferiores, entre 15 y 17. A ambas frecuencias la pendiente adquiere valores superiores a los hallados para la dorada de forma dorsal a 200 kHz en el Capítulo 4.

El coeficiente de determinación sugiere que existe una relación relativamente fuerte entre ambas variables. A 201 kHz el *p*-valor de la matriz de covarianza inferior a 0.5 confirma que existe una correlación elevada entre variables, mientras que a 123 kHz el *p*-valor es superior a 0.05 para los diferentes estadísticos, por lo cual se puede asumir que no se tiene una relación estadísticamente significativa entre el *TS* y el logaritmo de *L*. Y el error cometido en la estimación del *TS* es sustancialmente mayor a 123 kHz que a 201 kHz.

A partir de los resultados se puede concluir que a 201 kHz se han obtenido ajustes más robustos, con coeficientes de determinación muy próximos a la unidad. La inclusión de puntos adicionales en los ajustes de los datos derivados de nuevas mediciones del *TS* para diferentes tallas es una práctica recomendable, ya que probablemente producirá una mejora significativa en el *p*-valor y en el error medio. Como se ha comentado anteriormente tal vez sea aconsejable optimizar la configuración de medida, utilizando pulsos más cortos y un menor intervalo entre pings que permitan obtener trazas de mayor calidad y en mayor cantidad. En cualquier caso, la medida precisa del tamaño de los

peces permitirá establecer relaciones más representativas y fiables entre el TS y la talla de los peces.

En caso de obtener correlaciones igual de robustas para ambas frecuencias con la inclusión de nuevas tallas, resultará más conveniente el uso de aquella frecuencia que proporcione una mayor pendiente, pues una pequeña variación en el tamaño de los peces producirá una mayor variación en el TS registrado, facilitando la discriminación entre dos tallas próximas y mejorando así la precisión del método.

En la Figura 5.11 se representan los puntos experimentales del valor promedio de las distribuciones del TS medio de las trazas, obtenidos para las dos frecuencias evaluadas de forma dorsal en función del logaritmo de la longitud de la lubina, así como el ajuste de la recta a los datos.

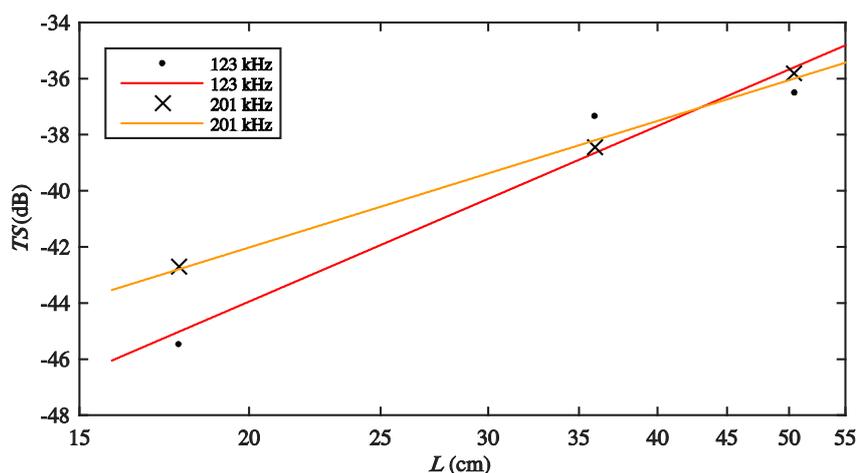


Figura 5.11. Relación lineal entre la media del TS medio de las trazas y el logaritmo en base 10 de la longitud total de la lubina para registros dorsales tomados en condiciones de producción a 123 kHz ($TS = 20.79 \log L - 71.00$) y 201 kHz ($TS = 14.99 \log L - 61.53$).

Con el fin de evaluar el error cometido en la estimación de la longitud a partir de la medida directa del TS se evalúa la relación potencial entre ambas variables, cuyos resultados se muestran en la Tabla 5.9.

Puesto que se intercambian la variable dependiente por la independiente, los valores del coeficiente de determinación y el p-valor de la Tabla 5.9 son idénticos a los recogidos en la Tabla 5.8. El error asociado a la estimación de la longitud toma valores aceptables a 201 kHz, que oscilan entre el 0.2 y el 3.2% según el estadístico del TS , mientras que a 123 kHz el error en la estima es mayor, con valores entre el 7.6 y el 9.7%. El uso del TS

medio no supone una mejora significativa, pues presenta una mayor incertidumbre en la estimación de la talla.

Tabla 5.9. Resultados del ajuste potencial de la longitud de la lubina frente a la media del TS máximo, medio y percentil 75 y el TSu medio de las trazas para los registros dorsales a 123 y 201 kHz.

Modelo		$L(cm) = a \cdot 10^{b \cdot TS(dB)}$							
Frecuencia		123 kHz				201 kHz			
Estad. Trz.		$TS_{Máx}$	TS_{Medio}	TS_{P075}	TSu_{Medio}	$TS_{Máx}$	TS_{Medio}	TS_{P075}	TSu_{Medio}
<i>a</i>		1312.74	2029.67	1562.07	4682.76	4029.12	12360.50	5284.84	52105.81
<i>b</i>		0.0440	0.0540	0.0442	0.0449	0.0585	0.0664	0.0598	0.0708
<i>EAM</i> (cm)		4.0810	3.6582	3.1164	5.6055	1.1547	0.9998	0.0813	1.7145
<i>ERM</i> (%)		9.71	8.77	7.58	13.49	3.17	2.73	0.22	4.82

Se evalúa la relación entre el TS de las trazas y la masa de los peces, por ser el parámetro biométrico más empleado en la gestión de piscifactorías. Como se ha visto en la Sección 4.2.4.3 existe una relación lineal entre el TS y el logaritmo en base 10 de la masa de los peces, debido a la relación potencial que guardan la masa y la longitud. En la Tabla 5.10 se recogen los resultados del ajuste lineal de los diferentes estadísticos del TS y el TSu de las trazas frente al logaritmo de la masa para las dos frecuencias ensayadas. Los errores en la estima del TS no se incluyen por ser idénticos a los mostrados en la Tabla 5.8, pues la longitud ha sido calculada a partir de los datos de masa.

Tabla 5.10. Resultados del ajuste lineal de la media del TS máximo, medio y percentil 75 y el TSu medio de las trazas frente al logaritmo de la masa de la lubina para los registros dorsales a 123 y 201 kHz.

Modelo		$TS(dB) = a \cdot \log M(g) + b$							
Frecuencia		123 kHz				201 kHz			
Estad. Trz.		$TS_{Máx}$	TS_{Medio}	TS_{P075}	TSu_{Medio}	$TS_{Máx}$	TS_{Medio}	TS_{P075}	TSu_{Medio}
<i>a</i>		7.1445	7.0301	7.3030	6.5193	5.7406	5.0695	5.6520	4.7082
<i>b</i>		-54.7893	-57.5329	-56.5319	-64.7208	-50.4290	-51.8168	-51.4091	-57.2809

Se obtienen pendientes próximas a 7 a 123 kHz y cercanas a 5 a 201 kHz, siendo superiores a las obtenidas a 200 kHz tanto ventral como dorsalmente en la Sección 4.2.4.3.

A fin de proporcionar una herramienta útil en la gestión de una piscifactoría para la estimación de la masa a partir de la medida del *TS* y determinar el error medio en la estima se halla la relación potencial entre ambas variables, cuyos resultados se resumen en la Tabla 5.11 para los cuatro estadísticos de las trazas evaluados a ambas frecuencias.

Tabla 5.11. Resultados del ajuste potencial de la masa de la lubina frente a la media del *TS* máximo, medio y percentil 75 y el *TSu* medio de las trazas para los registros dorsales a 123 y 201 kHz.

Modelo		$M(g) = a \cdot 10^{b \cdot TS(dB)}$							
Frecuencia		123 kHz				201 kHz			
Estad. Trz.		<i>TS</i> _{Máx}	<i>TS</i> _{Medio}	<i>TS</i> _{P075}	<i>TSu</i> _{Medio}	<i>TS</i> _{Máx}	<i>TS</i> _{Medio}	<i>TS</i> _{P075}	<i>TSu</i> _{Medio}
<i>a</i>		2.0260·10 ⁷	7.3512·10 ⁷	3.3885·10 ⁷	8.7134·10 ⁸	5.5858·10 ⁸	1.5379·10 ¹⁰	1.2461·10 ⁹	1.0839·10 ¹²
<i>b</i>		0.1301	0.1343	0.1314	0.1329	0.1732	0.1964	0.1769	0.2095
<i>EAM</i> (g)		233.73	208.81	177.04	317.76	61.18	53.20	4.42	89.31
<i>ERM</i> (%)		29.19	26.16	22.37	42.28	9.51	8.17	0.64	14.55

Al igual que sucede con el error en la estima de la longitud, el error cometido en la estimación de la masa puede considerarse aceptable a la mayor frecuencia, pero es significativo a 123 kHz, tomando valores entre el 22 y el 29%.

En la Figura 5.12 se representa la masa frente al valor promedio de las distribuciones del *TS* medio de las trazas para las dos frecuencias, donde se puede apreciar que el modelo potencial se ajusta fielmente a los puntos experimentales obtenidos a 201 kHz, y algo peor a 123 kHz.

Aunque la dispersión de tallas dentro de una jaula es elevada en principio este método parece adecuado para la estimación de la talla promedio. Con el fin de obtener una relación precisa entre el *TS* y la longitud o la masa es necesario obtener ajustes con un mayor grado de correlación y un menor error en la estimación de los parámetros biométricos a partir de la medida directa del *TS*, por lo que resulta recomendable ensayar una mayor variabilidad de tallas con una configuración más adecuada que permita la detección de trazas de calidad y en gran cantidad, y restringir los criterios del SED para la obtención de unos resultados más representativos. De igual modo es necesario disponer de datos exactos de la longitud y la masa de los peces, obtenidos mediante muestreos manuales o con el uso de cámaras estereoscópicas de una muestra significativa de la población. Faltará por comprobar si los ejemplares aislados detectados en la zona limítrofe al cardumen a las distancias más próximas al transductor son representativos de la población de la jaula, ya que podría darse una distribución de tallas en función de su posición en del banco o tratarse de especies invasoras. Una vez establecida la relación entre el *TS* y la talla para una especie dada, tan solo serán necesarias unas pocas mediciones para estimar de forma indirecta la talla de los peces.

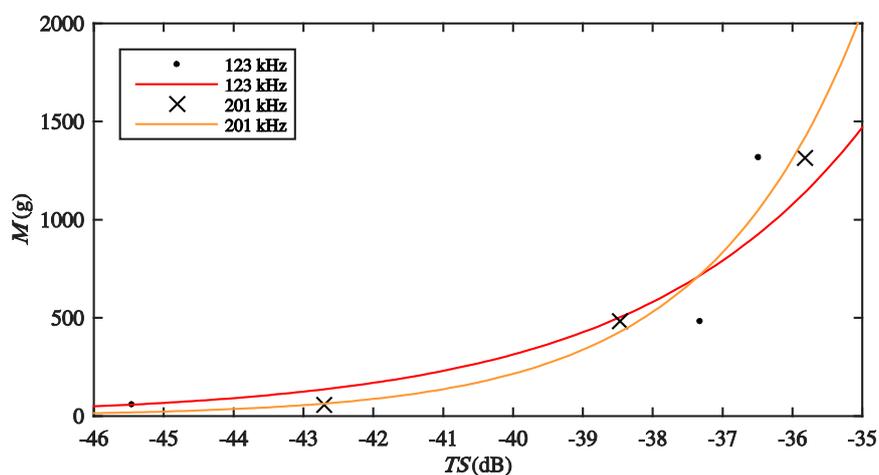


Figura 5.12. Relación potencial entre la masa de la lubina y la media del TS medio de las trazas registradas dorsalmente a 123 kHz ($M = 7.35 \cdot 10^7 \cdot 10^{0.134 \cdot TS}$) y 201 kHz ($M = 1.54 \cdot 10^{10} \cdot 10^{0.196 \cdot TS}$).

5.2.1.2. DORADA

Se dispone de datos de doradas para dos tamaños diferentes pero obtenidos con diferentes ecosondas en piscifactorías diferentes. En Culmarex se tomaron registros de dorada de 433 g con una ecosonda DT-X de Biosonics a 123 y 201 kHz con pulsos de 200 y 300 μ s de duración respectivamente, mientras que en Piagua se ensayó en una jaula de dorada de 541 g con una EK60 a 200 kHz con duraciones de pulso de 256 μ s. Teniendo esto en cuenta y en vista de los resultados obtenidos, no se ha considerado del todo oportuno la comparación de los resultados obtenidos con sistemas diferentes, aun manteniendo constantes los criterios de definición de ecos individuales y trazas.

En la Tabla 5.12 se recogen los resultados del TS obtenidos para la jaula de dorada ensayada en la explotación de Culmarex. Los valores promedio de las distribuciones de los diferentes estadísticos obtenidos a 123 kHz y a 201 kHz con la configuración de 300 μ s de duración de pulso son muy similares. Las mediciones realizadas a 201 kHz con la menor duración de pulso son en general 1 dB mayor, aunque para ambas configuraciones se obtienen valores inferiores a los esperados según los resultados de la Sección 4.2.4.

La longitud de eco y la desviación de fase obtenidas en Culmarex para la dorada son muy similares a las registradas para las dos tallas mayores de lubina a 201 kHz.

Tabla 5.12 Masa media, longitud media, número de trazas detectadas y media y desviación típica de los diferentes estadísticos de las trazas (máximo, media y percentil 75 del TS, y media del TSu) para las grabaciones dorsales de dorada a 123 y 201 kHz, en la parte superior e inferior de la tabla respectivamente, de los registros obtenidos en Culmarex.

123 kHz											
<i>M</i> (g)	<i>L</i> (cm)	τ (μ s)	<i>N</i> ^o trazas	<i>TS</i> _{Máx}		<i>TS</i> _{Medio}		<i>TS</i> _{P075}		<i>TS</i> _{UMedio}	
				μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ
433	29.4	300	5171	-37.33	5.94	-40.38	5.65	-38.97	5.70	-48.29	6.22

201 kHz											
<i>M</i> (g)	<i>L</i> (cm)	τ (μ s)	<i>N</i> ^o trazas	<i>TS</i> _{Máx}		<i>TS</i> _{Medio}		<i>TS</i> _{P075}		<i>TS</i> _{UMedio}	
				μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ
433	29.4	300	1512	-37.73	4.53	-40.80	4.26	-39.28	4.30	-46.35	4.90
433	29.4	200	13008	-36.56	5.90	-39.91	5.65	-38.46	5.69	-45.91	6.59

En la Figura 5.13 se representan las distribuciones de probabilidad del *TS* medio de las trazas a las dos frecuencias de trabajo para la dorada de 433 g. A la izquierda se muestran los resultados para la menor frecuencia y a la derecha para la mayor. A 201 kHz se han obtenido los histogramas para las dos longitudes de pulso empleadas.

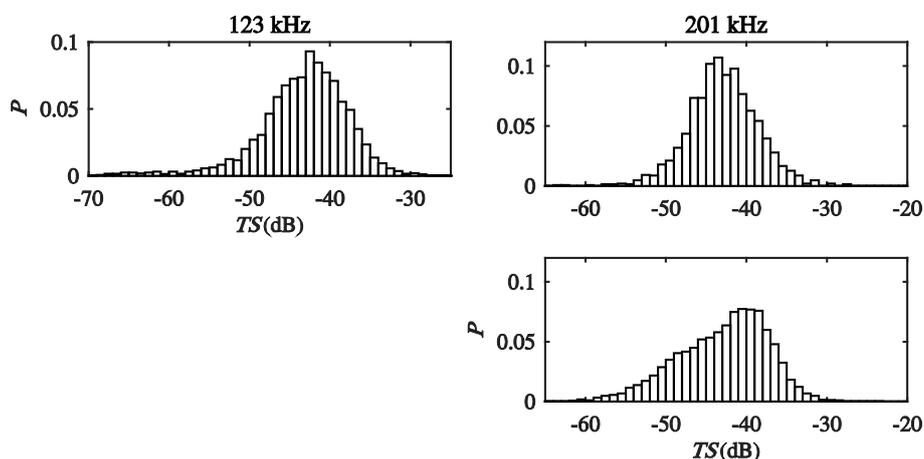


Figura 5.13. Densidad de probabilidad para el aspecto dorsal del *TS* medio de las trazas de dorada de 433 g a dos frecuencias para la única talla ensayada en Culmarex. En la columna izquierda se representa las distribución obtenida a 123 kHz y a la derecha se muestran las distribuciones a 201 kHz para las dos duraciones de pulso (300 μ s arriba y 200 μ s abajo)

Al igual que los resultados mostrados anteriormente las distribuciones obtenidas son unimodales. A 201 kHz se puede apreciar una mayor dispersión de valores para la menor longitud de pulso.

En la Tabla 5.13 se recogen los resultados del *TS* obtenidos a partir de las mediciones realizadas en Piagua. Los valores son menores a los esperados según los resultados obtenidos en Culmarex y en el Capítulo 4 de forma dorsal, aunque se ha de tener en cuenta que no son directamente comparables debido al uso de diferentes ecosondas y a que la duración del pulso empleada en condiciones de producción es 4 veces mayor a la empleada en el Puerto de Gandia.

Tabla 5.13. Masa media, longitud media, número de trazas detectadas y media y desviación típica de los diferentes estadísticos de las trazas (máximo, media y percentil 75 del *TS*, y media del *TSu*) para las grabaciones dorsales de dorada a 200 kHz de los registros obtenidos en Piagua.

<i>M</i> (g)	<i>L</i> (cm)	<i>MCG</i> (dB)	<i>Nº</i> trazas	<i>TS</i> dorsal (dB)							
				<i>TS</i> _{Máx}		<i>TS</i> _{Medio}		<i>TS</i> _{P075}		<i>TSu</i> _{Medio}	
				μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ
541	31.5	12	109123	-40.33	5.79	-42.97	5.65	-41.59	5.71	-47.27	7.60

El *TS* máximo de las trazas es el estadístico que presenta una menor variabilidad para diferentes *MCG*, seguido del percentil 75.

Los ecos registrados con la EK60 en Piagua presentan distribuciones de la longitud de eco muy similares a las obtenidas con la DT-X en Culmarex. Sin embargo, las desviaciones de fase son sustancialmente mayores para la DT-X.

En la Figura 5.14 se muestra el histograma del *TS* medio de las trazas de dorada registradas a 200 kHz. Se puede apreciar que la dispersión de valores del *TS* es mayor que las obtenidas en el Capítulo 4, tal vez debido a una mayor dispersión de tamaños y/o una mayor variabilidad en la orientación de los peces dentro de una jaula con condiciones de producción, aunque los resultados no son directamente comparables.

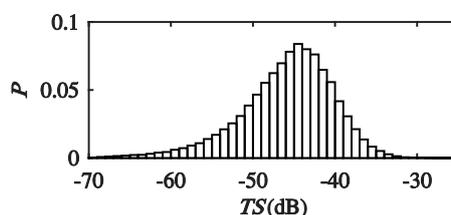


Figura 5.14. Densidad de probabilidad para el aspecto dorsal del *TS* medio de las trazas registradas en Piagua a 200 kHz para la dorada 541 g.

Se ha observado cierta variabilidad del *TS* a lo largo del día, pero no se ha identificado una tendencia clara del *TS* en función de la hora. Teniendo en cuenta los datos de todas las jornadas y sacando la media del *TS* medio de las trazas a intervalos de 1 hora se tienen variaciones de hasta 1 dB, que podrían atribuirse a variaciones en la temperatura. Para el *TS* máximo de las trazas esas diferencias ascienden hasta 1.3 dB. En cuanto a la variabilidad diaria, se aprecian diferencias de 0.3 dB de un día a otro.

5.2.2. ESTIMACIÓN DE LA ABUNDANCIA

El pulso acústico transmitido ha sido capaz de atravesar el banco de peces, pues se ha podido comprobar mediante la inspección visual de los ecogramas la detección del copo de la red.

En ocasiones se ha observado un nivel de eco algo superior al nivel de ruido por debajo del banco, que podría corresponder a la detección de la red con los lóbulos laterales del transductor o al fenómeno de dispersión múltiple, que produce un alargamiento de la señal de ecos. Para comprobarlo sería conveniente realizar mediciones con la jaula vacía y el transductor situado en la misma posición, que permitan identificar cual es la energía devuelta por la red.

En primer lugar se muestran los resultados obtenidos para la jaula de dorada de Piagua, ya que es posible contrastar las estimaciones acústicas con datos reales de abundancia, permitiendo una evaluación cuantitativa. A continuación se incluyen algunos ejemplos de los resultados obtenidos en Culmarex que pueden ayudar a mejorar la técnica, pues tan solo se dispuso de meras estimaciones sobre la talla y el número de peces.

5.2.2.1. PIAGUA

A continuación se muestran los resultados del análisis del *Sv* obtenidos a partir de campaña realizada en la planta de Piagua, donde se registraron series diarias durante 7 días a una frecuencia de 200 kHz. Durante los cuatro primeros días se mantuvo una biomasa de 6.2 Tn, los días 16 y 17 de 4.9 Tn, y el último día de 3.5 Tn. Desde la Figura 5.15 a la Figura 5.21 se representa la evolución diaria a intervalos de una hora de los parámetros empleados para describir el posicionamiento del banco, la comparación de la media y el *CV* de densidad de peces observada en el haz con la densidad de referencia, y el error cometido en la estimación de la abundancia. La posición del cardumen en el haz se ha descrito mediante el centro de masas del ecograma *Sv*, y las líneas de fondo (*F*) y superficie (*S*) que delimitan el volumen de peces insonificado por el transductor. Se representa la media y la media \pm la desviación típica a intervalos de una hora. Se consiguen apreciar variaciones en el comportamiento del banco, pudiendo distinguir momentos en que la distribución de peces es muy variable y otros momentos en que el banco se vuelve más estable en función de la variación de la media y la desviación típica

entre intervalos consecutivos. Cuando la media permanece estable y la variabilidad es reducida y sin variaciones en horas sucesivas se puede asumir que los peces presentan un estado de actividad reducido. Se representa la media de la densidad de peces observada acústicamente en el haz del transductor, obtenida mediante el escalado Sv/TS , y la densidad de peces en la jaula calculada a partir del número de peces real y el volumen ocupado por el banco, que se emplea como referencia. De igual modo se representa el coeficiente de variación de las densidades representadas, que da una idea de la variabilidad observada, y el error relativo ER asociado a la estimación de la abundancia en la jaula, que se ha visto influenciado por la determinación de la densidad observada y el volumen ocupado por el cardumen.

La elección de qué estadístico del *TS* conviene utilizar es un aspecto crítico, pues las estimaciones de la abundancia presentan una gran variabilidad el función del estadístico empleado en el cálculo. El uso del *TS* medio de las trazas parece ser adecuado para la estimación de la abundancia, ya que el error cometido cálculo del número de peces en ocasiones es muy reducido.

Otro aspecto a tener en cuenta es la extrapolación de la distribución vertical y la densidad observada por el transductor a la totalidad de la jaula. Resulta conveniente diseñar una experiencia que permita evaluar en qué momentos o condiciones la distribución y la densidad en el haz son representativas del resto del cardumen, de forma que la estimación de la abundancia se realice correctamente. Para ello será necesario monitorizar una mayor proporción del volumen de la jaula. De igual modo, el cálculo del volumen ocupado por los peces puede verse afectado por la detección de la red a distancias próximas al transductor, cuando esta no se encuentra fijada correctamente y presenta un movimiento oblicuo, como se pudo comprobar mediante inspecciones visuales.

Parece ser que el momento más conveniente para la estimación de la abundancia es en aquellos instantes en que la distribución de peces es más estable, cuando la media del *CM* y de los límites del banco apenas varía entre intervalos consecutivos y las desviaciones típicas son reducidas. Estas condiciones suelen darse cuando el *CV* es reducido tanto para densidad observada en el haz como para la densidad de referencia, ambas densidades son similares, y el error relativo cometido en la estimación de la abundancia es reducida. Suelen darse con mayor frecuencia durante la noche, aunque también pueden producirse de día, como se puede apreciar en la Figura 5.16.

El cálculo de la abundancia en los momentos más idóneos produce subestimaciones entorno al 20 % durante el día 12. El día 13 se ven reducidas hasta el 6.5%. El día 14 oscilan entorno a cero con valores de $\pm 10\%$, sin exceder el 20%. El día 15 se sobreestima alrededor de un 11%. El día 16 la incertidumbre resulta muy variable debido a un comportamiento cambiante del cardumen antes y después de un periodo de pesca, aunque puede verse reducida hasta el 10%. El día 17 presenta variaciones de aproximadamente $\pm 12\%$. Y el día 18 la incertidumbre también es cambiante, aunque hay que tener en cuenta que los datos se registraron durante el día y fueron escasos.

El día 16 (Figura 5.19) se puede apreciar una gran variabilidad del centro de masas y los límites superior e inferior del banco, que corresponde a un comportamiento cambiante del cardumen antes y después de las labores de despesque. Se considera que estas condiciones no son adecuadas para la estimación de la abundancia.

El principio de linealidad parece cumplirse para las densidades evaluadas, aunque resulta conveniente la realización de nuevos estudios que permitan depurar la técnica y obtener una menor incertidumbre en la estimación de la abundancia de peces, así como evaluar la existencia de fenómenos de dispersión múltiple y apantallamiento del haz. Estas mejoras podrían pasar por emplear un estadístico del *TS* diferente para escalar el *Sv*, definir de forma alternativa el rango de distancias a considerar en el análisis del *TS*, o mejorar la forma de definir el volumen ocupado por los peces.

