

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

Master en Eval. Amb. Ecosistemas marinos y Cost.



**UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA**



**ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR DE GANDIA**

**“Caracterización del target strength de
piensos comerciales mediante
ecosondas monohaz y de haz partido”**

TRABAJO FINAL DE MASTER

Autor/a:

Susana Llorens Escrich

Tutor/a:

Isabel Pérez Arjona

GANDIA, 2016

ÍNDICE

RESUMEN.....	3
ABSTRACT.....	4
1. INTRODUCCIÓN.....	5
1.1. CONCEPTOS PREVIOS DE ACÚSTICA SUBMARINA.....	6
2. OBJETIVO.....	15
3. MATERIAL Y MÉTODOS.....	16
3.1. ECOSONDAS.....	16
3.2. LUGAR DE MEDICIÓN.....	20
3.3. DISPOSITIVO RED. CESTO.....	21
3.4. PIENSOS.....	23
3.5. PROCESADO Y ANÁLISIS DE DATOS.....	24
4. RESULTADOS.....	29
4.1. DETECCIÓN ACÚSTICA DE DIFERENTES CALIBRES DE GRANOS DE PIENSO CON ECOSONDA MONOHAZ A 200 KHZ.....	29
4.2. DETECCIÓN ACÚSTICA DE DIFERENTES CALIBRES DE GRANOS DE PIENSO SECOS Y HÚMEDOS CON ECOSONDAS DE HAZ PARTIDO, A 120 Y 200 KHZ.....	30
5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	35
6. CONCLUSIÓN.....	38
7. PROPUESTA FUTURA.....	39
8. BIBLIOGRAFÍA.....	40
AGRADECIMIENTOS.....	42

RESUMEN

Una de las líneas de investigación en acuicultura está enfocada a reducir los impactos económicos y ambientales relacionados con la dispensación excesiva de alimento en las jaulas submarinas. La acústica submarina puede ser una herramienta eficaz con el fin de determinar el momento en el que los individuos están saciados y el alimento dispensado cae al fondo sin ser ingerido. El propósito del trabajo es la caracterización acústica, mediante la determinación del *target strength*, de diferentes calibres de granos de pienso. La metodología utilizada es la insonificación desde abajo de los *pellets* en descenso desde la superficie, mediante un ecosonda monohaz a 200 kHz y dos ecosondas de haz partido, a 120 y 200 kHz. Los resultados muestran una relación lineal entre el *target strength* y el calibre de los granos.

Palabras clave: Ecosonda, piensos, acuicultura, *target strength*.

ABSTRACT

One of the lines of research in aquaculture is aimed to reduce the economic and environmental impacts associated with the excessive food dispensing in sea cages. Underwater acoustics can be an effective tool to determine the moment when the fish are satiated and food is not being ingested. The aim of the present study is the acoustic characterization of different pellet sizes by determining the target strength. The methodology is the bottom-upinsonification of the pellets descending from the surface by a 200 kHz single-beam echosounder and two split-beam echosounders working at 120 and 200 KHz. The results show a linear relationship between target strength and feed size.

Keywords: Echosounder, pellets, aquaculture, target strength.

1. INTRODUCCIÓN

Existen una gran variedad de cultivos acuícolas en medio marino en los que la alimentación de los individuos está constituida por piensos comerciales. Actualmente gran parte de la inversión económica de una piscifactoría es en la alimentación de los organismos, llegando a ser del 50 al 60% en el caso del cultivo de salmón [1]. No es tarea sencilla conocer el momento en el que los individuos ya han ingerido la cantidad de alimento necesaria y rentable para un adecuado crecimiento. Habitualmente se determina el cese del suministro por observación, se considera que los individuos están saciados si la cantidad de peces que están en la parte superficial, donde acuden a alimentarse, es nula o notablemente inferior a la que hay en los primeros momentos del proceso de alimentación. Este método se dificulta por la elevada densidad de individuos y la turbidez del agua [2], que lo hace aun más inexacto. Debido a esta inexactitud se aporta pienso en exceso, se pierde cerca del 8,26% del alimento total [3], lo que conlleva el correspondiente gasto económico y un impacto ambiental añadido por el exceso de materia orgánica que se deposita en el lecho marino debido al depósito del alimento sobrante en el fondo que provoca un enriquecimiento en nutrientes [4].

Se han desarrollado diferentes estudios orientados a aportar una cantidad óptima de alimento a los individuos de cultivo, desde el cálculo de la cantidad de pienso necesaria para un cultivo mediante la recolección de los granos no ingeridos [5] hasta un mecanismo de “auto-alimentación” en el que mediante mordiscos de los peces se activa el dispensador de alimento, no siendo totalmente eficiente porque en ocasiones se produce “alimentación accidental” [6]. También se han llevado a cabo mecanismos de control indirecto del proceso de alimentación, como los “sistemas de retroalimentación interactiva”, basados en el ajuste de la cantidad de alimento mediante la detección de los *pellets* no ingeridos o mediante la evaluación del comportamiento de alimentación de los peces. Juell en 1991 [7] desarrolló un método de detección acústica del pienso no ingerido acumulado y de los granos de pienso individuales, y Blyth en 1993 [8] utilizó la detección de *pellets* mediante sensores infrarrojos [2]. Posteriormente se desarrollaron software de análisis de imagen orientados a la detección y cuantificación del pienso sobrante [9, 10]. Además se han utilizado ecosondas en combinación con videocámaras, éstas últimas para determinar la posición de los individuos y la velocidad de natación, como indicativos de apetito. En 2003, Mallekh desarrolló un método de determinación del cese de suministro mediante acústica pasiva, basado en los

sonidos producidos por el rodaballo durante la alimentación, un declive de los sonidos de alimentación es indicativo de saciedad, por lo tanto es posible un aporte óptimo de alimento para el crecimiento del rodaballo en condiciones de cultivo [2] . Sin embargo este último método no es extrapolable a otras especies de interés puesto que es específico del rodaballo.

Por motivos económicos y ambientales existe un interés en diseñar métodos que permitan suministrar la cantidad óptima de alimento para el cultivo en jaulas marinas, y la acústica submarina puede ser una herramienta idónea para este cometido.

1.1. CONCEPTOS PREVIOS DE ACÚSTICA SUBMARINA

A continuación, se introducen los conceptos básicos de acústica submarina necesarios para comprender el desarrollo del Trabajo de Fin de Master. [11, 12, 13].

Propagación de ondas acústicas en el medio marino

Las ondas acústicas son ondas de presión originadas por la propagación de una perturbación mecánica en un medio de propiedades elásticas, lo que produce compresiones y dilataciones que se transmiten de un punto al contiguo. El movimiento de las partículas del medio provocado por el paso de la onda es en la dirección de propagación, por ello las ondas acústicas son ondas longitudinales.

Las ondas acústicas generadas se propagan en todas las direcciones del espacio a partir del punto de origen, de modo que las partículas en movimiento forman una esfera cada vez más grande a medida que se transmite la perturbación. Se trata en este caso de **ondas esféricas**. La representación gráfica de la propagación de una onda acústica se puede observar en la Figura 1.

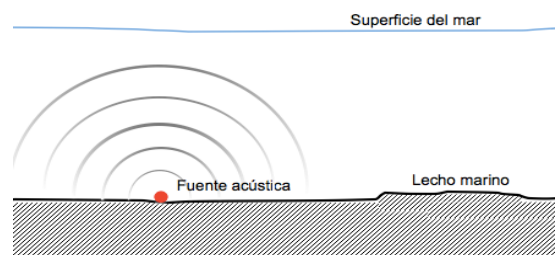


Figura 1. Representación gráfica de la propagación esférica de una onda acústica submarina.

La velocidad de propagación (c) de las ondas depende de dos características del medio en el que viaja: la densidad (ρ) y el módulo de elasticidad (E), éste último cuantifica la variación relativa de volumen o densidad debida a variaciones de presión. Esta relación se refleja en la siguiente ecuación:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1)$$

El agua es un medio más denso y menos compresible que el aire, lo que da lugar a una gran diferencia de velocidad de propagación del sonido entre ambos medios, siendo de 1500 a 2000 m/s en el agua y de 340 m/s en el aire.

Toda onda se caracteriza por:

La frecuencia (f): el número de vibraciones por segundo, expresado en Hertzios (Hz). En acústica submarina se utilizan frecuencias de 10 Hz a 1 MHz.

El periodo (T): el tiempo, en segundos, en el que se produce una vibración completa. Es la inversa de la frecuencia.

La longitud de onda (λ): la distancia real entre dos puntos del medio consecutivos que están en la misma fase, es decir, sometidos al mismo movimiento en el mismo instante. Dicho de otro modo, es la distancia que viaja la onda durante un periodo con una determinada velocidad. La unidad de medida es el metro.

Los términos expuestos se relacionan de la siguiente manera:

$$\lambda = cT = \frac{c}{f} \quad (2)$$

Además la propagación del sonido lleva asociada una energía acústica debida al movimiento de las partículas y a las fuerzas de presión que dan lugar a la onda. El flujo de energía por unidad de superficie y tiempo es la **intensidad** (I), la cual depende principalmente de la amplitud de la presión (p) y de la velocidad de propagación del medio. Si se tratase de una onda plana la ecuación que refleja la intensidad es la siguiente:

$$I = \frac{p_0^2}{2\rho c} \quad (\text{en W/m}^2) \quad (3)$$

La **potencia** (P) es la intensidad total que recibe una superficie.

$$P = I S \quad (\text{en W}) \quad (4)$$

Una onda que viaja por un medio e impacta con la superficie de otro medio sufre **reflexión**, parte de la energía rebota con ángulo especular a la onda incidente, y **refracción**, parte de la energía sigue propagándose en el segundo medio (Figura 2). Ambos fenómenos juegan un papel crucial en acústica submarina. Para comprenderlos es importante conocer el concepto de **impedancia acústica** (Z) del medio, determinado por su densidad y por la velocidad de propagación del sonido en el mismo, relacionado de la siguiente manera:

$$Z = \rho c \quad (5)$$

La unidad de medida de la impedancia es el Rayleigh o Rayl ($\text{Kg/m}^2\text{s}$).

Cuánto mayor sea la diferencia entre las impedancias de ambos medios, mayor porcentaje de la energía será reflejada. Por el contrario, si las impedancias son muy similares, la energía de la onda se transmitirá al segundo medio casi en su totalidad.

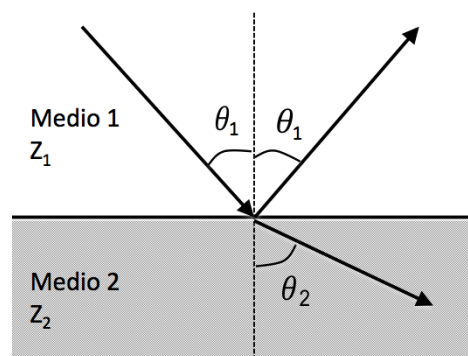


Figura 2. Reflexión y refracción de una onda acústica en la interfase entre dos medios con diferente impedancia.

