

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

Master en Ingeniería Acústica



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR DE GANDIA

**“Monitorización y medida de atunes en
jaulas mediante el uso combinado de
técnicas acústicas y ópticas”**

TESIS DE MASTER

Autor:
Vicente Puig Pons

Director/es:
Víctor Espinosa Roselló

GANDIA, 2010

Monitorización y medida de atunes en jaulas mediante el uso combinado de técnicas acústicas y ópticas

Autor: Vicente Puig Pons

Director: Víctor Espinosa Roselló

Resumen — Este trabajo presenta un dispositivo experimental diseñado para poder monitorizar el crecimiento del atún rojo (*Thunnus thynnus*) en jaulas. Se realiza el estudio en jaulas que el IEO posee en la costa de Cartagena (Murcia). Se integra este estudio dentro del programa Europeo SELFDOTT (From capture based to self-sustained aquaculture an domestication of bluefin tuna *Thunnus thynnus*). El objetivo principal es poder conocer el estado de los individuos alojados en las jaulas de cría mediante la combinación de técnicas ópticas y acústicas (ambas no intrusivas). Para ello se hace uso de una ecosonda científica, dotada con un multiplexor y dos transductores split-beam de 200 KHz con la que se toman medidas dorsales y ventrales de los peces. Por otro lado, se dispone de un sistema de video estereoscópico colocado dentro de la jaula, que proporciona información visual del comportamiento de los peces y nos permite estimar la longitud de algunos de ellos mientras cruzan el haz acústico. Las medidas obtenidas nos permitirán establecer una relación entre el TS y el tamaño de los atunes.

Abstract — This work presents an experimental setup designed to monitor the growth of bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) in cages. The study was carried in cages that IEO has in Cartagena's coast (Murcia). This study is integrated in the European program SELFDOTT (From capture based to self-sustained aquaculture domestication of bluefin tuna *Thunnus thynnus*). The main objective is to know the status of the individuals housed in breeding cages, through a combination of optical and acoustic techniques (both non-intrusive). This is done using a scientific echo sounder, equipped with a multiplexer and two 200KHz split-beam transducers to get dorsal and ventral measurements of fishes. On the other hand, we used a stereoscopic video system, placed inside the cage, which provides visual information on the behavior of the tuna and allows us to estimate the length of some of them while crossing the acoustic beam. The measurements obtained will enable us to establish a relationship between the TS and the tuna size.

Autor: Vicente Puig Pons email: vipuipon@epsg.upv.es
Fecha de entrega: 06-09-2010

ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN	3
I.1. La ecosonda científica	4
I.2. Target Strengt (TS) de peces vivos en jaula	8
I.3. Nociones básica sobre la fotografía estereoscópica	11
II. MATERIALES Y MÉTODOS	16
II.1. Montaje experimental.....	16
II.2. Toma de las medidas	18
II.3. Análisis de los datos acústicos	19
II.4. Análisis de los datos ópticos	22
III. RESULTADOS	31
IV. CONCLUSIONES	36
V. LÍNEAS FUTURAS	37
AGRADECIMIENTOS	39
REFERENCIAS	40
ANEXOS	42
Anexo 1. Cálculo del coeficiente de absorción del agua del mar y de la velocidad de propagación del sonido en el agua del mar	42
Anexo 2. La ecuación del sónar.....	44
Anexo 3. Especificaciones del transductor utilizado. ES200-7C	45
Anexo 4. Especificaciones las cámaras utilizadas en el sistema Vicass. CCTV Cámara WV-BP330/WV-BP332/WV-BP334 de Panasonic.....	47
Anexo 5. Aplicación implementada en Matlab®.....	48
Anexo 6. Calibración de la cámara con el toolbox de Matlab® CCT	56
Anexo 7 Experimental setup for monitoring the growth of tuna in cages by the combined use of acoustic and optical techniques.	60

I. INTRODUCCIÓN

Con la finalidad de aliviar la presión de la pesca indiscriminada del atún rojo (*Thunnus thynnus*) y poder ayudar a la conservación de la especie, es necesaria la domesticación del mismo y el desarrollo de una industria acuícola sostenible. El proyecto SELFDOTT (From capture based to self sustained aquaculture and domestication of Bluefin tuna, *Thunnus thynnus*) se propone utilizar los conocimientos obtenidos sobre el control artificial de la reproducción del atún rojo en cautividad, provenientes de proyectos europeos anteriores como es el caso del REPRODOTT (Reproduction and Domestication of *Thunnus thynnus*). El objetivo es establecer una base de conocimientos adecuada para poder controlar de manera eficiente la producción de huevos viables, estudiar el desarrollo embrionario y larvario para la producción de juveniles, al mismo tiempo que se perfeccionan dietas eficaces y respetuosas con el medio ambiente. Los proyectos de investigación y desarrollo tecnológico DOTT, cuyos costes están cofinanciados por la Unión Europea (UE), agrupa no solo a países de la UE, sino también a otros cuyas costas son bañadas por el mar Mediterráneo. El proyecto SELFDOTT comenzó en enero de 2008 y está financiado por el séptimo programa marco de cooperación del Programa de Trabajo: Alimentación, Agricultura y Pesca, y Biotecnología [1,2,3]. El ciclo de vida del atún rojo en cautividad se está cerrando [4], por ello, en estos momentos, es necesario unir los esfuerzos para diseñar mecanismos de control del crecimiento que hagan que el proceso sea eficiente ecológica y económicamente y por tanto asumible por los criadores.

Para poder cumplir este objetivo, en este trabajo se realiza la propuesta de un dispositivo experimental que combina medidas acústicas (ventrales y dorsales) y técnicas ópticas, para obtener información biométrica de los especímenes alojados en las jaulas de cría. Es importante destacar el carácter no intrusivo de estas técnicas, que nos permitirán la monitorización del aumento de peso de los especímenes optimizando al máximo los recursos.

Se plantea en este documento la evaluación de diferentes aspectos:

- La viabilidad de sincronizar una ecosonda científica y un sistema comercial de captura de imágenes para la obtención de datos biométricos.
- Establecer correspondencias entre las trazas acústicas representadas en un ecograma y las imágenes capturadas.
- Evaluar la consistencia de las medidas del Target Strength (TS) en condiciones de campo cercano (dado el gran tamaño de los especímenes evaluados con respecto al volumen del haz acústico utilizado).
- La posibilidad de establecer una relación entre el TS (dorsal y ventral) y el tamaño del atún rojo.

Este experimento se plantea como una primera aproximación al problema, y aumenta las expectativas abiertas hasta el momento [5] de obtener parámetros que permitan conocer el comportamiento, el estado y los datos biométricos de los especímenes alojados en las jaulas de cultivo.

En los siguientes apartados de la introducción se explicará cuáles son las bases teóricas de una ecosonda científica y una descripción de cómo se realiza el cálculo del Target Strength (TS) de peces en jaulas. Así como nociones básicas de fotografía estereoscópica. En el punto dos se mostrará cómo se realizó el ensayo y como se han tratado los datos a posteriori, para en el punto tres mostrar las conclusiones a las que se ha llegado tras la realización del experimento. Finalmente en los puntos cuatro y cinco se detallarán las conclusiones y se presentaran las líneas futuras de investigación que es estudio plantea.

I.1. La ecosonda científica.

Una ecosonda es un tipo particular de SONAR (SOund and NAVigation and Ranging). Se trata de un sistema activo, es decir, que posee la capacidad de detectar y procesar los ecos recibidos de una señal acústica que ha sido radiada por él mismo. En una ecosonda el haz va dirigido verticalmente hacia abajo en la mayoría de los dispositivos utilizados para pesca y batimetrías; aunque también puede orientarse hacia arriba, para tomar medidas ventrales por ejemplo, o incluso lateralmente. Se emplea principalmente en la estimación de distancias y ángulos de incidencia, y en la identificación y caracterización de blancos.

El esquema típico de una ecosonda es el siguiente:

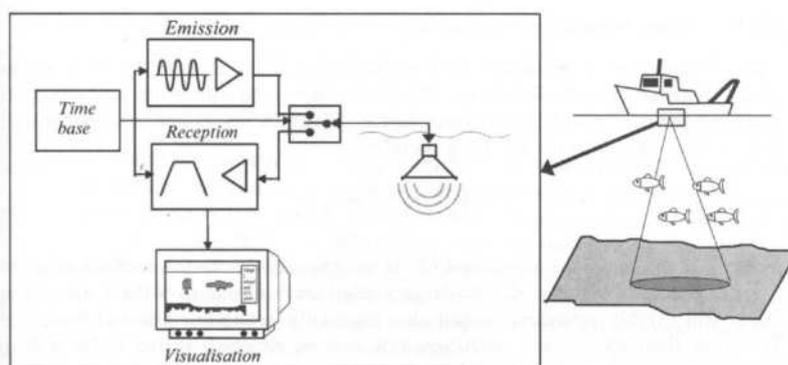


Fig.1. Esquema típico de una ecosonda.