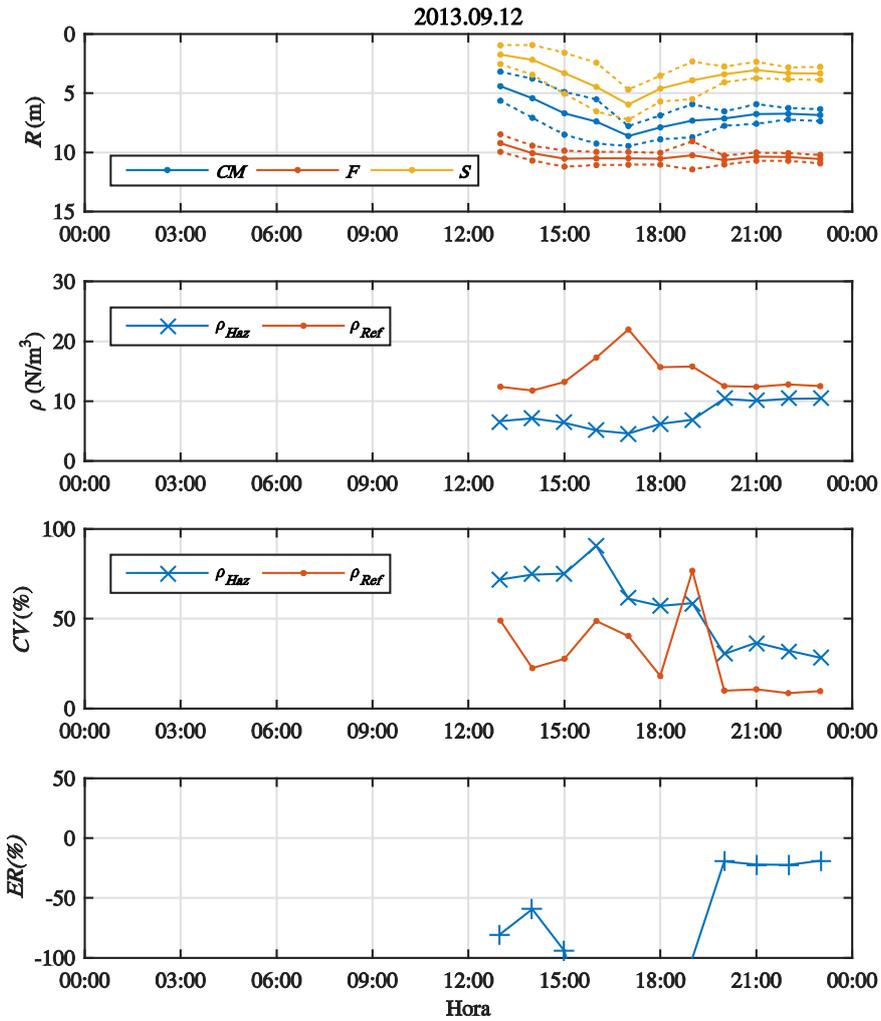


Figura 5.15. De arriba abajo a intervalos de 1 hora: Media y desviación típica del centro de masas, y de los límites superior (S) e inferior (F) del cardumen; media de la densidad observada en el haz y la densidad de referencia; coeficiente de variación de las densidades representadas; y error relativo en la estimación de la abundancia. Resultados del día 12 de septiembre para una abundancia de 11427 peces.

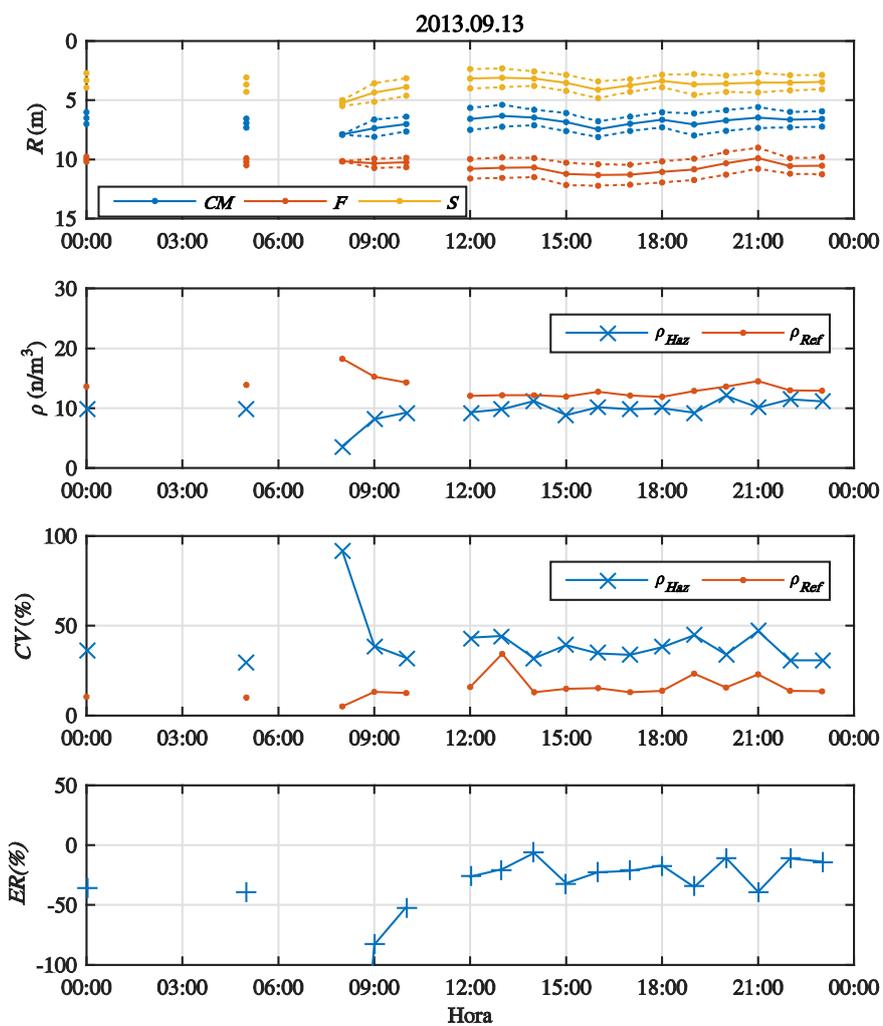


Figura 5.16. De arriba abajo a intervalos de 1 hora: Media y desviación típica del centro de masas, y de los límites superior (S) e inferior (F) del cardumen; media de la densidad observada en el haz y la densidad de referencia; coeficiente de variación de las densidades representadas; y error relativo en la estimación de la abundancia. Resultados del día 13 de septiembre para una abundancia de 11427 peces.

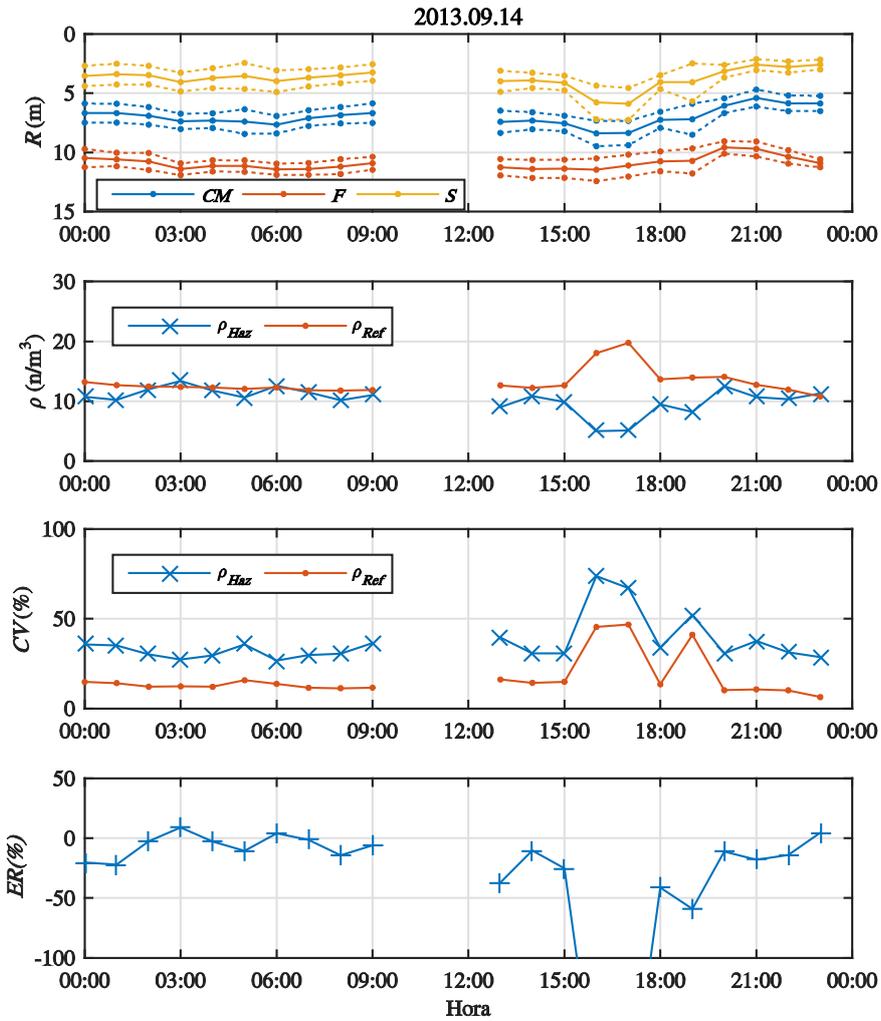


Figura 5.17. De arriba abajo a intervalos de 1 hora: Media y desviación típica del centro de masas, y de los límites superior (S) e inferior (F) del cardumen; media de la densidad observada en el haz y la densidad de referencia; coeficiente de variación de las densidades representadas; y error relativo en la estimación de la abundancia. Resultados del día 14 de septiembre para una abundancia de 11427 peces.

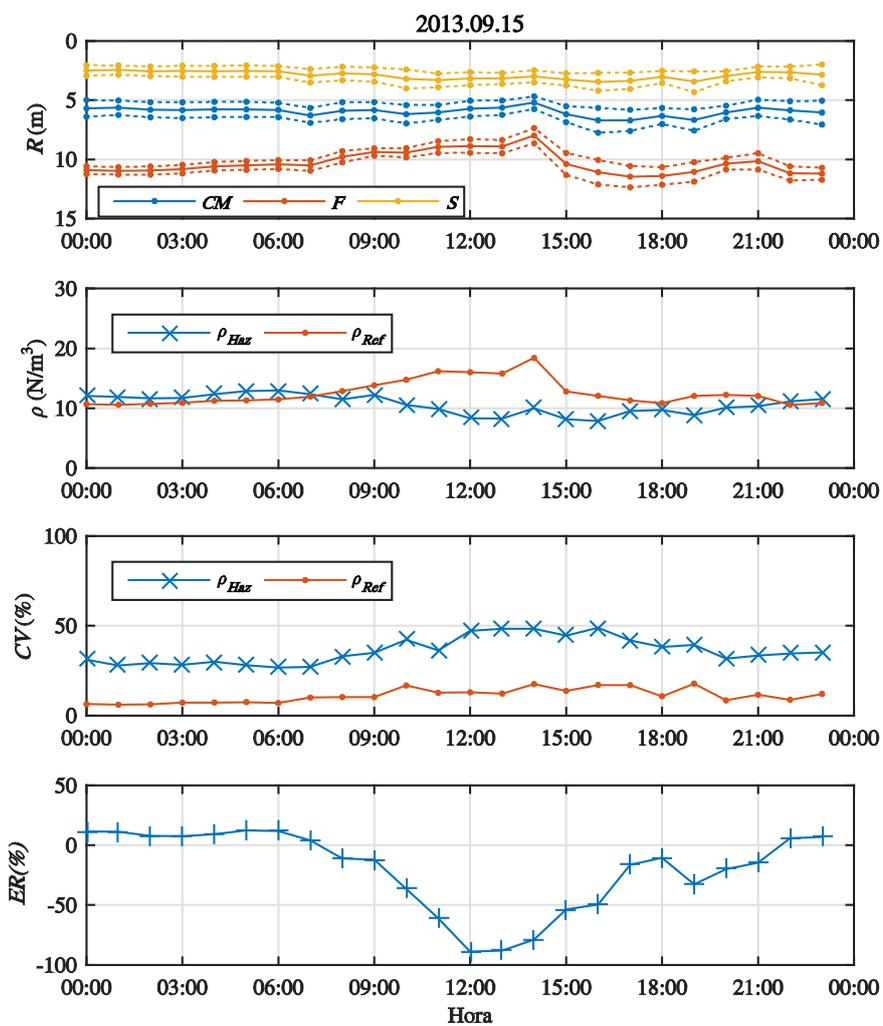


Figura 5.18. De arriba abajo a intervalos de 1 hora: Media y desviación típica del centro de masas, y de los límites superior (S) e inferior (F) del cardumen; media de la densidad observada en el haz y la densidad de referencia; coeficiente de variación de las densidades representadas; y error relativo en la estimación de la abundancia. Resultados del día 15 de septiembre para una abundancia de 11427 peces.

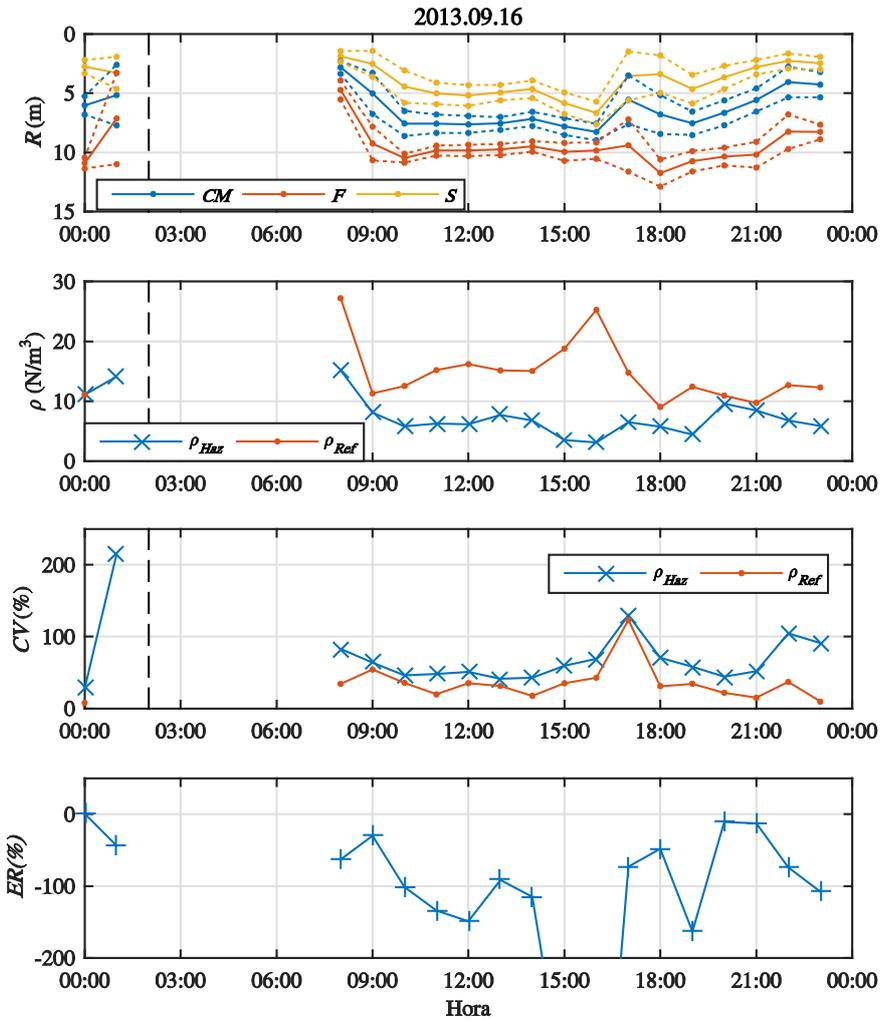


Figura 5.19. De arriba abajo a intervalos de 1 hora: Media y desviación típica del centro de masas, y de los límites superior (S) e inferior (F) del cardumen; media de la densidad observada en el haz y la densidad de referencia; coeficiente de variación de las densidades representadas; y error relativo en la estimación de la abundancia. Resultados del día 16 de septiembre. La línea vertical negra discontinua indica el momento en que se realizó una pesca, marcando un cambio en la una abundancia de 11427 a 9004 peces.

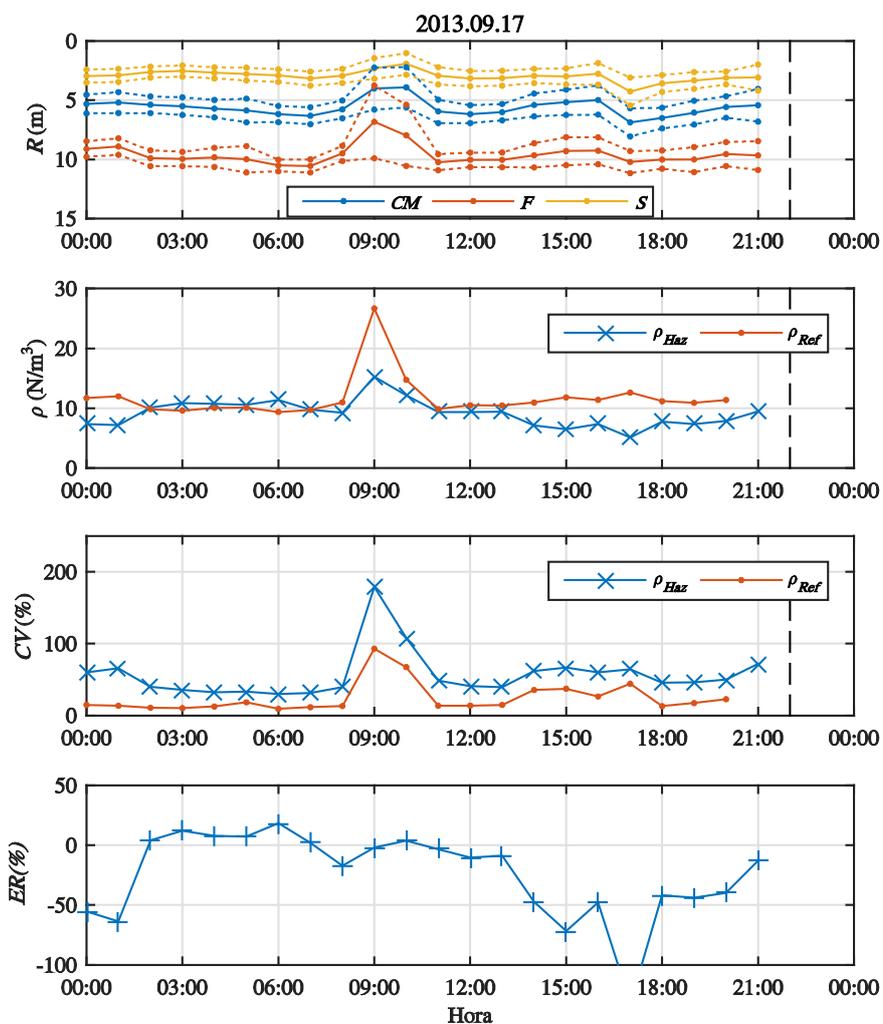


Figura 5.20 De arriba abajo a intervalos de 1 hora: Media y desviación típica del centro de masas, y de los límites superior (S) e inferior (F) del cardumen; media de la densidad observada en el haz y la densidad de referencia; coeficiente de variación de las densidades representadas; y error relativo en la estimación de la abundancia. Resultados del día 17 de septiembre para una abundancia de 9004 peces. La línea vertical negra discontinua indica el momento en que se realizó una pesca.

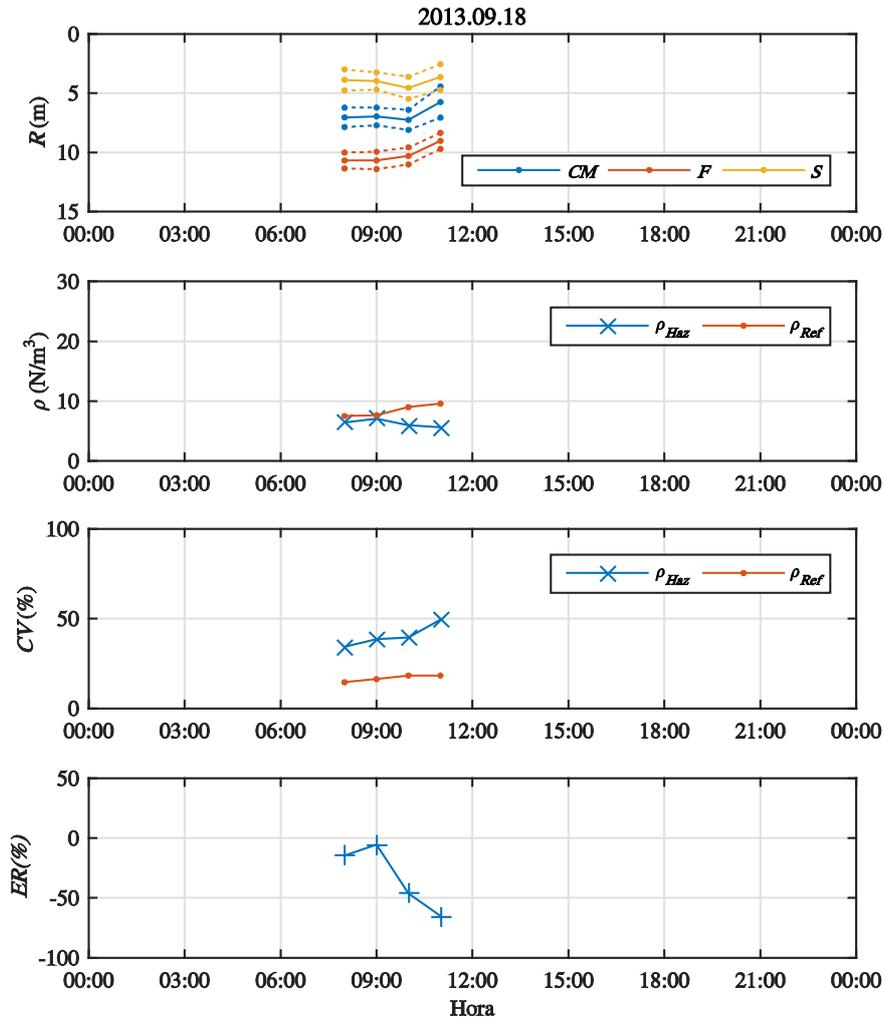


Figura 5.21 De arriba abajo a intervalos de 1 hora: Media y desviación típica del centro de masas, y de los límites superior (S) e inferior (F) del cardumen; media de la densidad observada en el haz y la densidad de referencia; coeficiente de variación de las densidades representadas; y error relativo en la estimación de la abundancia. Resultados del día 18 de septiembre para una abundancia de 6372 peces.

Se comparan los datos reales de biomasa y las series diarias de la estimación acústica de la biomasa obtenidas a partir del estudio del Sv en la Figura 5.22. La estimación de la biomasa se obtiene multiplicando la abundancia por la masa media proporcionada por la empresa. Habitualmente las condiciones óptimas que permiten una estima más precisa se producen durante la noche, aunque en ocasiones también pueden darse por el día. No obstante, la obtención de estimaciones más precisas requiere una mejora de la metodología.

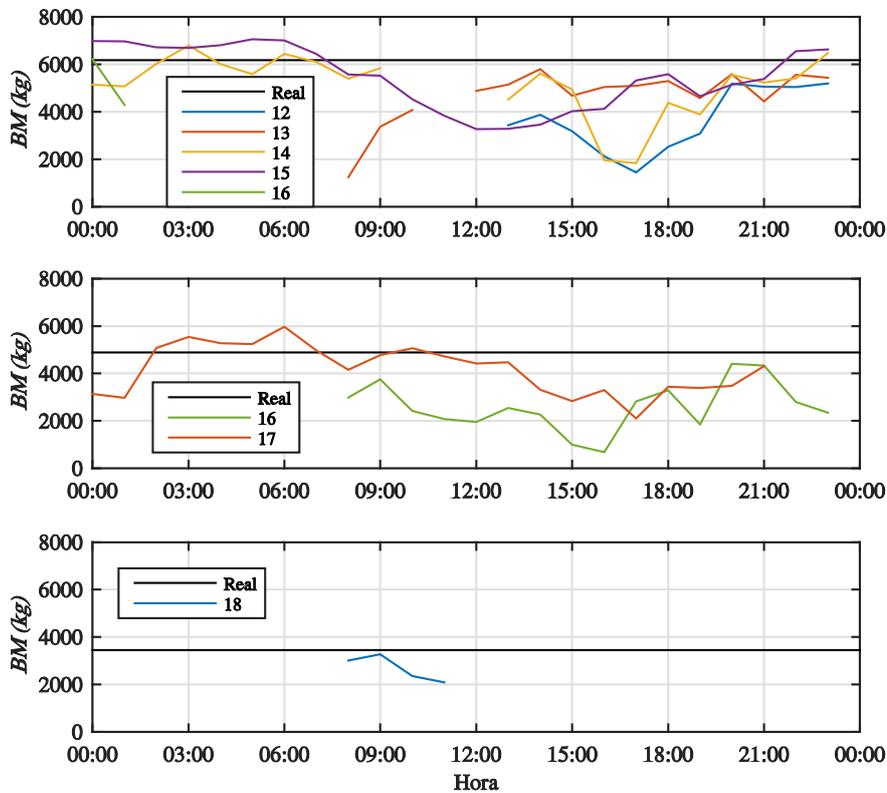


Figura 5.22. Comparación de la biomasa real presente en la jaula y la biomasa estimada a partir de los datos acústicos para los diferentes días del ensayo.

5.2.2.2. CULMAREX

En esta Sección se incluye una muestra los resultados obtenidos en Culmarex para tres tallas de lubina y una única talla de dorada con el fin de evaluarlos cualitativamente, ya que no se dispuso de datos reales del número de peces, a excepción de la lubina de tamaño intermedio (C4). Por tanto, la determinación de la densidad de referencia y el error relativo asociado a la estimación acústica del número de peces están fuertemente influenciados por la precisión de la abundancia proporcionada por la empresa, que queda representada mediante una línea de puntos. Se representa la evolución de la distribución vertical del banco, la comparación de la densidad de peces observada por el haz y la densidad de referencia y los CV asociados, y las variaciones del error cometido en la estimación de la abundancia.

En la Figura 5.23 se muestran los resultados de la dorada (CB20) a 201 kHz para el 18 de septiembre. La distribución vertical de los peces sufrió grandes variaciones a lo largo del día, al igual que sucedió el resto de días en que se obtuvieron registros de esta jaula. En todos los casos la estimación de la abundancia ha sido muy inferior a los datos proporcionados por la empresa. Aun así, se ha observado que la incertidumbre se reduce cuando disminuye el CV de la densidad observada acústicamente. A diferencia de lo observado en la Planta de Piagua, estas condiciones se produjeron durante el día entre las 12 y las 19 h.

Los resultados de la jaula de la menor talla de lubina (CB23) obtenidos para una frecuencia de 123 kHz el día 15 de septiembre se muestran en la Figura 5.24. Se puede apreciar un comportamiento del banco más estable que el observado para la dorada, debido a una menor variabilidad de los límites del banco y del CM. El coeficiente de variación de la densidad observada en el haz presenta poca variabilidad, siendo más acusada durante la noche de forma que el error asociado a la estimación de la abundancia se ve reducido.

En la Figura 5.25 y la Figura 5.26 se representan los resultados para la jaula de lubina de tamaño intermedio (C4) a las dos frecuencias ensayadas. Se ha observado que a 123 kHz la densidad promedio en el haz y su CV presentan una variabilidad reducida, aunque el error cometido en la estimación de la abundancia presenta mayores oscilaciones. Esto puede deberse a que la distribución vertical observada por el transductor no sea representativa de la totalidad de la jaula. A 201 kHz se ha observado una distribución de los peces más estable durante el día, un menor CV de la densidad, y una incertidumbre más constante.

Los resultados para la lubina de mayor tamaño (C2) se representan en la Figura 5.27 y la Figura 5.28, que corresponden a diferentes valores de biomásas medidos a una frecuencia de 201 kHz. En esta jaula se ha podido apreciar diferente comportamiento durante el día y la noche. Durante el día los peces se encontraban a una mayor profundidad que durante la noche. No se han observado grandes diferencias en la estimación acústica de la densidad relativa al volumen insonificado por el transductor.