La impedancia del agua es alrededor de $1,545 \cdot 10^6$ Rayls y la del aire 442 Rayls, esta gran diferencia provoca que una onda acústica que se propaga en el mar y se encuentra con aire, como puede ser burbujas o la superficie del mar, sufre una reflexión casi total, muy poca parte de la energía se transmite al aire.

Por último, conviene destacar que las ondas acústicas que se transmiten en el agua sufren **pérdidas de energía por propagación**. Se dan dos principales tipos:

Pérdidas por propagación geométrica

Como se ha comentado anteriormente, la propagación de la onda acústica es esférica, de modo que, a medida que ésta se transmite, la superficie de la

esfera aumenta. La energía de una onda acústica se conserva, sin embargo, debido a ese aumento de superficie conforme aumenta la distancia a la fuente, se produce una disminución de intensidad entre un punto y otro punto más alejado del origen (Figura 3). Esta diferencia de intensidades entre dos puntos a diferentes distancias a la fuente es inversamente proporcional a la superficie total de la “esfera” en cada distancia.

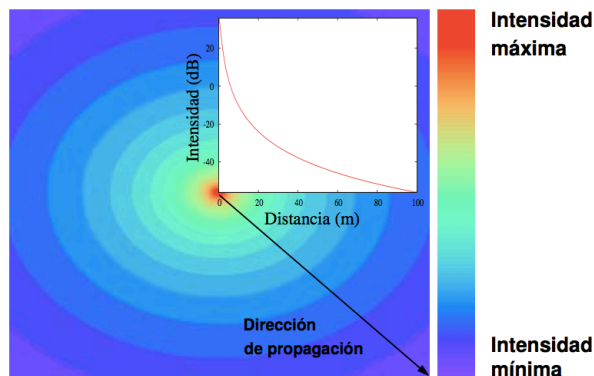


Figura 3. Disminución de intensidad por propagación geométrica. Fuente: [11].

Pérdidas por atenuación

El agua marina es un medio de propagación disipador, que absorbe parte de la energía de la onda transmitida. Esa energía se disipa por dos mecanismos, disipación viscosa y disipación química. La disipación viscosa ocurre porque para mover unas partículas respecto a sus partículas vecinas es necesario aplicar energía, y la disipación química es debida a que las moléculas pierden su equilibrio químico y parte de la energía de la onda se invierte en desplazar ese equilibrio, principalmente se trata de la relajación de las moléculas de sulfato de magnesio (MgSO_4) a frecuencias cercanas a 100 kHz y a la relajación de las moléculas de ácido bórico (B(OH)_3) a frecuencias cercanas a 1 kHz.

Acústica submarina

Las ondas electromagnéticas pueden ser utilizadas como una herramienta eficaz para conocer y estudiar en medio aéreo ya que se transmiten a gran velocidad y sufren leve pérdida de la energía, sin embargo en medio acuático sufren gran absorción, por lo tanto se atenúan y presentan dificultades, si no imposibilidades, para la obtención de información de aquello que está mucho más allá de la superficie. Esto no ocurre con las ondas sonoras. Debido a las características de las

ondas acústicas y a su comportamiento en agua, la acústica submarina constituye una herramienta eficaz para la detección y caracterización de diferentes elementos, desde conocer el perfil y la naturaleza del fondo marino, hasta detectar bancos de peces con objetivo pesquero o de censos poblacionales.

En acústica submarina se utiliza el **decibelio** (dB) como unidad relativa de medida para expresar el nivel de intensidad de la onda acústica. Un dB es 10 veces el logaritmo en base 10 del ratio entre dos magnitudes.

El decibelio se expresa de la siguiente manera:

$$10 \log \frac{I_i}{I_{ref}} \quad (6)$$

donde I_i es la intensidad registrada y I_{ref} es la intensidad de referencia, que depende del medio.

El decibelio también se aplica a otras magnitudes, como la potencia o la presión acústica.

La principal herramienta que permite el uso de la acústica submarina son las **ecosondas**. Estos dispositivos aplican acústica activa, es decir, son capaces de enviar una onda acústica de determinadas características y recibir su eco, es decir, la reflexión de esa onda al encontrarse con un obstáculo. El software de la ecosonda proporciona directamente la distancia del objeto, puesto que se conoce la velocidad de propagación del sonido en el medio y el tiempo empleado en emitir una onda y recibir su eco. Además el análisis del eco acústico puede dar información acerca del obstáculo del que proviene, como puede ser el lecho marino.

Una ecosonda está constituida por dos elementos, el **transceptor**, generador de señales eléctricas, y el **transductor**, formado por piezas de materiales con propiedades piezoeléctricas (como cuarzo o cerámicas sintéticas) capaces de convertir las señales eléctricas que le llegan del transceptor en pequeñas vibraciones que generan las ondas acústicas. El transductor emite **pings** de sonidos, que son paquetes de ondas con una determinada frecuencia y duración (duración de pulso), lo cual es definido por el usuario mediante el software de la ecosonda en un ordenador.

El transductor emite ondas acústicas, las cuales, debido principalmente a la geometría y frecuencia de las mismas, se propagan en el espacio con una determinada direccionalidad, de manera que la intensidad de la onda es máxima en el eje de propagación, disminuyendo ésta a medida que se aleja del mismo. Esto conforma el haz acústico, el cual está compuesto por el **lóbulo principal** y los **lóbulos laterales**. La forma del haz acústico es específica de cada transductor, y viene determinada por la **directividad** del mismo. En la Figura 4 se observa el esquema de directividad de un transductor. La forma del lóbulo principal y de los lóbulos laterales está determinada por la caída de intensidad, en dB, que se produce en todos los ángulos respecto a la orientación del transductor. En la dirección de propagación (ángulo 0°) se produce el máximo de intensidad, a medida que se aleja del eje de proyección ésta disminuye.

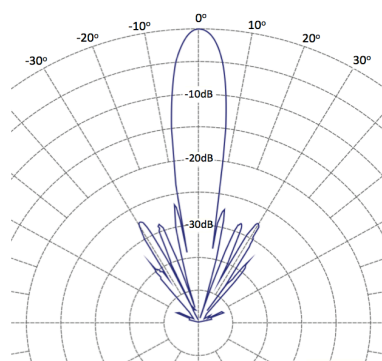


Figura 4. Esquema de directividad de un transductor. Fuente: [14]

En acústica submarina se trabaja habitualmente considerando lóbulo principal, en la región en la que la onda acústica no sufre una caída de intensidad por encima de un límite establecido, que suele ser de -3 dB. Los lóbulos laterales pueden provocar interferencias ya que generan ecos de artefactos externos al área de estudio.

Los principales tipos de ecosondas son:

Ecosondas monohaz o *single-beam echosounders*

Genera un único haz acústico (Figura 5), emite *pings* que al encontrar un obstáculo se reflejan y el eco producido es recibido por el mismo transductor.

La aplicación de las ecosondas *single-beam* más extendida es en batimetría, ya que en este tipo de muestreo generalmente no es necesario un detalle milimétrico. La ecosonda se sitúa en el casco de la embarcación, orientada hacia abajo, de modo que “barre” la columna del agua y el lecho marino.

Detecta tanto el fondo como la vegetación o los artefactos que hay sobre estos, proporcionando información a cerca de la profundidad. Normalmente se obtiene información complementaria del segundo eco (el paquete de ondas viaja hasta el fondo, el eco producido rebota en el casco de la embarcación o en la superficie del mar y vuelve hacía el fondo, donde se vuelve a reflejar. Éste segundo eco en el fondo es también detectado por el transductor). La combinación de los registros del primer y segundo eco proporciona información a cerca de la dureza y la rugosidad, lo cual permite hacer una clasificación de los tipos de suelo.

La principal ventaja de las ecosondas monohaz es el bajo coste sin embargo cubre áreas poco extensas e integra toda el área que recoge el haz acústico, lo que puede falsear resultados.

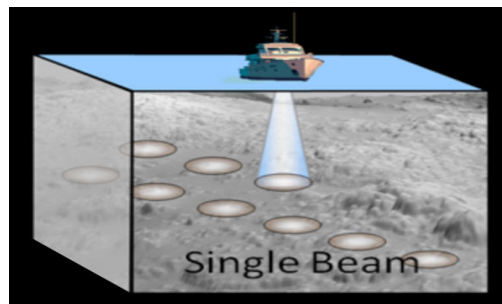


Figura 5. Esquema del funcionamiento de una ecosonda monohaz. Fuente: [15]

Ecosondas de barrido lateral o *side scan sonars*

Al igual que las ecosondas monohaz, emiten un único haz acústico, pero en este caso es un haz estrecho, semejante a una "cortina" acústica (Figura 6).

El *side scan sonar* es arrastrado por la embarcación manteniéndose cerca del suelo, de modo que mide la sombra acústica, llegando a tener precisiones centimétricas.

Puede trabajar en un amplio rango de frecuencias, siendo común trabajar a frecuencias elevadas, del orden de 100 kHz, con una duración del pulso mínima con el objetivo de aumentar la precisión. Sin embargo a frecuencias elevadas la absorción es mayor, por ello es recomendable que trabaje a cortas distancias del suelo.

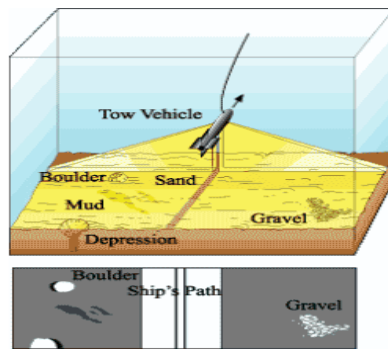


Figura 6. Esquema del funcionamiento de una ecosonda de barrido lateral. Fuente: [15]

Ecosondas de haz partido o *split-beam echosounders*

El transductor emite un haz acústico dividido en 4 (Figura 7), de modo que es capaz de determinar la distancia de los objetos en cada uno de los cuadrantes, inferir la información recibida por los cuatro y determinar su posición angular respecto al haz acústico. De esta manera se puede conocer la distancia exacta del objeto respecto al transductor y su posición en el plano perpendicular a la dirección de propagación de la onda acústica desde la fuente. Además permite determinar la trayectoria de objetos móviles que insonifica, como pueden ser individuos de especies de interés pesquero. Es el tipo de ecosonda que presenta mayor precisión en la detección de objetos puntuales.