El transmisor genera un “burst” eléctrico de una frecuencia determinada que se envía a un transductor acústico después de una amplificación adecuada. El transductor transforma el pulso eléctrico en un pulso acústico, radiándolo a través del agua en un haz direccional.

Cuando el pulso encuentra un blanco en su camino de propagación, la energía incide en él de tal manera que una porción de la misma se refleja y el resto se dispersa. Parte de esa energía recorre el camino en dirección contraria encontrándose con el transductor. Esta energía reflejada o “eco” es captada por el transductor, que la convierte de nuevo en una señal eléctrica, que será procesada para obtener información del obstáculo encontrado en el camino de propagación. El primer paso es optimizar la relación señal a ruido y calcular a la distancia a la que se encuentra el blanco, conociendo el tiempo transcurrido entre la emisión del pulso y la recepción del eco. La representación habitual de los resultados se realiza mediante un ecograma en el que se observan la distancia a la que se encuentran los blancos respecto al transductor. El proceso se repite de manera cíclica obteniendo representaciones en 2 dimensiones como la de la Fig 2. [5,6,7]

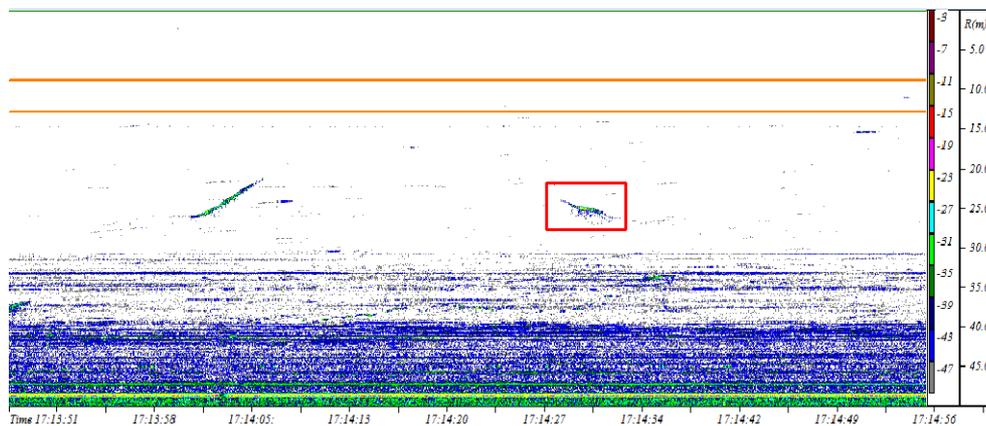


Fig.2. Imagen de un ecograma. En el eje horizontal se aprecian variaciones en el tiempo si la ecosonda es fija o en el espacio si está en movimiento. En el eje vertical se muestra el rango o distancia respecto al transductor. La amplitud del eco se muestra mediante escala de colores

Cuando se habla de una ecosonda científica, se hace referencia a la capacidad de obtener y almacenar ecos con un sistema susceptible de ser calibrado. Este tipo de ecosondas poseen una electrónica concebida con una amplitud estable y una gran cantidad de características adicionales entre las que hay que destacar la existencia de un amplificador preciso de ganancia variable con el tiempo (TVG). Este amplificador nos permite compensar las pérdidas de la señal producidas por la divergencia geométrica del haz y la absorción del medio. Es importante la señal obtenida del TVG ya que nos permite distinguir blancos individuales independientemente de su distancia al transductor, del mismo modo permite evaluar la densidad de un conjunto de especímenes, cuando es imposible obtener blancos individuales, sin tener en cuenta la profundidad a la que se encuentran.

Realizaremos ahora una descripción más detallada de las partes que componen una ecosonda científica.

El *Transmisor* se encarga de generar y amplificar el pulso eléctrico. Normalmente este pulso está constituido por varios ciclos de una señal sinusoidal a la frecuencia de trabajo del transductor. La duración temporal del “burst” atiende a la expresión:

$$\tau = \frac{n}{f_0} (s) \quad (1)$$

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

La frecuencia de trabajo dependerá de la aplicación (entre 1KHz y 1MHz en pesquería). En la elección de la frecuencia de trabajo ha de llegarse a una situación de compromiso, ya que, al aumentar la frecuencia se consigue una mayor resolución (al disponer de pulsos más cortos) pero la absorción del medio de propagación es mayor, por lo que dicho aumento de la frecuencia limita el alcance de la ecosonda. Por lo tanto, la elección de f_0 dependerá del blanco a caracterizar. Cuanto menor sea el tamaño del blanco, mayor será la frecuencia elegida para poder realizar el estudio alejados de la zona de Rayleigh donde la potencia del blanco varía rápidamente con la frecuencia.

La longitud del pulso depende del medio de propagación y de la duración temporal del mismo. La longitud del pulso determina la resolución espacial y afecta a la energía de transmisión.

$$L = c \cdot \tau (m) \quad (2)$$

donde c es la velocidad de propagación del sonido en el agua.

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

$$T_2 > T_1 + \tau (s) \quad (3)$$

$$R_2 - R_1 > \frac{c \tau}{2} (m) \quad (4)$$

Esta expresión nos indica que como mínimo deberán estar separados media longitud de onda del pulso en el agua para poderlos distinguir como dos ecos separados.

La potencia media que transporta el pulso aumenta conforme aumenta la longitud del pulso, consiguiendo alcances mayores a costa de pérdida de resolución espacial [8]. Por esta razón, al igual que en la elección de la frecuencia de trabajo, se ha de llegar a una situación de compromiso

para obtener la resolución requerida para la aplicación, teniendo presente a la distancia a la que se encuentra el blanco del transductor.

El *Transductor* es el encargado de transformar el pulso eléctrico en un pulso acústico que se transmite en el agua por medio de un haz direccional. Además realiza el proceso contrario cuando el transductor detecta un eco procedente de un blanco.

El tipo de transductor más utilizado, en aplicaciones de pesca, es el piezoeléctrico por su gran eficiencia. Se caracteriza principalmente por la frecuencia de trabajo y el patrón de directividad (ángulo de cobertura a -3dB). Como es sabido, el patrón de directividad hace referencia a la sensibilidad del transductor con la dirección, debido a las diferencias de fase entre los diferentes puntos o elementos del transductor.

Analizando la dependencia de la función de directividad con el ángulo, a partir del diagrama de directividad, podemos observar un lóbulo principal en la dirección de máxima radiación (que constituirá el llamado eje acústico), y una serie de lóbulos secundarios alrededor del principal.

Se aplica, en la mayoría de los casos, el mismo patrón de directividad para la emisión y la recepción. La anchura del lóbulo principal se describe, normalmente, mediante el ángulo de cobertura a -3 dB, que se corresponde con el doble del ángulo para el cual la directividad se reduce en 3 dB respecto a la dirección de máxima directividad.

El ángulo de cobertura suele variar entre 5° y 15° y no ha de ser necesariamente simétrico. Depende, fundamentalmente, de la frecuencia y del tamaño del transductor. A mayor frecuencia mayor directividad, por el contrario al aumentar el ancho del haz, se obtiene mayor cobertura, pero disminuye la máxima profundidad de penetración, ya que, la energía transmitida es fija.

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

- Haz simple (Single-beam): la señal que nos proporciona depende de la dirección del blanco respecto al eje acústico y de la sección transversal del blanco. No facilita información de la dirección del blanco, por lo que la estimación de la potencia del blanco se realiza de manera indirecta empleando métodos estadísticos (el más utilizado de ellos es el de Craig y Forbes (1969)).
- Haz doble (Dual-beam): facilita la medida directa de la potencia del blanco. Los elementos cerámicos del transductor se ordenan en círculos concéntricos alrededor de un elemento central. Si se requiere un haz estrecho se aplica señal a todos los elementos, si el haz requerido es ancho se aplica señal únicamente a los elementos centrales. Se procesa separadamente la señal recibida para el haz ancho y estrecho. El cociente de intensidades, entre el haz ancho y el haz estrecho, proporciona información con algunas ambigüedades respecto a la dirección. Estas desviaciones pueden minimizarse aplicando umbrales a las intensidades y al cociente de las mismas [5].