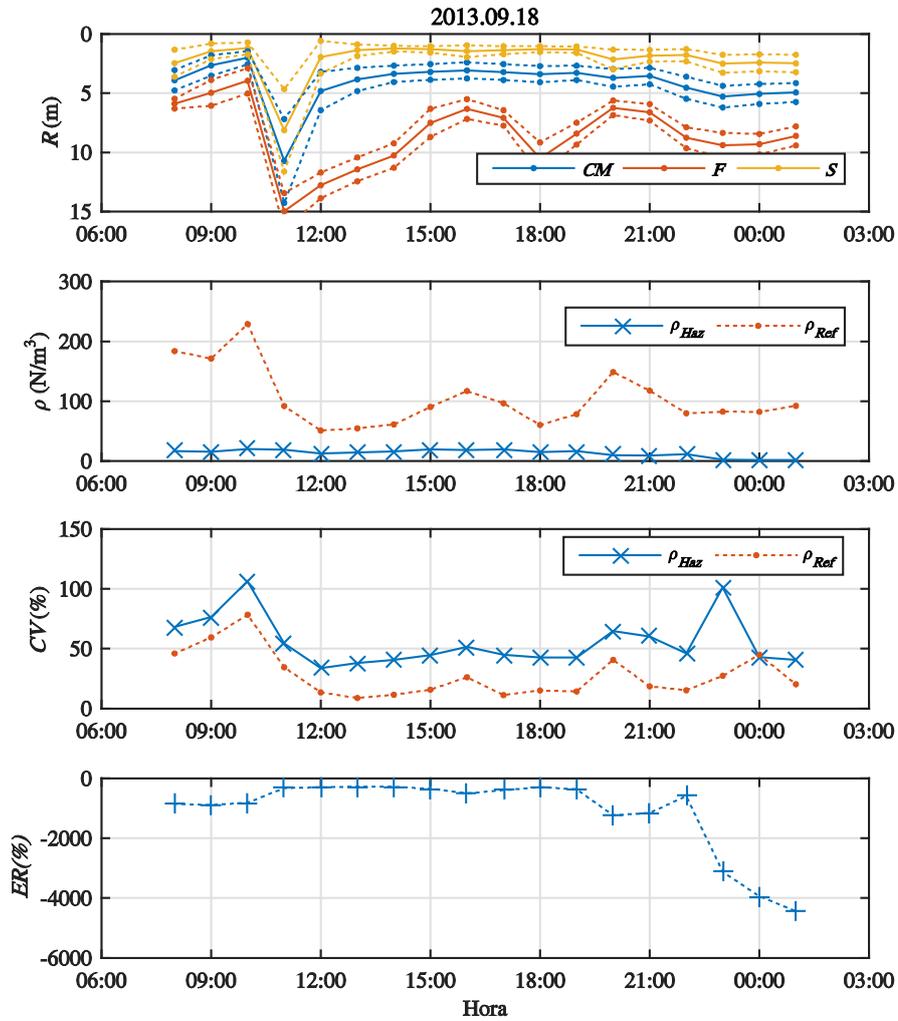


Figura 5.23 De arriba abajo a intervalos de 1 hora: Media y desviación típica del centro de masas, y de los límites superior (S) e inferior (F) del cardumen; media de la densidad observada en el haz y la densidad de referencia; coeficiente de variación de las densidades representadas; y error relativo en la estimación de la abundancia. Resultados del día 18 de septiembre para la dorada (CB20) a 201 kHz.

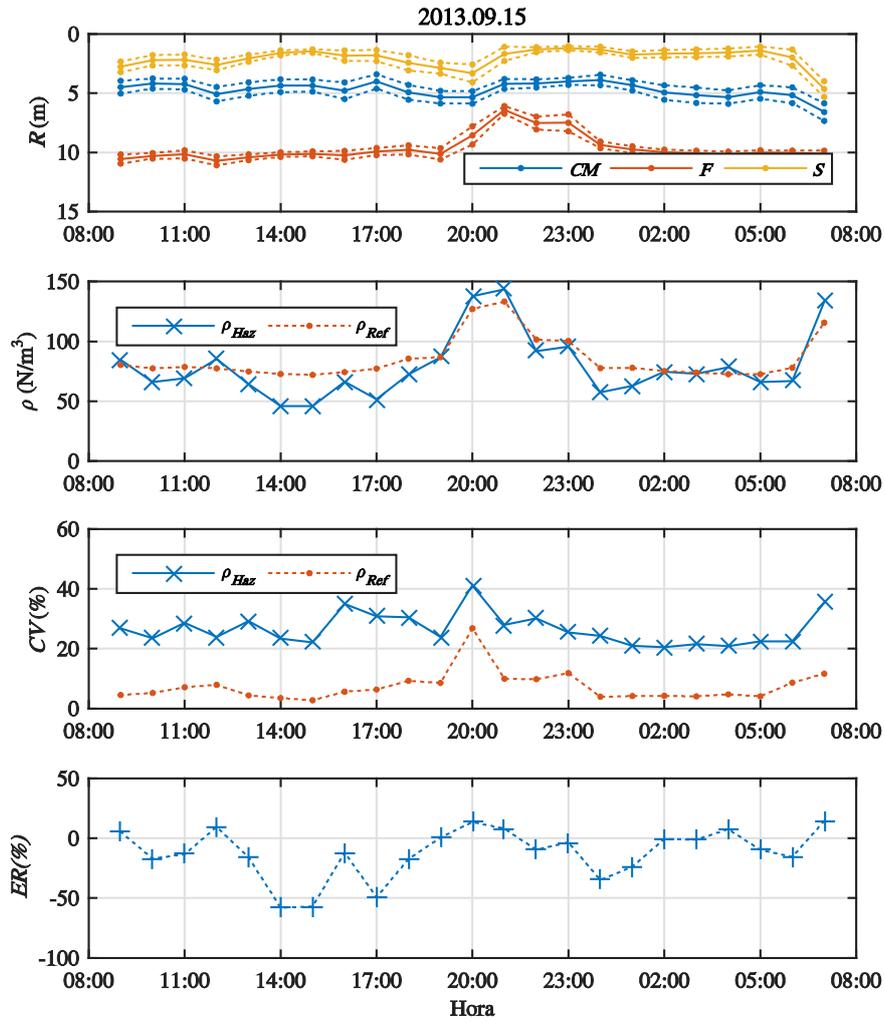


Figura 5.24. De arriba abajo a intervalos de 1 hora: Media y desviación típica del centro de masas, y de los límites superior (S) e inferior (F) del cardumen; media de la densidad observada en el haz y la densidad de referencia; coeficiente de variación de las densidades representadas; y error relativo en la estimación de la abundancia. Resultados del día 15 de septiembre para la lubina de menor tamaño (CB23) a 123 kHz.

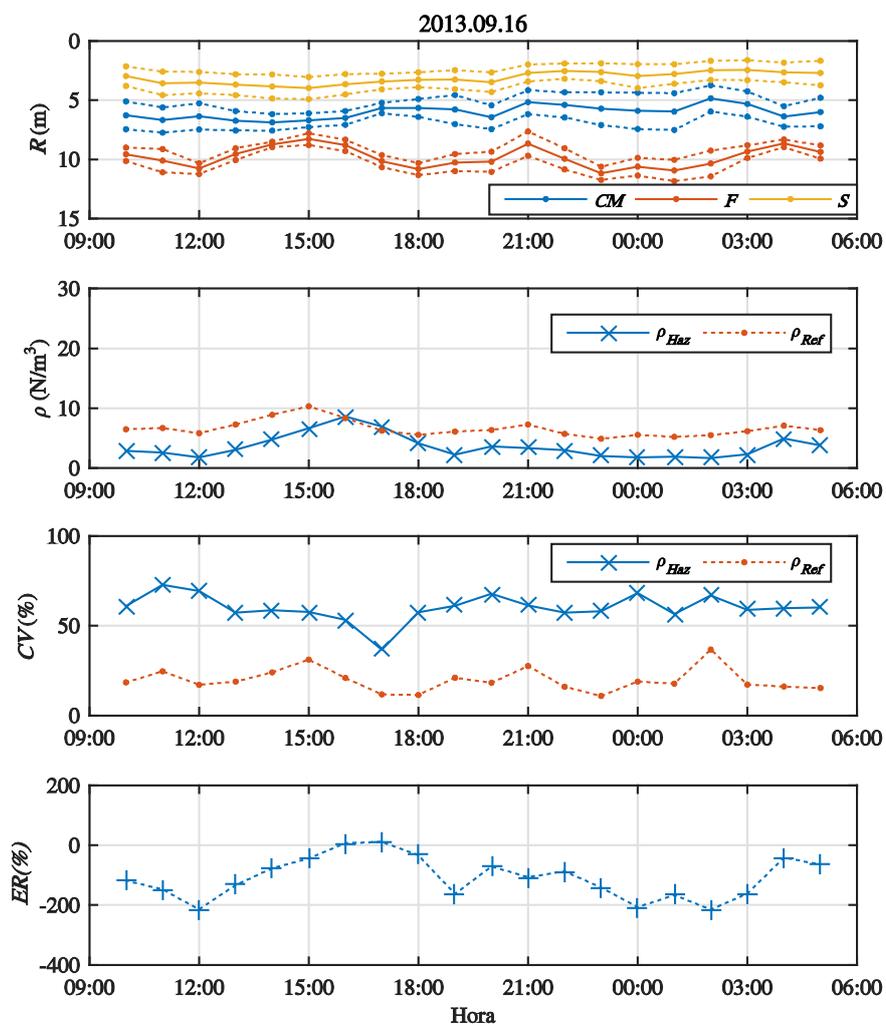


Figura 5.25. De arriba abajo a intervalos de 1 hora: Media y desviación típica del centro de masas, y de los límites superior (S) e inferior (F) del cardumen; media de la densidad observada en el haz y la densidad de referencia; coeficiente de variación de las densidades representadas; y error relativo en la estimación de la abundancia. Resultados del día 16 de septiembre para la lubina de tamaño intermedio (C4) a 123 kHz.

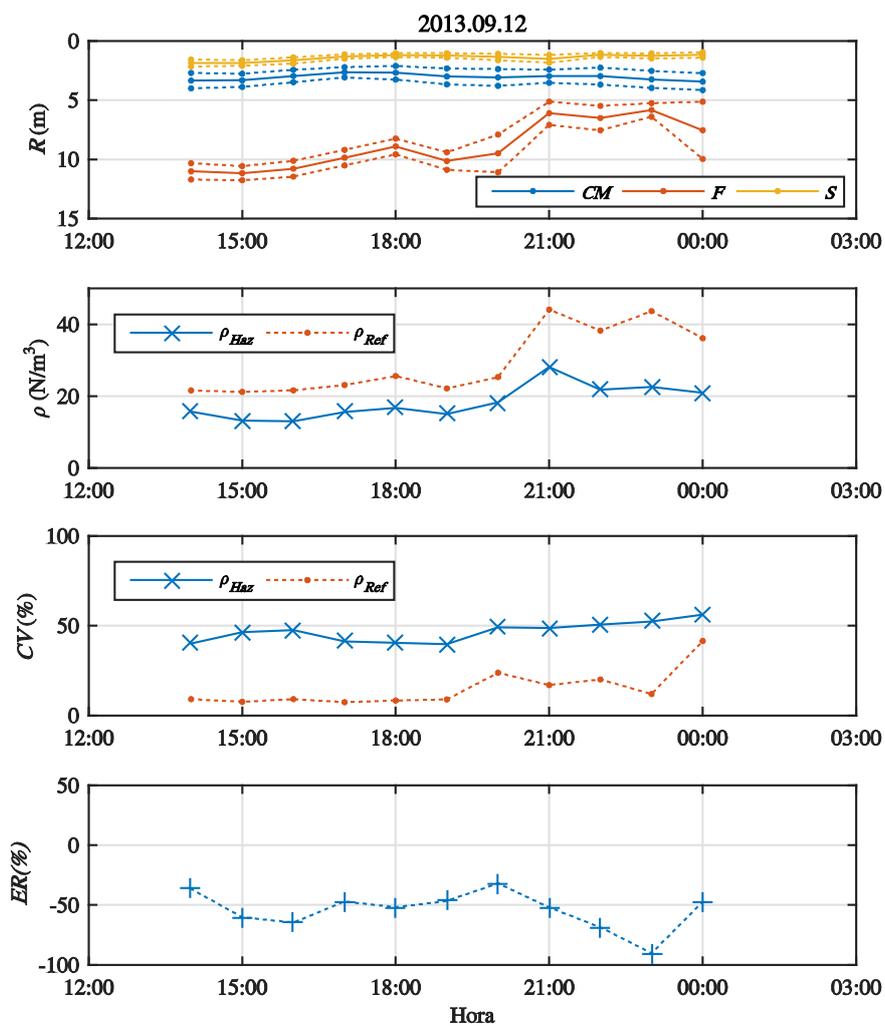


Figura 5.26. De arriba abajo a intervalos de 1 hora: Media y desviación típica del centro de masas, y de los límites superior (S) e inferior (F) del cardumen; media de la densidad observada en el haz y la densidad de referencia; coeficiente de variación de las densidades representadas; y error relativo en la estimación de la abundancia. Resultados del día 12 de septiembre para la lubina de tamaño intermedio (C4) a 201 kHz.

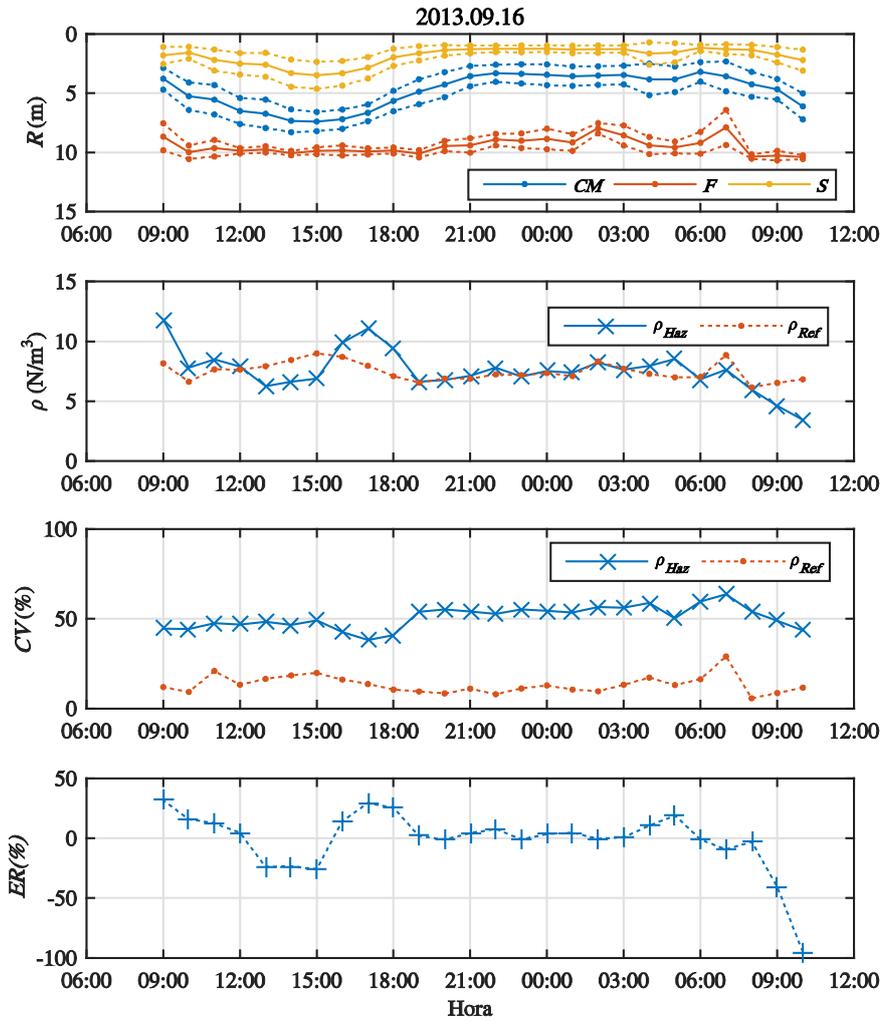


Figura 5.27. De arriba abajo a intervalos de 1 hora: Media y desviación típica del centro de masas, y de los límites superior (S) e inferior (F) del cardumen; media de la densidad observada en el haz y la densidad de referencia; coeficiente de variación de las densidades representadas; y error relativo en la estimación de la abundancia. Resultados del día 16 de septiembre para la lubina de mayor tamaño (C2) a 201 kHz.

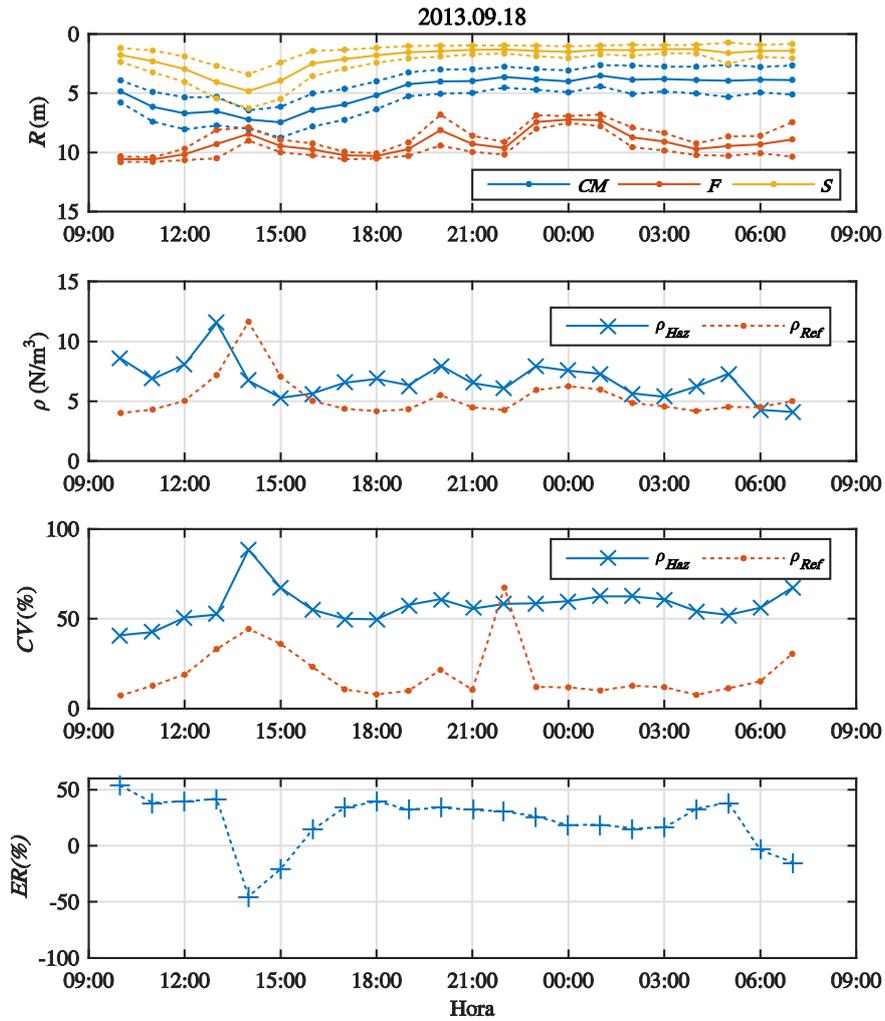


Figura 5.28. De arriba abajo a intervalos de 1 hora: Media y desviación típica del centro de masas, y de los límites superior (S) e inferior (F) del cardumen; media de la densidad observada en el haz y la densidad de referencia; coeficiente de variación de las densidades representadas; y error relativo en la estimación de la abundancia. Resultados del día 18 de septiembre para la lubina de mayor tamaño (C2) a 201 kHz.

Para los datos registrados a 123 kHz el día 16 la incertidumbre asociada a la estimación de la abundancia se ha mantenido con valores reducidos durante la noche, intervalo en el que la distribución del banco es bastante estable. Aunque el día 18 a 201 kHz se ha producido una sobreestimación del número de peces durante la mayor parte de la jornada, también se ha observado un comportamiento de la incertidumbre más uniforme durante la noche.

En ocasiones la densidad de referencia ha alcanzado valores superiores a los manejados por acuicultores, debido a la suposición de que los peces presentan la misma distribución vertical en toda la jaula. Sin embargo, se ha podido comprobar visualmente que el grado de agregación de los peces es variable.

5.3. CONCLUSIONES

Se han obtenido expresiones que definen la dependencia del aspecto dorsal del *TS* con la longitud y la masa de la lubina a partir de detecciones próximas al transductor, procedentes de individuos situados por encima del denso cardumen. Ha sido posible la detección de trazas para el análisis del *TS*, aunque en algunas jaulas se ha detectado una reducida cantidad de trazas debido a la proximidad del denso cardumen a la superficie. Puede resultar conveniente optimizar la configuración de medida para la detección de trazas de mayor calidad y en mayor cantidad, empleando un pulso de menor longitud y un menor intervalo entre pings. De esta forma podría obtenerse una estimación más precisa del *TS* y reducir la incertidumbre en la estimación del tamaño de los peces. Se puede asumir que las distribuciones obtenidas para la lubina y la dorada de forma dorsal son unimodales, tal y como se ha observado para la dorada en el Capítulo 4. El percentil 75 y la media del *TS* de las trazas parecen buenos estadísticos para su correlación con el tamaño de la lubina a las dos frecuencias ensayadas. Se han obtenido correlaciones más fuertes a 201 que a 123 kHz, con incertidumbres aceptables respecto a la precisión aportada por sistemas ópticos.

En principio parece viable la estimación de la abundancia de peces mediante técnicas acústicas. Bajo ciertas condiciones se ha conseguido una incertidumbre inferior a la derivada de las estimaciones realizadas por parte del personal de la planta. Se considera más apropiado el cálculo del número de peces en aquellos momentos del día en que el banco presenta un comportamiento más invariante, y cuando la variabilidad de la densidad observada y el volumen del haz ocupado por los peces es menor, correspondiendo con los instantes en que la incertidumbre en la estimación de la abundancia es menor. Estas condiciones suelen darse con más frecuencia por la noche. El uso del detector de fondos ha resultado útil para determinar los límites del cardumen, aunque su aplicación se dificulta para densidades muy bajas.

Las medidas de dorada realizadas en Piagua han podido ser contrastadas con datos reales de masa y abundancia, aunque se llevaron a cabo en jaulas destinadas a venta con

densidades relativamente bajas. Por este motivo resulta conveniente ampliar el estudio con el fin de evaluar la energía devuelta por bancos con mayores densidades, así como la posible influencia de la talla. También es recomendable ensayar en jaulas de igual tamaño, reduciendo variables que puedan influir en el resultado final, pues el comportamiento de los peces (distribución, orientación, etc.) también puede verse influenciado en cierto modo por las dimensiones de la jaula.

Resulta conveniente estudiar en qué condiciones la distribución vertical de los peces observada por el transductor es extrapolable al resto de la jaula, permitiendo un cálculo correcto del volumen ocupado por el banco de forma que la incertidumbre en la estimación de la abundancia se vea reducida.

Al igual que se ha comentado en el Capítulo 4, una monitorización continua de la temperatura puede favorecer la obtención de estimas más precisas, ya que permite un cálculo más realista de la velocidad de propagación del sonido y el coeficiente de absorción.

Es conveniente el almacenado de los datos en modo local, y emplear el enlace wifi para el control del sistema y el volcado de datos. De esta forma el intervalo entre pings no se verá afectado por la eficiencia de la transmisión del enlace wifi.

Se ha podido comprobar visualmente *in situ* la detección de la red a distancias próximas al transductor debido a su movimiento. Por este motivo sería conveniente la elección de una posición del transductor dentro de la jaula que minimice las detecciones de la red, ya sean debido al movimiento de la red por las corrientes de agua o a la detección con el lóbulo lateral del transductor. De igual modo, es deseable la elección de un emplazamiento que evite las detecciones del anillo anticorriente ya podría afectar a la estimación de la abundancia.

No se ha podido comprobar la aparición del efecto de la dispersión múltiple y el apantallamiento del haz para las densidades ensayadas.

6

Estimación del tamaño a cortas distancias mediante el análisis de la forma de onda del eco

Tradicionalmente la estimación acústica de la masa individual de peces se realiza a partir de la medida del *TS*. Sin embargo, a cortas distancias tanto las mediciones como la calibración del sistema electroacústico presentan cierta problemática debido a la proximidad de los blancos al transductor, que es discutida ampliamente en la Sección 3.4. A pesar de estas dificultades, en el Capítulo 4 se ha observado una fuerte dependencia del *TS* con la longitud y la masa de la dorada tanto dorsal como ventralmente a muy cortas distancias, a diferencia de estudios anteriores realizados con salmones en jaulas de piscifactoría que tan solo mostraban correlación con la talla para el aspecto ventral del *TS* (Knudsen *et al.*, 2004).

Burwen *et al.* (2003) propusieron estimadores alternativos al *TS* para determinar la talla de los peces a cortas distancias e insonificando de forma lateral. Colocaron en un río peces vivos atados mediante un anzuelo y los insonificaron lateralmente empleando una ecosonda 244 de HTI, un transductor con un haz elíptico de $10 \times 2.9^\circ$, y pulsos de 0.2 ms a 200 kHz. Observaron que para dos especies de salmónidos diferentes los parámetros temporales de la envolvente del eco presentaban una mayor consistencia con la longitud del pez que los parámetros basados en la amplitud del eco (*TS*). Comprobaron que la amplitud del eco era muy variable e incluso registraron ecos con más de máximo local, debido a que los peces son un tipo de dispersor complejo que generan un campo dispersado complejo a cortas distancias y fuertemente dependiente de la superposición de las reflexiones procedentes de las diferentes partes del cuerpo del pez. Comprobaron que la longitud de los ecos procedentes de un único pez se veía afectada por la orientación

del pez, y se incrementaba y presentaba una mayor variabilidad al aumentar el tamaño de los salmones, traduciéndose en un aumento de la media y la desviación típica de las distribuciones de la longitud del eco como se ha observado en los Capítulos 4 y 5 a una frecuencia de 200 kHz. Observaron que la media y la desviación típica de la longitud del eco, definida a partir de la caída de -12 dB respecto al máximo, eran buenos estimadores de la talla de los peces y la desviación típica incluso podía emplearse para discriminar dos especies de salmones. Fleischman & Burwen (2003) confirmaron que la desviación típica de la longitud del eco procedente de peces individuales era un mejor estimador para la discriminación de dos especies de salmones que la aplicación de un umbral en el *TS*, y obtuvieron un modelo para determinar la cantidad de ejemplares detectados de cada una de las dos especies.

Burwen *et al.* (2007) fueron capaces de detectar ecos procedentes de peces individuales con dos e incluso hasta tres máximos locales empleando la misma configuración que Burwen *et al.* (2003) y Fleischman & Burwen (2003). Observaron que la envolvente del eco de un salmón real (*Onconhynchus tshawytscha*) dependía del ángulo formado entre la dirección de la onda incidente y la normal al eje longitudinal del pez, la curvatura del cuerpo, la longitud del pez y la longitud del pulso transmitido. Un ligero cambio en el ángulo del pez afectaba fuertemente a la envolvente del eco, de forma que al aumentar el ángulo se veía reducida la amplitud y la longitud del eco se incrementaba. Incluso detectaron ecos con múltiples picos de menor duración que podían proporcionar dos ecos diferenciados a la salida del detector de ecos, aun procediendo de un blanco individual al ser insonificado por un único pulso. La aparición de varios máximos resultó más evidente para peces grandes y pulsos transmitidos de corta duración, mientras que peces de menor tamaño o pulsos de una mayor duración producían envolventes de eco más suavizadas y con una menor presencia de picos múltiples. Un ligero ángulo del pez era capaz de producir ecos más separados para peces de mayor tamaño, pues resulta más fácil exceder la resolución espacial determinada por $c \cdot \tau / 2$. La aparición de varios máximos locales en un eco se debía a las reflexiones de la onda incidente en las partes más cercana y más lejana del cuerpo del pez respecto al transductor, que podían corresponder a la reflexión en las zonas de la cabeza y la cola. Cuando el pez se encontraba bastante recto y oblicuo, conseguían estimar la longitud del pez a partir de la medida de la distancia entre dos máximos locales y la medida del ángulo que forma la normal al eje longitudinal del pez respecto a la dirección de la onda incidente a partir de imágenes obtenidas con un sónar DIDSON, consiguiendo estimaciones entorno al 90% de la longitud total del pez.