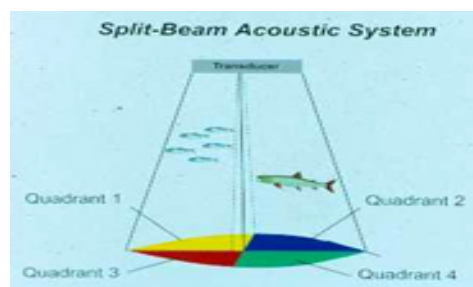


Figura 7. Esquema del funcionamiento de una ecosonda de haz partido. Fuente: [16]

Ecosondas multihaz o *multibeam echosounders*

Las ecosondas multihaz son capaces de mapear amplias áreas con rapidez y exactitud puesto que emiten multitud de haces acústicos estrechos, contiguos unos a otros (Figura 8). Se utilizan sobre todo en mediciones batimétricas, posicionadas en la parte inferior del casco del barco. La medición batimétrica se realiza en cada haz individualmente, mediante el registro del tiempo y el ángulo de la recepción se reconstruye la trayectoria de la onda en la columna de agua y

la posición del punto de impacto en el lecho marino. En aguas profundas y a bajas frecuencias son capaces de cubrir hasta 10000 km² por día.

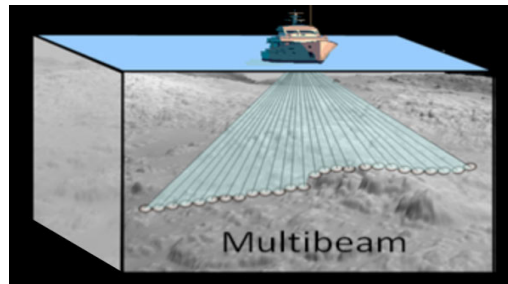


Figura 8. Imagen de ecosonda multihaz.
Fuente: [15]

En el momento en el que la onda acústica emitida por el transductor encuentra un obstáculo en su camino es reflejada, en mayor o menor medida, en forma de eco acústico. La parte que se refleja en la dirección de incidencia llega al transductor y puede, por tanto, ser analizado. El **análisis del eco** puede proporcionar valiosa información a cerca del objeto que produce la reflexión, también denominado *target*.

La ecuación 7 expresa como el nivel del eco (*EL*) obtenido con la emisión de un pulso acústico y recepción del mismo depende de diversos factores:

$$EL = SL - 2TL + TS \quad (7)$$

SL es el nivel con el que emite la fuente, *TL* son las pérdidas que sufre por propagación, multiplicadas por 2 ya que pierde en el camino de ida y de vuelta y *TS* es el *target strength*, que es la contribución al nivel del eco que proviene del blanco insonificado.

El **target strength** (*TS*), que viene a significar “la fuerza del blanco”, se define como el ratio, en dB, de las intensidades de las ondas reflejadas e incidentes, tal cual se expresa en la ecuación 8, donde I_{bs} es la intensidad de la onda reflejada e I_i es la intensidad de la onda incidente.

$$TS = 10 \log \frac{I_{bs}}{I_i} \quad (8)$$

El *TS* es característico de cada objeto y depende de factores como su geometría, el material del que esté compuesto o su estructura interna. Por ello es utilizado en acústica submarina para la caracterización acústica de objetos de interés, como pueden ser individuos de determinada especie de pez pelágico y determinado tamaño.

2. OBJETIVO

El propósito del presente Trabajo de Fin de Máster es la caracterización acústica de pienso comercial utilizado en acuicultura mediante la determinación del *TS* de diferentes calibres de grano pienso y el diseño de parte del dispositivo específico de estudio. Se pretende con ello encontrar la correlación entre el calibre de los granos y la respuesta acústica representada por el *TS*.

3. MATERIAL Y MÉTODOS

Con el fin de determinar el *TS* de los diferentes calibres de granos de pienso comercial se procede a la detección acústica de los mismos mediante dos tipos de ecosondas, una ecosonda monohaz que emite a 200 kHz, la cual permite determinar el *TS* de los granos de pienso y la distancia de los mismos al transductor y dos ecosondas de haz partido, una de ellas emite a 200 kHz y otra a 120 kHz, que permiten determinar, además del *TS* del objeto y la distancia al transductor, la posición angular y la trayectoria del objeto en el plano perpendicular a la orientación de los transductores. Durante las mediciones los transductores se sitúan en la parte inferior orientados hacia arriba, de modo que se detecta los granos de piensos que se suministran desde superficie y descienden.

Momentos antes de proceder a las mediciones de los granos de pienso con las diferentes ecosondas se realiza una medición acústica en modo pasivo en el mismo lugar, de modo que se tiene un conocimiento acústico del medio con el fin de tener un registro ante posibles anomalías que se puedan presentar durante las mediciones experimentales.

3.1. ECOSONDAS

Medidas acústicas con ecosonda monohaz

La ecosonda monohaz utilizada es una ES15 *single-beam* de Simrad®, a una frecuencia de 200 kHz. Las medidas realizadas tienen en cuenta el haz acústico hasta una caída de -3 dB, el cual presenta un ángulo de apertura de 30.3°. Las especificaciones de las mediciones realizadas con *single-beam* se presentan en la Tabla 1.

El transductor *single-beam* fue situado a una profundidad de 2.5 m.

El método de medida con *single-beam* presenta un inconveniente a tener en cuenta. Tal y como se ha expuesto en el apartado 1. Introducción, el haz acústico presenta una mayor intensidad en la zona central del haz, con respecto a la periferia, es decir, los objetos que no se encuentran en la zona central del haz son insonificados con una menor intensidad. La ecosonda monohaz, al tratarse de un solo haz acústico, no es capaz de determinar la posición angular de los objetos con respecto al transductor, lo que impide corregir las variaciones de *TS* debidas a la menor

intensidad de insonificación de los objetos que no se encuentran en el eje central del haz acústico. Por tanto se esperan diferencias en los *TS* de los objetos según la posición angular de éstos con respecto al transductor, considerándose una variabilidad añadida por el método.

Tabla 1. Datos de las mediciones realizadas con ecosonda monohaz.

Ecosonda monohaz	
Frecuencia	200 kHz
Apertura del haz (hasta caída -3 dBs)	30.3°
Potencia	90 W
Duración del pulso	64 μ s
Intervalo de muestreo	0.012 s
Ancho de banda	18.76 kHz
Intervalo entre ping	25 ms
Frecuencia de absorción	200 kHz

Medidas acústicas con ecosonda de haz partido

Las ecosondas utilizadas para medir los diferentes calibres de granos de pienso son EK60 *split-beam* de Simrad®, una con un transductor que emite a 200 kHz y otro a 120 kHz. En este caso las medidas realizadas son teniendo en cuenta el haz acústico a una caída de -10 dB. Tanto para la ecosonda de 200 kHz como para la de 120 kHz, el ángulo de apertura del haz es de 7° [14]. En la Tabla 2 se muestran las especificaciones de las mediciones realizadas con las dos ecosondas de haz partido.

Ambos transductores se han situado a una profundidad de 3,3 m y se han considerado las medidas a partir de 1 m de distancia al transductor, asegurando que se encontraban en el campo lejano y considerando que a esa distancia el ancho del haz era lo suficientemente amplio.

Las ecosondas de haz partido, debido a la emisión en cuadrantes diferenciados, son capaces de determinar la posición angular de los objetos insonificados respecto al transductor. Esto supone una ventaja frente a las ecosondas *single-beam*, puesto que es posible corregir las desviaciones de *TS* que se producen por las diferentes

posiciones angulares de los objetos detectados. De modo que se obtienen las medidas de “TS sin compensar” y “TS compensado”, las medidas de este último es con las que se trabaja.

Tabla 2. Datos de las mediciones realizadas con las ecosondas de haz partido a 200 y 120 kHz.

Ecosondas haz partido		
Frecuencia	200 kHz	120 kHz
Apertura del haz (hasta caída -10 dBs)	7°	7°
Potencia	90 W	100 W
Duración del pulso	64 μ s	64 μ s
Intervalo de muestreo	16 μ s	16 μ s
Ancho de banda	11.8 kHz	18.76 kHz
Intervalo entre ping	50 ms	50 ms
Frecuencia de absorción	200 kHz	120 kHz

Software ecosondas. ER60

El programa informático utilizado es el programa de medida ER60, específico de las ecosondas con las que se trabaja, el cual permite indicar los parámetros para el control del transceptor, grabar y visualizar los datos. En la Figura 9 se muestra una captura de pantalla de la ventana principal del programa durante el trabajo con la ecosonda *split-beam* de 200 kHz, en ella se puede observar 6 secciones:

- Posición de las detecciones individuales: Muestra la posición de los *target* en el plano perpendicular a la orientación del transductor mediante un sistema de dos ejes que dividen en 4 cuadrantes.
- Distribución de detecciones individuales: Muestra un histograma que refleja el número de detecciones de cada *TS*.
- Escala de colores: Los colores indican la intensidad de la detección. En este caso se ha configurado para que la escala de color indique el *TS* compensado (corregido con la posición del *target* en el haz).
- Ecograma: Se observa la representación gráfica de las detecciones durante la medición. En el eje de las *x* se representa el tiempo y el número de *ping* enviado. En el eje de las *y* se representa la distancia al transductor. El transductor se ha situado sumergido y orientado hacia arriba, por ello la distancia 0 se sitúa en la parte superior y se representa

al revés que en la realidad. En la imagen se observa como a distancia próxima a 3,3 m hay una detección de elevada intensidad, correspondiente a la superficie del mar, que debido a la diferencia de impedancias entre agua y aire se refleja gran parte de la energía.

- e) Osciloscopio: Representa gráficamente las señales eléctricas a tiempo real.
- f) Información de parámetros: En ella se visualizan la configuración de las mediciones y de la representación gráfica.