- **Haz dividido (Split-beam):** también realiza la medida directa de la potencia del blanco, compensando el patrón de radiación del transductor. El transductor se divide en cuatro cuadrantes, determinándose la dirección del blanco, de forma precisa, comparando las diferencias de fase entre cuadrantes [5]. El pulso se emite por el transductor entero, pero las señales recibidas por cada cuadrante se procesan de manera separada.

El *Receptor* filtra y procesa la señal recibida, facilitando la señal de salida de la ecosonda, sincronizada con la transmisión para hacer efectivo el uso de un solo transductor.

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

El segundo paso es estimar la envolvente, teniendo en cuenta que el área alojada bajo ella nos proporciona el valor de la energía dispersada por el blanco. A continuación se aplica a la señal la función TVG (Time Varying Gain), compensando la dispersión geométrica del haz y la absorción del medio. Así se obtiene a la salida ecos independientes de la distancia del blanco.

Finalmente el *Integrador de Ecos* se encarga de integrar la energía de todos los ecos detectados. Prácticamente se trata de calcular la integral del cuadrado de la tensión producida por la ecosonda, en los intervalos de tiempo correspondientes a las capas profundas. Es necesario excluir los ecos procedentes del fondo para poder detectar blancos pequeños (por ejemplo un pez).

I.2. Target Strength (TS) de peces vivos en jaulas.

Cuando se insonifica un pez mediante una ecosonda, que transmite energía dentro del agua, parte de la energía transmitida se refleja como un “eco” que es detectado por la ecosonda. El Target Strength (TS) indica la capacidad que tiene el blanco de reflejar la energía incidente de vuelta a la ecosonda. El TS es una medida logarítmica de la proporción de energía incidente que se dispersa en la dirección de vuelta, o también llamada backscattering:

$$TS = 10 \log \frac{I_{bs}(1m)}{I_i} (dB) \quad (4)$$

Donde I_i es la intensidad incidente en el blanco, e $I_{bs}(1m)$ es la intensidad dispersada de vuelta a 1 m del centro del blanco.

Si el blanco o pez es pequeño en comparación con la longitud de onda, la onda somete a todo el blanco a la misma presión acústica, consecuentemente éste actuará como una fuente puntual re-

radiando la energía como tal. Por el contrario si el blanco es mucho mayor que la longitud de onda, aparece dispersión geométrica y la energía reflejada dependerá tanto de la forma como del tamaño del blanco. Si la superficie es plana, la dispersión es simplemente una onda reflejada cuya dirección presenta simetría especular con respecto a la onda incidente. Si el blanco es esférico, la energía dispersada aumenta aproximadamente con el cuadrado del radio de la esfera. Para tamaños intermedios, donde las dimensiones del blanco son comparables con la longitud de onda, la dispersión depende de la estructura geométrica y de las propiedades físicas del blanco de una forma compleja. Las resonancias que se producen hacen que la energía dispersada varíe rápidamente con la frecuencia.

Debido a estos efectos podemos clasificar los blancos en puntuales, que son aquellos que están totalmente insonificados por el haz acústico; y extensos que sería aquellos que el haz acústico solo insonifica de manera parcial debido a su gran tamaño. En el primer caso la potencia de dispersión es independiente de la distancia al sistema sonar y de las características del mismo; mientras que en el segundo, la potencia de dispersión depende de su intersección geométrica con el haz acústico. El TS ya no es un valor de punto, sino un volumen o superficie insonificado al que se asocia un coeficiente de volumen o superficie dispersora de vuelta, que expresa la cantidad de energía dispersada por unidad elemental de dispersión [6].

Todo lo esbozado en párrafos anteriores nos lleva a la conclusión de que el valor del TS depende de la forma y tamaño del blanco, de su absorción o reflectividad y de la frecuencia. Si consideramos que la onda que incide en el blanco es localmente plana y la dispersada esférica, la definición del TS incluye los conceptos de sección transversal aparente, que define la potencia acústica interceptada por el blanco $P_i(\theta_i)$ y la función de dispersión G_i , que describe la distribución espacial de la energía dispersada por el blanco. La intensidad dispersada por el blanco en la dirección θ_s :

$$I_s(\theta_s, R_{1m}) = \frac{P_i(\theta_i)}{R_{1m}^2} G_i(\theta_i, \theta_s) (W / m^2) \quad (5)$$

Para una fuente isotrópica que radia de manera omnidireccional, se tiene que:

$$G_i(\theta_i, \theta_s) = \frac{1}{4\pi} \Rightarrow I_s(\theta_s, R_{1m}) = \frac{P_i(\theta_i)}{4\pi R_{1m}^2} (W / m^2) \quad (6)$$

La sección transversal de dispersión se define como:

$$\sigma_s(\theta_i, \theta_s) = \frac{I_s(\theta_s, R_{1m})}{I_i(\theta_i)} R_{1m}^2 (m^2) \quad (7)$$

Y la sección transversal de backscattering del blanco se calcula en la dirección de vuelta al transductor como:

$$\sigma_{bs}(\theta_i) = \frac{I_s(\theta_i, R_{1m})}{I_i(\theta_i)} R_{1m}^2 (m^2) \quad (8)$$

Por tanto el TS es una medida logarítmica de la sección transversal del backscattering

$$TS = 10 \log \frac{\sigma_{bs}(\theta_i)}{R_{1m}^2} (dB) \quad (9)$$

Los blancos extensos están limitados por el ancho del haz y la duración del pulso, como es el caso del fondo del mar, grandes bancos de peces o la capa profunda de dispersión. La sección transversal de backscattering puede descomponerse en dos partes: el tamaño de la porción del blanco insonificada $A_{s,v}$ y la sección de backscattering por unidad de superficie o volumen $\sigma_{bs}^{s,v}$.

$$\sigma_{bs} = A_{s,v} \cdot \sigma_{bs}^{s,v} (m^2) \quad (10)$$

Ha quedado demostrada la posibilidad de calcular el TS de un pez a partir de teorías acústicas, pero no se ha mencionado hasta el momento, la importancia que la fisiología del animal tiene a la hora de realizar estos cálculos. De entre las partes del animal que contribuyen al eco, hay que destacar, en las especies que la poseen, la vejiga natatoria. Ésta, dependiendo de su forma, refleja hasta el 90% de la energía dispersada. La existencia de la vejiga natatoria permite explicar las grandes diferencias existentes en el TS de dos peces, que externamente, son muy similares. Pero no solo eso, incluso para dos peces de la misma especie y de tamaños parecidos, la variabilidad del TS es grande, debido a la orientación del pez, el estado de la vejiga y otros factores derivados del comportamiento del individuo bajo estudio. Hay que recordar que la cantidad de gas albergado en la vejiga varía con la profundidad, y por lo tanto, se ha demostrado que la frecuencia de resonancia de un pez crece con la profundidad, del mismo modo que lo hace al disminuir el tamaño de los peces.

De lo mencionado en el párrafo anterior se infiere que, es difícil obtener los valores del TS para un pez de una especie determinada a partir de estimaciones teóricas. Por este motivo, es necesario medir el TS de forma experimental, o en caso en que sea computacionalmente posible, abordar el problema a partir de integraciones numéricas de modelos tridimensionales del pez. El TS es un parámetro estocástico, es decir, es una cantidad que tiene una distribución de valores y un valor medio que es el promedio de un gran número de medidas. Por esta razón, para obtenerlo de manera fiable, se deben realizar un gran número de medidas para poder conseguir una distribución estadística del TS que nos permita obtener un valor medio para el pez observado. Para que el resultado sea adecuado, se deberán realizar medidas de muchos individuos de la misma especie con alguna característica que los una, como puede ser por ejemplo el tamaño.

Con la finalidad de obtener valores del TS representativos para una determinada especie, se realiza gran cantidad de medidas en jaulas de cría. De esta manera factores como las condiciones

ambientales y los factores biológicos pueden ser controlados. En estos experimentos se pretende averiguar además, cual es la variación temporal del TS para dicha especie (variación día-noche), en el caso de que exista, y cuál es la dependencia de la potencia dispersada por el blanco con la profundidad, permitiéndonos una caracterización completa de la especie desde el punto de vista acústico.