De forma similar a los trabajos comentados anteriormente y con el fin de evitar los efectos dependientes de la distancia inherentes a la medida del *TS* y las incertidumbres asociadas, en este Capítulo se propone un método alternativo para la estimación de la masa de los peces, con especial interés en su aplicación en jaulas flotantes de acuicultura donde la detección de peces se realiza a muy cortas distancias. El método consiste en insonificar peces individuales con un transductor single-beam de forma vertical y medir

la diferencia del tiempo de vuelo entre las reflexiones procedentes de las diferentes interfases debidas a las estructuras internas de la dorada, determinando así la distancia vertical entre estas estructuras. Como se ha demostrado en Jones *et al.* (1999), Morey *et al.* (2003), la Sección 4.2.1 y otros muchos estudios, la longitud, la altura y la masa de los peces guardan relación entre ellas. Al igual que sucede con estos parámetros biométricos, se asume la existencia de una relación entre la separación vertical de las estructuras internas del pez y la masa que permita estimar indirectamente la masa de los peces a partir de la medida de la diferencia del tiempo de vuelo entre las reflexiones producidas en las diferentes estructuras del pez. En principio no existen consideraciones teóricas que puedan limitar la aplicación de esta técnica, ya sea desde el aspecto dorsal como desde el aspecto ventral de los peces. De esta forma no sería necesario calibrar las ganancias del sistema ni se tendrían que tener en consideración los errores cometidos en la medida del *TS* a cortas distancias, ya que tan solo se ha de determinar la diferencia temporal entre las reflexiones producidas en diferentes partes del cuerpo del pez. El factor que más puede afectar a los resultados es la estimación de la velocidad de propagación del sonido, así como la elección de la frecuencia de muestreo empleada para el registro de ecos. Puesto que la detección de peces se efectúa a distancias próximas al transductor, el uso de un valor promedio de la velocidad del sonido en el rango de distancias evaluado puede minimizar los errores asociados. Y el uso de una frecuencia de muestreo elevada permitirá reducir el error en la determinación del instante temporal en que se detecta un máximo y obtener una medida precisa de la diferencia temporal entre reflexiones.

El objetivo final de este estudio es la estimación de la biomasa individual de la dorada a partir del análisis de los ecos acústicos producidos por un pulso corto, capaz de proporcionar suficiente resolución espacial como para discriminar diferentes estructuras internas de la dorada, asumiendo que existe una correlación entre la separación de estas estructuras y la masa de la dorada. Para ello será necesario digitalizar el eco con una frecuencia de muestreo elevada, que proporcione una estimación precisa de las distancias verticales entre las interfases del interior del cuerpo del pez.

6.1. MATERIALES Y MÉTODOS

A continuación se describe la configuración experimental empleada para la transmisión de pulsos cortos y el registro de ecos con una elevada frecuencia de muestreo, la caracterización biométrica de los animales bajo estudio, y el análisis de los ecos acústicos registrados que ha permitido obtener algún parámetro del eco relacionado con la masa individual de la dorada. Además se ha implementado una simulación numérica mediante el método de elementos finitos, que ha ayudado a la interpretación de los resultados experimentales.

6.1.1. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

Se dispuso de 135 ejemplares de doradas, cedidos por el Laboratorio de Ciencia Animal del Campus de Gandia, a partir de los cuales se obtuvieron cinco tallas diferentes de dorada. En primer lugar se realizó un muestreo para evaluar la dispersión de tamaños y definir cinco grupos en función de la longitud. Fue necesario suministrar anestesia a los peces para poder muestrearlos. Los ejemplares disponibles presentaban longitudes comprendidas entre 18 y 31 cm, con masas desde 113 hasta 551 g.

Tras la evaluación de los datos registrados de longitud y masa se definieron 5 grupos en función de la longitud de forma que la dispersión dentro de cada grupo fuera lo menor posible, se tuvieran al menos 4 ejemplares en cada grupo y se asegurara diferencias en la talla entre grupos sucesivos. A continuación se realizó un segundo muestreo para seleccionar los peces que formaron parte de cada uno de los grupos. En la Tabla 6.1 se resumen los datos biométricos de los diferentes grupos de dorada definidos, donde se incluye el número de ejemplares que conformaron cada grupo, y el valor promedio y el coeficiente de variación de la longitud total y la masa de los peces.

Tabla 6.1. Resumen del valor medio y el coeficiente de variación de la longitud y la masa de los grupos de dorada definidos en función de la longitud.

Grupo	Nº peces	L (cm)		M (g)	
		μ	CV (%)	μ	CV (%)
1	4	20.3	0.2	158.8	0.7
2	4	21.1	0.4	178.7	1.3
3	8	21.7	0.5	194.4	1.5
4	4	23.1	0.5	235.7	1.5
5	4	24.2	0.4	268.7	1.3

Los grupos formados eran altamente homogéneos, pues presentaban una reducida dispersión tanto en longitud como en masa. Debido a la reducida disponibilidad de ejemplares resultó inviable la elección de grupos con mayores diferencias de talla y que abarcaran un mayor rango, quedando cubiertas la totalidad de tallas manejadas en el proceso de engorde de la dorada en jaulas marinas. En cambio se ha podido evaluar la aplicación del método acústico para la discriminación de ligeras diferencias en el tamaño de los peces.

Cada uno de los grupos fue caracterizado acústicamente por separado. Se formaron grupos de un reducido número de ejemplares con la finalidad de reducir la dispersión de

tallas y evitar la detección ecos superpuestos procedentes de múltiples blancos que pudieran falsear los resultados.

Las mediciones acústicas se realizaron durante la última semana del mes de julio de 2011 en el Puerto de Gandia (Valencia). Se instaló una pequeña jaula experimental en frente del tinglado nº 15 del muelle frutero junto al noray 29, donde se montaron los transductores y se introdujeron unos pocos ejemplares de dorada. Los dispositivos electrónicos necesarios para llevar a cabo las mediciones se colocaron en el interior del tinglado nº 15.



Fuente: Propia

Figura 6.1. Jaula experimental de 3 m de diámetro y 2.5 m de altura. Detalle del montaje de los transductores para las mediciones acústicas desde el aspecto ventral de los peces.

La jaula poseía un diámetro de 3 m y una altura de 2.5 m, confiriéndole un volumen de aproximadamente 19 m^3 (Figura 6.1). Estaba situada sobre un fondo de tipo lodoso, donde se tenía un calado de unos 6 m. La jaula estaba formada por 3 anillos construidos a base de tubo de polietileno de 30 mm y 2 atmósferas. Se colocó un anillo en la parte superior rasante a la superficie del agua, un anillo en el fondo, y otro anillo a mitad de altura de la jaula, que le conferían una forma aproximadamente cilíndrica a la red. Los anillos superior e inferior circunscribían una cruz montada a base de tubo de PVC de 50 mm, que permitía instalar fácilmente los transductores en la superficie y en el fondo de la jaula para la realización de mediciones desde el aspecto dorsal y el ventral, respectivamente. Los 3 anillos estaban unidos entre sí mediante 4 cabos, que limitaban la altura de la jaula cuando se extendía al introducirla en el agua y permitían recogerla fácilmente al finalizar las mediciones plegándola como un acordeón. Se amarraron 4 flotadores tipo donuts al anillo superior que proporcionaban flotabilidad a la jaula. A los anillos medio e inferior se les practicó agujeros para permitir la entrada y la salida de agua en el tubo, facilitando la extensión de la estructura cuando se introducía en el agua

y el plegado de la jaula durante las operaciones de cambio de peces y para retirar la estructura del agua. Se instalaron en el anillo inferior 4 plomos de 2 kg de peso cada uno, con el fin de otorgar cierta estabilidad vertical a la estructura. La red utilizada iba tejida con un hilo de 1.5 mm de grosor formando una malla de 7 mm de lado. Se cosió en forma de cilindro cerrándola por su extremo inferior, y se fijó a los tres anillos mediante bridas.



Figura 6.2. Equipo empleado para la generación del pulso transmitido y la grabación de la señal de ecos, formado por un sistema PXI portátil, un amplificador, y un ordenador.

Para la realización de las mediciones acústicas se empleó un sistema PXI de Nationals Instruments formado por chasis PXI 1031-DC, un generador de forma de onda NI-5412 y un digitalizador NI-5102 de 8 bits y 20 MS/s, que se controlaba mediante un ordenador portátil a través de una NI-ExpressCard 8360. Se implementó una aplicación en Labview que permitía configurar y controlar el sistema PXI para la generación y adquisición de señales. La tensión proporcionada por el generador de forma de onda se elevaba a los niveles adecuados para la excitación del transductor con un amplificador de potencia 2100L de la serie 245 de Electronic Navigation Industries. El transductor utilizado era de tipo composite, el 200-28 CM de Simrad, con una frecuencia de trabajo de 200 kHz, una apertura del haz de 28° y un campo cercano inferior a 10 cm. El transductor se montó sobre una plataforma de tablero marino barnizado y se instaló en el centro de la jaula, sujetándolo a la estructura de PVC mediante bridas, como se puede apreciar en la Figura 6.1. Se colocó en superficie y dirigido verticalmente hacia abajo para la realización de las mediciones del aspecto dorsal del pez, y en el fondo de la jaula orientado hacia arriba para los registros ventrales. El pulso acústico transmitido tenía una duración de 60 μ s y un nivel de fuente de 201.5 dB, que equivale a una tensión de 111 V_{rms} en bornes del transductor. Se empleó una tasa de repetición de 5 pings por segundo. Se almacenaron series temporales de la señal de ecos registrada por el transductor correspondientes a una distancia de 3 m desde el transductor, muestreada a una frecuencia de 2 MS/s y una resolución vertical de 0.39 mV. Se grabaron datos durante aproximadamente 1 hora. La duración del pulso emitido era suficientemente corta como para discriminar blancos que

se encontraran separados al menos 4.5 cm. La elección del nivel de fuente aseguraba una buena relación señal a ruido y evitaba la aparición de efectos no lineales. La tasa de repetición del ping se vio limitada por el elevado volumen de datos a almacenar derivado del uso de una elevada frecuencia de muestreo para la digitalización de la señal de ecos. La frecuencia de muestreo elegida proporcionó una gran resolución espacial, que era aproximadamente de 0.375 mm.

La temperatura del agua fue medida a una profundidad de 1 m durante las mediciones acústicas para la determinación de la velocidad de propagación del sonido. Puesto que tan solo se realizaron registros durante una hora, se puede considerar que los cambios de temperatura en el intervalo de medida no fueron considerables.

Durante esta campaña también se realizó la medida del *TS* con una ecosonda EK60 de Simrad y un transductor split-beam ES200-7C, para una frecuencia de 200 kHz y una apertura de haz de 7°. En la Figura 6.1 se puede apreciar dos transductores montados en una plataforma de madera, el 200-28 CM (blanco) y el ES200-7C (naranja). Al igual que la medida de ecos con una elevada frecuencia de muestreo, se realizaron grabaciones con una duración de aproximadamente 1 hora para cada talla. Sin embargo, la brevedad de las mediciones no permitió registrar una cantidad suficiente de trazas para la obtención de resultados fiables.

6.1.2. PROCESADO DE DATOS

Las señales de ecos registradas fueron procesadas en Matlab. En primer lugar, con objeto de identificar los ecos procedentes de blancos individuales se realizó la correlación cruzada de la señal de ecos con el pulso transmitido, pues consigue mejorar notablemente la relación señal a ruido. La señal de ecos se puede entender como las reflexiones del pulso transmitido producidas en los diferentes obstáculos que ha ido encontrando en su trayectoria, a las que se le ha sumado ruido aleatorio. La correlación cruzada entre la señal de ecos y el pulso transmitido presentará un máximo en aquellos instantes temporales en los que se halle un eco y será prácticamente igual a cero donde tan solo se tenga ruido. El efecto de la correlación cruzada sobre la forma de onda de la señal de ecos fue muy similar al obtenido con un filtrado paso banda. El siguiente paso consistió en determinar la envolvente de la señal de ecos mediante el método de detección de máximos, y representarlas secuencialmente formando un ecograma clásico.

Mediante la visualización del ecograma se seleccionaron las trazas que correspondían a blancos individuales, excluyendo aquellas trazas que pudieran proceder de la superposición de ecos de dos o más peces situados a distancias similares del transductor. Cada una de las trazas detectadas se analizó de forma individual, examinando la evolución de la envolvente del eco a través de la traza. Se prestó atención a la aparición de patrones repetitivos en la envolvente del eco procedente de un pez individual, como

la aparición de múltiples picos que podían relacionarse con la detección de estructuras internas del cuerpo de la dorada.

Un análisis preliminar mostró la existencia de dos o incluso tres máximos locales en un elevado número de ecos, principalmente en los situados en la parte central de la traza que correspondían a las posiciones del pez más cercanas al eje acústico del transductor. La detección de múltiples picos dentro de un mismo eco fue posible gracias a la transmisión de pulsos muy cortos mediante transductores de gran ancho de banda, que permitían la generación de pulsos con una rápida atenuación de la cola de caída. En la forma de onda del eco representada en la Figura 6.3, que corresponde a la parte central de una traza procedente de un ejemplar individual registrada ventralmente para las doradas de mayor tamaño, se puede apreciar la existencia de tres máximos locales, revelando la capacidad de detectar diferentes interfases en el cuerpo del pez con un pulso de corta duración. Los múltiples picos registrados dentro de un mismo eco se debieron a las reflexiones originadas en el haz del transductor por un cambio de impedancia en el medio de transmisión. El máximo de mayor amplitud correspondía a la reflexión del pulso en la vejiga natatoria, pues la interfase carne-gas fue la que presentaba un mayor cambio de impedancia y, por tanto, la encargada de reflejar la mayor parte de la energía incidente. Los máximos anterior y posterior podían corresponder a las reflexiones producidas en el vientre y en el dorso del pez, respectivamente, cuando se situaba el transductor en el fondo de la jaula. La interfase agua-carne supuso un menor cambio de impedancia, proporcionando una menor cantidad de energía devuelta al transductor. En la representación de las señales de ecos en un ecograma clásico no ha resultado evidente la aparición de estos múltiples picos, pues la diferencia de amplitud entre ellos era elevada, siendo más acusado en la representación logarítmica. A partir de la medida de la diferencia de tiempo entre dos máximos locales se obtuvo la información relativa a la distancia entre las diferentes interfases del cuerpo del pez, que ha podido relacionarse con diferentes parámetros biométricos del pez como la longitud o la masa.

En algunas ocasiones fue imposible detectar más de un máximo dentro de un eco, pues las reflexiones de menor amplitud quedaban enmascaradas por la reflexión de mayor amplitud procedente de la vejiga. Esto se producía cuando los picos secundarios tenían una amplitud muy reducida en relación al pico principal o si se veía disminuida la separación entre picos, dependiendo de la relación entre la longitud del pulso y las dimensiones del pez, la orientación y la posición del pez dentro del haz.

En el análisis preliminar de los datos se observó que en la mayoría de ecos se producía un enmascaramiento del máximo anterior al pico de mayor amplitud procedente de la vejiga natatoria. Mientras que, el máximo posterior correspondiente a la interfase carne-agua se detectaba en una gran parte de los ecos centrales de las trazas, como se muestra en la Figura 6.4, donde se representa la evolución de la forma de onda del eco en función de su posición dentro de la traza para una traza detectada ventralmente correspondiente a las doradas de mayor tamaño. Este hecho sucedía tanto para las detecciones registradas ventral como dorsalmente.

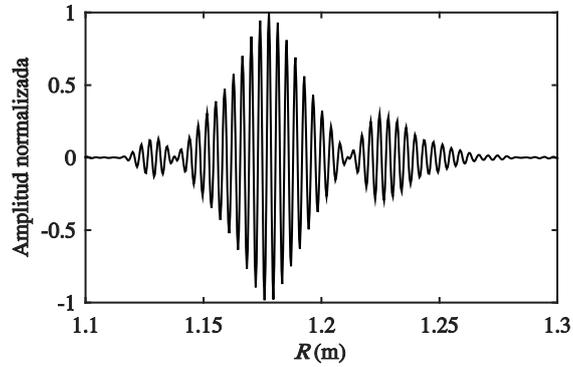


Figura 6.3. Forma de onda del eco correlada procedente de un pez situado en la parte central de una traza registrada de forma ventral para la mayor talla.

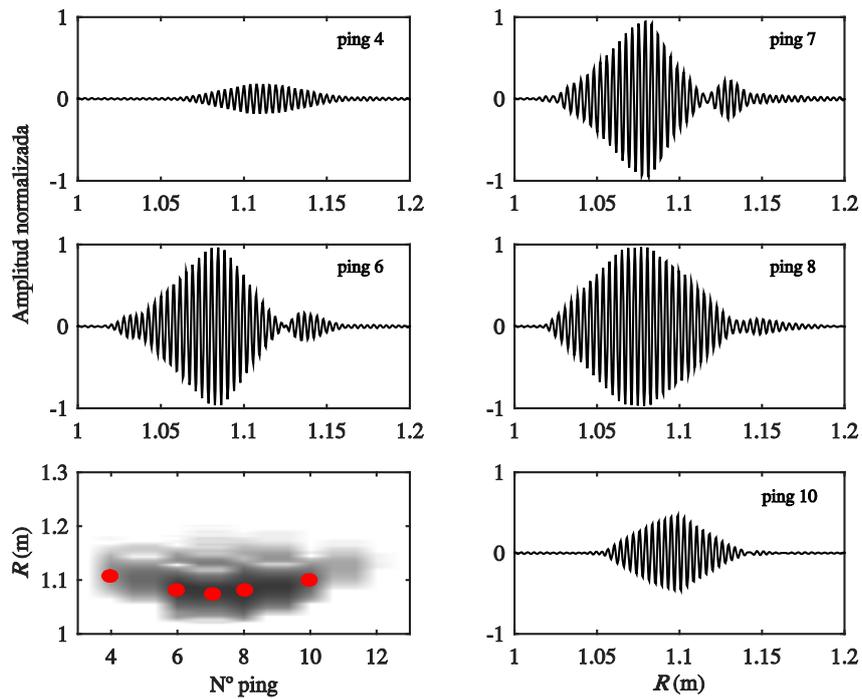


Figura 6.4. Evolución de la forma de onda correlacionada en función de su posición dentro de una traza registrada ventralmente. Bajo a la izquierda se muestra un zoom del ecograma donde aparece la traza, donde se indica con puntos rojos qué pings han sido representados.

Con el fin de simplificar el proceso de análisis y hacer más fácil su automatización, se estableció como referencia el eco de mayor amplitud como punto de referencia, y la diferencia temporal con respecto al siguiente máximo proporcionaba el dato para el cálculo de la distancia, suponiendo en una primera aproximación una velocidad del sonido en la carne igual a 1.025 veces la velocidad de propagación en el agua del mar.

Para cada eco formado por múltiples picos se determinó la distancia entre el valor máximo correspondiente a la reflexión en la vejiga y al pico posterior, asociado a la zona dorsal para los registros ventrales, y a la zona ventral para las grabaciones dorsales. A la distancia vertical determinada ventralmente se le ha denominado altura acústica ventral (AAV) y a la obtenida de forma dorsal altura acústica dorsal (AAD).

6.1.3. SIMULACIÓN NUMÉRICA

Con objeto de entender la superposición de las reflexiones producidas en las diferentes partes del cuerpo de la dorada, se ha implementado un modelo numérico mediante el método de elementos finitos en Comsol Multiphysics para simular la señal retrodispersada ventralmente por un modelo simplificado de la dorada.

Con el fin de minimizar el coste computacional del cálculo de la simulación, se definió el dispersor con un modelo 2D con simetría de revolución. El cuerpo de la dorada se esquematizó de forma simplificada como un elipsoide con propiedades acústicas de la carne del pez, donde se incrustaron dos esferas con propiedades de aire y hueso que corresponden a la vejiga natatoria y a la espina dorsal, respectivamente. Se definió el eje mayor de la elipse con una longitud de 8.5 cm y el eje menor de 3.5 cm, y a las esferas se les asignó un radio de 0.5 cm, en un intento de modelar una dorada de unos 290 g según la expresión obtenida en la Sección 4.2.1 y las proporciones de las estructuras observadas en la imagen de rayos X de la dorada (Figura 2.2). El elemento dispersor se definió dentro de un dominio de agua con forma rectangular, y tenía unas dimensiones de 1 m de largo por 4 cm de ancho. La fuente fue modelada como una línea perpendicular al eje mayor de la elipse y situada a una distancia de 0.95 m, simulando un pistón circular plano con un radio de 3.5 cm. En la Figura 6.5 se muestra la disposición de los diferentes elementos, donde se puede apreciar que se situó el pez en el eje de la fuente.

El medio de propagación presentaba propiedades de agua y a la vejiga natatoria se le confirió propiedades de aire. A la carne del pez se le asignó una velocidad de propagación y una densidad similares a la del agua, 1525 m/s y 1043 kg/m³, respectivamente, valores aproximados a los sugeridos en Gorska *et al.* (2005) y Fässler *et al.* (2009). A la espina dorsal se le aplicó una velocidad de 2273 m/s y una densidad de 1100 kg/m³.

Se definieron 4 modelos acústicos, cada uno de ellos con las propiedades del medio de propagación, la carne, la vejiga natatoria y la espina dorsal. Los límites del medio de

propagación se definieron como elementos radiantes con divergencia cilíndrica. Y la línea que se encargaba de generar la señal de excitación radiaba un pulso de iguales características a la señal empleada en el dispositivo experimental, con una frecuencia de 200 kHz y con una duración de 60 μ s.

Se configuró una malla con un tamaño mínimo igual a la longitud de onda dividida por 20, y un tamaño máximo igual a la longitud de onda dividida por 13, de forma que los resultados obtenidos no dependieran del tamaño de la malla. Puesto que el modelo se definió empleando 4 materiales diferentes, en cada uno de ellos el tamaño de malla era diferente. En la Figura 6.5 se muestra un detalle del mallado empleado.

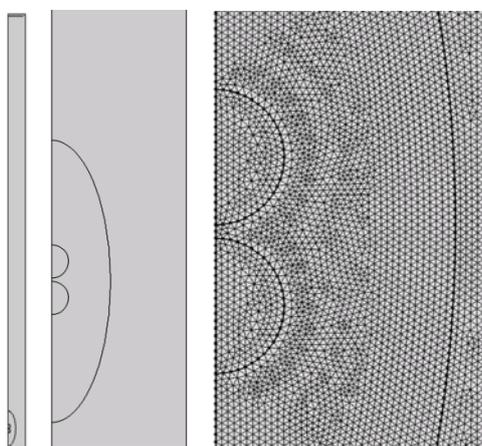


Figura 6.5. Geometría del modelo a la izquierda y detalle de la malla empleada a la derecha.

6.2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta Sección se muestran en primer lugar los resultados obtenidos de la simulación numérica, que en cierto modo avalan el método de medida empleado para determinar la altura acústica. A continuación se incluyen los resultados obtenidos a partir de los datos experimentales. Se han evaluado las distribuciones de probabilidad de los datos y su ajuste al modelo teórico de Valores Extremos Máximos. Además se ha estudiado la relación existente entre la masa y la media de las distribuciones, así como la relación entre la masa y los parámetros derivados de la distribución teórica.

6.2.1. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA

Empleando el esquema simplificado del cuerpo de la dorada descrito anteriormente, se ha conseguido simular un eco retrodispersado con una forma de onda muy similar a la del eco registrado experimentalmente para los peces de mayor tamaño, formada por la superposición de reflexiones en diferentes partes del cuerpo del pez.

Las simulaciones muestran la existencia de múltiples picos en el eco retrodispersado, con un pico de mayor amplitud en el centro y dos picos de menor amplitud a ambos extremos del máximo central. Ligeros cambios en la duración del pulso transmitido y en las posiciones de la espina y la vejiga natatoria afectan a la distancia entre máximos así como al enmascaramiento del primer máximo.

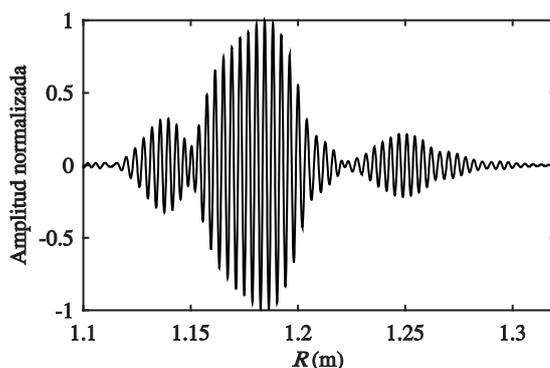


Figura 6.6. Forma de onda correlada obtenida mediante simulación del modelo 2D con simetría de revolución, correspondiente al eco de un pez situado en el eje acústico de la fuente para una traza registrada ventralmente.

En la Figura 6.6 se representa la forma de onda del eco correlado con la señal de excitación obtenida mediante simulación a una distancia de 63 cm del pez y a 32 cm de la fuente, cuando se sitúa el dispersor sobre el eje acústico de la fuente. Esta forma de onda simulada fue muy similar a la obtenida experimentalmente (Figura 6.3). Aunque los resultados de simulación en principio han resultado coherentes con los resultados obtenidos experimentalmente, estos se han visto influenciados por la disposición y el tamaño de las diferentes estructuras internas del pez del modelo empleado, e incluso por la longitud del pulso. Para obtener unos resultados de simulación más realistas será necesario obtener un modelo del cuerpo de la dorada en 3 dimensiones mediante técnicas de tomografía axial computarizada (TAC), que permita definir de forma exacta la anatomía de la dorada. No obstante, para poder resolver este modelo con un elevado grado de detalle será necesario disponer de una elevada potencia de computación.

6.2.2. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En los registros ventrales se ha observado un elevado número de trazas procedentes de peces aislados, formadas por ecos con una elevada relación señal a ruido. En cada traza ha sido posible diferenciar claramente en varios ecos con una reflexión de gran amplitud procedente de la vejiga natatoria y una reflexión posterior de menor amplitud correspondiente al área dorsal del pez, como se muestra en la representación de la forma de onda correlacionada de los pings 6 y 7 en la Figura 6.4. En algunas ocasiones se puede apreciar una reflexión anterior a la procedente de la vejiga asociada a la interfase de la zona ventral del pez (Figura 6.3), produciéndose con mayor frecuencia en los peces de gran tamaño, aunque aparece enmascarada en la mayor parte de los ecos detectados.