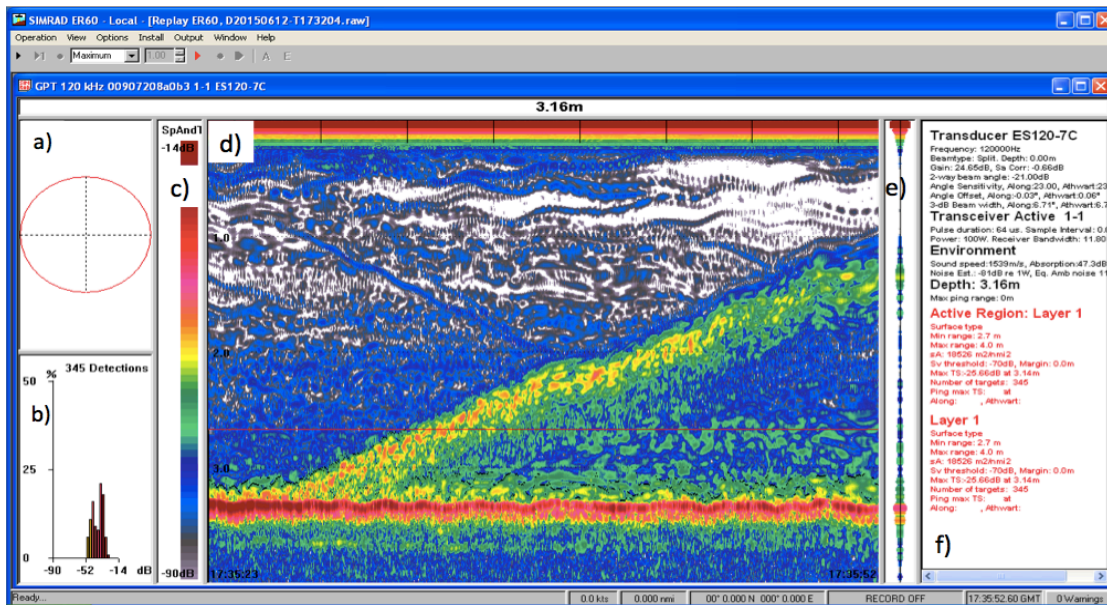


Figura 9. Captura de pantalla del programa ER60. a) Posición de las detecciones individuales; b) Histograma de las detecciones individuales; c) Barra de colores; d) Ecograma; e) Osciloscopio; f) Información de parámetros.

Calibración de las ecosondas

Es recomendable realizar la calibración del sistema previamente a las mediciones, si bien es cierto, que se puede realizar la calibración a *posteriori*. En el presente trabajo se hicieron las calibraciones para cada transductor previamente, en condiciones similares a las experimentales.

La calibración de las ecosonda *single-beam* fue previa a la realización del TFM. Las ecosondas *split-beam* sí fueron calibradas durante la realización del TFM, dos días antes de que se llevaran a cabo las mediciones del estudio, en el mismo lugar que éstas, y con los mismos parámetros de medición.

El proceso se lleva a cabo mediante la detección de un blanco de referencia, en este caso se trata de una esfera de calibración. Las esferas de calibración están homologadas y presentan un *TS* característico y verificable, de modo que se pueden comparar las detecciones de la esfera durante el proceso con el valor estándar, configurar los parámetros del transductor en función de las comparaciones y obtener el calibrado del instrumento.

En este caso se trataban de dos esferas de cobre de elevada pureza y pulidas perfectamente, cada una de un calibre específico, adecuado a la frecuencia de medición, en el caso de 120 kHz la esfera era de 23 mm de diámetro y para 200 kHz de 15 mm. En cada proceso de calibración la esfera era movida con ayuda de una caña de pescar (Figura 10) con el fin de que fuera detectada por la ecosonda. Siendo necesaria la obtención de 100 a 200 detecciones dispersadas en los 4 cuadrantes y en el eje.

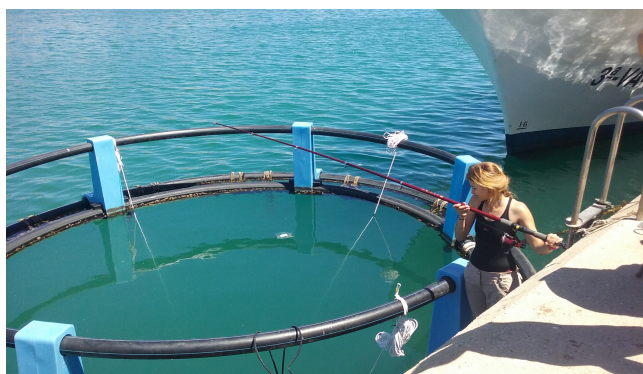


Figura 10. Calibración de la ecosonda *split-beam* de 200 kHz.

Una vez finalizada la calibración es importante comprobar que la desviación existente entre los valores estándar y los valores obtenidos por la ecosonda son aceptables. Para ello se comprueba el error cuadrático medio, siendo aceptable si es menor de 0,4.

3.2. LUGAR DE MEDICIÓN

Las mediciones se llevan a cabo en el puerto de Gandía en el soporte de jaula marina flotante situado en el muelle pesquero.

Se tomaron *in situ* las medidas de temperatura, salinidad, y pH.

3.3. DISPOSITIVO RED. CESTO

Para las medidas con las dos ecosondas de haz partido, con el fin evitar que los diferentes peces (atraídos por la dispensación de pienso) u objetos de gran tamaño de la columna de agua interfirieran con las ondas acústicas y pudieran dificultar la discriminación entre las señales correspondientes a los granos de pienso y ruido, se construyó un dispositivo red.

Para el diseño se tuvieron en cuenta diversos factores que se especifican a continuación:

Luz de malla

Se utilizó una red de material rígido con una pequeña luz de malla (aproximadamente 4 x 5 mm).

Posición de los transductores

Con el objetivo de asemejar el diseño experimental al posible diseño en un situación real de producción, los transductores se localizan en la parte inferior de la jaula orientados hacia la superficie, ya que en situación de producción no sería conveniente que éstos se localizaran en la parte superior orientados hacia abajo. El motivo es que durante el proceso de alimentación los peces ascienden para ingerir los granos de pienso, de manera que en la franja superior se sitúa un elevado porcentaje de individuos, que pueden crear efecto “pantalla acústica” al interceptar los *pings* acústicos, dificultando la insonificación de manera eficaz más allá de la pantalla creada, por lo tanto sería difícil poder obtener una respuesta acústica fiable. Sin embargo con los transductores en la parte inferior, orientados hacia abajo, sería factible poder insonificar los *pellets* para obtener trazas individuales, ya que en la parte inferior el porcentaje de individuos que puedan interferir con el haz acústico es mucho menor.

Dimensiones

El cesto construido tuvo una profundidad de 3.3 m y un diámetro de 1.5 m. Una profundidad de 3.3 m se consideró adecuada debido a que las medidas consideradas para análisis serían a partir de 1 m de distancia al transductor y al fondo fangoso y poco profundo (4 - 5 m).

El diámetro del dispositivo era adecuado teniendo en cuenta la profundidad y la apertura del haz acústico, minimizando la interferencia de los lóbulos laterales con la pared.

En la Figura 11 se muestra el esquema del dispositivo.

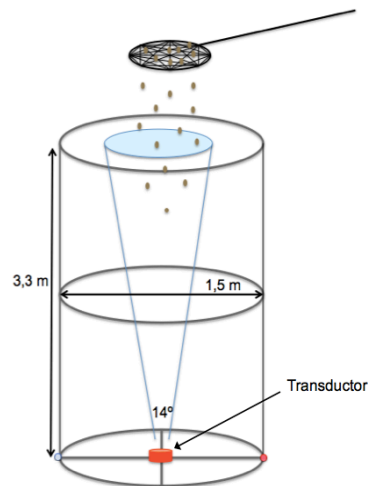


Figura 11. Esquema del diseño del cesto.

La construcción del dispositivo tuvo lugar en el tinglado portuario de la UPV en el puerto de Gandía.

La estructura que conforma el cesto y soporta la malla está constituida por 3 aros realizados con tubo de polietileno y por una estructura de tubos de PVC en forma de cruz al fondo del cesto, cuya función era dar rigidez al fondo para soportar de manera “estática” los transductores. Tanto los tubos de polietileno como los de PVC fueron perforados para ayudar al hundimiento del dispositivo.

Las diferentes partes de la estructura se unieron mediante bridas.

Con el objetivo de que el cesto se mantuviera en la posición correcta y no se inclinase durante las mediciones, fueron instalados 2 plomos de buceador de 2 kg cada uno en la cruz de la parte inferior del cesto y en la parte superior se dispusieron 3 tubos de espuma (tubos utilizados habitualmente en juegos acuáticos).

En la Figura 12 se presentan fotografías de diferentes momentos durante la elaboración del cesto y el cesto ya finalizado e instalado en el lugar de medición, sujetado a la plataforma flotante mediante cuatro cabos.

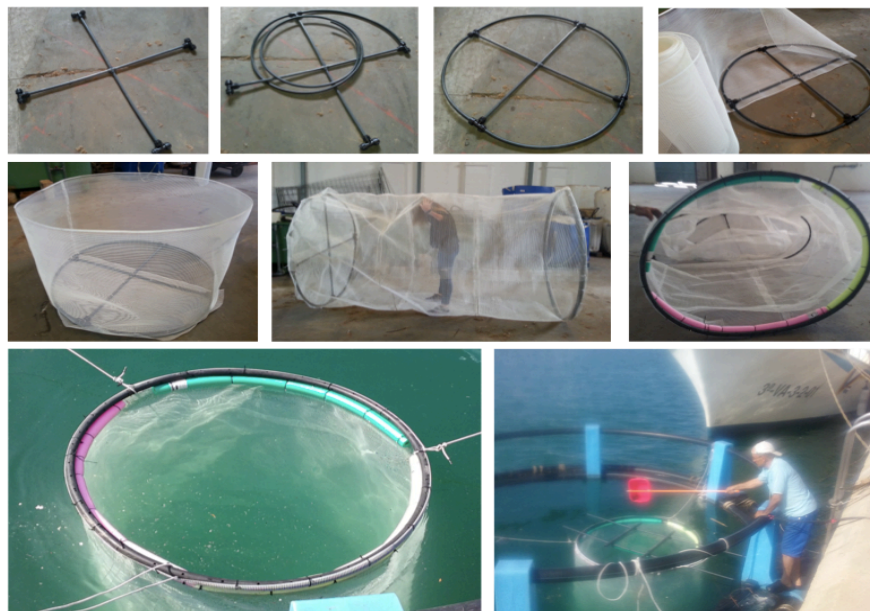


Figura 12. Fotografías del proceso de elaboración del cesto y del mismo ya colocado en el lugar de medición.

3.4. PIENSOS

Los piensos utilizados en el experimento fueron aportados por la empresa Simrad®, en el caso de las medidas con ecosonda monohaz, y por el Departamento de Acuicultura de la UPV, en el caso de las mediciones con ecosondas de haz partido.

Ambos tipos de pienso eran piensos comerciales cuya composición está basada en harina y aceite de pescado.

Conviene conocer diferentes aspectos relacionados con los piensos utilizados:

Calibres

Los calibres de los *pellets* sometidos a estudio fueron 1, 2, 4, 6 y 8 mm en el caso de la ecosonda monohaz y 1,9, 4,5, 6,5 y 12 mm en el caso de las ecosondas de haz partido.

Estado los granos de pienso durante la medición

En el caso de las mediciones con *single-beam*, los *pellets* fueron lanzados en seco al cesto para proceder a la detección de los mismos durante el descenso.