No se puede pasar por alto, que ha quedado demostrada experimentalmente la dependencia del TS de un pez con su longitud, comparando los resultados obtenidos a partir de los estudios acústicos y de muestras capturadas de diferentes especies. Esta dependencia es válida en aquel rango de frecuencias en el que se observa dispersión geométrica, para peces relativamente grandes ($L/\lambda \gg 1$) o para elevadas frecuencias. Generalmente la dependencia del TS medio con la longitud del pez es lineal en escala logarítmica y atiende a la expresión:

$$\overline{TS} = m \cdot \log(L) + b(\text{dB}) \quad (11)$$

donde m es un coeficiente de proporcionalidad, L es la longitud del pez y b , que depende de la especie, tiene dos componentes, una es constante y otra depende débilmente de la frecuencia y a menudo es insignificante.

Se hablará en los anexos de este documento de la ecuación del sonar y de los parámetros que influyen en el nivel de eco detectado, así como de los procedimientos de cálculo del coeficiente de absorción del agua del mar y de la velocidad de propagación del sonido en el agua del mar.

I.3. Nociones básicas sobre la fotografía estereoscópica.

Cuando se toma una imagen de un objeto con una cámara, la distancia del objeto en la imagen con respecto a la lente (profundidad) no se conoce, al menos mientras no sea medida físicamente [9]; sin embargo, el principio básico de formación de una imagen virtual sostiene que la distancia real de los objetos con respecto a la cámara existe implícitamente cuando el tamaño de los mismos es conocido.

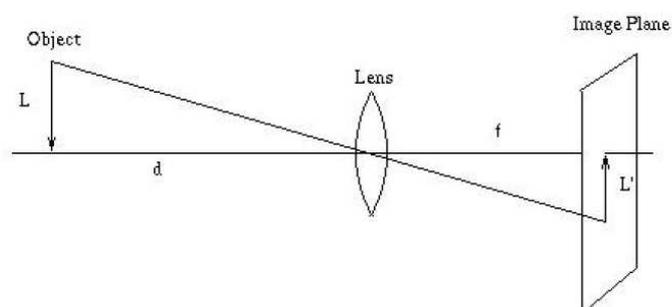


Fig.3. Funcionamiento de una lente

En la figura, f es la distancia de la lente al plano de imagen, d es la distancia de la lente al objeto, L' es el tamaño del objeto proyectado en el plano de imagen y L es el tamaño real del objeto. La Fig. 3 muestra el principio de formación de una imagen virtual hecha por una lente. Ésta es una de las leyes más comunes en ciencia óptica y nos dice que la distancia del objeto a la lente determina directamente el tamaño de la imagen virtual en el plano de imagen, ya que el tamaño real del objeto es conocido y es constante y la distancia entre la lente y el plano de imagen se conoce una vez que se saben los parámetros de la cámara que se está utilizando De acuerdo a la fórmula óptica:

$$\frac{L'}{f} = \frac{L}{d} \quad (12)$$

Se suele asimilar en muchos casos el funcionamiento de una cámara fotográfica con el de una lente delgada, para simplificar los cálculos desde el punto de vista geométrico, y se ha comprobado que el error cometido es pequeño con esta aproximación. Una lente delgada es aquella cuyo espesor es despreciable en comparación con los radios de curvatura de los dioptros que la forman.

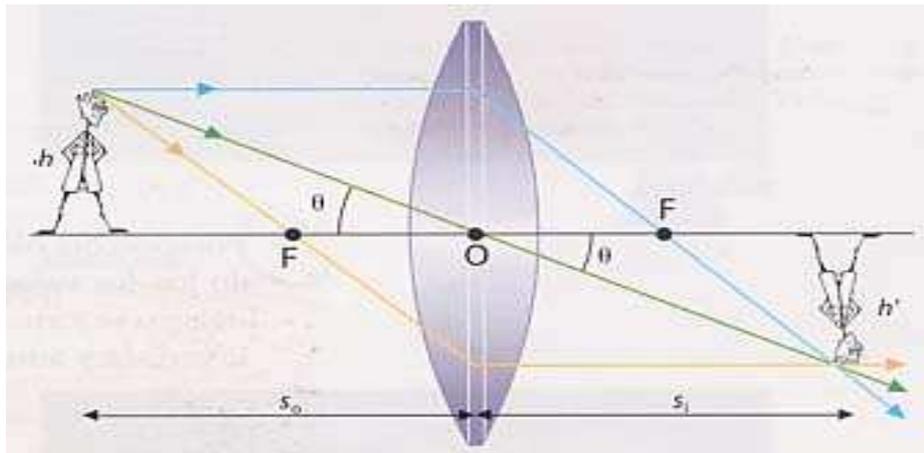


Fig.4. Funcionamiento de una lente delgada

$$\frac{1}{s_0} + \frac{1}{s_i} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (13)$$

La ecuación 13 es la conocida ecuación del fabricante de lentes o fórmula de las lentes delgadas; que expresada en función de la distancia focal queda como sigue:

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (14)$$

$$\frac{1}{s_0} + \frac{1}{s_i} = \frac{1}{f} \quad (15)$$

donde f es la distancia focal de la lente, s_i la distancia a la imagen virtual y s_o la distancia de la lente a la imagen real.

A partir de estas fórmulas podemos conocer el aumento lateral que produce la lente. Si observamos la Fig.4 podemos deducir que [10]:

$$m = \frac{h'}{h} = -\frac{s_i}{s_o} \quad (16)$$

donde m es el aumento lateral de la lente, s_i la distancia a la imagen virtual y s_o la distancia de la lente a la imagen real, h' la altura del objeto virtual y h la altura del objeto real.

A pesar de toda la información que se encuentra en una fotografía, la profundidad de un punto en una escena no puede ser directamente accesible con una sola imagen. Con, al menos, dos imágenes la profundidad puede ser medida a través de la triangulación. Esto es, por supuesto, una de las razones por la que la mayoría de los animales tienen al menos dos ojos y por la que se equipa a los sistemas autónomos con sistemas de análisis estéreos. Se define visión estéreo o estereoscópica como aquella en la que se emplea más de una imagen para obtener una idea de tridimensionalidad.

Una sistema de fotografía estereoscópica puede estar formado por una cámara con dos objetivos, por dos cámaras iguales separadas una distancia conocida, o por una cámara que se desplaza para obtener dos fotografías con distinta perspectiva. En aplicaciones de pesquería el método más utilizado es el segundo, por lo que será este el que nos ocupe en el resto del apartado.

En este caso se usa un sistema de visión paralela, es decir, se alinean los ejes de las lentes de las cámaras de modo que los ejes ópticos de ambas funcionen de forma paralela. La convergencia de las imágenes se consigue al mover ligeramente las cámaras o con el traslado horizontal de las imágenes y con un recorte de las imágenes tratadas si es necesario.

Como se puede ver en la Fig. 5, un punto real, w , con coordenadas X , Y y Z , será proyectado hacia los sensores de imagen derecho e izquierdo y la disparidad horizontal será función de los siguientes factores: la separación base de la cámara, o línea de base, B , la distancia focal de las lentes de las cámaras, (λ) , y la distancia de las cámaras al punto real, Z_w . En resumen, se puede ver el proceso de captura de las imágenes de cada una de las cámaras como una traslación del eje X seguida de una transformación de la perspectiva. Las coordenadas de proyección de la cámara (cámara izquierda: x_l , y_l , cámara derecha x_r , y_r) respecto al punto real $w(X, Y, Z)$ son:

$$x_l(X, Z) = \lambda \cdot \frac{X + \frac{B}{2}}{\lambda - Z} \quad (17)$$

$$y_l(Y, Z) = \lambda \cdot \frac{Y}{\lambda - Z} \quad (18)$$

$$x_r(X, Z) = \lambda \cdot \frac{X - \frac{B}{2}}{\lambda - Z} \quad (19)$$

$$y_r(Y, Z) = \lambda \cdot \frac{Y}{\lambda - Z} \quad (20)$$

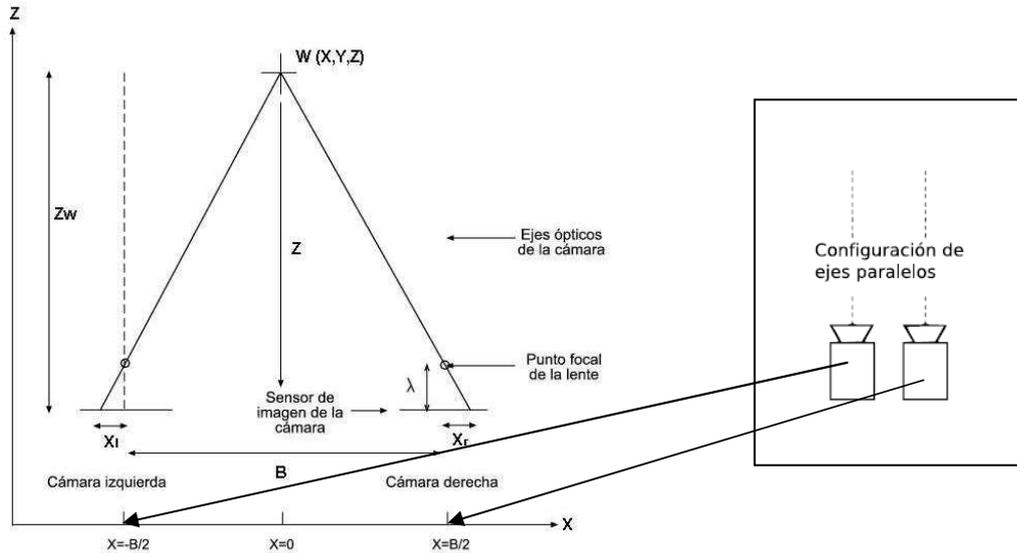


Fig.5. Disposición de dos cámaras en paralelo

Como podemos determinar, comparando las ecuaciones 18 y 20, el punto real (X, Y, Z) se proyecta a la misma coordenada Y en las dos cámaras, y si las cámaras están correctamente alineadas no se produce desplazamiento vertical (o paralax vertical). La disparidad horizontal $d_{h,p}$, se obtiene sustrayendo x_l , la coordenada X de la proyección de la cámara izquierda, de la x_r , la coordenada X de la proyección de la cámara derecha:

$$d_{h,p} = x_r(X, Z) - x_l(X, Z) \quad (21)$$

De las relaciones anteriores, se puede obtener:

$$d_{h,p}(Z) = \lambda \cdot \frac{-B}{\lambda - Z} \quad (22)$$

De ello se deduce que la disparidad se incrementará con la separación de las cámaras, B , y con la distancia focal (λ). Hay que notar que para puntos en el infinito respecto al eje Z , la disparidad tiende a cero. Y, si se calibra el sistema apropiadamente, en la disposición paralela de cámaras no se produce disparidad vertical y, como consecuencia, tampoco distorsiones graves [12].

Conociendo todos los parámetros necesarios, y con la ayuda de las herramientas matemáticas que nos proporciona la geometría estéreo o epipolar, a partir de dos imágenes tomadas con un

sistema de visión estéreo en configuración paralela, podemos obtener información de la profundidad en las imágenes tomadas (a que distancia se encuentra el objeto fotografiado), y a partir de estos datos y de los parámetros intrínsecos de las cámaras el tamaño del objeto capturado por las cámaras.

Las cámaras poseen parámetros intrínsecos y extrínsecos. Los parámetros intrínsecos son aquellos que describen el funcionamiento de una cámara: la distancia focal, el punto principal o el centro óptico, por ejemplo.

En una cámara CCD (Charge-Coupled Device), que son generalmente las cámaras digitales, los parámetros internos definen las coordenadas en píxeles de un punto en la imagen virtual con respecto a las coordenadas en el cuadro de referencia de la cámara, es decir, dan la orientación interna del cuadro, siempre teniendo el objetivo de conocer la distancia focal, el punto principal, etcétera, de la cámara digital.

Los parámetros externos de la cámara son aquellos que definen la posición y la orientación del cuadro de referencia de la cámara con respecto al mundo real, es decir, dan la orientación externa de la cámara [12].

Para poder disponer de toda la información sobre los parámetros intrínsecos y extrínsecos de la cámara, mencionados anteriormente, es imprescindible calibrar la cámara a utilizar. En este trabajo se ha realizado el correspondiente proceso de calibrado del sistema óptico que se detalla en los anexos. Los resultados obtenidos de la calibración nos permiten el cálculo del tamaño del pixel de manera bastante aproximada, y con ayuda de las fórmulas ópticas esenciales se puede trasladar los valores en píxeles a valores en milímetros del mundo real. Obteniendo de este modo en el caso que nos ocupa valores biométricos de los peces a partir de imágenes.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

II.1. *Montaje experimental.*

Se realizan las medidas en jaulas de cría instaladas en la costa española del mar Mediterráneo, sus dimensiones son 20 metros de profundidad y 25 metros de diámetro. Dichas jaulas están localizadas en la partida de El Gorguel perteneciente a la ciudad de Cartagena (Murcia). En esta zona el Instituto Español de Oceanografía (IEO) tiene instaladas diferentes jaulas de cría científica en las que se encuentran atunes en diferentes estadios de crecimiento. Los ensayos se llevan a cabo en la jaula R5 que aloja a los atunes destinados a la reproducción, por lo tanto, en ella, encontraremos alrededor de 35 atunes de gran tamaño (después de diferentes mediciones realizadas los técnicos del IEO estiman que la longitud media de los peces durante las medidas es de 164 ± 7 cm).



Fig.6. Imagen de las jaulas de cría en el Gorguel (Cartagena)

Para la realización de las medidas se dispone de un sistema acústico y uno óptico. El sistema óptico (Vicass de AkvaSmart) nos proporciona información visual de los especímenes durante las medidas (tanto de su comportamiento como de su orientación), así como la longitud de los mismos, ya que, se trata de un sistema de grabación estereoscópica diseñado para su uso en piscifactorías. El sistema óptico está compuesto por dos cámaras idénticas montadas en una caja de metal estanca y con sus ejes ópticos alineados y separados 15 pulgadas. Dicho sistema dispone además de un ordenador de campo que nos permite la manipulación de las cámaras y la obtención de imágenes de manera manual o automática. El sistema acústico consiste en dos transductores de haz dividido o Split-beam de 200kHz, conectados a un multiplexor para operar de manera simultánea con una ecosonda científica (EK-60 de Simrad), gobernada por el mismo ordenador de

campo desde el que se maneja el sistema óptico, de este modo se obtiene la sincronización necesaria a través del reloj interno del ordenador de campo.



Fig.7. Imagen del sistema Vicass a la izquierda y de uno de los transductores a la derecha

Para asegurar la flotabilidad de los transductores y su posición, se monta cada uno de ellos sobre una tabla de madera cuadrada de 40 cm de lado. A dicha tabla se le practican agujeros para poder ensamblar i atornillar los transductores, y también sogas que se anudaran a la jaula para mantener los transductores estables en la posición deseada. Del mismo modo, se ata mediante sogas el sistema óptico Vicass, de tal manera que, se mantengan los objetivos orientados hacia la superficie y que el conjunto sistema óptico-sistema acústico permanezca alineado.

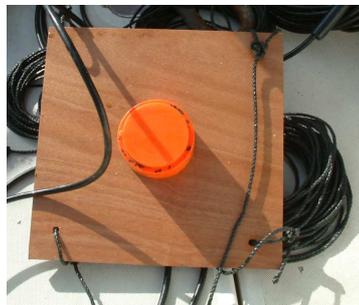


Fig.8. Detalle del transductor con la tabla y las sogas que permitirán mantenerlo estable.

El esquema del montaje experimental se muestra a continuación (Fig. 9). Uno de los transductores se coloca en el fondo de la jaula, a 20 m de la superficie, orientado hacia la superficie para tomar medidas ventrales. El otro transductor, por el contrario, se coloca en la superficie del mar, orientado hacia el fondo de la jaula y alineado con el primero, de este modo se podrán captar ecos dorsales de los especímenes que crucen el haz acústico. Finalmente el sistema la caja de metal que contiene las dos cámara del sistema Vicass, se coloca a 15 m de la superficie, alienada con los haces acústicos, con los objetivos de ambas cámaras orientados hacia la superficie. Los equipos no se colocan en el centro de la jaula, como se puede observar en el

esquema siguiente, sino desplazados hacia el borde de la jaula (a 7 m del perímetro de la misma), ya que, de esta manera aumenta la probabilidad de que un pez atraviese el haz acústico, este hecho se debe a que, es conocido que los atunes en cautividad nadan describiendo un movimiento circular cerca del perímetro de la jaula.