Las trazas detectadas dorsalmente presentaban una menor relación señal a ruido debido a que a 200 kHz la dorada presenta un poder dispersor menor dorsal que ventralmente, conforme lo observado en el Capítulo 4. El número de trazas registradas de forma dorsal fue mucho menor a las observadas ventralmente, y el número de ecos que presentan múltiples picos dentro de una traza también fue menor.

Se ha obtenido la distribución de valores de la *AAV* y la *AAD* en función de la talla a partir de la distancia de separación entre el pico de mayor amplitud y el máximo posterior para aquellos ecos con múltiples picos. Las distribuciones han quedado caracterizadas por el valor medio y la desviación típica. Se ha observado que las distribuciones de probabilidad obtenidas de forma experimental se ajustan al modelo de Valores Extremos Máximos, descrito en la Sección 4.2.4.4. En la Tabla 6.2 se recogen los resultados en función de la talla, para los registros ventrales en la parte superior y para los dorsales en la parte inferior. Se incluye el número de ecos detectados, la media y la desviación típica de los datos experimentales, los parámetros moda y escala del modelo de Valores Extremos Máximos ajustado, el p-valor del test de Kolmogorov-Smirnov, y la media y la desviación típica obtenidas a partir del modelo.

La altura acústica media oscila entre 5.26 y 5.85 para los registros ventrales, y entre 5.08 y 5.37 para las grabaciones ventrales, mientras que la altura máxima de los peces ensayados comprendía valores entre 6.9 y 8.3 cm según la expresión que relaciona la masa y la altura hallada en la Sección 4.2.1. Las distribuciones de la *AAV* presentan un rango de valores más amplio que la *AAD*, quedando reflejado en una mayor desviación típica de los datos. Para una clase dada el valor medio de la *AAV* es ligeramente mayor al de la *AAD*, y además se ha observado que la altura acústica obtenida ventralmente crece más rápidamente al aumentar la talla que las obtenidas de forma dorsal. No se ha apreciado una tendencia en el comportamiento de la desviación típica.

Tanto ventral como dorsalmente α_G , que coincide con la moda, presenta una tendencia creciente con la masa de los peces, mientras que β_G varía de forma aleatoria. Debido a que el p-valor es mayor o igual a 0.05 en todos los casos, excepto para los peces de 194.4 g medidos ventralmente, no se puede rechazar la idea de que *AAV* y *AAD* provengan de una distribución de Valores Extremos Máximos con un nivel de confianza del 95%. El

error en la estimación de la media a partir del modelo ajustado tan solo es del 0.67 % en el peor de los casos, mientras que el error cometido en la estimación de la desviación típica puede alcanzar valores de hasta el 27%.

Tabla 6.2. Masa media de los peces, número de ecos registrados, media y desviación típica de la AAV (en la parte superior) y la AAD (en la parte inferior) expresados en cm, moda y escala del modelo ajustado, p-valor del test de Kolmogorov-Smirnov, y media y desviación típica obtenidas a partir del modelo y error medio en la estimación de ambos expresado en %.

AAV											
Datos				Distribución Valores Extremos Máximos							
<i>M</i> (g)	<i>N</i> ^o ecos	μ	σ	α_G	β_G	<i>p</i> -valor	μ	σ	ERM(μ)	ERM(σ)	
158.8	101	5.2602	0.5577	5.0105	0.4218	0.0699	5.2539	0.5409	0.12	3.11	
178.7	117	5.3955	0.6985	5.0758	0.5553	0.2637	5.3963	0.7122	0.01	1.92	
194.4	156	5.5453	0.7608	5.2031	0.5474	0.0002	5.5190	0.7021	0.48	8.36	
235.7	40	5.7365	1.0308	5.2897	0.7111	0.1911	5.7001	0.9120	0.64	13.03	
268.7	102	5.8477	0.8392	5.4632	0.6317	0.3120	5.8278	0.8102	0.34	3.58	

AAD											
Datos				Distribución Valores Extremos Máximos							
<i>M</i> (g)	<i>N</i> ^o ecos	μ	σ	α_G	β_G	<i>p</i> -valor	μ	σ	ERM(μ)	ERM(σ)	
158.8	41	5.0803	0.4744	4.8483	0.4282	0.3721	5.0955	0.5492	0.30	13.62	
178.7	26	5.1383	0.3587	4.9757	0.2588	0.1175	5.1251	0.3319	0.26	8.07	
194.4	44	5.1783	0.4372	4.9868	0.3143	0.2135	5.1682	0.4041	0.20	8.19	
235.7	9	5.2854	0.3764	5.0904	0.4002	0.6896	5.3213	0.5132	0.67	26.66	
268.7	53	5.3722	0.7584	5.0620	0.4760	0.1139	5.3368	0.6106	0.66	24.21	

Se ha ajustado un modelo potencial a los datos de la masa de los peces frente al valor medio de los datos experimentales de la altura acústica. En la Tabla 6.3 se recogen los resultados obtenidos a partir de los registros ventrales y dorsales, se incluyen los parámetros *a* y *b*, el coeficiente de determinación, el p-valor, el error absoluto medio y el error relativo medio en la estimación de la masa.

Al igual que sucede con la masa y la altura de la dorada, la masa y la altura acústica guardan una relación de tipo potencial con un fuerte grado de correlación, según indica el coeficiente de determinación que se encuentra muy próximo a 1 y los p-valores que son muy inferiores a 0.05, por lo que se puede afirmar que existe una relación

estadísticamente significativa entre las dos variables con un nivel de confianza del 95% y el modelo potencial resulta adecuado para describir los datos experimentales observados.

Tabla 6.3. Resultados de los ajustes potenciales entre la masa expresada en g y el valor medio de la altura acústica ventral y dorsal expresada en cm.

Modelo	$M = a \cdot AAV^b$	$M = a \cdot AAD^b$
a	0.0495	$3.5358 \cdot 10^{-5}$
b	4.8545	9.4307
R^2	0.9850	0.9972
p -valor	0.0008	0.0001
EAM (g)	4.2996	1.9319
ERM (%)	2.0181	0.8984

En la Figura 6.7 se representa la relación entre la masa y el valor medio de la altura estimada acústicamente a partir de los registros ventrales y dorsales, así como el ajuste del modelo potencial a los datos experimentales. Se puede apreciar que el modelo potencial se ajusta fielmente a los datos.

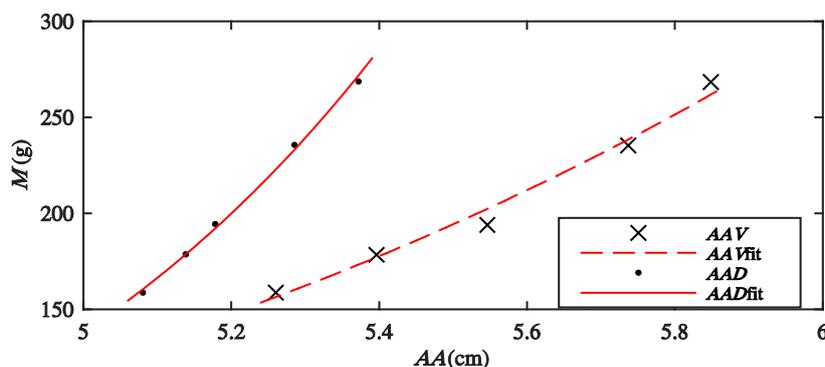


Figura 6.7. Relación potencial entre la masa y el valor medio de las distribuciones de la altura acústica, medida ventral y dorsalmente (Tabla 6.3).

En principio este método ha resultado eficiente para diferenciar pequeñas variaciones de la masa de la dorada a distancias muy próximas al transductor. Una variación de la masa de los peces produce mayores diferencias en la altura acústica obtenida a partir de los

registros ventrales, por lo que se podría considerar que la AAV resulta más adecuada para la estimación de la masa. Sin embargo, hay que tener en cuenta que el coeficiente de determinación es ligeramente menor al obtenido de forma dorsal y el error cometido en la estimación de la masa es del 2.0%, algo más del doble del obtenido dorsalmente. No obstante, el coeficiente de determinación es prácticamente 1 y se puede asumir que la incertidumbre asociada a la estima de la masa es muy reducida en ambos casos.

El hecho de que la altura acústica medida ventral y dorsalmente presente diferente tasa de crecimiento con la talla de los peces puede deberse a un crecimiento asimétrico de los peces, produciéndose un mayor desarrollo de la parte del cuerpo de la dorada situada por encima de la vejiga.

Se ha estudiado la relación entre la masa y los parámetros moda y escala, y la media y la desviación típica obtenidas a partir del modelo de Valores Extremos Máximos ajustado. En la Tabla 6.4 se resumen los resultados de los ajustes del modelo potencial para la moda y la media calculadas a partir de la distribución teórica, por ser las variables que proporcionan mejores resultados. Se ha elegido el modelo potencial por ser el que proporciona un mejor ajuste a los datos. No se ha encontrado un modelo que se ajuste bien al parámetro escala ni a la desviación típica.

Tabla 6.4. Resultados de los ajustes potenciales entre la masa expresada en g y el parámetro moda de la distribución de Valores Extremos Máximos y la media obtenida a partir del modelo. La masa se expresa en g, y la AAV y la AAD en cm.

Modelo	$M = a \cdot AAV^b$		$M = a \cdot AAD^b$	
	α_G	μ	α_G	μ
<i>a</i>	0.0088	0.0341	$1.9855 \cdot 10^{-5}$	$2.6586 \cdot 10^{-5}$
<i>b</i>	6.0934	5.0805	10.0403	9.6051
R^2	0.9703	0.9916	0.8094	0.9538
<i>p-valor</i>	0.0022	0.0003	0.0376	0.0043
<i>EAM</i> (g)	6.1741	2.7496	15.7641	8.3704
<i>ERM</i> (%)	2.9554	1.3365	7.3923	3.8663

Al ajustar los parámetros del modelo no se han obtenido mejoras significativas respecto a los ajustes de los estadísticos de los datos experimentales. Dorsalmente se reduce el coeficiente de determinación, aumenta el p-valor y aumenta el error relativo medio respecto al ajuste que proporciona la media de los datos. Y de forma ventral se ha logrado un ligera mejora del ajuste al emplear la media del modelo en lugar de la media de los

datos, ya que aumenta ligeramente el coeficiente de determinación y se reduce levemente el p-valor y el error relativo.

Cabe destacar que se han obtenido relaciones entre la masa y la altura acústica con un fuerte grado de correlación y una incertidumbre reducida tanto ventral como dorsalmente. La evaluación de un limitado número de ecos ha sido suficiente para lograr resultados precisos, a diferencia de los métodos clásicos basados en la medida del *TS* que requieren un mayor número de detecciones, con el consecuente aumento del tiempo de medida y de procesado.

6.3. CONCLUSIÓN

El análisis de la señal de ecos digitalizada con una frecuencia de muestreo elevada ha permitido obtener información biométrica directa del pez. Ha sido posible estimar la masa de la dorada a partir de la medida de la distancia entre los múltiples picos de un eco procedente de un único pez, tanto desde el aspecto ventral como del dorsal. Sin embargo, se ha obtenido una mayor cantidad de trazas, una mayor relación señal a ruido, y un mayor número de ecos con múltiples picos dentro de una misma traza en los registros ventrales.

Se ha observado que la masa de los peces posee una relación de tipo potencial con el valor medio de las distribuciones de la distancia entre picos con un fuerte grado de correlación. Esta metodología ha conseguido discriminar pequeñas diferencias en la talla de los peces con una reducida incertidumbre, por lo que podría considerarse una herramienta potencialmente eficiente para la monitorización del crecimiento, que permita una gestión más adecuada de las explotaciones piscícolas. Además las distribuciones de probabilidad de los datos experimentales se han ajustado al modelo teórico de Valores Extremos Máximos, por lo que pueden quedar descritas mediante tan solo dos parámetros.

Una gran ventaja de este método es que, además de que ha permitido determinar la talla a distancias comprendidas posiblemente dentro del campo cercano de los peces, no ha sido necesario calibrar el sistema electroacústico. Tan solo se ha requerido una frecuencia de muestreo elevada, asegurar una buena relación señal a ruido, y un cálculo preciso de la velocidad de propagación del sonido.

La resolución espacial que ha proporcionado la duración del pulso transmitido en este estudio ha sido bastante limitada, pues se encontraba próxima a las distancias a resolver para el tamaño de peces y la especie evaluados. No obstante, la resolución espacial puede mejorarse empleando pulsos de menor duración o señales tipo sweep (Ehrenberg & Torkelson, 2000). La nueva generación de ecosondas científicas incluye este tipo de señales de excitación, que permiten mantener una mayor resolución espacial y mejorar

la relación señal a ruido, pudiendo aplicarlas a todo el rango de tallas de peces que se maneja en una explotación acuícola.

Estudios futuros deberían estar dirigidos a la aplicación de esta técnica en una jaula en condiciones de producción, como las que se tiene en una explotación piscícola marina, donde existe una mayor densidad de peces y una mayor dispersión de tallas, y posiblemente diferentes distribuciones de las orientaciones de los peces. Conviene determinar si es posible la detección de ecos procedentes de blancos individuales empleando un transductor single-beam de gran apertura, o si resulta más conveniente el uso de haces más estrechos. También es interesante evaluar la capacidad del método para mejorar la diferenciación entre especies con ecosondas de una única frecuencia, basándose en criterios como la desviación típica de las distribuciones.

7

Detección acústica de la caída de pienso

El pienso puede representar más de la mitad del coste total de una explotación piscícola, por lo que una buena racionalización es indispensable para reducir el coste y el impacto ambiental. La cantidad de pienso sobrante supone un coste adicional, llegando en ocasiones a desperdiciarse hasta el 60% según la estrategia de alimentación empleada.

Se han desarrollado sistemas de alimentación automatizados que permiten minimizar los costes de producción y mejorar la calidad del producto, ya que permiten suministrar la cantidad de alimento necesaria para conseguir una tasa de crecimiento óptima. Sin embargo, el cálculo de la cantidad de alimento adecuada es una tarea complicada, pues depende de numerosos factores ambientales y fisiológicos como la temperatura del agua, la concentración de oxígeno, la calidad del agua, la edad de los ejemplares, el nivel de estrés, los ritmos endógenos, etc. El aporte de un exceso de alimento genera costes adicionales y disminuye la calidad del agua, pudiendo afectar de forma negativa al estado de los peces.

Para optimizar la gestión del proceso de alimentación es necesario disponer de una serie de sensores que proporcionen una señal de alarma que permita continuar o detener el suministro de pienso en función del apetito de los peces. Se han desarrollado algunos métodos basados en el uso de ecosondas o cámaras subacuáticas que detectan la caída del pienso sobrante. Acker *et al.* (2002) emplearon una ecosonda single-beam de Biosonics para la detección de la caída de pienso por debajo de una jaula. Colocaron en el centro de la jaula, por debajo de la red, un transductor con una frecuencia de 200 kHz, una apertura a -3 dB de 6° y con lóbulos laterales inferiores a -30 dB, montado sobre un

eje de rotación con el haz orientado horizontalmente. Observaron que durante el proceso de alimentación una gran cantidad de peces en libertad eran atraídos por la caída del pienso. En ausencia de estos peces fueron capaces de detectar e incluso cuantificar la caída de pienso mediante ecointegración. Sin embargo, la presencia de estos peces durante la alimentación no impedía la detección de la caída del pienso, pero hacía inviable la cuantificación del pienso desperdiciado. Algunos autores (Foster *et al.*, 1995; Ang & Petrell, 1997; Parsonage & Petrell, 2003) sugieren el uso de cámaras subacuáticas y el procesado de imagen para la detección e incluso la cuantificación del pienso sobrante suministrado en jaulas marinas, ya sea con cámaras orientadas hacia el fondo o la superficie. Sin embargo, los sistemas de cámaras se ven limitados por diversos factores como la turbidez del agua, la luminosidad o el alcance máximo, que afectan notablemente a la calidad de la imagen. Los sistemas acústicos, además de ser capaces de detectar la caída del pienso, permiten monitorizar el comportamiento de los peces, pudiendo incluso relacionarlo con el estado de saciedad de los peces. La dorada cuando se encuentra hambrienta sube a la superficie durante el suministro de alimento formando una capa muy densa, mientras que cuando se halla saciada desciende a mayores profundidades. En caso de que el transductor esté situado por debajo del fondo de la jaula, la aparición de una gran cantidad de peces en las inmediaciones de la jaula puede indicar la aparición del pienso sobrante por debajo de la jaula. Mediante el uso de ecosondas es posible realizar de forma simultánea la estimación de la biomasa de peces y la detección de la caída del pienso sobrante. La instalación del transductor en el interior de la jaula puede salvar la problemática que tuvieron Acker *et al.* (2002), pues se evita la detección de blancos indeseados. Para discriminar de forma eficaz los ecos procedentes de los peces y el pienso es preciso conocer las propiedades acústicas de ambos. Por ello es importante estudiar las distribuciones del *TS* del pienso utilizado en una explotación dada en función de su calibre, pues la composición, la forma o la extrusión del pienso pueden afectar a los valores del *TS* detectados. La distribución del *TS* de los peces puede conocerse de antemano como se sugiere en el Capítulo 5. El estudio del comportamiento del cardumen junto con la detección de pienso en el fondo de la jaula pueden proporcionar una señal de alarma que indique al sistema de alimentación cuando ha de finalizar el suministro.

El objetivo de este trabajo es la caracterización acústica del pienso mediante la medida del *TS*, que permitirá en un futuro detectar e identificar la caída del pienso sobrante al fondo de una jaula de piscifactoría para la generación de una señal de alarma capaz de controlar el sistema de alimentación.

7.1. MATERIALES Y MÉTODOS

Las mediciones acústicas se realizaron con una ecosonda EK60 split-beam en el interior de una pequeña jaula experimental situada en el Puerto de Gandia, durante el mes de mayo de 2011. La jaula se instaló en el noray 29, frente al tinglado nº 15 de muelle

frutero, y presentaba una diámetro de 3 m y una altura de 2.7 m. Se utilizó un transductor ES200-7C, con una frecuencia de 200 kHz y una apertura de 7°, que se instaló en el centro del fondo de la jaula orientado verticalmente hacía la superficie. La jaula se describe con más detalle en la Sección 6.1.1.

Se estudiaron 3 calibres diferentes de pienso de 4, 6 y 7 mm. El pienso fue lanzado poco a poco al centro de la jaula para garantizar la detección de ecos procedentes de granos de pienso individuales, y mientras tanto se registraba la señal de ecos con la ecosonda. En una jaula de piscifactoría el pienso se arroja en mayores cantidades y al hundirse va disminuyendo el número de granos por volumen debido la dispersión del pienso por las diferentes trayectorias seguidas por los granos y las diferentes velocidades de caída. De esta forma se ha intentado simular la situación que se tendría en el fondo de una jaula de piscifactoría arrojando el pienso poco a poco.

Se utilizó un nivel de fuente de 217.2 dB (equivalente a una potencia eléctrica de transmisión de 90 W), el pulso más corto que se puede configurar con una duración de 64 μ s, y un intervalo entre pings de 25 ms.

Se midió la temperatura del agua a mitad de la altura de la jaula, siendo de 19.2°C. Para el cálculo de la velocidad de propagación del sonido y el coeficiente de absorción se empleó una salinidad de 36 ppm y un pH de 8.

Antes de comenzar las grabaciones se calibró el sistema acústico siguiendo las indicaciones de la Sección 4.2.2.

Se grabaron datos durante 20 minutos para cada calibre de pienso, que se almacenaron en formato .RAW en el ordenador. Los ficheros fueron procesados y analizados en Sonar5 Pro y Matlab. Se consideraron ecos procedentes de blancos individuales aquellos que cumplieran los siguientes criterios,

Tabla 7.1. Parámetros del detector de ecos individuales empleados en Sonar5-Pro.

<i>Parámetros</i>	<i>Valor</i>
<i>TS_{min}</i> (dB)	-70
<i>mLE</i>	0.5
<i>MLE</i>	2.0
<i>MDF</i> (°)	1.0
<i>MCG</i> (dB)	12
<i>SMP</i>	medium

La capa de análisis se restringió a distancias comprendidas entre 0.5 y 2.35 m, limitadas por la distancia al campo lejano del transductor y la detección de la superficie, respectivamente. Se utilizó la herramienta *Advanced MTT* de Sonar5 para la detección de las trazas del pienso, aunque aplicando un método ligeramente diferente al empleado para definir la trayectoria de los peces descrito en la Sección 4.1.2.2. Una consecución de ecos se aceptó como una traza válida si poseía una longitud de al menos 75 ecos, con un máximo de 2 pings consecutivos perdidos. La definición de trazas largas aseguraba que las detecciones procedían de blancos aislados y evitaba los ecos de agrupaciones muy densas que puedan falsear las mediciones. Se empleó una ventana de 3 cm, y 3° en las direcciones longitudinal y transversal para la predicción de la traza. Se configuró una ponderación de 50 para el número de ping, 10 para la distancia, y 1 para los ángulos y el *TS*. Se empleó un algoritmo de predicción *Alpha Beta*, con alfa y beta igual a 0.5, ya que detectaba más fielmente las trayectorias rectilíneas de caída del pienso. En ocasiones el pienso al descender liberaba pequeñas burbujas de agua, que fueron detectadas por la ecosonda como pequeños blancos que ascendían a la superficie con una trayectoria también rectilínea, pero con un *TS* menor. El criterio de la distancia recorrida en la dirección *Z* (profundidad) entre el primer y el último eco que forman la traza permitió eliminar de forma eficiente las trazas procedentes de las pequeñas burbujas de agua. Las trazas correspondientes al pienso presentaban distancias recorridas negativas y las trazas de las burbujas tenían distancias positivas. Las trazas almacenadas en *fish baskets* fueron exportadas a un fichero de texto.

Se muestra un ecograma de ejemplo en la Figura 7.1, registrado para el pienso de menor calibre. La distancia mínima incluida en el análisis del *TS* corresponde a la distancia a campo lejano del transductor calculada por Sonar5 y representada mediante una línea naranja. La máxima distancia se muestra con una línea roja y se define mediante el detector de fondos. Arriba se representa el ecograma de la envolvente del eco (*Amp*) y abajo el ecograma con las detecciones de ecos procedentes de blancos aislados (*SED*), sobre el cual se aplica el detector de trazas. Las detecciones de pienso corresponden a las líneas descendentes en el tiempo. También se puede apreciar líneas ascendentes que corresponden a pequeñas burbujas de gas liberadas por el pienso al sumergirse.

En Matlab se importó el contenido de las *fish baskets* y se obtuvo la distribución de probabilidad del *TS* y el *TSu* máximo de las trazas. A partir del valor medio de las distribuciones se halló la relación entre el *TS* y el logaritmo en base 10 del calibre del pienso mediante un ajuste por mínimos cuadrados.

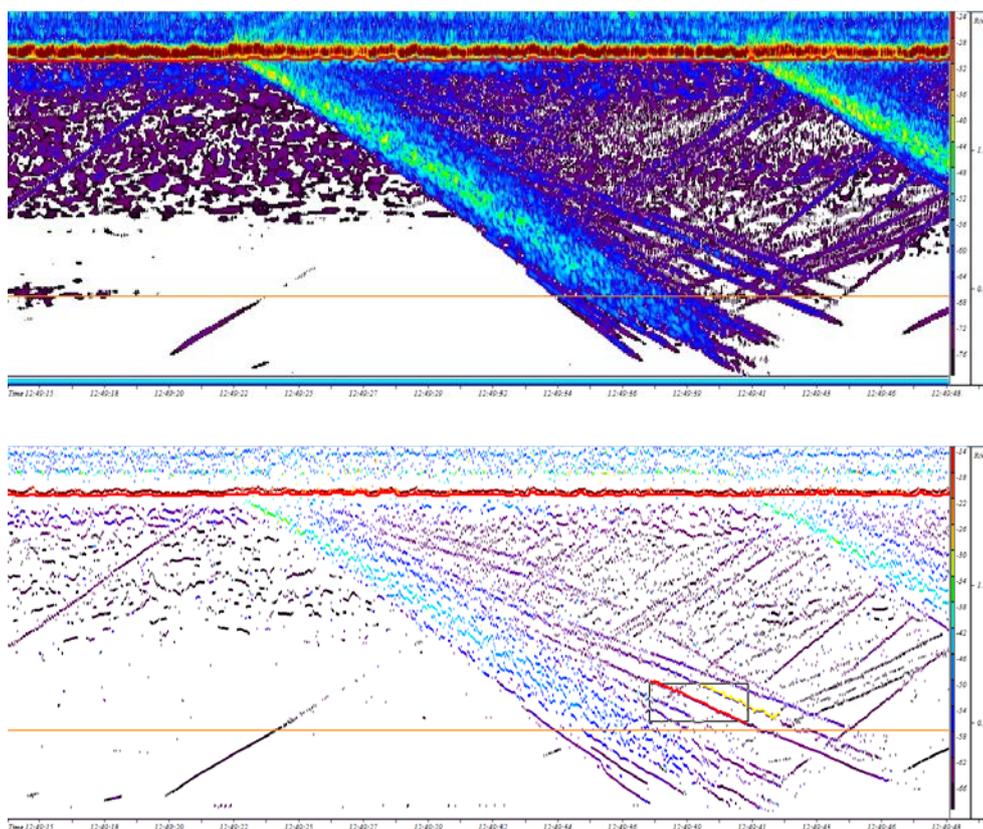


Figura 7.1. Ejemplo de ecograma registrado para el pienso de 4 mm. La línea naranja corresponde a la mínima distancia incluida en el análisis y la línea roja a la distancia máxima. Arriba se muestra el ecograma de la envolvente del eco (*Amp*) y abajo el ecograma de detecciones individuales (*SED*), donde se puede apreciar en rojo la detección de una traza.

7.2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta Sección se muestran los resultados de la medida del *TS* para 3 calibres de pienso. Se incluyen la densidad de probabilidad del *TS* de cada uno de los calibres ensayados y el ajuste lineal de la media de las distribuciones frente al logaritmo en base 10 del calibre.

En la

Tabla 7.2 se resumen los resultados del análisis del *TS* en función del calibre del pienso. Se muestran el número de trazas detectadas, la longitud media de las trazas, y la media y la desviación típica de las distribuciones del valor máximo del *TS* y el *TSu* de las trazas.

Tabla 7.2. Número de trazas detectadas, longitud media de la traza medida en número de ecos, y media y desviación típica del TS y TSu máximo de las trazas en función del calibre del pienso.

Calibre (mm)	Nº trazas	Long traza media		$TS_{Máx}$ (dB)		$TSu_{Máx}$ (dB)	
		(nº ecos)		μ	σ	μ	σ
4	33	95.06		-53.11	4.43	-57.78	3.59
6	39	120.08		-49.37	4.10	-51.94	5.29
7	38	151.16		-45.51	4.59	-48.60	5.40

El número de trazas registrado durante el intervalo de medida fue reducido. No obstante, la longitud de las trazas medida en número de ecos detectados es elevada, debido al lento descenso de los granos de pienso y a la escasa variación angular de estos durante su trayectoria descendente.

Se ha observado que el valor medio de las distribuciones del TS y el TSu máximos de las trazas crece con el calibre del pienso. Sin embargo, no se aprecia una tendencia en la desviación típica de las distribuciones, posiblemente debido al reducido número de trazas detectadas. En la Figura 7.2 se representa la densidad de probabilidad del TS máximo de las trazas para los tres calibres ensayados. Se han registrado valores del TS bastante inferiores a los obtenidos para la dorada, aun incluso para las tallas más pequeñas. Por tanto, la detección simultánea de ecos de doradas y de pienso podría producir distribuciones con dos modas claramente diferenciadas.