En lo que a las mediciones con *split-beam* se refiere, los granos de pienso se lanzaron en seco y en mojado. El motivo de medir granos ya mojados es la conveniencia de aumentar la similitud entre las condiciones del experimento y las condiciones de la realidad, es decir, en una situación de alimentación mediante pienso a peces en piscifactorías marinas. Las jaulas marinas utilizadas en producción poseen profundidades mucho mayores a las del cesto del presente trabajo, pudiendo llegar a ser de veinte metros. Si un transductor acústico es situado en el fondo para medir acústicamente los granos de pienso en descenso, en el momento en que llega a insonificarlos ya han recorrido una cierta distancia desde la superficie del agua, de modo que se han empapado, sus orificios, antes llenos de aire, han sido reemplazados por agua, su velocidad de caída se ha modificado, así como su densidad y volumen, y con ello su *TS*. En las condiciones que nos competen en el estudio, la profundidad de los transductores es mucho menor, por lo tanto, dispensar el pienso ya mojado permite acercar la situación experimental a la situación real.

Método de dispensación de los granos de pienso

En el trabajo con la ecosonda monohaz el alimento fue dispensado de manera manual, como se hace habitualmente en las jaulas marinas.

El método de suministro fue modificado para el caso de las ecosondas de haz partido. Se utilizó un dispositivo artesanal que permitía colocar cantidades determinadas de pienso en el centro del haz.

3.5. PROCESADO Y ANÁLISIS DE DATOS

Durante las mediciones de campo, los datos obtenidos por las ecosondas son recogidos por el programa ER60 y son almacenados en ficheros *.raw*. A partir de estos ficheros se procesan los datos, utilizando los programas Sonar5-Pro® y Matlab® con el fin de comprobar si existe una correlación entre el calibre de los *pellets* y la respuesta acústica. El análisis estadístico sobre el ajuste a la recta de regresión lineal es llevado a cabo en el programa Statgraphics® mediante ANOVA.

En el procesado de datos se trabaja sobre el *TS* promedio y *TS* máximo. Se decidió trabajar con ambas mediciones para comprobar cual ofrecía mejores resultados. Trabajar con *TS* máximo cobra sentido con la ecosonda monohaz, ya que en el centro del haz es donde la onda acústica presenta mayor intensidad y por lo tanto el *TS* de un objeto será mayor cuanto más cercano a centro del haz se sitúe. De esta manera se trabaja con el *TS* de los ecos y las trazas más cercanos al eje.

Procesado en Sonar5-Pro®.

Mediante el procesado en Sonar5-Pro® se pretende extraer la información de las trazas pertenecientes a detecciones de *pellets* para así obtener las matrices de datos sobre las cuales trabajar.

El programa SonarX® es un software de postprocesado gratuito creado en Noruega por HelgeBalk y TorfinnLindem en 1997 [17], que permite procesar los datos obtenidos por diferentes ecosondas sin necesidad de utilizar el software específico de la ecosonda, permitiendo una mayor accesibilidad a los usuarios. La versión utilizada es el Sonar5-Pro, diseñado principalmente como herramienta de estimación de biomasa e identificación de trazas de peces.

A continuación se detalla el proceso realizado en Sonar5-Pro:

1º. Conversión de ficheros

En primer lugar se han de convertir los ficheros *.raw* obtenidos con ER60 en fichero *.uuu*, a partir de los cuales se realiza el procesado con Sonar5-Pro®.

Mediante la conversión se obtiene el ecograma completo y un ecograma que integra los ecos que pertenecen a un mismo objeto para cada pulso de sonido. Este último es el ecograma SED (*Single Echo Detection*) y es sobre el que se ha trabajado. Los parámetros asignados para la integración de ecos son: una longitud relativa del eco mínima de 0.4 y máxima de 4, un valor mínimo de -80 dB y una aceptación de picos con valores locales mínimos menores de -1.5 dB. Además, en el caso de los datos tomados con haz partido, una máxima desviación estándar del ángulo detectado de 2 y una máxima compensación de 12 dB.

2º. Visualización de ecogramas

En la pantalla principal de Sonar5-Pro® se observa el ecograma del fichero seleccionado. Es recomendable ajustar los umbrales de *TS*, la profundidad que deseamos visualizar y la escala temporal, de manera que podamos identificar las detecciones de interés. En la Figura 13 se muestra una captura de pantalla de uno de los ecogramas obtenidos con *single-beam* en modo SED. La visualización del ecograma es similar al programa ER60 (eje *x*: tiempo y número de *ping* enviado; eje *y*: distancia al transductor, en este caso se ha invertido el eje y para visualizarlo como en la realidad, la superficie en la parte superior y la distancia 0 al transductor en la parte inferior; colores: intensidad de la detección, *TS*). Cada punto corresponde a una detección de un *ping* de sonido. También se pueden identificar las trazas, cada una compuesta por la serie de detecciones individuales pertenecientes a un mismo grano de pienso. Las detecciones de granos de pienso se identifican porque son de intensidad elevada comparada con el resto y pertenecen a trazas descendentes. En el caso de la experiencia con el transductor monohaz hubo presencia de peces, que dan lugar a detecciones de intensidad elevada, habitualmente con trayectoria horizontal.

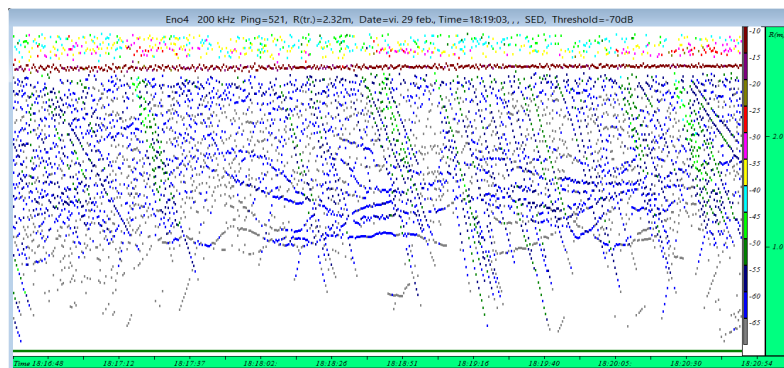


Figura 13. Visualización de un ecograma de las mediciones de granos de pienso de 8 mm de calibre con *single-beam* en Sonar5-Pro.

3º. Eliminación de ruido

Para poder trabajar con las trazas correspondientes a granos de pienso individuales es conveniente eliminar el ruido de los ecogramas. En este caso el ruido fue eliminado de manera manual. En la Figura 14 se presenta un ecograma con el ruido eliminado, se observan las trazas aisladas, de manera que facilita su estudio.

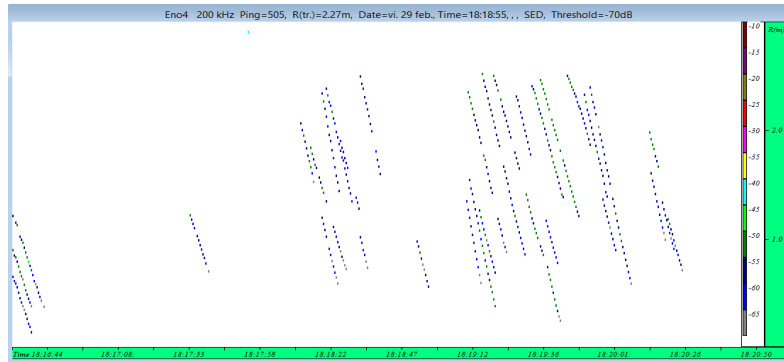


Figura 14. Visualización de un ecograma de las mediciones de granos de pienso de 8 mm de calibre con *single-beam* con el ruido eliminado, de manera que se identifican fácilmente las trazas.

4º. Trazado

Con el trazado se agrupa la información de cada traza compuesta por los datos de *TS* (y datos complementarios) de los ecos que componen cada una, es decir, de las detecciones de un mismo grano de pienso. Sólo se seleccionan las trazas con una longitud y continuidad de ecos aceptables, de modo que se asegure que todos los ecos pertenecen a un mismo *pellet*.

Mediante el trazado se crearon ficheros independientes de manera que cada fichero contenía la información de las trazas correspondientes a un mismo calibre de pienso medido con un determinado método.

5º. Exportación de la información de las trazas

Los ficheros creados en el apartado anterior fueron exportados en documentos de texto .txt para ser posteriormente procesados en Matlab®.

Procesado en Matlab®.

Mediante el procesado en Matlab® se calculan los *TS* promedio y *TS* máximo, la distribución de los mismos y se realiza el análisis de correlación por mínimos cuadrados.

La primera fase del análisis en Matlab® consiste en obtener, para cada calibre de pienso, el *TS* promedio (*TSp*) y el *TS* máximo (*TSm*) de cada traza y a partir de estos conjuntos de datos se obtuvo la media y el máximo del conjunto de los *TSp* de las trazas ($\langle TSp \rangle$ y $MTSp$, respectivamente) y lo mismo para el conjunto de *TSm* de las trazas ($\langle TSm \rangle$ y $MTSm$). En la Figura 15 se muestra el esquema del proceso realizado para cada calibre.

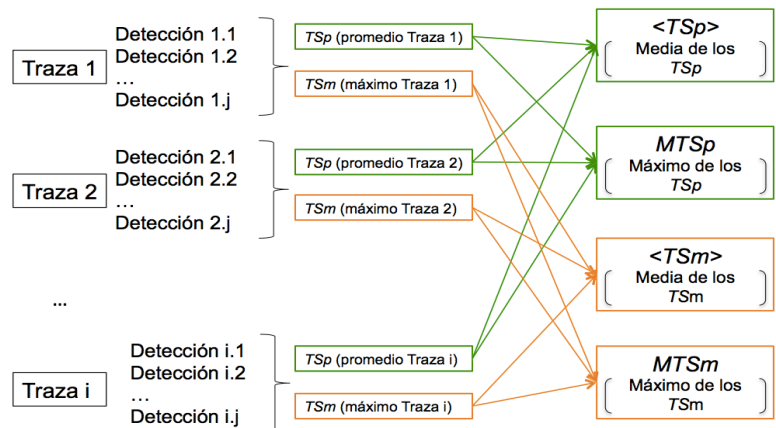


Figura 15. Esquema de los cálculos realizados con el TS de los granos de pienso de cada calibre.

El TSp de cada traza, y el $\langle TSp \rangle$ y $\langle TSm \rangle$ de cada calibre se calcularon teniendo en cuenta que el TS es en escala logarítmica, puesto que son dB. Se muestra como ejemplo la ecuación del TSp :

$$TSp = 10 \log \left(\sum 10^{\frac{TS}{10}} \right) - 10 \log(Necos) \quad (9)$$

donde $Necos$ es el número de ecos que forman la traza.

Una vez obtenidos los resultados de TS , se realizan las rectas de regresión lineal y al análisis de correlación por mínimos cuadrados, cuyo cometido es comprobar si efectivamente existe una relación entre el calibre del grano de pienso, como variable independiente y el TS , como variable dependiente. Dado que el TS se mide en dB y éstos son una medida logarítmica, el análisis se realiza tomando las medidas del calibre en milímetros en logaritmo en base 10.