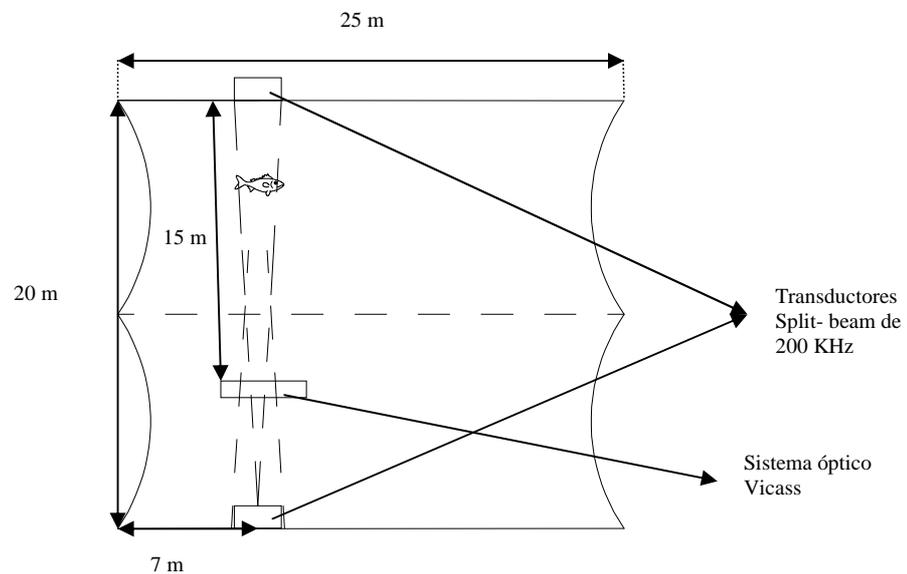


Fig.9. Esquema del montaje experimental en la jaula

Todos los equipos se manejan desde un barco amarrado cerca de la jaula en la que se realizan las medidas. Se elige para la ecosonda un intervalo entre pings de 200 milisegundos, que al contar con una señal multiplexada enviará un ping por un mismo transductor cada 400 milisegundos. El sistema óptico realiza la captura de imágenes cada 2 segundos.

II.2. Toma de las medidas.

Se realizan las medidas con los equipos instalados en la jaula R5 (reproductores), tal y como se indica en el punto anterior. Para ello, se hace uso del PC que controla la ecosonda mediante el sistema de escritorio remoto. Con él, se accede al ordenador de campo del sistema Vicass donde esta instalado el software de captura de las imágenes proporcionado junto con las cámaras. En dicho "Field Computer" se instala previamente el software de manejo de la ecosonda (programa de manejo de la ecosonda científica ER-60)

Antes de realizar las medidas, se procede a la calibración de los transductores. Para realizarla se sumerge cada transductor, montado en la tabla de madera, a 4 m de la superficie y se amarra al perímetro de la jaula para mantener su estabilidad. El haz se orienta hacia la superficie, y con ayuda de una esfera de calibración, proporcionada por el fabricante, se lleva a cabo el proceso como se indica en los manuales de Simrad [13].

Con los transductores calibrados y colocados en la posición deseada, se procede a tomar medidas, para disponer de especímenes en la zona de interés (zona entre los objetivos de las cámaras y la superficie y dentro de los haces de los transductores), se lanza cebo al agua para incitar a los atunes a moverse por la zona deseada. Tras unos minutos de cebado los atunes se mueven por la zona de estudio y se procede a la toma automática de 1200 fotografías, mientras se realizan capturas de ecos de manera continua por ambos transductores. Como se ha indicado anteriormente se usan dos transductores Split-beam (modelo ES200-7C de Simrad), emitiendo a 90W, el intervalo entre pings es de 0.2 s, el ancho de haz para estos transductores es de 7°. Tanto las imágenes como los ecogramas obtenidos durante el proceso de medida son almacenados para su posterior análisis.

II.3. *Análisis de los datos acústicos.*

El análisis comienza con la selección de las imágenes consideradas de interés, es decir, aquellas en las que el sistema estereoscópico ha tomado imágenes de atunes nadando bajo el haz acústico y dentro de la zona deseada. De las imágenes marcadas como “de interés” se obtiene información temporal del instante en el que fueron tomadas.

Por otro lado, se realiza el tratamiento de los datos acústicos mediante el software Sonar5_Pro, desarrollado por Balk y Lindem en la Universidad de Oslo [14]. Este programa posee sofisticadas herramientas para el tratamiento de ecos individuales (SED), y se hará uso de ellas para la detección de trazas que posteriormente se relacionarán temporalmente con las imágenes tomadas por el sistema óptico.

Siguiendo las indicaciones del manual del Sonar5_Pro [14], se aplica un alto umbral para reducir el ruido, y de este modo, disponer de ecogramas más limpios para realizar una detección de trazas efectiva. El umbral se fija en -40 dB, ya que, se conoce que para peces de especies similares y tamaño parecido el TS varía entre -40 y -15 dB [15, 16].

Hay que destacar que dispondremos de dos tipos de ecogramas, los tomados por el transductor colocado en la superficie, a los que llamaremos dorsales, y los obtenidos por el transductor colocado en el fondo de la jaula que se denominarán ventrales. Para que la representación sea parecida, y su interpretación fácil, se opta por colocar la línea de emisión en la parte superior del ecograma, midiéndose la distancia al transductor en metros, por lo tanto para el caso de los ecogramas ventrales, la profundidad en metros en los ecogramas no será como se intuye la distancia a la superficie, si no, la distancia al transductor situado en el fondo de la jaula. Más fácil será para el caso de las medidas dorsales, pues la distancia al transductor se corresponderá con la profundidad respecto a la superficie.

Para las medidas dorsales se representará en el rango entre 0 y -15 m, siendo 0 la posición del transductor, el sistema Vicasss se encuentra a 15 m de la superficie, por tanto tendremos representada la zona de interés. Para las medidas ventrales representaremos los ecogramas entre -5 y -20 m, al igual que en el caso anterior en 0 se encontraría el transductor (y se correspondería con 20 m de profundidad) pero es en -5 donde se encuentra la Vicass, por lo que la zona de interés se extiende de -5 a -20 m en este tipo de ecogramas.

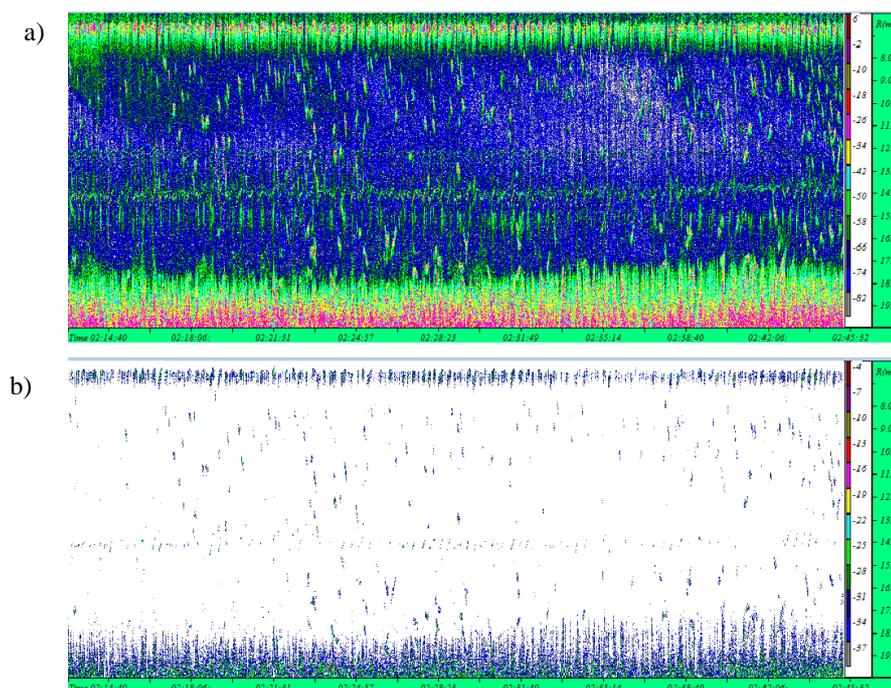


Fig.10. Se muestran 2 imágenes de ecogramas a) muestra un ecograma ventral con el rango entre -5 y -20 m b) muestra ecograma ventral de la zona de interés umbralizado

Con ayuda del menú Tracking del Sonar5_Pro, se realiza una detección manual de trazas. [14]. Este proceso es necesario para poder realizar una detección automática a posteriori, y sirve al programa como entrenamiento. Para ello se identifican las detecciones en el ecograma que se corresponden con imágenes de un atún cruzando el haz acústico, marcando dichas trazas como posibles trazas de atunes. Se realiza este proceso para un número considerable de detecciones y se almacenan las detecciones (en uno de los denominados fish baskets). El software utiliza los criterios adoptados por el usuario en modo manual para realizar una detección automática de trazas. Como se puede apreciar en el centro de la Fig. 10. a unos 5 m de la superficie se encuentra una detección continua (que forma una línea de ecos) que también aparece en los ecogramas dorsales. Esta línea es debida a una soga utilizada junto con una boya para alinear todos los equipos. La aparición de esta línea nos obliga a indicarle al programa que realice la detección automática de trazas en cada ecograma en dos partes desde la Vicass hasta la soga, y de la soga a la

superficie, salvando ésta y los ecos que produce. Este proceso se realiza haciendo uso de la posibilidad de utilizar capas (echogram control dialog /layer) que nos ofrece el Sonar5_Pro.