En la Tabla 7.3 se resumen los parámetros del ajuste lineal del valor medio del TS frente al logaritmo del calibre C obtenidos para el TS y el TSu máximos de las trazas.

Para los dos estadísticos evaluados la media de las distribuciones proporciona buenos ajustes, a pesar del reducido número de trazas registradas.

La pendiente resultante para el TS es próxima a 30, siendo superior a la pendiente lograda por Acker *et al.* (2002) que resultó próxima a 20, mientras que el TSu presenta una pendiente aun mayor. Este comportamiento es diferente al observado con la dorada, donde el valor de la pendiente de ambos ajustes era más similar.

El coeficiente de determinación indica que existe una correlación relativamente fuerte entre las variables dependiente e independiente, tanto para el TS como para el TSu . El p-valor superior a 0.05 indica que la relación entre el TS y el TSu frente al logaritmo del calibre no es estadísticamente significativa con un nivel de confianza del 95%, aunque el error medio cometido es relativamente bajo.

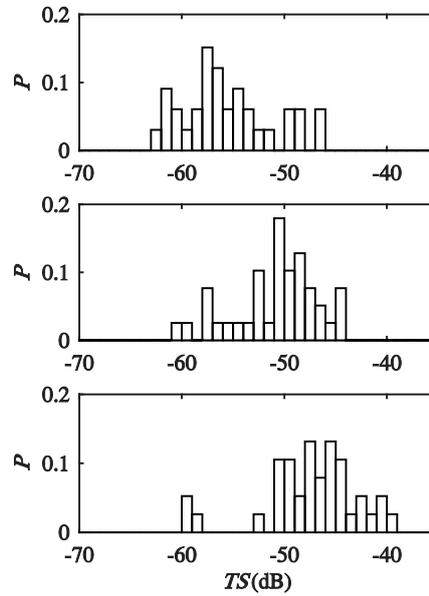


Figura 7.2. Densidad de probabilidad del TS máximo de las trazas a una frecuencia de 200 kHz para los calibres de 4, 6 y 7 mm. Las trazas tienen una longitud mínima de 75 ecos, y están formadas por ecos con una LE entre 0.5 y 2m, una MDF de 1° , y una MCG de 12 dB.

Tabla 7.3. Resultados del ajuste lineal de la media de las distribuciones del TS y el TSu máximos de las trazas frente al logaritmo del calibre del pienso para una frecuencia de 200 kHz. Las trazas tienen una longitud mínima de 75 ecos, y están formadas por ecos con una LE entre 0.5 y 2m, una MDF de 1° , y una MCG de 12 dB.

<i>Modelo</i>	$TS(dB) = a \cdot \log C(cm) + b$	
<i>Estadístico Traza</i>	$TS_{Máx}$	$TSu_{Máx}$
<i>a</i>	29.2137	36.8294
<i>b</i>	-41.7836	-43.2628
R^2	0.9327	0.9904
<i>p-valor</i>	0.1671	0.0623
<i>EAM</i> (dB)	0.7343	0.3384
<i>ERM</i> (%)	1.5245	0.6598

El p-valor del ajuste se corresponde con el p-valor de la pendiente, por lo que la inserción de nuevos puntos en el ajuste tal vez que afecte en mayor medida al valor de la pendiente que al valor de la ordenada en el origen. Tanto el coeficiente de determinación, como el p-valor y el error medio indican que el grado de correlación obtenido para el TS_u es mayor que para el TS .

Se representa en la Figura 7.3 el valor medio de la distribución del TS máximo de las trazas frente al logaritmo en base 10 del calibre expresado en cm cuando se detectan trazas con una longitud mínima de 75 ecos, formadas por ecos con una LE entre 0.5 y 2m, una MDF de 1°, y una MCG de 12 dB.

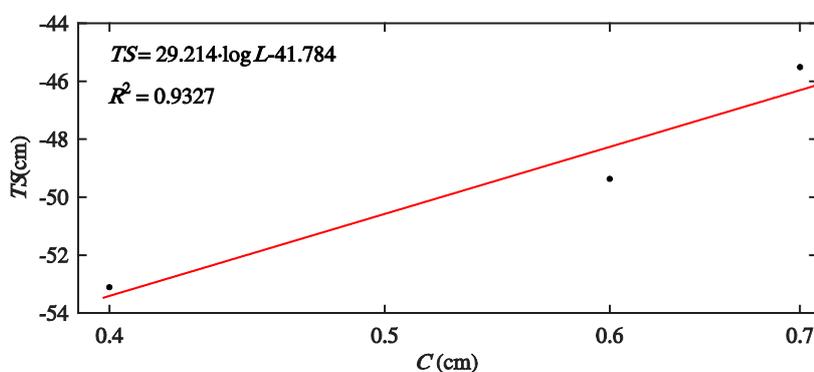


Figura 7.3. Relación lineal entre la media del TS máximo de las trazas y el logaritmo en base 10 del calibre para una frecuencia de 200 kHz. Las trazas tienen una longitud mínima de 75 ecos, y están formadas por ecos con una LE entre 0.5 y 2m, una MDF de 1° y una MCG de 12 dB.

Gráficamente se puede apreciar la existencia de una relación lineal relativamente fuerte entre el TS máximo de las trazas y el logaritmo del calibre del pienso.

El TS del pienso y su dependencia con el calibre pueden verse afectados por diversos factores como la composición de los granos, su geometría, el estado de hidratación, el contenido en gases, etc. Será necesario obtener la relación entre el TS y el calibre para cada tipo de pienso de forma que permanezcan invariables la composición y la geometría de los granos. Aun así los valores de TS registrados pueden depender del grado de hidratación del pienso, que a su vez puede verse alterado respecto a los valores de fabricación debido a las condiciones ambientales y de almacenaje o por la forma de dispensar los granos, ya que en ocasiones se realiza en una tolva con agua. El contenido en gases también puede afectar al TS registrado, y puede variar según el factor de compacidad de los granos o por la emanación de gases debido a procesos de fermentación. Por todos estos motivos será conveniente establecer la dependencia del TS con el calibre del pienso para cada granja, ya que puede diferir de un proveedor a otro y

según el modo de suministrarlo, e incluso evaluar la influencia de los diferentes factores en los resultados obtenidos.

7.3. CONCLUSIÓN

La identificación de trazas procedentes del pienso ha podido realizarse acústicamente de forma satisfactoria mediante un procesado tradicional para la detección de ecos y formación de trazas de peces, sin tener que recurrir a la identificación de patrones en el ecograma mediante el procesado de imagen que complique el análisis de los datos y requiera un mayor coste computacional.

Aunque el número de trazas registradas ha sido reducido el valor medio de las distribuciones ha proporcionado buenos resultados tanto para el *TS* como para el *TSu*, obteniendo una correlación ligeramente superior para el *TSu*.

Resulta viable la identificación simultánea de trazas procedentes de peces y pienso debido a que el *TS* del pienso obtenido es significativamente inferior al de la dorada. El conocimiento de la distribución del *TS* del calibre suministrado permitirá determinar si la aparición de distribuciones bimodales es debida a la detección de la caída del pienso, comparando la moda y el rango de valores esperados con los registrados *in situ*. En caso de detectar distribuciones bimodales y comprobar que el modo de menor valor se debe a la detección de la caída del pienso al fondo de la jaula, se puede concluir que los peces se encuentran saciados. Esto puede verse respaldado por un estudio de la distribución de los peces a través de la profundidad de la jaula. Por ejemplo, la dorada se condensa en la capa superficial cuando se encuentra hambrienta durante el suministro de pienso. Por tanto, una elevación del banco sugerirá que los peces se encuentran hambrientos, y la dispersión de peces a lo través de toda la columna durante el suministro de alimento indicará que ya se encuentran saciados.

La colocación del transductor en el interior de la jaula puede evitar la problemática encontrada por Acker *et al.* (2002) de detección de especies no deseadas, pues dentro de la jaula tan solo será posible detectar la especie de interés y la caída del pienso.

La simple detección de caída del pienso al fondo de la jaula puede emplearse como señal de alarma para detener el suministro, sin ser necesaria la cuantificación del exceso de pienso.

Conclusiones

A lo largo de esta tesis se ha podido comprobar que las técnicas acústicas pueden resultar herramientas muy útiles para la estimación de biomasa de peces en jaulas marinas, la monitorización del comportamiento del banco, e incluso para la generación de una señal de alarma que avise de la caída de pienso al fondo de la jaula.

Resulta viable la estimación de la talla a cortas distancias mediante los dos métodos evaluados: el análisis del *TS* y la medida de la diferencia del tiempo de vuelo entre de las reflexiones producidas en diferentes partes del cuerpo del pez.

Mediante el uso de ecosondas científicas se han conseguido relaciones entre el *TS* y la talla de los peces con un fuerte grado de correlación e incertidumbres aceptables tanto ventral como dorsalmente. La experiencia se llevó a cabo en una jaula a escala con una densidad muy reducida que favorecía la detección de peces aislados. De igual modo se han obtenido resultados favorables en jaulas de lubina en condiciones de producción a 123 y 201 kHz, donde ha sido posible detectar dorsalmente trazas de ejemplares individuales situados por encima del denso cardumen, aunque de forma escasa. En esta ocasión la incertidumbre ha sido aceptable a 201 kHz, y algo mayor a 123 kHz.

Se ha podido comprobar que la medida de la diferencia de tiempo de llegada de las reflexiones producidas en diferentes estructuras de la dorada proporciona una buena estimación de su talla, con incertidumbres asociadas a la estimación de la masa menores a las obtenidas mediante la evaluación del *TS*. De esta forma se consigue sortear la problemática asociada a la medida del *TS* a cortas distancias y no se precisa la calibración

del sistema. Parece ser que la configuración ventral resulta la más idónea, pues ha conseguido estimaciones de la talla más precisas, se observado una mejor relación señal a ruido, y se registrado un mayor número de trazas y una mayor cantidad de ecos con múltiples picos.

De igual modo, se ha conseguido estimar la abundancia a partir de la integral de energía en el haz del transductor. Aunque en algunas condiciones se han conseguido incertidumbres reducidas, resulta conveniente la realización de nuevos estudios que permitan mejorar la precisión. Aun así se han establecido unas directrices para definir el momento idóneo para la estimación del número de peces. Parece ser que durante la noche se suelen dar las condiciones más adecuadas debido a que la distribución vertical de los peces es más uniforme, y la variación de la densidad y la incertidumbre en la estimación de la abundancia es menor.

Por estos motivos, las ecosondas científicas pueden resultar una herramienta muy útil para la estimación de biomasa en granjas marinas de peces, tanto para la estimación del tamaño como de la abundancia, a pesar de la incertidumbre en la medida asociada a la proximidad entre el transductor y los peces. Sin embargo, el elevado precio de las ecosondas científicas comercializadas es un factor limitante para su aplicación en piscifactorías. El desarrollo de tecnología más económica o el uso de ecosondas single-beam podría abaratar en gran medida el coste de instalación de los equipos en jaulas, facilitando así su instalación en jaulas marinas. Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, el uso de transductores single-beam podría ser adecuado para la estimación de la talla mediante el análisis clásico del *TS* o a partir del estudio de la forma de onda. De igual modo la implementación de sistemas con una gran capacidad de autonomía facilita la aplicación de estos sistemas en granjas marinas, donde la disponibilidad de energía es limitada.

Referencias

- Acker, T., Burczynski, J., Hedgepeth, J., Ebrahim, A., 2002. Digital Scanning Sonar for Fish Feeding Monitoring in Aquaculture. *R/OLJ Seattle: Biosonics Inc.*, [Http://Www.Biosonic Sinc.Com](http://www.biosonic.com).
- Ang, K., Petrell, R., 1997. Control of Feed Dispensation in Seacages using Underwater Video Monitoring: Effects on Growth and Food Conversion. *Aquacult.Eng.*, vol. 16, no. 1, pp. 45-62.
- Balk, H., Lindem, T., 2011. *Sonar4 and Sonar5-Pro Post Processing Systems. Operator Manual Version 6.0.2*. Oslo, Norway: .
- Biosonics Inc., 2010. *Visual Acquisition Version 6.0.1: User Guide*.
- Boulineau-Coatanea, F., 1969. Régime Alimentaire Du Bar Dicentrarchus Labrax (Serranidae) Sur La Côte Atlantique Bretonne. *Bulletin Du Muséum National d'Histoire Naturelle*, vol. 41, pp. 1106-1122.
- Burwen, D.L., Fleischman, S.J., Miller, J.D., Jensen, M.E., 2003. Time-Based Signal Characteristics as Predictors of Fish Size and Species for a Side-Looking Hydroacoustic Application in a River. *ICES Journal of Marine Science: Journal Du Conseil*, vol. 60, no. 3, pp. 662-668.
- Burwen, D.L., Neilson, P.A., Fleischman, S.J., Mulligan, T.J., Horne, J.K., 2007. The Complexity of Narrowband Echo Envelopes as a Function of Fish Side-Aspect Angle. *ICES Journal of Marine Science: Journal Du Conseil*, vol. 64, no. 5, pp. 1066-1074.
- Calise, L., 2009. *Multifrequency Acoustic Target Strength of Northern Krill*. The University of Bergen.

Clay, C., Heist, B.G., 1984. Acoustic Scattering by fish—Acoustic Models and a Two . *J.Acoust.Soc.Am.*, vol. 75, no. 4, pp. 1077-1083.

Dahl, P., Mathisen, O., 1983. Measurement of Fish Target Strength and Associated Directivity at High Frequencies. *J.Acoust.Soc.Am.*, vol. 73, no. 4, pp. 1205-1211.

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. *Aquat.Living Resour.*, vol. 13, no. 05, pp. 291-295.

Del Grosso, V.A., 1974. New Equation for the Speed of Sound in Natural Waters (with Comparisons to Other Equations). *J.Acoust.Soc.Am.*, vol. 56, no. 4, pp. 1084-1091.

Demer, D.A., Renfree, J.S., 2008. Variations in Echosounder–transducer Performance with Water Temperature. *ICES Journal of Marine Science: Journal Du Conseil*, vol. 65, no. 6, pp. 1021-1035.

Ehrenberg, J., Carlson, T., Traynor, J., Williamson, N., 1981. Indirect Measurement of the Mean Acoustic Backscattering Cross Section of Fish. *J.Acoust.Soc.Am.*, vol. 69, no. 4, pp. 955-962.

Ehrenberg, J.E., Torkelson, T.C., 2000. FM Slide (Chirp) Signals: A Technique for significantly Improving the Signal-to-Noise Performance in Hydroacoustic Assessment Systems. *Fisheries Research*, vol. 47, no. 2, pp. 193-199.

FAO., 2015. *Departamento De Pesca Y Acuicultura*. Available from: <http://www.fao.org/fishery/es>.

Fässler, S.M., Brierley, A.S., Fernandes, P.G., 2009. A Bayesian Approach to Estimating Target Strength. *ICES Journal of Marine Science: Journal Du Conseil*.

Fleischman, S.J., Burwen, D.L., 2003. Mixture Models for the Species Apportionment of Hydroacoustic Data, with Echo-Envelope Length as the Discriminatory Variable. *ICES Journal of Marine Science: Journal Du Conseil*, vol. 60, no. 3, pp. 592-598.

Fleischman, S.J., Burwen, D.L., 2000. Correcting for Position-Related Bias in Estimates of the Acoustic Backscattering Cross-Section. *Aquat.Living Resour.*, vol. 13, no. 05, pp. 283-290.

- Foote, K.G., 1982. Optimizing Copper Spheres for Precision Calibration of Hydroacoustic Equipment. *J.Acoust.Soc.Am.*, vol. 71, no. 3, pp. 742-747.
- Foote, K.G., MacLennan, D.N., 1984. Comparison of Copper and Tungsten Carbide Calibration Spheres. *J.Acoust.Soc.Am.*, vol. 75, no. 2, pp. 612-616.
- Foote, K., Knudsen, H., Vestnes, G., MacLennan, D., Simmonds, E., 1987. *Calibration of Acoustic Instruments for Fish Density Estimation: A Practical Guide*. International Council for the Exploration of the Sea.
- Foster, M., Petrell, R., Ito, M., Ward, R., 1995. Detection and Counting of Uneaten Food Pellets in a Sea Cage using Image Analysis. *Aquacult.Eng.*, vol. 14, no. 3, pp. 251-269.
- Francois, R., Garrison, G., 1982. Sound Absorption Based on Ocean Measurements. Part II: Boric Acid Contribution and Equation for Total Absorption. *J.Acoust.Soc.Am.*, vol. 72, no. 6, pp. 1879-1890.
- Furusawa, M., Hamada, M., Aoyama, C., 1999. Near Range Errors in Sound Scattering Measurements of Fish. *Fisheries Science: FS*, vol. 65, no. 1, pp. 109-116.
- García, B., 1995. *Influencia De La Reproducción Sobre El Crecimiento Y calidad De La Dorada (Sparus Aurata) En El Engorde Intensivo. Proyecto De Investigación Del Plan Nacional De Cultivos Marinos. Ministerio De Agricultura, Pesca Y Alimentación. Consejería de Medio Ambiente, Agricultura y Agua en la Región de Murcia ed., .*
- Gorska, N., Ona, E., Korneliussen, R., 2005. Acoustic Backscattering by Atlantic Mackerel as being Representative of Fish that Lack a Swimbladder. Backscattering by Individual Fish. *ICES Journal of Marine Science: Journal Du Conseil*, vol. 62, no. 5, pp. 984-995.
- Johannesson, K., Mitson, R., 1983. *Fisheries Acoustics: A Practical Manual for Aquatic Biomass Estimation*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Jones, R., Petrell, R., Pauly, D., 1999. Using Modified Length–weight Relationships to Assess the Condition of Fish. *Aquacult.Eng.*, vol. 20, no. 4, pp. 261-276.
- Jørgensen, R., 2004. *The Effects of Behaviour on the Acoustic Target Strength of Capelin (Mallotus Villosus) and Implication for Acoustic Abundance Estimation*. University of Tromsø, Norway.

Jørgensen, R., Olsen, K., 2002. Acoustic Target Strength of Capelin Measured by Single-Target Tracking in a Controlled Cage Experiment. *ICES Journal of Marine Science: Journal Du Conseil*, vol. 59, no. 5, pp. 1081-1085.

Kang, D., Hwang, D., 2003. Ex Situ Target Strength of Rockfish (*Sebastes Schlegeli*) and Red Sea Bream (*Pagrus Major*) in the Northwest Pacific. *ICES Journal of Marine Science: Journal Du Conseil*, vol. 60, no. 3, pp. 538-543.

Kang, D., Sadayasu, K., Mukai, T., Iida, K., Hwang, D., Sawada, K., Miyashita, K., 2004. Target Strength Estimation of Black Porgy *Acanthopagrus Schlegeli* using Acoustic Measurements and a Scattering Model. *Fisheries Science*, vol. 70, no. 5, pp. 819-828.

Kieser, R., Mulligan, T., Ehrenberg, J., 2000. Observation and Explanation of Systematic Split-Beam Angle Measurement Errors. *Aquat.Living Resour.*, vol. 13, no. 05, pp. 275-281.

Kinsler, L.E., Frey, A.R., Coppens, A.B., Sanders, J.V., 1999. *Fundamentals of Acoustics*. John Wiley & Sons ed., 4th ed.

Knudsen, F., Fosseidengen, J., Oppedal, F., Karlsen, Ø, Ona, E., 2004. Hydroacoustic Monitoring of Fish in Sea Cages: Target Strength (TS) Measurements on Atlantic Salmon (< i> *Salmo Salar*). *Fisheries Research*, vol. 69, no. 2, pp. 205-209.

Korneliussen, R.J., Diner, N., Ona, E., Berger, L., Fernandes, P.G., 2008. Proposals for the Collection of Multifrequency Acoustic Data. *ICES Journal of Marine Science: Journal Du Conseil*, vol. 65, no. 6, pp. 982-994.

Love, R.H., 1977. Target Strength of an Individual Fish at any Aspect. *J.Acoust.Soc.Am.*, vol. 62, no. 6, pp. 1397-1403.

Lunde, P., Pedersen, A.O., Korneliussen, R.J., Tichy, F.E., Nes, H., 2013. Power-Budget and Echo-Integrator Equations for Fish Abundance Estimation.

Lurton, X., 2002. *An Introduction to Underwater Acoustics: Principles and Applications*. Springer.

Mackenzie, K.V., 1981. Nine-term Equation for Sound Speed in the Oceans. *J.Acoust.Soc.Am.*, vol. 70, no. 3, pp. 807-812.

- MacLennan, D.N., 1986. Time Varied Gain Functions for Pulsed Sonars. *J.Sound Vibrat.*, vol. 110, no. 3, pp. 511-522.
- MacLennan, D.N., 1990. Acoustical Measurement of Fish Abundance. *J.Acoust.Soc.Am.*, vol. 87, no. 1, pp. 1-15.
- MacLennan, D.N., 1982. *Target Strength Measurements on Metal Spheres*. Librarian Department of Agriculture and Fisheries for Scotland, Marine Laboratory.
- Mayer, P., Estruch, V., Martí, P., Jover, M., 2009. Use of Quantile Regression and Discriminant Analysis to Describe Growth Patterns in Farmed Gilthead Sea Bream (*Sparus Aurata*). *Aquaculture*, vol. 292, no. 1, pp. 30-36.
- Mayer, P., Estruch, V., Jover, M., 2012. A Two-Stage Growth Model for Gilthead Sea Bream (*Sparus Aurata*) Based on the Thermal Growth Coefficient. *Aquaculture*, vol. 358, pp. 6-13.
- Mayer, P., Estruch, V., Blasco, J., Jover, M., 2008. Predicting the Growth of Gilthead Sea Bream (*Sparus Aurata* L.) Farmed in Marine Cages Under Real Production Conditions using Temperature-and Time-dependent Models. *Aquacult.Res.*, vol. 39, no. 10, pp. 1046-1052.
- 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*, vol. 60, no. 2, pp. 419-428.
- McClatchie, S., Alsop, J., Coombs, R.F., 1996. A Re-Evaluation of Relationships between Fish Size, Acoustic Frequency, and Target Strength. *ICES Journal of Marine Science: Journal Du Conseil*, vol. 53, no. 5, pp. 780-791.
- Medwin, H., Blue, J.E., 2005. *Sounds in the Sea: From Ocean Acoustics to Acoustical Oceanography*. Cambridge University Press.
- Medwin, H., Clay, C.S., 1997. *Fundamentals of Acoustical Oceanography*. Academic Press.
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente., 2015. *Datos De Producción De Acuicultura*. Available from: http://www.magrama.gob.es/app/jacumar/datos_produccion/datos_produccion.aspx.

Morey, G., Moranta, J., Massuti, E., Grau, A., Linde, M., Riera, F., Morales-Nin, B., 2003. Weight-length Relationships of Littoral to Lower Slope Fishes from the Western Mediterranean. *Fisheries Research*, vol. 62, no. 1, pp. 89-96.

Moszyński, M., Stepnowski, A., 2002. Increasing the Accuracy of Time-Varied-Gain in Digital Echosounders. *Acta Acustica United with Acustica*, vol. 88, no. 5, pp. 814-817.

Moszyński, M., 2005. *Statistical Analysis for Digital Processing of Pelagic Fish Echoes*. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej ed., Gdańsk: Politechnika Gdańska.

Mulligan, T., 2000. Shallow Water Fisheries Sonar: A Personal View. *Aquat.Living Resour.*, vol. 13, no. 05, pp. 269-273.

Nielsen, J.R., Lundgren, B., 1999. Hydroacoustic Ex Situ Target Strength Measurements on Juvenile Cod (*Gadus Morhua* L.). *ICES Journal of Marine Science: Journal Du Conseil*, vol. 56, no. 5, pp. 627-639.

Ona, E., 2003. An Expanded Target-Strength Relationship for Herring. *ICES Journal of Marine Science: Journal Du Conseil*, vol. 60, no. 3, pp. 493-499.

Ona, E., 1999. *Methodology for Target Strength Measurements: With Special Reference to in Situ Techniques for Fish and Mikro-Nekton*. International Council for the Exploration of the Sea.

Ona, E., 1990a. *Optimal Acoustic Beam Pattern Corrections for Split Beam Transducers*. ICES.

Ona, E., 1990b. Physiological Factors Causing Natural Variations in Acoustic Target Strength of Fish. *J.Mar.Biol.Assoc.U.K.*, vol. 70, no. 01, pp. 107-127.

Ona, E., Foote, K.G., Zhao, X., Svellingen, I., 1996. *Some Pitfalls of Short-Range Standard-Target Calibration*. ICES.

Ortega, A., 2012. *Cuadernos De Acuicultura 1. Cultivo De Lubina (Dicentrarchus Labrax)*. Fundación Observatorio Español de Acuicultura (FOESA), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) and Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente eds., Madrid: .

Ortega, A., 2008. *Cuadernos De Acuicultura 1. Cultivo De Dorada (Sparus Aurata)*. Fundación Observatorio Español de Acuicultura (FOESA), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) and Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente eds., Madrid: .

Parker-Stetter, S.L., 2009. Standard Operating Procedures for Fisheries Acoustic Surveys in the Great Lakes.

Parsonage, K.D., Petrell, R.J., 2003. Accuracy of a Machine-Vision Pellet Detection System. *Aquacult.Eng.*, vol. 29, no. 3, pp. 109-123.

Partridge, B.L., 1982. The Structure and Function of Fish Schools. *Sci.Am.*, Jun, vol. 246, no. 6, pp. 114-123 ISSN 0036-8733; 0036-8733.

Pedersen, A., 2006. *Effects of Nonlinear Sound Propagation in Fisheries Research*. The University of Bergen.

Peruzzi, S., Westgaard, J., Chatain, B., 2007. Genetic Investigation of Swimbladder Inflation Anomalies in the European Sea Bass, < i> Dicentrarchus Labrax L. *Aquaculture*, vol. 265, no. 1, pp. 102-108.

Ricker, W., 1975. Computation and Interpretation of Biological Statistics of Fish Populations. *Bull.Fish.Res.Board Can*, vol. 191, pp. 382.

Sherman, C.H., Butler, J.L., 2007. *Transducers and Arrays for Underwater Sound*. Springer.

Simmonds, J., MacLennan, D.N., 2005. *Fisheries Acoustics: Theory and Practice*. Second edition ed. Blackwell Science.

Simrad., 2008. *Simrad ER60, Scientific Echo Sounder. Reference Manual*.

Simrad., 1997. *Simrad EK500. Fishery Research Echo Sounder. Operator Manual. Rev. G*.

Tichy, F., 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 Science: Journal Du Conseil*, vol. 60, no. 3, pp. 571-574.

Urick, R.J., 1983. *Principles of Underwater Sound*. Los Altos, California: Peninsula Publishing.

Zhao, X., 1996. *Target Strength of Herring (Clupea Harengus L.) Measured by the Split-Beam Tracking Method*. University of Bergen.

Agradecimientos

Esta tesis, y supongo que la gran mayoría, habría sido irrealizable sin la ayuda de infinidad de personas. Así que a todas ellas... gracias!