También se obtienen histogramas de las distribuciones de TSp y TSm por calibre para comprobar que la distribución es normal y poder observar si hay variación dependiente del calibre de grano.

El programa utilizado en Matlab® se incluye en el Anexo I.

4. RESULTADOS

4.1. DETECCIÓN ACÚSTICA DE DIFERENTES CALIBRES DE GRANOS DE PIENSO CON ECOSONDA MONOHAZ A 200 kHz

Mediante las medidas con *single-beam* a 200 kHz se han podido caracterizar acústicamente los 5 calibres de pienso sometidos a análisis. La distribución de *TSp* y *TSm* obtenidos se muestra en la Figura I en el anexo II.

En la Tabla 3 se refleja el número de trazas analizadas para cada calibre y los resultados de *TS* obtenidos.

Tabla 3. Número de trazas analizadas y resultados de *TS* para cada calibre de pienso, medidos con ecosonda monohaz a 200 kHz.

Calibre (mm)	Nº trazas	<i>TSp</i> (trazas)			<i>TSm</i> (trazas)		
		< <i>TSp</i> > (dB)	<i>MTSp</i> (dB)	<i>s</i>	< <i>TSm</i> > (dB)	<i>MTSm</i> (dB)	<i>s</i>
1	31	-64,95	-62,17	1,53	-61,07	-58,41	1,9
2	13	-60,46	-58,47	1,74	-57,68	-55,49	2,27
4	21	-58,49	-50,92	4,25	-51,66	-44,91	5,57
6	44	-55,22	-50,93	3,36	-50,91	-45,57	3,88
8	17	-53,15	-50,91	1,11	-50,87	-47,48	1,54

Como se ha expuesto en el apartado 3. Material y Métodos, se han realizado rectas de regresión lineal, calculadas por mínimos cuadrados, con el fin de comprobar si existe una relación lineal entre la respuesta acústica (*TS*), y el calibre de los granos de pienso (*Log C*), considerando a éste último como variable independiente, y las medidas de <*TSp*>, *MTSp*, <*TSm*> y *MTSm*, como variable dependiente. Los resultados de los coeficientes de la recta (*a* y *b*), el coeficiente de determinación (como porcentaje de la variabilidad de *TS* explicado por el modelo) (R^2), el error cuadrático medio (ECM), el estadístico *F* y el *p*-valor obtenido para el ajuste del modelo se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Resultados de los ajustes mediante regresión lineal, para las medidas realizadas mediante ecosonda monohaz a 200 kHz.

	$y = a \cdot x + b$			
	< <i>TSp</i> > (dB)	<i>MTSp</i> (dB)	< <i>TSm</i> > (dB)	<i>MTSm</i> (dB)
<i>a</i>	12,40	13,82	12,37	15,04
<i>b</i>	-64,86	-61,83	-60,83	-58,14
R^2	0,98	0,91	0,94	0,80
<i>ECM</i>	0,38	1,99	0,98	6,06
<i>F</i>	129,63	31,01	50,52	12,05
<i>p</i> -valor	0,0015	0,0114	0,0057	0,0403

En la Figura 16 se visualizan las 4 rectas de regresión lineal. De derecha a izquierda y de la parte superior a la inferior, se muestran las gráficas que representan la recta de regresión lineal entre $\text{Log } C$ y las medidas de $\langle TS_p \rangle$, $MTSp$, $\langle TSm \rangle$ y $MTSm$, respectivamente.

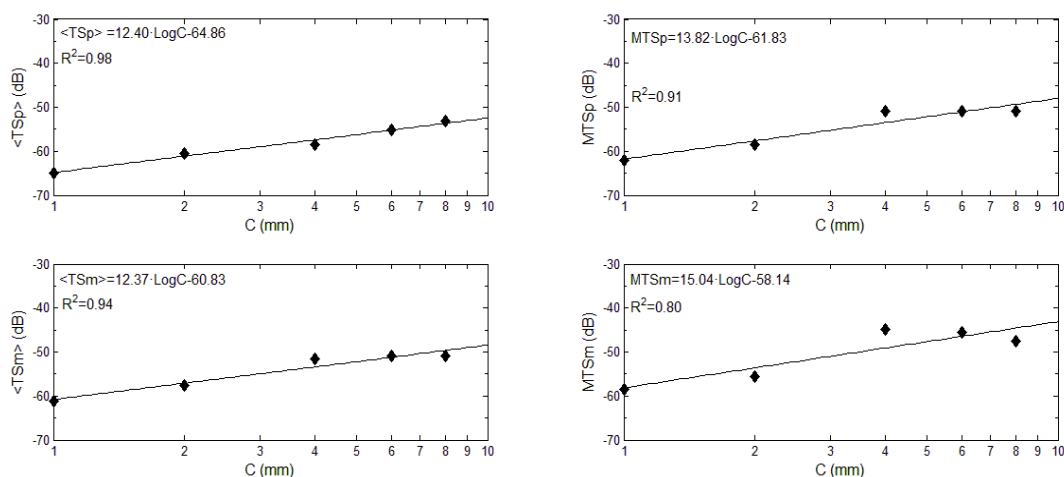


Figura 16. Rectas de regresión lineal entre TS y el logaritmo del calibre de los granos de pienso, medido con ecosonda monohaz a 200 kHz.

4.2. DETECCIÓN ACÚSTICA DE DIFERENTES CALIBRES DE GRANOS DE PIENSO SECOS Y HÚMEDOS CON ECOSONDAS DE HAZ PARTIDO A 120 Y 200 kHz

Mediante las detecciones con *split-beam* a 200 y 120 kHz se han podido caracterizar los 4 calibres de pienso estudiados, tanto suministrados en seco como húmedos. En el anexo II se encuentran las distribuciones de TS_p y TS_m , para cada calibre de pienso, en las Figuras II y III, las distribuciones para piensos secos medidos a 200 y 120 kHz respectivamente y en las Figuras IV y V, las distribuciones para piensos húmedo a 200 y 120 kHz.

En la Tabla 5 se reflejan el número de trazas analizadas para cada calibre y los resultados de TS obtenidos en las mediciones de **pienso seco a 200 kHz**, en la Tabla 6 se muestran los datos de los correspondientes ajustes y del análisis estadístico y en la Figura 17 se representan las 4 rectas de regresión lineal.

Tabla 5. Número de trazas analizadas y resultados de *TS* para cada calibre de pienso seco, medidos con ecosonda de haz partido a 200 kHz.

Calibre (mm)	Nº trazas	<i>TSp</i> trazas			<i>TSm</i> trazas		
		< <i>TSp</i> > (dB)	<i>MTSp</i> (dB)	<i>s</i>	< <i>TSm</i> > (dB)	<i>MTSm</i> (dB)	<i>s</i>
1,9	23	-57,33	-52,49	3,06	-54,13	-49,17	3,44
4,5	15	-58,39	-54,46	2,40	-56,06	-52,59	2,53
6,5	20	-50,95	-47,97	2,47	-48,03	-43,75	2,76
12	8	-43,66	-39,50	3,00	-37,21	-32,76	2,63

Tabla 6. Resultados de los ajustes mediante regresión lineal, para las medidas de pienso seco realizadas mediante ecosonda de haz partido a 200 kHz.

	$y = a \cdot x + b$			
	< <i>TSp</i> > (dB)	<i>MTSp</i> (dB)	< <i>TSm</i> > (dB)	<i>MTSm</i> (dB)
<i>a</i>	17,39	16,17	21,04	20,49
<i>b</i>	-64,85	-60,02	-63,71	-59,03
<i>R</i> ²	0,73	0,66	0,69	0,63
<i>ECM</i>	9,26	11,21	16,85	21,15
<i>F</i>	5,49	3,92	4,41	3,33
<i>p</i> -valor	0,1439	0,1863	0,1704	0,2094

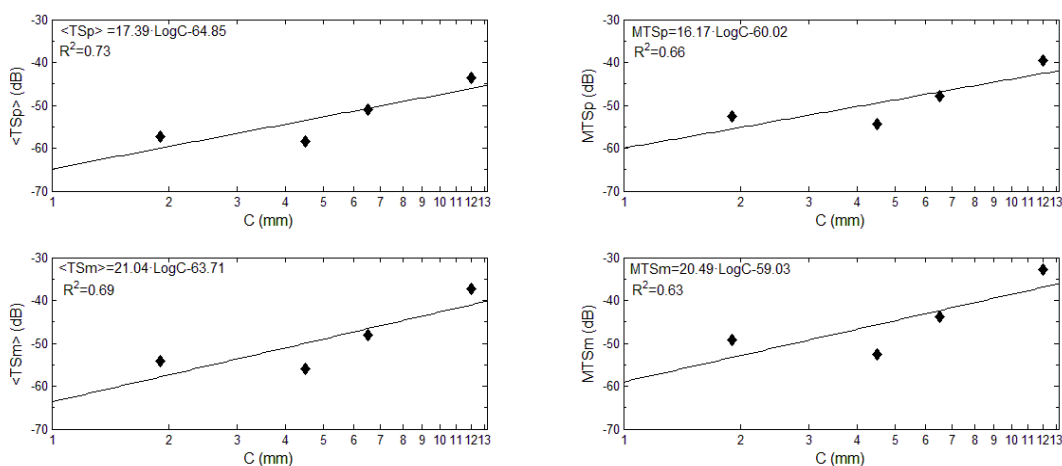


Figura 17. Rectas de regresión lineal entre *TS* y el logaritmo del calibre de los granos de pienso secos, medido con ecosonda de haz partido a 200 kHz.

Los datos de *TS* y el número de trazas analizadas pertenecientes a las mediciones de **pienso seco a 120 kHz** se observan en la Tabla 7, los datos de los ajustes y del análisis estadístico en la Tabla 8 y las rectas de regresión lineal en la Figura 18.

Tabla 7. Número de trazas analizadas y resultados de *TS* para cada calibre de pienso seco, medidos con ecosonda de haz partido a 120 kHz.

Calibre (mm)	Nº trazas	<i>TSp</i> trazas			<i>TSm</i> trazas		
		< <i>TSp</i> > (dB)	<i>MTSp</i> (dB)	<i>s</i>	< <i>TSm</i> > (dB)	<i>MTSm</i> (dB)	<i>s</i>
1,9	11	-58,96	-56,06	2,36	-56,77	-53,94	2,78
4,5	18	-57,65	-52,39	2,66	-54,80	-50,60	2,54
6,5	17	-51,94	-49,34	1,38	-48,78	-45,50	1,60
12	9	-46,93	-45,12	1,47	-44,66	-43,41	1,06

Tabla 8. Resultados de los ajustes mediante regresión lineal, para las medidas de pienso seco realizadas mediante ecosonda de haz partido a 120 kHz.