Debido a los parámetros elegidos para la realización del ensayo (frecuencia de los transductores, intervalo entre pings, anchura del haz, distancia del blanco a los transductores...) y al tamaño y velocidad de los especímenes bajo estudio, en nuestro caso en particular se le indica al programa que considere que una traza debe contener como mínimo tres ecos para considerarse como tal. Esta cantidad de ecos es bastante pequeña, ya que, normalmente las trazas suelen estar formadas por un número de ecos mayor. Pero en este trabajo, se pretende establecer una metodología de medida del TS en jaulas para el atún a frecuencias altas y cuantificar en qué grado puede ser esta configuración apta para la estimación de la biomasa que una jaula alberga. Por este hecho y por el marcado carácter experimental de este trabajo, se considera suficiente esta cantidad mínima de ecos para considerar una traza como apta, no sin olvidar, que la mayoría de las detecciones disponen de una imagen que nos ayuda a certificar que la detección se corresponde con un pez cruzando el haz acústico, de manera total o parcial.

Se muestra un ejemplo de correspondencia traza acústica imagen a continuación, se trata de un ecograma dorsal en el que se puede apreciar una traza bien definida, y sus correspondientes imágenes. La traza y las imágenes se corresponden temporalmente, en este caso ambos están tomados el día 22-01-2010 a las 15:10:40 horas. El TS medio de la traza es de -29,3 dB y la distancia al centro de gravedad del transductor es de 12.1m. Este último dato nos lleva a hacer una consideración, para tratamiento de datos posteriores, será interesante conocer la distancia del pez al sistema óptico, el cálculo será directo en cada caso, se medirá la posición del sistema óptico en el instante temporal que se corresponda con la imagen (alrededor de 15m) y se le restará a este valor el valor del rango respecto al centro de gravedad del transductor que nos ofrezca la traza. Este pequeño cambio de referencia solo será necesario en las trazas dorsales y no en las ventrales a las que tendremos que restar al valor del rango de la traza los 5 metros que separan el transductor y el sistema Vicass. No obstante para cada imagen, se calculará con ayuda del ecograma dichas distancias de manera exacta.

De todas las trazas detectadas se guardará el TS medio, la distancia al centro de gravedad el transductor (R), el instante temporal en que fue tomado, la cantidad de ecos que la forman y el número de ping emitido por la ecosonda con el que se corresponde. Con toda esta información se obtendrán los resultados que se muestran el siguiente apartado.

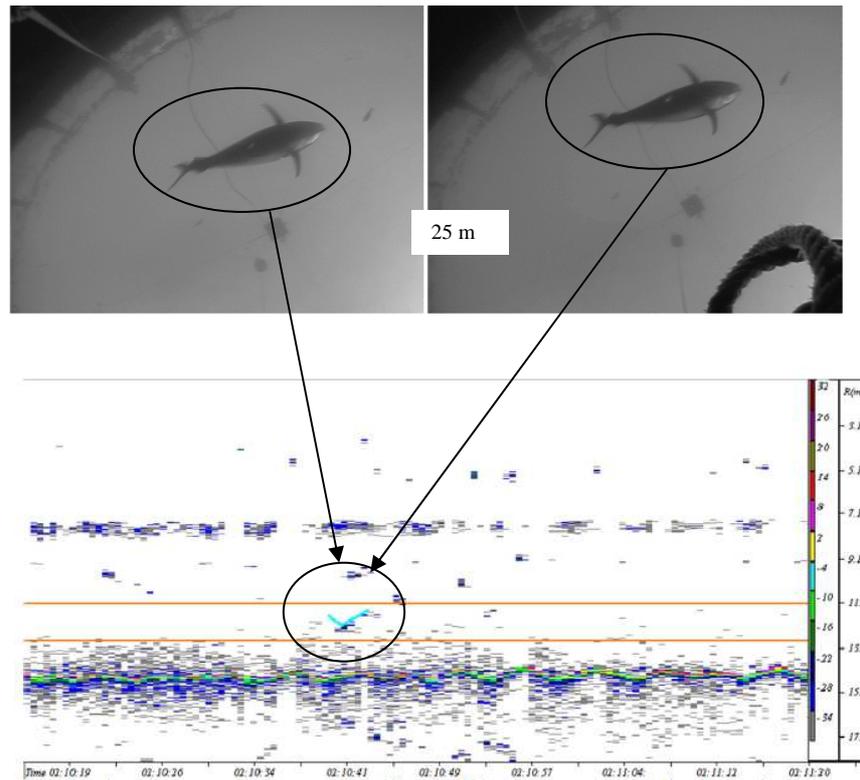


Fig.11. Imágenes tomadas por las dos cámara del sistema Vicass (izquierda y derecha respectivamente) y traza encontrada en el instante temporal en el que se realizan las imágenes marcada en el ecograma.

II.4. Análisis de los datos ópticos.

En los párrafos anteriores se ha indicado como se tratan los datos acústicos una vez obtenidos, y como la detección de trazas se apoya en los datos ópticos obtenidos. Pero el atún rojo (*Thunnus thynnus*) nunca ha sido caracterizado en cautividad, y no se dispone en la bibliografía de relaciones matemáticas entre el TS y la longitud del espécimen, como si existen para otras especies incluso de atunes [17].

Con ayuda del sistema estereoscópico Vicass se pretende conocer el tamaño de los peces que aparecen en las imágenes y relacionarlo con el valor de TS de la traza que se corresponda con la imagen tomada.

Como ya se ha indicado, la visión estereoscópica permite la adquisición sincronizada de pares de imágenes de un mismo motivo. El par de imágenes se capturan desde puntos distintos aunque cercanos por cámaras distintas, de modo que los campos visuales de ambos fotogramas no coinciden completamente. No obstante, dichos campos visuales se solapan, y es en esa zona de solapamiento donde se pueden realizar mediciones de los motivos capturados por ambas cámaras.

El equipo VICASS (Video Image Capture And Size System) es comercializado por la compañía Noruega AKVAsmart, siendo el único equipo disponible en el mercado de visión estereoscópica sumergible y fotogrametría, diseñado específicamente para la realización de muestreos biométricos de peces en cultivo. Las dos cámaras de vídeo, están ubicadas en el interior de cajas estancas, perfectamente paralelas y separadas entre sí 15 pulgadas (38,10cm), con el fin de poder medir ejemplares de hasta 3 m de longitud, como es el caso del atún rojo. Existe un área en el que los campos visuales de ambas cámaras se solapan, donde los objetos presentes pueden ser medidos. Los campos visuales empiezan a solaparse a partir de 60cm de distancia de las cámaras, y la profundidad de campo, aunque en principio infinita, se recomienda que no sea superior a los 2 metros con el fin de conseguir la mayor exactitud de las medidas. El equipo perteneciente al IEO, ha sido modificado por el fabricante para poder tomar imágenes hasta a 6 m de distancia.

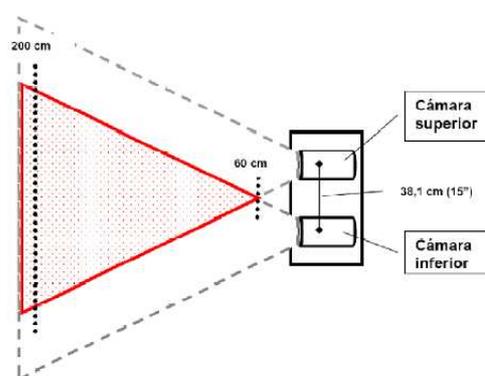


Fig.12. Esquema del sistema Vicass

Como se indica en un punto anterior se realiza la captura de 1200 imágenes de manera automática. Se lleva a cabo una gran captura ya que la aleatoriedad del movimiento de los peces y la especial disposición de las cámaras nos inducen a pensar que para disponer de una cantidad de imágenes medibles aceptable, se deberá realizar un gran muestreo.