Ante todo tengo mucho que agradecer a mis compañerxs Vicent y Patri por estar siempre ahí contra viento y marea... GRACIAS xxxxxx xx xxxx!!! Sin vosotrxs nada de esto hubiera sido posible.

De igual modo doy las gracias a mis directores de tesis Víctor y Silvia por confiar en mí y por su dedicación a la supervisión de mi trabajo, así como a Vicent Estruch, Isa, Lucio, Diego, Pedro Poveda, Jaime Ramis, Fernando de la Gándara, Ana Tomás y Miguel Jover por su colaboración y apoyo.

También tengo mucho que agradecer a los técnicos de la UPV por su gran entrega, pues con ellos siempre es todo es más fácil y divertido. Gracias Fernando, Charlie, Javier y Andrés.

No me olvido del resto de mis compañerxs del Departamento de Física Aplicada del Campus de Gandia, de los que aun están y de los que ya se fueron, por compartir buenos y no tan buenos momentos.

Y Helge... muchísimas gracias por tu ayuda incondicional, por estar siempre ahí para orientarme y ayudarme a entender.

Tampoco me olvido de Pablo Mayer, Miguel Rodilla y asociados, y Paco Capel y asociados, por su gran aportación en el montaje experimental de todo el chiringuito del Puerto de Gandia.

Igualmente quiero expresar mi gratitud a Jordi Comas y Lara Gómez por su paciencia y por todo el tiempo que nos han dedicado, así como a Maremar, Bersolaz, Culmarex, Piagua y la Torre de Control del Puerto de Aguadulce por su colaboración.

También quiero agradecer a Palonés, Carpi y Riegos Pous por sus ideas, a Ca La Pastaora por darnos de comer en los momentos difíciles, y a Pepin y su tripulación por ese arroz con pulpo que nos supo gloria.

Por último agradecer el soporte financiero 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. De igual modo, dar las gracias al Ministerio de educación por la Ayuda FPU(AP2009-4459).

Índice de Tablas

Tabla 4.1. Definición inicial de los grupos de dorada: longitudes media, mínima y máxima para una dispersión de ± 0.140 dB dentro de cada grupo calculado mediante la Ecuación 4.1, masa media estimada según la Ecuación 4.2, y media del TS calculada según la expresión de Love.	78
Tabla 4.2. Tipo de transductor, frecuencia de operación y apertura del haz a -3dB de los diferentes transductores montados en la plataforma para la medida directa e indirecta del TS.....	81
Tabla 4.3. Especificaciones de la hoja de calibración del transductor split-beam ES200-7C de Simrad.....	83
Tabla 4.4. Dependencia con la distancia al transductor del diámetro, el área de la sección transversal y el volumen insonificado por el haz del transductor ES200-7C con un ángulo de apertura a -3 dB de 7° , y dependencia de la resolución espacial (tamaño de la celda) con la distancia debida a la resolución angular de la ecosonda.	84
Tabla 4.5. Parámetros de configuración del sistema acústico empleados durante la calibración (a la izquierda) y parámetros de calibración de fábrica (a la derecha) para la ecosonda EK60 funcionando con el transductor ES200-7C para una duración de pulso de $64 \mu\text{s}$	87
Tabla 4.6. Parámetros del detector de ecos individuales (SED) empleados en Sonar5-Pro.	90
Tabla 4.7. Resultados de los ajustes del modelo potencial para los pares de datos $M-L$, $M-H$, $L-H$ y $FC-L$; y del modelo lineal para $L-H$	97
Tabla 4.8. Longitud, altura, masa y factor de condición del grupo 1 y 2 empleados en la medida del TS. Se muestran los datos de los muestreos realizados justo antes y después de las mediciones acústicas, así como la variación de los parámetros. .	100
Tabla 4.9. Longitud, altura, masa y factor de condición del grupo 3 y 4 empleados en la medida del TS. Se muestran los datos de los muestreos realizados justo antes y después de las mediciones acústicas, así como la variación de los parámetros. .	101

- Tabla 4.10. Datos biométricos de los grupos 5 empleados para la medida del *TS*. Se muestran los datos de los muestreos realizados antes y después de las mediciones acústicas, así como la variación de los parámetros. 103
- Tabla 4.11. Configuración durante la calibración de la EK60 junto con el transductor ES200-7C y resultados obtenidos. Calibraciones realizadas antes, durante y después de la medida del *TS* de la dorada en el Puerto de Gandia, para un pulso de 64 μ s, una potencia de 90 W y diferentes intervalos entre pings (50 ms y 1 s), empleando una esfera de cobre de 13.7 mm. 105
- Tabla 4.12. Longitud media, número de trazas detectadas y media y desviación típica de los diferentes estadísticos de las trazas: máximo, media y percentil 75 del *T*, y máximo del *TSu*. Resultados para los registros ventrales en la parte superior de la tabla y para las grabaciones dorsales en la parte inferior. Las trazas poseen una longitud angular mínima de 2° y están formadas por ecos con una *LE* entre 0.7 y 1.5, una *MDF* de 0.3°, y una *MCG* variable. Se comparan los resultados para una *MCG* de 3 dB y 12 dB, que se muestran en la parte izquierda y derecha de la tabla respectivamente. 109
- Tabla 4.13. Resultados del ajuste lineal de la media del *TS* máximo, medio y percentil 75, y el *TSu* máximo de las trazas frente al logaritmo de la longitud de la dorada a una frecuencia de 200 kHz, para los registros ventrales (parte superior) y dorsales (parte inferior). Las trazas poseen una longitud angular mínima de 2° y están formadas por ecos con una *LE* entre 0.7 y 1.5, una *MDF* de 0.3°, y una *MCG* variable. Se comparan los resultados para una *MCG* de 3 dB y 12 dB que se muestran en la parte izquierda y derecha de la tabla, respectivamente. 115
- Tabla 4.14. Resultados del ajuste potencial de la longitud de la dorada frente a la media del *TS* máximo, medio y percentil 75, y el *TSu* máximo de las trazas a una frecuencia de 200 kHz, para los registros ventrales (parte superior) y dorsales (parte inferior). Las trazas poseen una longitud angular mínima de 2° y están formadas por ecos con una *LE* entre 0.7 y 1.5, una *MDF* de 0.3°, y una *MCG* variable. Se comparan los resultados para una *MCG* de 3 dB y 12 dB que se muestran en la parte izquierda y derecha de la tabla, respectivamente. 118
- Tabla 4.15. Resultados del ajuste potencial de la masa de la dorada frente a la media del *TS* máximo, medio y percentil 75, y el *TSu* máximo de las trazas a una frecuencia de 200 kHz, para los registros ventrales (parte superior) y dorsales (parte inferior). Las trazas poseen una longitud angular mínima de 2° y están formadas por ecos con una *LE* entre 0.7 y 1.5, una *MDF* de 0.3°, y una *MCG* variable. Se comparan los resultados para una *MCG* de 3 dB y 12 dB que se muestran en la parte izquierda y derecha de la tabla, respectivamente. 121
- Tabla 4.16. Media y desviación típica de la L_{bs} máxima de las trazas, parámetro γ , parámetros de las distribuciones de Rayleigh (b_{Ray}), Rice (s_{Rice} , σ_{Rice}), Valores

Extremos Máximos (α_G, β_G) y Gamma (a_γ, b_γ) por tallas, función log-verosimilitud, p-valor del test de Kolmogorov-Smirnov, coeficiente de determinación, estimación de la media y la desviación típica a partir del modelo, y error relativo en la estimación de ambos. Los valores de L y L_{bs} se expresan en cm y los errores en %. Resultados para trazas registradas de forma ventral a 200 kHz, con una longitud mínima de 2°, formadas por ecos con una LE entre 0.7 y 1.5, una MDF de 0.3 y una MCG de 3 dB. 128

Tabla 4.17. Media y desviación típica de la L_{bs} media de las trazas, parámetro γ , parámetros de las distribuciones de Rayleigh (b_{Ray}), Rice (s_{Rice}, σ_{Rice}), Valores Extremos Máximos (α_G, β_G) y Gamma (a_γ, b_γ) por tallas, función log-verosimilitud, p-valor del test de Kolmogorov-Smirnov, coeficiente de determinación, estimación de la media y la desviación típica a partir del modelo, y error relativo en la estimación de ambos. Los valores de L y L_{bs} se expresan en cm y los errores en %. Resultados para trazas registradas de forma dorsal a 200 kHz, con una longitud mínima de 2°, formadas por ecos con una LE entre 0.7 y 1.5, una MDF de 0.3 y una MCG de 12 dB. 129

Tabla 4.18. Comparación del promedio del TS máximo de las trazas en función de la talla para los registros ventrales y del TS medio de las trazas para las grabaciones dorsales, calculado a partir de los datos de L_{bs} y σ_{bs} , y del promedio obtenido a partir de los ajustes de los modelos de Rice, Rayleigh, Gamma y Valores Extremos Máximos a los datos de L_{bs} . Resultados para trazas con una longitud angular mínima de 2° formadas por ecos con una LE entre 0.7 y 1.5, MDF de 0.3°, y una MCG de 3 dB para los registros ventrales y de 12 dB para los registros dorsales. 133

Tabla 4.19. Media y desviación típica de la $L_{bs,u}$ máxima de las trazas, parámetro γ , parámetros de las distribuciones de Rayleigh (b_{Ray}), Rice (s_{Rice}, σ_{Rice}), Valores Extremos Máximos (α_G, β_G) y Gamma (a_γ, b_γ) por tallas, función log-verosimilitud, p-valor del test de Kolmogorov-Smirnov, coeficiente de determinación, estimación de la media y la desviación típica a partir del modelo, y error relativo en la estimación de ambos. Los valores de L y L_{bs} se expresan en cm y los errores en %. Resultados para trazas registradas de forma ventral a 200 kHz, con una longitud mínima de 2°, formadas por ecos con una LE entre 0.7 y 1.5, una MDF de 0.3 y una MCG de 3 dB. 136

Tabla 4.20. Media y desviación típica de la $L_{bs,u}$ media de las trazas, parámetro γ , parámetros de las distribuciones de Rayleigh (b_{Ray}), Rice (s_{Rice}, σ_{Rice}), Valores Extremos Máximos (α_G, β_G) y Gamma (a_γ, b_γ) por tallas, función log-verosimilitud, p-valor del test de Kolmogorov-Smirnov, coeficiente de determinación, estimación de la media y la desviación típica a partir del modelo, y error relativo en la estimación de ambos. Los valores de L y L_{bs} se expresan en cm y los errores en %. Resultados para trazas registradas de forma dorsal a 200 kHz, con una longitud

mínima de 2°, formadas por ecos con una <i>LE</i> entre 0.7 y 1.5, una <i>MDF</i> de 0.3 y una <i>MCG</i> de 12 dB.	137
Tabla 4.21. Comparación del promedio del <i>TSu</i> máximo de las trazas en función de la talla para los registros ventrales y del <i>TSu</i> medio de las trazas para las grabaciones dorsales, calculado a partir de los datos de $L_{bs,u}$ y $\sigma_{bs,u}$, y del promedio obtenido a partir de los ajustes de los modelos de Rice, Rayleigh, Gamma y Valores Extremos Máximos a los datos de $L_{bs,u}$. Resultados para trazas con una longitud angular mínima de 2° formadas por ecos con una <i>LE</i> entre 0.7 y 1.5, <i>MDF</i> de 0.3°, y una <i>MCG</i> de 3 dB para los registros ventrales y de 12 dB para los registros dorsales.	140
Tabla 4.22. Número de trazas registradas y cálculo de la media del <i>TS</i> y de la σ_{bs} de las trazas a partir de talla media de los grupos, el error absoluto de cada una de las variables, la desviación típica de los datos de σ_{bs} de las trazas y el tamaño mínimo de la muestra para lograr una precisión del 2% en la estimación de la longitud. En la parte superior se muestran los resultados para los registros ventrales donde se evalúa el valor máximo de las trazas, y en la parte inferior se resumen los resultados obtenidos a partir del valor promedio de las trazas para las grabaciones dorsales	143
Tabla 5.1. Jaula bajo ensayo, especie y masa media de los ejemplares, y diámetro de la jaula, profundidad del anillo anticorriente y profundidad máxima del copo de la jaula.	152
Tabla 5.2. Datos de calibración de los transductores split-beam de Biosonics.	154
Tabla 5.3. Frecuencia ensayada en cada jaula, estimaciones de la masa media, el número de peces y la biomasa total, fecha y hora de inicio y finalización de las mediciones acústicas, y fecha y hora de las actividades de alimentación y pesca que se dan de forma simultánea a las mediciones acústicas	156
Tabla 5.4. Fecha y hora de los despesques, y número de peces, biomasa y masa media de los ejemplares extraídos.....	158
Tabla 5.5. Parámetros de fábrica y parámetros obtenidos mediante calibración para la ecosonda EK60 funcionando con el transductor ES200-7C para una duración de pulso de 256 μ s.....	160
Tabla 5.6. Frecuencia ensayada en cada jaula, datos reales de la masa media, el número de peces y la biomasa total, fecha y hora de inicio y finalización de las mediciones acústicas, y fecha y hora de las actividades de alimentación que se dan de forma simultánea a las mediciones acústicas.....	161
Tabla 5.7. Masa media, longitud media, número de trazas detectadas y media y desviación típica de los diferentes estadísticos de las trazas (máximo, media y percentil 75 del <i>TS</i> , y media del <i>TSu</i>) en función de la talla para las grabaciones	

dorsales de lubina a 123 y 201 kHz en la parte superior e inferior de la tabla, respectivamente.....	167
Tabla 5.8. Resultados del ajuste lineal de la media del <i>TS</i> máximo, medio y percentil 75 y el <i>TSu</i> medio de las trazas frente al logaritmo de la longitud total de la lubina para los registros dorsales a 123 y 201 kHz.....	169
Tabla 5.9. Resultados del ajuste potencial de la longitud de la lubina frente a la media del <i>TS</i> máximo, medio y percentil 75 y el <i>TSu</i> medio de las trazas para los registros dorsales a 123 y 201 kHz.	171
Tabla 5.10. Resultados del ajuste lineal de la media del <i>TS</i> máximo, medio y percentil 75 y el <i>TSu</i> medio de las trazas frente al logaritmo de la masa de la lubina para los registros dorsales a 123 y 201 kHz.	171
Tabla 5.11. Resultados del ajuste potencial de la masa de la lubina frente a la media del <i>TS</i> máximo, medio y percentil 75 y el <i>TSu</i> medio de las trazas para los registros dorsales a 123 y 201 kHz.	172
Tabla 5.12 Masa media, longitud media, número de trazas detectadas y media y desviación típica de los diferentes estadísticos de las trazas (máximo, media y percentil 75 del <i>TS</i> , y media del <i>TSu</i>) para las grabaciones dorsales de dorada a 123 y 201 kHz, en la parte superior e inferior de la tabla respectivamente, de los registros obtenidos en Culmarex.....	174
Tabla 5.13. Masa media, longitud media, número de trazas detectadas y media y desviación típica de los diferentes estadísticos de las trazas (máximo, media y percentil 75 del <i>TS</i> , y media del <i>TSu</i>) para las grabaciones dorsales de dorada a 200 kHz de los registros obtenidos en Piagua.....	175
Tabla 6.1. Resumen del valor medio y el coeficiente de variación de la longitud y la masa de los grupos de dorada definidos en función de la longitud.	200
Tabla 6.2. Masa media de los peces, número de ecos registrados, media y desviación típica de la <i>AAV</i> (en la parte superior) y la <i>AAD</i> (en la parte inferior) expresados en cm, moda y escala del modelo ajustado, p-valor del test de Kolmogorov-Smirnov, y media y desviación típica obtenidas a partir del modelo y error medio en la estimación de ambos expresado en %	210
Tabla 6.3. Resultados de los ajustes potenciales entre la masa expresada en g y el valor medio de la altura acústica ventral y dorsal expresada en cm.....	211
Tabla 6.4. Resultados de los ajustes potenciales entre la masa expresada en g y el parámetro moda de la distribución de Valores Extremos Máximos y la media obtenida a partir del modelo. La masa se expresa en g, y la <i>AAV</i> y la <i>AAD</i> en cm.	212
Tabla 7.1. Parámetros del detector de ecos individuales empleados en Sonar5-Pro... 217	

Tabla 7.2. Número de trazas detectadas, longitud media de la traza medida en número de ecos, y media y desviación típica del TS y TSu máximo de las trazas en función del calibre del pienso.....220

Tabla 7.3. Resultados del ajuste lineal de la media de las distribuciones del TS y el TSu máximos de las trazas frente al logaritmo del calibre del pienso para una frecuencia de 200 kHz. Las trazas tienen una longitud mínima de 75 ecos, y están formadas por ecos con una LE entre 0.5 y 2m, una MDF de 1°, y una MCG de 12 dB.221

Índice de Figuras

Figura 2.1. Fotografía de un ejemplar de dorada (<i>Sparus aurata</i> , L. 1758).....	22
Figura 2.2. Radiografía de una dorada de talla comercial, con una longitud de 29 cm y una masa de 420 g.	22
Figura 2.3. Mapa de distribución de la dorada.	23
Figura 2.4. Principales países productores de dorada.	25
Figura 2.5 . Fotografía de un ejemplar de lubina (<i>Dicentrarchus labrax</i> , L. 1758).....	26
Figura 2.6. Radiografía de una lubina de tamaño comercial.....	26
Figura 2.7. Mapa de distribución de la lubina.....	27
Figura 2.8. Principales países productores de lubina.	29
Figura 3.1. Sistema de coordenadas empleado para la descripción de la propagación de una onda acústica, donde la cara radiante de la fuente queda centrada en el origen de coordenadas.....	33
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 ($kr = 33.5$).	38
Figura 3.3. Diagrama de sistema acústico formado por un transductor y un blanco individual, situados en el origen de coordenadas de dos sistemas esféricos paralelos con coordenadas R, θ, φ y R', θ', φ'	43
Figura 3.4. Circuito equivalente de Thevenin durante la recepción de ecos.....	50
Figura 3.5. Circuito equivalente de Thevenin durante la transmisión de la onda acústica.	51
Figura 4.1. Fotografía por satélite del Puerto de Gandia (parte superior), y detalle del tinglado nº 3 y la lámina de agua reservada entre los norayes 16 y 17 que aparecen remarcados en rojo (parte inferior).	72
Figura 4.2. Esquema de la jaula a escala de 5 m de diámetro y 4 m de alto.	74

- Figura 4.3. Jaula a escala amarrada entre los norayes 16 y 17 del muelle frutero del Puerto de Gandía.....74
- Figura 4.4. Detalle de la estructura secundaria empleada para la instalación de los transductores en el fondo de la jaula y facilitar la extracción de los peces.75
- Figura 4.5. Detalle de los dos tanques instalados en el tinglado para el mantenimiento de las doradas. Al fondo se puede observar el tanque con biobolas empleado como filtro biológico.....76
- Figura 4.6. Fotografía realizada durante un muestreo.....79
- Figura 4.7. Transceptor de la ecosonda científica split-beam EK60 de Simrad y portátil empleado para el control de la ecosonda y el almacenamiento de datos.....81
- Figura 4.8. Detalle de la plataforma utilizada para montar los diferentes transductores: ES200-7C de Simrad (naranja), 200-28 CM de Simrad (blanco), Z1 de Zunibal (negro) y TC2122 de Reson (gris).....82
- Figura 4.9. Ejemplo de ecograma registrado ventralmente para la dorada de talla intermedia. La línea naranja corresponde a la mínima distancia incluida en el análisis del *TS* y la línea roja a la distancia máxima determinada mediante el detector de fondos. Arriba se representa el ecograma de la envolvente del eco (*Amp*) y abajo el ecograma de detecciones individuales (*SED*), donde se puede apreciar en rojo la detección de una traza y la posición angular de los ecos que la forman. ...93
- Figura 4.10. Representación de los datos registrados en los muestreos y los ajustes del modelo potencial en a), b) y c), y del modelo lineal en d). En a) se representa los datos de la masa frente a la longitud total, en b) la masa frente a la altura máxima, en c) la longitud total frente la altura máxima, y en d) el factor de condición frente a la longitud. Se muestra el intervalo de confianza para la media y el intervalo de predicción para un nivel de confianza del 95%.....98
- Figura 4.11. Densidad de probabilidad del *TS* máximo de las trazas para los registros ventrales (izquierda) y del *TS* medio de las trazas para los registros dorsales (derecha) a una frecuencia de 200 kHz. Las trazas poseen una longitud angular mínima de 2° y están formadas por ecos con una *LE* entre 0.7 y 1.5, *MDF* de 0.3°, y una *MCG* de 3 dB para los registros ventrales y de 12 dB para los registros dorsales. Los datos se muestran ordenados de arriba a abajo de menor a mayor talla. 111
- Figura 4.12. Relación lineal entre la media del *TS* máximo de las trazas y el logaritmo de la longitud de la dorada para registros ventrales ($TS = 23.06 \log L - 62.58$, en rojo), y la media del *TS* medio de las trazas y el logaritmo de la longitud para las grabaciones dorsales ($TS = 10.34 \log L - 52.16$, en naranja) a una frecuencia de 200 kHz. Las trazas poseen una longitud angular mínima de 2° y están formadas por

ecos con una LE entre 0.7 y 1.5, MDF de 0.3° , y una MCG de 3 dB para los registros ventrales y de 12 dB para los dorsales. 116

Figura 4.13. Relación potencial entre la longitud total de la dorada y la media del TS de las trazas. Se representa el TS máximo para los registros ventrales ($L = 480.38 \cdot 10^{0.0437S}$, en rojo) y el TS medio para las grabaciones dorsales ($L = 9.40 \cdot 10^4 \cdot 10^{0.0957S}$, en naranja) a una frecuencia de 200 kHz. Las trazas poseen una longitud angular mínima de 2° y están formadas por ecos con una LE entre 0.7 y 1.5, MDF de 0.3° , y una MCG de 3 dB para las detecciones ventrales y de 12 dB para las dorsales. 119

Figura 4.14. Relación potencial entre la masa de la dorada y la media del TS de las trazas. Se representa el TS máximo para los registros ventrales ($M = 3.32 \cdot 10^6 \cdot 10^{0.1367S}$, en rojo) y el TS medio para los dorsales ($M = 7.18 \cdot 10^{13} \cdot 10^{0.3047S}$, en rojo) a una frecuencia de 200 kHz. Las trazas poseen una longitud angular mínima de 2° y están formadas por ecos con una LE entre 0.7 y 1.5, MDF de 0.3° , y una MCG de 3 dB para las detecciones ventrales y de 12 dB para las detecciones dorsales. 122

Figura 4.15. Distribución de probabilidad de la L_{bs} de las trazas a una frecuencia de 200 kHz, PDF empírica, y ajuste a las PDF de Rice y Rayleigh. Se representa la L_{bs} máxima para los registros ventrales y la media para los dorsales. Las trazas poseen una longitud angular mínima de 2° y están formadas por ecos con una LE entre 0.7 y 1.5, MDF de 0.3° , y una MCG de 3 dB para los registros ventrales y de 12 dB para las dorsales. 131

Figura 4.16. Distribución de probabilidad de la L_{bs} de las trazas a una frecuencia de 200 kHz, PDF empírica, y ajuste a las PDF Gamma y de Valores Extremos Máximos. Se representa la L_{bs} máxima para los registros ventrales y la media para los dorsales. Las trazas poseen una longitud angular mínima de 2° y están formadas por ecos con una LE entre 0.7 y 1.5, MDF de 0.3° , y una MCG de 3 dB para los registros ventrales y de 12 dB para las dorsales. 132

Figura 4.17. Distribución de probabilidad para el aspecto ventral y dorsal de la $L_{bs,u}$ máxima y media, respectivamente, de las trazas a una frecuencia de 200 kHz, PDF empírica, y ajuste a las PDF de Rice y Rayleigh. Las trazas poseen una longitud angular mínima de 2° y están formadas por ecos con una LE entre 0.7 y 1.5, MDF de 0.3° , y una MCG de 3 dB para los registros ventrales y 12 dB para los dorsales. 138

Figura 4.18. Distribución de probabilidad para el aspecto ventral y dorsal de la $L_{bs,u}$ máxima y media, respectivamente, de las trazas a una frecuencia de 200 kHz, PDF empírica, y ajuste a las PDF Gamma y de Valores Extremos Máximos. Las trazas poseen una longitud angular mínima de 2° y están formadas por ecos con una LE entre 0.7 y 1.5, MDF de 0.3° , y una MCG de 3 dB para los registros ventrales y 12 dB para los dorsales. 139

Figura 4.19. Evolución de la media del aspecto ventral <i>TS</i> máximo de las trazas calculada para conjuntos de 2000 trazas a intervalos de 100 trazas.	144
Figura 4.20. Valor medio del <i>TS</i> de las trazas en capas de 50 cm de altura, del <i>TS</i> máximo para los registros ventrales y del <i>TS</i> medio para los dorsales. Las marcas rojas muestran los valores medios calculados en aquellas capas donde se han detectado al menos 1000 trazas. La línea discontinua muestra el valor medio de todos los datos y la línea de puntos una desviación de ± 0.2 dB respecto a la media para los registros ventrales y de ± 0.09 dB para los dorsales.	146
Figura 5.1. Fotografía de las instalaciones de Culmarex en Águilas (Murcia).	151
Figura 5.2. Detalle del montaje del transductor sobre una plataforma de madera fijada a un flotador salvavidas.	152
Figura 5.3. Detalle de la instalación de la ecosonda en la barandilla y las baterías en los anillos flotantes de la jaula.	153
Figura 5.4. Detalle de la instalación del transductor en el interior de la jaula.	153
Figura 5.5. Fotografía de las instalaciones de Piagua en Aguadulce (Almería).	157
Figura 5.6. Detalle de la instalación de la maleta de la ecosonda, la caja de las baterías y la antena wifi.	159
Figura 5.7. Detalle de la colocación del transductor en la jaula.	159
Figura 5.8. Ecograma del <i>Sv</i> registrado en la jaula de lubina de menor tamaño (CB23) a 123 kHz el 15 de septiembre de 2012.	162
Figura 5.9 Ecograma del <i>Sv</i> registrado en la jaula de dorada (CB20) a 123 kHz el 15 de septiembre de 2012. La línea de superficie y fondo corresponden a los límites superior e inferior del cardumen, y junto al centro de masas dan una idea de la distribución vertical de los peces.	165
Figura 5.10. Densidad de probabilidad para el aspecto dorsal del <i>TS</i> medio de las trazas de lubina a dos frecuencias y para las tres tallas ensayadas en Culmarex. En la columna izquierda se representan las distribuciones obtenidas a 123 kHz y a la derecha se muestran las distribuciones a 201 kHz. Se muestran de arriba abajo los resultados para los peces de menor a mayor talla.	168
Figura 5.11. Relación lineal entre la media del <i>TS</i> medio de las trazas y el logaritmo en base 10 de la longitud total de la lubina para registros dorsales tomados en condiciones de producción a 123 ($TS = 20.79 \log L - 71.00$) y 201 kHz ($TS = 14.99 \log L - 61.53$).	170
Figura 5.12. Relación potencial entre la masa de la lubina y la media del <i>TS</i> medio de las trazas registradas dorsalmente a 123 kHz ($M = 7.35 \cdot 10^7 \cdot 10^{0.134 \cdot TS}$) y 201 kHz ($M = 1.54 \cdot 10^{10} \cdot 10^{0.196 \cdot TS}$).	173

- Figura 5.13. Densidad de probabilidad para el aspecto dorsal del *TS* medio de las trazas de dorada de 433 g a dos frecuencias para la única talla ensayada en Culmarex. En la columna izquierda se representa las distribución obtenida a 123 kHz y a la derecha se muestran las distribuciones a 201 kHz para las dos duraciones de pulso (300 μ s arriba y 200 μ s abajo)..... 174
- Figura 5.14. Densidad de probabilidad para el aspecto dorsal del *TS* medio de las trazas registradas en Piagua a 200 kHz para la dorada 541 g..... 175
- Figura 5.15. De arriba abajo a intervalos de 1 hora: Media y desviación típica del centro de masas, y de los límites superior (*S*) e inferior (*F*) del cardumen; media de la densidad observada en el haz y la densidad de referencia; coeficiente de variación de las densidades representadas; y error relativo en la estimación de la abundancia. Resultados del día 12 de septiembre para una abundancia de 11427 peces. 179
- Figura 5.16. De arriba abajo a intervalos de 1 hora: Media y desviación típica del centro de masas, y de los límites superior (*S*) e inferior (*F*) del cardumen; media de la densidad observada en el haz y la densidad de referencia; coeficiente de variación de las densidades representadas; y error relativo en la estimación de la abundancia. Resultados del día 13 de septiembre para una abundancia de 11427 peces. 180
- Figura 5.17. De arriba abajo a intervalos de 1 hora: Media y desviación típica del centro de masas, y de los límites superior (*S*) e inferior (*F*) del cardumen; media de la densidad observada en el haz y la densidad de referencia; coeficiente de variación de las densidades representadas; y error relativo en la estimación de la abundancia. Resultados del día 14 de septiembre para una abundancia de 11427 peces. 181
- Figura 5.18. De arriba abajo a intervalos de 1 hora: Media y desviación típica del centro de masas, y de los límites superior (*S*) e inferior (*F*) del cardumen; media de la densidad observada en el haz y la densidad de referencia; coeficiente de variación de las densidades representadas; y error relativo en la estimación de la abundancia. Resultados del día 15 de septiembre para una abundancia de 11427 peces. 182
- Figura 5.19. De arriba abajo a intervalos de 1 hora: Media y desviación típica del centro de masas, y de los límites superior (*S*) e inferior (*F*) del cardumen; media de la densidad observada en el haz y la densidad de referencia; coeficiente de variación de las densidades representadas; y error relativo en la estimación de la abundancia. Resultados del día 16 de septiembre. La línea vertical negra discontinua indica el momento en que se realizó una pesca, marcando un cambio en la una abundancia de 11427 a 9004 peces. 183
- Figura 5.20 De arriba abajo a intervalos de 1 hora: Media y desviación típica del centro de masas, y de los límites superior (*S*) e inferior (*F*) del cardumen; media de la densidad observada en el haz y la densidad de referencia; coeficiente de variación de las densidades representadas; y error relativo en la estimación de la abundancia.