	$y = a \cdot x + b$			
	< <i>TSp</i> > (dB)	<i>MTSp</i> (dB)	< <i>TSm</i> > (dB)	<i>MTSm</i> (dB)
<i>a</i>	15,39	13,70	15,69	13,85
<i>b</i>	-64,73	-60,40	-62,33	-58,14
R^2	0,87	0,98	0,89	0,94
<i>ECM</i>	3,13	0,35	2,49	1,09
<i>F</i>	12,7	89,91	16,58	29,72
<i>p-valor</i>	0,0705	0,0109	0,0554	0,0320

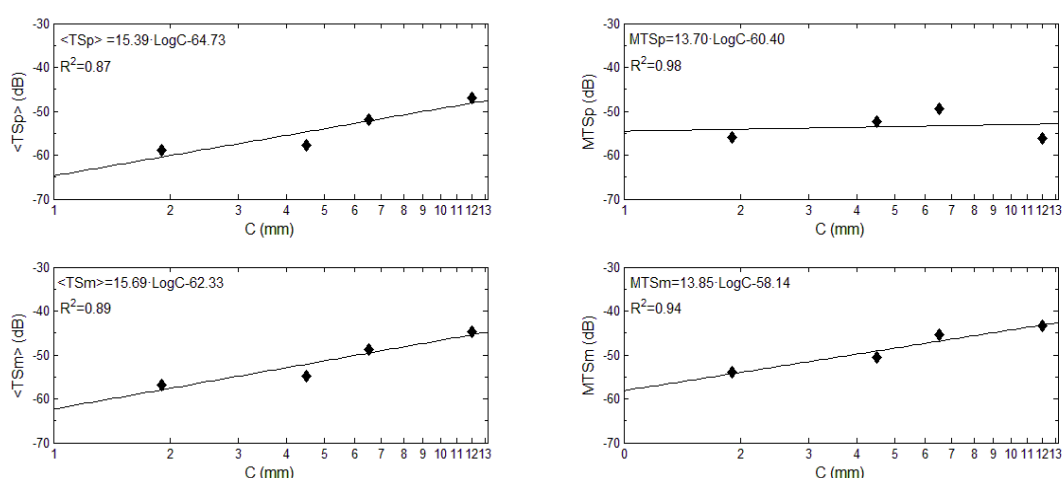


Figura 18. Rectas de regresión lineal entre *TS* y el calibre de los granos de pienso secos, medidos con ecosonda de haz partido a 120 kHz.

Respecto a los resultados de la mediciones de los **piensos húmedos medidos a 200 kHz**, se presentan en la Tabla 9, en la Tabla 10, los datos de los ajustes y de los análisis estadísticos correspondientes. En la Figura 19 están representadas las 4 rectas de regresión lineal.

Tabla 9. Número de trazas analizadas y resultados de *TS* para cada calibre de pienso humedecido, medidos con ecosonda de haz partido a 200 kHz.

Calibre (mm)	Nº trazas	<i>TSp</i> trazas			<i>TSm</i> trazas		
		< <i>TSp</i> > (dB)	<i>MTSp</i> (dB)	<i>s</i>	< <i>TSm</i> > (dB)	<i>MTSm</i> (dB)	<i>s</i>
1,9	17	-64,99	-60,59	2,76	-62,92	-58,28	2,90
4,5	16	-61,14	-59,09	1,60	-57,48	-54,74	2,02
6,5	17	-55,01	-52,92	1,72	-51,03	-46,57	2,39
12	12	-49,90	-47,08	1,83	-43,66	-40,07	2,87

Tabla 10. Resultados de los ajustes mediante regresión lineal, para las medidas de pienso húmedo realizadas mediante ecosonda de haz partido a 200 kHz.

	$y = a \cdot x + b$			
	< <i>TSp</i> > (dB)	<i>MTSp</i> (dB)	< <i>TSm</i> > (dB)	<i>MTSm</i> (dB)
<i>a</i>	19,33	17,21	24,31	23,39
<i>b</i>	-71,41	-67,07	-70,94	-66,43
<i>R</i> ²	0,94	0,87	0,96	0,91
<i>ECM</i>	1,88	3,87	2,13	4,38
<i>F</i>	33,48	12,86	46,52	21,01
<i>p</i> -valor	0,0286	0,0697	0,0208	0,0444

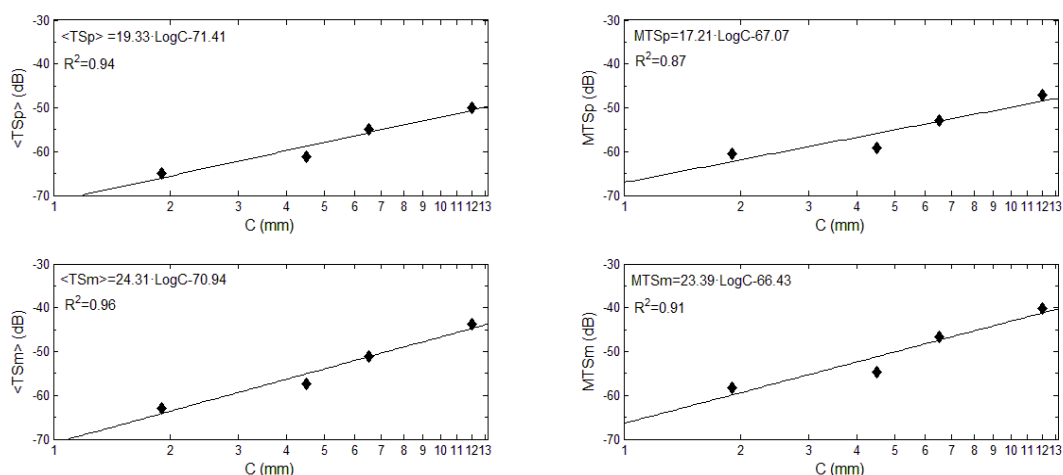


Figura 19. Rectas de regresión lineal entre *TS* y el logaritmo del calibre de los granos de pienso humedecido, medidos con ecosonda de haz partido a 200 kHz.

En la Tabla 11 se reflejan el número de trazas analizadas para cada calibre y los resultados de *TS* obtenidos en las mediciones de **pienso húmedo a 120 kHz**, en la Tabla 12 los datos de los ajustes al modelo lineal y los datos de los análisis estadísticos respectivos y en la Figura 20 se representan las 4 rectas de regresión lineal obtenidas.

Tabla 11. Número de trazas analizadas y resultados de *TS* para cada calibre de pienso humedecido, medidos con ecosonda de haz partido a 120 kHz.

Calibre (mm)	Nº trazas	<i>TSp</i> trazas			<i>TSm</i> trazas		
		< <i>TSp</i> > (dB)	<i>MTSp</i> (dB)	<i>s</i>	< <i>TSm</i> > (dB)	<i>MTSm</i> (dB)	<i>s</i>
1,9	33	-64,27	-57,61	4,43	-60,95	-53,82	4,47
4,5	21	-61,85	-56,92	3,11	-58,56	-53,28	3,08
6,5	21	-56,95	-53,23	2,30	-53,61	-50,01	2,42
12	14	-51,46	-47,59	2,18	-46,86	-42,57	2,48

Tabla 12. Resultados de los ajustes mediante regresión lineal, para las medidas de pienso húmedo realizadas mediante ecosonda de haz partido a 120 kHz.

	$y = a \cdot x + b$			
	< <i>TSp</i> > (dB)	<i>MTSp</i> (dB)	< <i>TSm</i> > (dB)	<i>MTSm</i> (dB)
<i>a</i>	16,18	12,41	17,61	13,62
<i>b</i>	-70,06	-62,60	-67,43	-59,53
R^2	0,91	0,82	0,90	0,98
<i>ECM</i>	2,13	2,83	3,03	4,55
<i>F</i>	20,69	9,14	17,23	6,85
<i>p-valor</i>	0,0451	0,0942	0,0534	0,1202

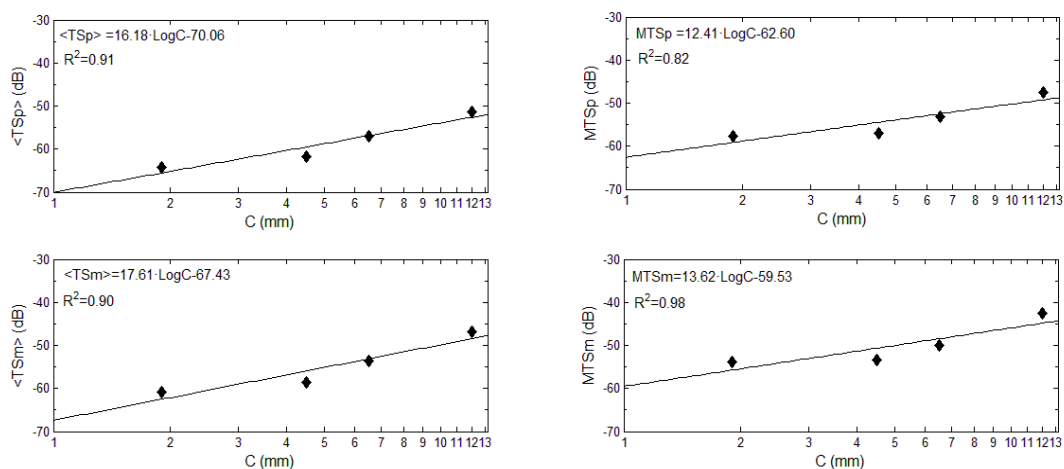


Figura 20. Rectas de regresión lineal entre *TS* y el logaritmo del calibre de los granos de pienso humedecido, medidos con ecosonda de haz partido a 120 kHz.

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Con el fin de asegurar que las trazas analizadas pertenecían a *pellets* individuales sólo se seleccionaron aquellas que tenían una longitud y una continuidad de ecos aceptable, tal y como se indica en el punto 3.5. Es por ello que en algunos casos, más frecuentes en las mediciones con *split-beam*, el número de trazas obtenidas no es elevado. Sin embargo presentan una desviación típica menor de 4 dB, no considerándose alta si se comparan con las obtenidas por Acker [1], a excepción del pienso de 4 mm medido con *single-beam* y del pienso humedecido de 1.9 mm medido con *split-beam* a 120 kHz, los cuales presentan desviaciones mayores de 4 dB, tanto para los *TSp* de las trazas como para los *TSm*.