Resultados del día 17 de septiembre para una abundancia de 9004 peces. La línea vertical negra discontinua indica el momento en que se realizó una pesca.	184
Figura 5.21 De arriba abajo a intervalos de 1 hora: Media y desviación típica del centro de masas, y de los límites superior (<i>S</i>) e inferior (<i>F</i>) del cardumen; media de la densidad observada en el haz y la densidad de referencia; coeficiente de variación de las densidades representadas; y error relativo en la estimación de la abundancia. Resultados del día 18 de septiembre para una abundancia de 6372 peces.	185
Figura 5.22. Comparación de la biomasa real presente en la jaula y la biomasa estimada a partir de los datos acústicos para los diferentes días del ensayo.	186
Figura 5.23 De arriba abajo a intervalos de 1 hora: Media y desviación típica del centro de masas, y de los límites superior (<i>S</i>) e inferior (<i>F</i>) del cardumen; media de la densidad observada en el haz y la densidad de referencia; coeficiente de variación de las densidades representadas; y error relativo en la estimación de la abundancia. Resultados del día 18 de septiembre para la dorada (CB20) a 201 kHz.	188
Figura 5.24. De arriba abajo a intervalos de 1 hora: Media y desviación típica del centro de masas, y de los límites superior (<i>S</i>) e inferior (<i>F</i>) del cardumen; media de la densidad observada en el haz y la densidad de referencia; coeficiente de variación de las densidades representadas; y error relativo en la estimación de la abundancia. Resultados del día 15 de septiembre para la lubina de menor tamaño (CB23) a 123 kHz.	189
Figura 5.25. De arriba abajo a intervalos de 1 hora: Media y desviación típica del centro de masas, y de los límites superior (<i>S</i>) e inferior (<i>F</i>) del cardumen; media de la densidad observada en el haz y la densidad de referencia; coeficiente de variación de las densidades representadas; y error relativo en la estimación de la abundancia. Resultados del día 16 de septiembre para la lubina de tamaño intermedio (C4) a 123 kHz.	190
Figura 5.26. De arriba abajo a intervalos de 1 hora: Media y desviación típica del centro de masas, y de los límites superior (<i>S</i>) e inferior (<i>F</i>) del cardumen; media de la densidad observada en el haz y la densidad de referencia; coeficiente de variación de las densidades representadas; y error relativo en la estimación de la abundancia. Resultados del día 12 de septiembre para la lubina de tamaño intermedio (C4) a 201 kHz.	191
Figura 5.27. De arriba abajo a intervalos de 1 hora: Media y desviación típica del centro de masas, y de los límites superior (<i>S</i>) e inferior (<i>F</i>) del cardumen; media de la densidad observada en el haz y la densidad de referencia; coeficiente de variación de las densidades representadas; y error relativo en la estimación de la abundancia. Resultados del día 16 de septiembre para la lubina de mayor tamaño (C2) a 201 kHz.	192

Figura 5.28. De arriba abajo a intervalos de 1 hora: Media y desviación típica del centro de masas, y de los límites superior (<i>S</i>) e inferior (<i>F</i>) del cardumen; media de la densidad observada en el haz y la densidad de referencia; coeficiente de variación de las densidades representadas; y error relativo en la estimación de la abundancia. Resultados del día 18 de septiembre para la lubina de mayor tamaño (<i>C2</i>) a 201 kHz.....	193
Figura 6.1. Jaula experimental de 3 m de diámetro y 2.5 m de altura. Detalle del montaje de los transductores para las mediciones acústicas desde el aspecto ventral de los peces.....	201
Figura 6.2. Equipo empleado para la generación del pulso transmitido y la grabación de la señal de ecos, formado por un sistema PXI portátil, un amplificador, y un ordenador.	202
Figura 6.3. Forma de onda del eco correlada procedente de un pez situado en la parte central de una traza registrada de forma ventral para la mayor talla.....	205
Figura 6.4. Evolución de la forma de onda correlacionada en función de su posición dentro de una traza registrada ventralmente. Bajo a la izquierda se muestra un zoom del ecograma donde aparece la traza, donde se indica con puntos rojos qué pings han sido representados.	205
Figura 6.5. Geometría del modelo a la izquierda y detalle de la malla empleada a la derecha.	207
Figura 6.6. Forma de onda correlada obtenida mediante simulación del modelo 2D con simetría de revolución, correspondiente al eco de un pez situado en el eje acústico de la fuente para una traza registrada ventralmente.	208
Figura 6.7. Relación potencial entre la masa y el valor medio de las distribuciones de la altura acústica, medida ventral y dorsalmente (Tabla 6.3).....	211
Figura 7.1. Ejemplo de ecograma registrado para el pienso de 4 mm. La línea naranja corresponde a la mínima distancia incluida en el análisis y la línea roja a la distancia máxima. Arriba se muestra el ecograma de la envolvente del eco (<i>Amp</i>) y abajo el ecograma de detecciones individuales (<i>SED</i>), donde se puede apreciar en rojo la detección de una traza.	219
Figura 7.2. Densidad de probabilidad del <i>TS</i> máximo de las trazas a una frecuencia de 200 kHz para los calibres de 4, 6 y 7 mm. Las trazas tienen una longitud mínima de 75 ecos, y están formadas por ecos con una <i>LE</i> entre 0.5 y 2m, una <i>MDF</i> de 1°, y una <i>MCG</i> de 12 dB.....	221
Figura 7.3. Relación lineal entre la media del <i>TS</i> máximo de las trazas y el logaritmo en base 10 del calibre para una frecuencia de 200 kHz. Las trazas tienen una longitud	

mínima de 75 ecos, y están formadas por ecos con una *LE* entre 0.5 y 2m, una *MDF* de 1° y una *MCG* de 12 dB.....222

Símbolos y abreviaturas

<i>A</i>	Área de recepción efectiva del transductor
<i>a_i</i>	Coefficiente para el cálculo del función exacta del <i>TVG</i> en función del tiempo para dispersores individuales
<i>a_γ</i>	Parámetro de forma de la función densidad de probabilidad Gamma
<i>AAD</i>	Altura acústica dorsal, normalmente expresada en cm
<i>AAV</i>	Altura acústica ventral, normalmente expresada en cm
<i>B</i>	Ancho de banda del receptor de la ecosonda, en Hz
<i>b_i</i>	Coefficiente para el cálculo del función exacta del <i>TVG</i> en función del tiempo para múltiples dispersores
<i>b_m</i>	Ordenada en el origen de la ecuación de la recta que relaciona el <i>TS</i> con el logaritmo en base 10 de la <i>L</i> , en dB
<i>b_{Ray}</i>	Parámetro de escala de la función densidad de probabilidad de Rayleigh
<i>b_γ</i>	Parámetro de escala de la función densidad de probabilidad Gamma
<i>BM</i>	Biomasa total en una jaula, en Tn
<i>c</i>	Velocidad de propagación del sonido, en m/s
<i>C</i>	Calibre del pienso, normalmente expresado en mm
<i>CG</i>	Compensación de ganancia en una dirección, en dB
<i>CM</i>	Centro de Masas
<i>Corr</i>	Factor de corrección obtenido mediante la calibración de la DT-X
<i>CV</i>	Coefficiente de variación, en %
<i>D</i>	Función directividad, adimensional
<i>D_{celda}</i>	Diagonal de la celda, en m
<i>D_{dB}</i>	Función directividad expresada en dB
<i>dR</i>	Resolución espacial, en m

dt	Resolución temporal, en s
dV_s	Diferencial de volumen de muestreo, en m^3
$d\beta 1$	Resolución angular en la dirección longitudinal, en ° mecánicos/pasos
$d\beta 2$	Resolución angular en la dirección transversal, en ° mecánicos/pasos
$d\sigma_{bs}$	Sección transversal de retrodispersión de los dispersores situados en un volumen dV_s
$d\sigma_s$	Sección transversal de dispersión de los dispersores situados en un volumen dV
$d\Omega$	Diferencial del ángulo sólido, en sr
$d\omega$	Diferencial de la frecuencia angular, en rad/s
EA	Error absoluto
EAM	Error absoluto medio
EE_{min}	Mínimo espaciado entre ecos, relativo a la longitud del pulso transmitido
ER	Error relativo, en %
ERM	Error relativo medio, en %
f	Frecuencia de la onda acústica, en Hz
f_s	Frecuencia de muestreo, en Hz
Fz	Factor de relación de impedancias eléctricas entre el transductor y el circuito receptor, adimensional
FC	Factor de condición, normalmente expresado en g/cm^3
FDP	Función densidad de probabilidad
g	Ganancia del transductor, adimensional
G_{Sv}	Ganancia del transductor para el cálculo del Sv de la EK60, en dB
$G_{Sv,act}$	Valor actual del G_{Sv} , en dB
$G_{Sv,corr}$	Valor corregido del G_{Sv} mediante la calibración, en dB
G_{TS}	Parámetro de calibración ganancia del transductor de la EK60 para el cálculo del TS , en dB
$G_{TS,act}$	Valor actual de G_{TS} , en dB
$G_{TS,corr}$	Valor de G_{TS} obtenido mediante la calibración, en dB
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_{Rx}	Corriente eléctrica suministrada al circuito receptor durante la recepción de ecos, en A
I_s	Intensidad acústica dispersada por el blanco, en W/m^2
I_{Tx}	Corriente eléctrica aplicada en bornes del transductor durante la transmisión, en A
I_0	Función de Bessel modificada de primera especie de orden cero
IC	Intervalo de confianza para la media
ID	Índice de directividad, en dB
$ID_{máx}$	Índice de directividad en la dirección de máxima radiación del transductor, en dB
IP	Intervalo de predicción
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
$L_{1/2}$	Polinomio de Laguerre
L_{bs}	Longitud de retrodispersión, en m
L_{celda}	Tamaño de la celda, en m
L_τ	Longitud del pulso transmitido en el agua, en m
LE	Longitud del eco normalizada a la longitud del pulso transmitido, adimensional
LI	Nivel de intensidad acústica, normalmente expresado en dB ref. 1 μPa
LP	Nivel de presión acústica, normalmente expresado en dB ref. 1 μPa
LW_{Rx}	Nivel de potencia eléctrica suministrada al circuito receptor durante la recepción de ecos, en W
$LW_{Rx,comp}$	Nivel de potencia eléctrica suministrada al circuito receptor durante la recepción de ecos comprimido y redondeado a un número entero

m	Pendiente de la ecuación de la recta que relaciona el TS con el logaritmo en base 10 de la L
M	Masa del pez, normalmente expresado en g
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	Nivel de ruido, en dB ref. 1 μ Pa
$Offset_{\beta 1}$	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	Respuesta en frecuencia del sistema electroacústico definida en potencia de forma bidireccional
p	Amplitud de presión de la onda acústica, en Pa
p_{bs}	Amplitud de presión de la onda acústica retrodispersada, en Pa
p_{inc}	Amplitud de presión de la onda acústica incidente, en Pa
p_{ref}	Presión acústica eficaz de referencia, normalmente 1 μ Pa
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	Distancia a la fuente sonora, en m
R'	Distancia al blanco, en m
R^2	Coefficiente de determinación, adimensional
r_a	Alto de un pistón plano rectangular, en m
r_b	Ancho de un pistón plano rectangular, en m
$R_{c.lej}$	Distancia a campo lejano del transductor, en m

R_L	Parte real de la impedancia eléctrica de entrada del circuito receptor, en Ω
$R_{m\acute{a}x}$	Distancia al transductor en la que se detecta el máximo valor del TSu 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_T	Parte real de la impedancia eléctrica de entrada del transductor, en Ω
R_{Sv}	Vector distancia empleado por la EK60 en la medida del S_v
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
RMS	Valor cuadrático medio
s	Desviación típica de una muestra
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
$s_{a,corr}$	Parámetro de calibración de la EK60 para el cálculo del S_v , adimensional
s_{Rice}	Parámetro de no centralidad de la función densidad de probabilidad de Rice
S_{Rx}	Sensibilidad del transductor durante la recepción, expresada normalmente en $V/\mu Pa$
$S_{Rx,dB}$	Valor de S_{Rx} en dB, normalmente ref. $1 V/\mu Pa$
$S_{Tx,i}$	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
$S_{a,corr_{corr}}$	Valor de $S_{a,corr}$ obtenido mediante la calibración, en dB
SED	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>SMP</i>	Supresión de múltiples picos
<i>Sv</i>	Potencia volumétrica de retrodispersión, en dB ref. a 1 m ² /m ³
<i>Sv_{med}</i>	Valor medido del <i>Sv</i> de la esfera de calibración, en dB ref. 1 m ³ /m ²
<i>Sv_{teór}</i>	Valor teórico del <i>Sv</i> de la esfera de calibración, en dB ref. 1 m ³ /m ²
<i>t_{del}</i>	Retardo debido al ancho de banda finito de la ecosonda y del dispersor
<i>T_{ping}</i>	Intervalo entre pings, en segundos
<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>TPRL</i>	Reducción del nivel de potencia transmitida de la DT-X, en dB
<i>TS</i>	Target strength o potencia del blanco, 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_{Love}</i>	Target strength calculado según la expresión de Love (1977), en dB ref. 1 m ²
<i>TS_{med}</i>	Valor medido del <i>TS</i> de la esfera de calibración, en dB ref. 1 m ²
<i>TS_{Medio}</i>	Valor medio del <i>TS</i> de una traza, 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_{Máx}</i>	Valor máximo del <i>TS</i> de una traza, en dB ref. 1 m ²
<i>TS_{P075}</i>	Valor del percentil 75 del <i>TS</i> 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>TS_{UMáx}</i>	Valor máximo del <i>TS_u</i> de una traza, en dB ref. 1 m ²
<i>tv_g</i>	Ganancia variable con el tiempo definida de forma lineal

TVG	Ganancia variable con el tiempo o, también llamada time varied gain, en dB
V_{Rx}	Tensión eléctrica aplicada suministrada al circuito receptor durante la recepción de ecos, en V
$V_{Rx,dB}$	Valor de V_{Rx} expresado en dB ref. 1 V
V_s	Volumen muestreado por el pulso acústico, en m ³
$V_{s,dB}$	Volumen muestreado por el pulso acústico, en dB
V_{Tx}	Tensión eléctrica aplicada en bornes del transductor durante la transmisión, en V
$V_{Tx,rms}$	Tensión eficaz aplicada en bornes del transductor durante la transmisión, en V
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
X_L	Parte imaginaria de la impedancia eléctrica de entrada del circuito receptor, en Ω
X_T	Parte imaginaria de la impedancia eléctrica de entrada del transductor, en Ω
$y_{estimado}$	Valor estimado a partir de un modelo
y_{medido}	Valor medido
Z_L	Impedancia eléctrica de entrada del circuito receptor, en Ω
Z_T	Impedancia eléctrica de entrada del transductor, en Ω
Z_T'	Impedancia eléctrica de salida del transductor, en Ω
ϕ	Diámetro, en m
$Z_{\alpha/2}$	Variable normal tipificada
α	Coefficiente de absorción del medio de propagación, en dB/m
α_G	Parámetro de localización de la función densidad de probabilidad de Valores Extremos Máximos

β	Coficiente de absorción del medio de propagación, normalmente en Np/m o Np/km
β_G	Parámetro de escala de la función densidad de probabilidad de Valores Extremos Máximos
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
γ	Parámetro gamma, cociente entre σ_c y σ_d , adimensional
γ_{E-M}	Constante de Euler-Mascheroni
Γ	Función Gamma
ΔR	Resolución espacial debida a la frecuencia de muestreo de la ecosonda, en m
ε	Error
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°/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

$\sigma_{bs,ef}$	Sección transversal de retrodispersión eficaz, en m ²
σ_c	Sección transversal de retrodispersión concentrada, en m ²
σ_d	Sección transversal de retrodispersión distribuida, en m ²
σ_{Rice}	Parámetro de escala de la función densidad de probabilidad de Rice
σ_s	Sección transversal de dispersión, en m ²
τ	Duración del pulso transmitido, en s
$\phi_{\beta 1}$	Fase eléctrica correspondiente al ángulo longitudinal, en ° eléctricos
$\phi_{\beta 1,N}$	Fase eléctrica correspondiente al ángulo longitudinal, en pasos
$\phi_{\beta 2}$	Fase eléctrica correspondiente al ángulo transversal, en ° eléctricos
$\phi_{\beta 2,N}$	Fase eléctrica correspondiente al ángulo transversal, en pasos
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

Anexo Fotográfico

1. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL PARA LA MEDIDA DEL *TS* DE LA DORADA A CORTAS DISTANCIAS



Fotografía 1. Montaje de la jaula experimental, paso 1. En tierra se amarra la parte más profunda de la red al anillo anticorriente. Se emplean bidones llenos de agua para proporcionar flotabilidad a la red y al anillo y poder así realizar el montaje desde la superficie.



Fotografía 2. Montaje de la jaula experimental, paso 2. Se introduce la red y el anillo anticorriente en el agua, y se amarra el anillo anticorriente al anillo de flotación con una separación entre ambos de unos 5 m. Se fija la red al anillo de flotación.



Fotografía 3. Montaje de la jaula experimental, paso 3. Se amarra la parte superior de la red a la barandilla.



Fotografía 4. Montaje de la jaula experimental, paso 4. Se fija la jaula a los norayes contiguos, permitiendo cierto movimiento de la jaula para evitar daños bajo condiciones meteorológicas adversas. Se instalan boyas que señalizan la instalación de la jaula.



Fotografía 5. Fabricación de los muertos empleados para mantener la posición de la jaula y las boyas de señalización.



Fotografía 6. Instalación de los muertos en los lindes de la zona delimitada por la lámina de agua reservada.



Fotografía 7. Cambio de red, paso 1. Se sube a mano el anillo anticorriente y se fija próximo al anillo de flotación. A continuación se suelta la red del anillo anticorriente y del anillo de flotación, quedando asegurado de la barandilla.



Fotografía 8. Cambio de red, paso 2. Se va saltando la red de la barandilla y se va amarrando al gancho de una grúa. Una vez se ha colgado completamente la red, se eleva y se extrae al muelle.



Fotografía 9. Cambio de red, paso 3: Una vez se tiene la red en el muelle y se sostiene en alto con ayuda de la grúa y se limpia con una hidrolimpiadora.



Fotografía 10. Detalle de la jaula con la nueva red, que se trata con pintura antifouling para evitar que se adhieran organismos a la red, minimizando así los cambios de red.



Fotografía 11. El equipo de trabajo encargado de realizar la instalación y los cambios de red, así como el mantenimiento de la jaula.



Fotografía 12. Detalle de los organismos fijados en el anillo anticorriente después de eliminar la población de mejillones.



Fotografía 13. Tareas de mantenimiento de la jaula: eliminación de mejillones y otros organismos adheridos a los anillos y a los cabos, y comprobación de la red, los cabos, los muertos y las boyas de señalización.



Fotografía 14. Instalación de la plataforma de los transductores en el fondo de la jaula para la realización de medidas ventrales. Se fija la plataforma a la cruceta de la estructura secundaria con bridas.



Fotografía 15. Detalle del sistema de fijación de los cables de los transductores a la estructura secundaria, para evitar la detección acústica de los cables. Se coloca un grillete a mitad de radio y otro próximo a la circunferencia, que permiten el guiado de los cables por el lateral de la jaula.



Fotografía 16. Detalle de los transductores instalados en el fondo de la estructura secundaria para la realización de mediciones ventrales. Antes de comenzar a medir es necesario sumergir la estructura secundaria hasta el fondo de la jaula.



Fotografía 17. Detalle de los transductores instalados en superficie para la realización de mediciones dorsales. Se emplean dos boyas tipo donuts para darle flotabilidad a la plataforma y se fija mediante cuatro cabos amarrados al anillo de flotación. Se tapa la jaula con una red para evitar que gaviotas o personas pesquen las doradas.



Fotografía 18. Detalle del extremo del tubo situado en el interior del tinglado que se emplea para llevar los cables hasta la jaula.



Fotografía 19. Detalle del extremo del tubo pasacables situado en la pared vertical del muelle próxima a la jaula.



Fotografía 20. Detalle del tipo de unión empleada para empalmar el cable de los transductores.



Fotografía 21. Laboratorio de hidroacústica situado en el tinglado nº 3 del Puerto de Gandia.



Fotografía 22. Transceptor de la ecosonda EK60 y portátil para el control y almacenado de datos.



Fotografía 23. Plataforma con los diferentes transductores utilizados para las mediciones acústicas.



Fotografía 24. Plataforma con los transductores a finales del mes de julio de 2013 con una gran cantidad de organismos adheridos debido a las altas temperaturas del agua.



Fotografía 25. Red de la estructura secundaria a finales del mes de julio de 2013, donde se puede apreciar una gran cantidad de organismos adheridos que ocasionan el cierre de la luz de la malla.



Fotografía 26. Reparación tanques para el mantenimiento de las doradas. Lijado de los tanques con una radial.



Fotografía 27. Reparación tanques para el mantenimiento de las doradas. Lijado de la parte interna del tanque.



Fotografía 28. Reparación tanques para el mantenimiento de las doradas. Lijado de la parte interna del tanque.



Fotografía 29. Reparación tanques para el mantenimiento de las doradas. Una vez lijados se aplica fibra de vidrio con resina para prevenir fugas de agua.



Fotografía 30. Tanques instalados para el mantenimiento de las doradas en el tinglado.



Fotografía 31. Bomba de superficie empleada para la recirculación de agua de los dos tanques.



Fotografía 32. Detalle del interior del tanque de biobolas empleado para el filtrado biológico del agua de los tanques.



Fotografía 33. Doradas clasificadas en cestillos según su tamaño.



Fotografía 34. El equipo de trabajo encargado de reparar los tanques.

2. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL PARA LA MEDIDA DEL TS Y EL SV DE DORADA Y LUBINA EN CONDICIONES DE PRODUCCIÓN.



Fotografía 35. Dispositivo de Culmarex. Instalación de la ecosonda en la barandilla de la jaula y de las baterías sobre los anillos de flotación.



Fotografía 36. Dispositivo de Culmarex. Montaje del transductor sobre una plataforma de madera anclada a un flotador salvavidas que le proporciona flotabilidad para la realización de mediciones dorsales.



Fotografía 37. Dispositivo de Culmarex. Instalación del transductor en superficie orientado hacia el fondo para la toma de mediciones dorsales. Se sitúa a un tercio del diámetro de la jaula.



Fotografía 38. Dispositivo de Culmarex. Detalle del transductor sumergido y del cardumen de lubina en el interior de la jaula.



Fotografía 39. Dispositivo de Piagua. Instalación de la ecosonda en la barandilla de la jaula, la caja de baterías sobre los anillos de flotación, y de la antena wifi en un mástil fijado al candelero próximo a la ecosonda.



Fotografía 40. Dispositivo de Piagua. Se asegura el cable del transductor a la barandilla.



Fotografía 41. Dispositivo de Piagua. Montaje del dispositivo experimental en la jaula de dorada ecológica.



Fotografía 42. Dispositivo de Piagua. Instalación del transductor en superficie a un tercio del diámetro de la jaula.



Fotografía 43. Dispositivo de Piagua. Instalación del transductor en superficie. Se amarra con dos cabos a la barandilla de la jaula.



Fotografía 44. Dispositivo de Piagua. Detalle de la red del lateral de la jaula. Presenta movimiento en oblicuo debido a las corrientes.



Fotografía 45. Dispositivo de Piagua. Doradas en una jaula en condiciones de producción.



Fotografía 46. Dispositivo de Piagua. Embarcación empleada para el montaje experimental en la jaula.



Fotografía 47. Dispositivo de Piagua. Torre de Control del Puerto Deportivo de Aguadulce. Se instala la anena wifi en la terraza y el ordenador de control en una sala del último piso.

3. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL PARA LA MEDIDA DE LA FORMA DE ONDA DEL ECO



Fotografía 48. Instalación de los transductores en una plataforma de madera. El transductor 200-28 CM (blanco) se emplea para la medida de la forma de onda y el ES200-7C para la medida del *TS* junto con la EK60.



Fotografía 49. Instalación de los transductores en el fondo de la jaula.



Fotografía 50. Instalación de la jaula y una embarcación de apoyo en el canal del Puerto de Gandia.



Fotografía 51. Sistema PXI portátil de generación y adquisición de señales, amplificador y ordenador de control.