En la mayoría de los casos la desviación típica de los datos es mayor cuando se ha utilizado los *TSm* de las trazas. En el caso de las medidas con ecosonda mohohaz esto se cumple en todos los calibres. Era esperable puesto que los granos de pienso descienden verticalmente, debido a que el efecto de las corrientes de agua en la zona de medidas era mínimo, por lo tanto los *pellets* que descienden cercanos al eje central del haz tendrán un *TSm* mayor que los *pellets* que descienden en la periferia (El *MTSm* debe ser el *TS* correspondiente al eco más cercano al eje de todos los ecos del muestreo de cada calibre). Esta explicación no es aplicable al caso de las ecosondas de haz partido, ya que se ha trabajado con el *TS* compensado, es decir, se ha corregido utilizando la determinación de la posición angular de los *targets*. Sin embargo es atribuible a que seleccionar el *TS* máximo es tomar un solo dato para representar a toda la traza, que puede variar por diferentes factores como el ángulo de incidencia de la onda acústica o la cantidad de aire que posea el grano, y por lo tanto puede afectar negativamente a la exactitud de los resultados.

En todos los casos analizados se observa una correlación positiva entre el calibre de los granos y el *TS*, indicando, tal y como se esperaba, que la respuesta acústica es mayor cuanto mayor es el tamaño del grano. En todos los casos R^2 es mayor de 0,8 a excepción de los resultados correspondientes a las medidas del pienso seco con *split-beam* a 200 kHz. En el caso de las medidas con *single-beam* el mejor ajuste se da en la relación entre $\log C$ y $\langle TSp \rangle$, con una pendiente de 12.41 y un R^2 de 0.98, es decir, con un nivel de confianza del 95%, el 98% de la variabilidad de $\langle TSp \rangle$ está explicada por el modelo basado en la variación de $\log C$. En el caso de las medidas del pienso seco con *split-beam* el mejor ajuste se da entre $\log C$ y *MTSp* a 120 kHz, dando una recta con pendiente 13.70 y un R^2 de 0.98. Por el contrario para las

medidas de los piensos humedecidos el mejor ajuste se da para *MTSm* a 120 kHz, siendo un R^2 de 0.98 y una pendiente de 13.62, sin embargo, estadísticamente es bajo menos de un 90% de confianza. En el caso de *<TSm>* a 200 kHz resulta un R^2 de 96% y una pendiente de 24,31 con un nivel de confianza de 95%.

Se puede inferir que existe una correlación entre el calibre de los granos de pienso y el *TS*. Sin embargo no se observa que haya una medida claramente mejor al resto, ya que, a excepción de los piensos secos detectados con *split-beam* a 200 kHz, todas muestran unos ajustes aceptables. No se ven diferencias elevadas entre *single-beam* y *split-beam*, a pesar de que se partía de la base de que las segundas son más exactas.

La existencia de relación entre el calibre del pienso y la respuesta acústica deja una línea de investigación abierta al desarrollo de un método capaz de determinar el momento en el que los individuos de una jaula marina han ingerido la cantidad óptima de alimento para su cultivo durante el suministro de pienso mediante la detección de granos no ingeridos que descienden hacia el fondo. Este sistema regularía el proceso de alimentación evitando la pérdida innecesaria de pienso, consiguiendo así disminuir los gastos económicos, producir de manera más eficiente y minimizar el impacto ambiental.

Teniendo en cuenta la posibilidad de aplicar la detección acústica de *pellets* en jaulas marinas de producción, sería conveniente utilizar el método más rentable, es decir, que sea eficaz y a la vez que procure un buen ajuste económico de la actividad. La utilización de la ecosonda monohaz sería la opción que más se ajusta a la propuesta puesto que proporciona buenos resultados y tiene un coste menor que las ecosondas de haz partido.

Dado que no se han analizado piensos húmedos mediante *single-beam*, sería propicia la realización de un análisis de los mismos, de manera que las condiciones de detección se asemejen a las condiciones reales.

Además cabe indicar que estos resultados se han obtenido de detecciones de los piensos bajo condiciones similares a “jaulas vacías” o con muy baja densidad de individuos, muy diferentes a las condiciones de producción. En estas últimas habría una elevada densidad de individuos en el campo insonificado, de modo que los ecogramas presentarían mayor ruido. Si bien es cierto que el *TS* de los peces de

cultivo, como la dorada con un *TS* mayor de -42 dB [18], son mayores que el *TS* de los granos de pienso y las trayectoria de las trazas también son notablemente diferentes, de manera que la discriminación entre los *pellets* y los individuos sería relativamente sencilla. Además el método de detección de *pellets* podría ser utilizado complementariamente a un método de detección del comportamiento de los individuos, teniendo en cuenta que cuando están hambrientos se concentran en la capa superior y a medida que van siendo saciados se desplazan ocupando zonas más inferiores de la columna de agua.

6. CONCLUSIÓN

Se ha detectado pienso de acuicultura en descenso mediante una ecosonda monohaz emitiendo a 200 kHz y dos ecosondas de haz partido, a 120 y 200 kHz, y se han obtenido elevadas correlaciones entre el calibre de los granos de pienso y el *TS* en los tres casos.

No se obtiene una mejoría notable con las ecosondas de haz partido respecto a la ecosonda monohaz y por tanto, considerando el coste y la facilidad de uso de la última, se concluye que la utilización de ecosondas *single-beam* es una buena opción para el estudio de los piensos con técnicas acústicas y se propone esta herramienta como base para futuras investigaciones para el desarrollo de tecnologías de monitorización acústica de la alimentación en acuicultura. [19]

7. PROPUESTA FUTURA

Una vez determinado que existe correlación entre el *TS* y el calibre de los granos de pienso, sería conveniente seguir la línea de investigación enfocada a determinar los factores necesarios que ayuden a la implementación del método en la actividad acuícola. Dado que la utilización de una ecosonda monohaz es una opción posible, el siguiente paso sería la determinación de la relación entre *TS* y el calibre de piensos humedecidos mediante la misma.

Complementariamente a este estudio sería apropiada la caracterización acústica de especies comerciales utilizadas en acuicultura mediante ecosonda *single-beam* con el fin de poder detectar la posición de los individuos en la columna de agua. La detección del pienso no capturado y de los individuos por una misma ecosonda podrían utilizarse cooperativamente para mejorar el sistema de determinación del momento de cese de suministro de alimento.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Acker, T., Burczynski, J., Hedgepeth, J., Ebrahim, A. (2002). Digital Scanning Sonar for Fish Feeding Monitoring in Aquaculture. *Biosonics Inc.*, <http://www.biosonicsinc.com>.
- [2] Mallekh, R., Lagardere, J. P., Eneau, J. P., Cloutour, C. (2003). An acoustic detector of turbot feeding activity. *Aquaculture*, 221(1), 481-489.
- [3] García, M., Sendra, S., Lloret, G., Lloret, J. (2011). Monitoring and control sensor system for fish feeding in marine fish farms. *IET Communications*, 5(12), 1682-1690.
- [4] Pearson, G. (1991). Eutrophication resulting from salmonid fish culture in fresh and swaters: Scandinavian experiences. *Nutritional strategies and aquaculture waster*, 163-185.
- [5] Helland, S. J., Grisdale-Helland, B., Nerland, S. (1996). A simple method for the measurement of daily feed intake of groups of fish in tanks. *Aquaculture*, 139(1), 157-163.
- [6] Alanärä, A., Kadri, S., Paspatis, M. (2001). Feeding management. *Food Intake in Fish*, 332–353.
- [7] Juell, J. E. (1991). Hydroacoustic detection of food waste—a method to estimate maximum food intake of fish populations in sea cages. *Aquacultural engineering*, 10(3), 207-217.
- [8] Blyth, P.J., Purser, G.J. (1993). Detection of feeding rhythms in sea caged Atlantic salmon using new feeder technology. *Fish Farming Technology*. 209-216.
- [9] Foster, M., Petrell, R., Ito, M.R., Ward, R. (1995). Detection and counting of uneaten food pellets in a sea cage using image analysis. *Aquacultural Engineering*, 14(3), 251-269.
- [10] Ang, K. P., Petrell, R. J. (1997). Control of feed dispensation in sea cage using underwater video monitoring: effects on growth and food conversion. *Aquacultural Engineering*, 16(1), 45-62.

- [11] Sánchez Carnero, N. (2012). Técnicas acústicas y software libre: aplicaciones en la gestión costera. Tesis doctoral. Universidad de la Coruña.
- [12] Lurton, X. (2002). An introduction to underwater acoustics: principles and applications. Springer Science & Business Media.
- [13] Kuperman, W., Roux, P. (2007). Underwater acoustics. *Springer Handbook of Acoustics*, 149-204.
- [14] Technical specifications of transducers. Disponible en: www.simrad.com [Consulta: mayo de 2015]
- [15] Ocean Explorer. National Oceanic and Atmospheric Administration. U.S. Department of Commerce. Disponible en: www.oceanexplorer.noaa.gov [Consulta: octubre de 2015]
- [16] American Fisheries Society. Disponible en: www.coralreefinfo.com [Consulta: octubre de 2015]
- [17] Balk, H., Lindem, T. (2014). Sonar4 and Sonar5-Pro. Post Processing systems. Operator manual versión 6.0.3. Norway.
- [18] Soliveres, E., Cebrecos, A., Espinosa, V. (2012). Dorsal and ventral target strength measurements on gilthead sea bream (*Sparus aurata*) in sea cages. *arXiv preprint arXiv:1201.4696*.
- [19] Espinosa, V., Pérez-Arjona, I., Soliveres, E., Llorens, S. (2016). Detection and target strength measurements of uneaten feed pellets with a single beam echosounder. *Aquacultural Engineering*, enviado.

AGRADECIMIENTOS

Una vez concluido el Trabajo de Fin de Máster me gustaría mostrar mis agradecimientos a las personas que me han ayudado y han hecho posible que hoy redacte estas palabras y finalice con ello esta etapa.

En primer lugar mis agradecimientos van dirigidos a mi tutora del trabajo, Isabel Pérez por haberme dado la oportunidad de trabajar con ella y por haberme ayudado y guiado en todo momento. Ella y el equipo de trabajo, Víctor Espinosa, Lucio Calise, Patricia Ordóñez, Vicent Puig y Ester Soliveres, me han enseñado, me han dado ideas, me han corregido y han empleado parte de su tiempo en ayudarme con la calibración, con las medidas...muchas gracias a tod@s. También quiero agradecer a Silvia Martínez y a Vicent Estruch su colaboración.

Gracias a mis compañeras del Desirée Luna Y Verónica Julián por ayudarme en la parte importante y laboriosa que ha sido la construcción del cesto, que parecía fácil pero sus dimensiones y su gran número de bridas lo hacían algo, sólo algo..., complicada.

Por último mil gracias a mi padre, José Llorens, que tiene un cerebro y una maña cuyos límites no conozco, por escuchar mis explicaciones y mis razonamientos, por hacerme ver y entender que la experiencia es un grado y por su tiempo, su esfuerzo y sus ideas en el Tinglado 4 del Puerto de Gandía.

Gracias!!!