El software de procesamiento de imágenes, que se proporciona con el sistema Vicass, solicita las imágenes tomadas que se almacenan en carpetas comprimidas, y nos pide que le indiquemos a que especie pertenecen las imágenes que se van a procesar, con el fin de seleccionar el algoritmo específico, guardando los resultados en un archivo formato Access *.mdb. Automáticamente el software detecta la correspondencia de cada par de imágenes sincronizadas y muestra en pantalla el primer par de imágenes. El siguiente paso es identificar a un mismo pez en ambos fotogramas. Seguidamente el operador deberá clicar con el ratón la longitud furcal y la altura máxima del pez en ambos fotogramas como se muestra en la Fig.13. Finalmente hay que señalar, que en el momento de estimar el peso en kg a partir del algoritmo propio de la especie (Weight), el peso ajustado en kg se calcula con una ecuación de ajuste perfecto obtenida a partir de los valores de longitud furcal y altura máxima pertenecientes al muestreo realizado (AdjustedWeight), la longitud

furcal en cm (Length) y altura máxima en cm (Height), la distancia en cm desde las cámaras hasta la nariz (NoseDistance) y la cola (ForkDistance), y las coordenadas de los cuatro puntos que determinan la longitud furcal y la altura máxima (TopBotXY).

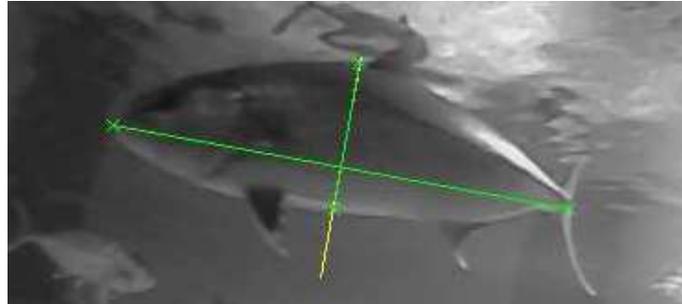
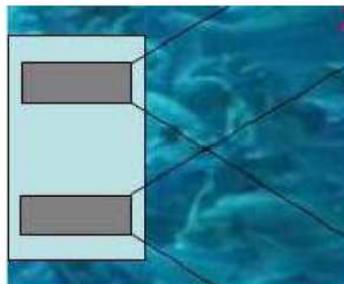
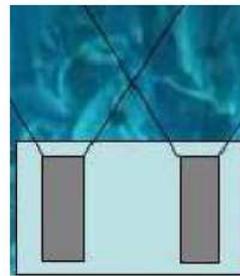


Fig.13. Imágenes de la medición de un pez con el software de Vicass con las cámaras en posición habitual

La disposición “habitual” del sistema de medida estereoscópica Vicass se corresponde con los objetivos de las cámaras mirando hacia dentro de la jaula desde uno de los laterales. En nuestro experimento, como se ha indicado en párrafos anteriores, se coloca el sistema óptico con los objetivos mirando hacia la superficie y dentro de la jaula.



Posición habitual



Cámaras mirando hacia la superficie

Fig.14. Diferencia de disposición entre la habitual y la elegida en nuestro experimento

En nuestro caso tomaremos fotografías ventrales de los peces, y por lo tanto no conoceremos la altura de los mismos. Por esta razón, el cálculo del peso no es posible, pues no disponemos del dato Height (altura máxima en cm) pues no la estamos midiendo al disponer de imágenes de peces desde abajo (ventrales). En esta primera aproximación al problema no es relevante el cálculo del peso de los especímenes pero si la validación del método de medida, en caso de resultar favorable se establecerá como objetivo futuro el desarrollo de ecuaciones que relacionen la longitud furcal y la anchura máxima del pez con el peso del mismo.

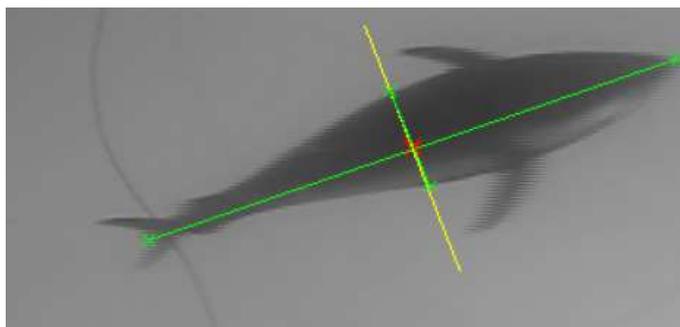


Fig.15. Medida de un atún con el sistema Vicass en la configuración elegida para este experimento.

Para verificar que no se aumenta en demasía el error al realizar las medidas de la longitud con una configuración para la que el sistema óptico no ha sido optimizado, se solicita al a la sede que el IEO tiene en Mazarrón, información biométrica de la jaula R5 (reproductores). Se nos proporciona biometrías realizadas con el sistema Vicass en su configuración habitual realizadas unos pocos días antes que las nuestras. Se calcula la longitud media y el error absoluto para los datos ofrecidos por el IEO y para los tomados en nuestro experimento con nuestra configuración y los resultados obtenidos son los siguientes:

disposición	Longitud media en cm	$\epsilon(\%)$
Habitual (lateral)	164 ± 7	4.3
Ventral	165 ± 13	7.9

Tabla 1: Valores medios y desviación típica de ambas configuraciones

A la vista de estos datos, se detecta un crecimiento alto del error absoluto cometido al variar la configuración de medida. En este trabajo como se ha indicado se presenta una primera aproximación al problema y se trabaja ya en la reducción de este error para mejorar las expectativas que ofrece este método de ensayo.

Pero durante la realización de las medidas de la longitud de los peces bajo estudio, nos encontramos con una dificultad añadida, la mayoría de las fotos no son medibles con el software que nos proporciona el sistema Vicass. Al intentarlo el programa nos indica que no reconoce el par de fotografías por lo que se opta por desarrollar un software propio cuya versión preliminar se presenta en este trabajo.

Se trata de un programa sencillo, desarrollado en Matlab®, que toma una de las imágenes capturadas por el sistema Vicass y segmenta el espécimen que se quiere medir calculando su contorno. A partir de él se estima la distancia en píxeles que existe entre la nariz y la cola (distancia furcal) directamente o con un algoritmo que calcula un eje de simetría aproximado del pez y ajusta una curva para obtener el valoren píxeles de la longitud del espécimen.

Este segundo método no directo, se implementa para el caso en el que el pez se encuentre relativamente curvado, pudiendo aproximar de este modo la longitud de manera más exacta que con el método que ofrece el sistema Vicass. Ya que, el software de AkvaSmart solo nos proporciona la posibilidad de realizar la medida mediante el trazado de una línea recta entre la nariz y la cola, aunque en algunos casos la diferencia es insignificante, en la mayoría es sustancial.

Para poder conseguir los resultados deseados se hace uso de las herramientas que el tratamiento digital de la imagen nos ofrece, y se implementa en Matlab® una primera versión pendiente de automatización. Las sentencias utilizadas se añaden en los anexos de este trabajo, así como una pequeña explicación de su funcionamiento.

Se muestra a continuación la filosofía del programa desarrollado en texto e imágenes. Se parte de una de las imágenes capturadas por el sistema Vicass, la que nos proporcione una mejor segmentación:

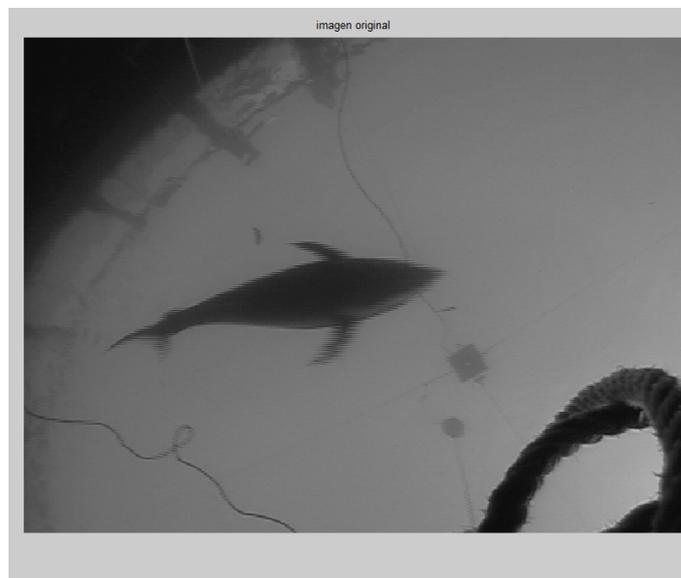


Fig.16. Fotografía original tomada por Vicass

Tras realizar una binarización de la imagen se segmenta quedándonos solo con el pez que aparece en la pantalla. Para ello tras eliminar el ruido de la imagen mediante erosiones y dilataciones de la misma, se asignan etiquetas a cada uno de los objetos que conforman la imagen y se automatiza el proceso para que nos quedemos solo con el pez.

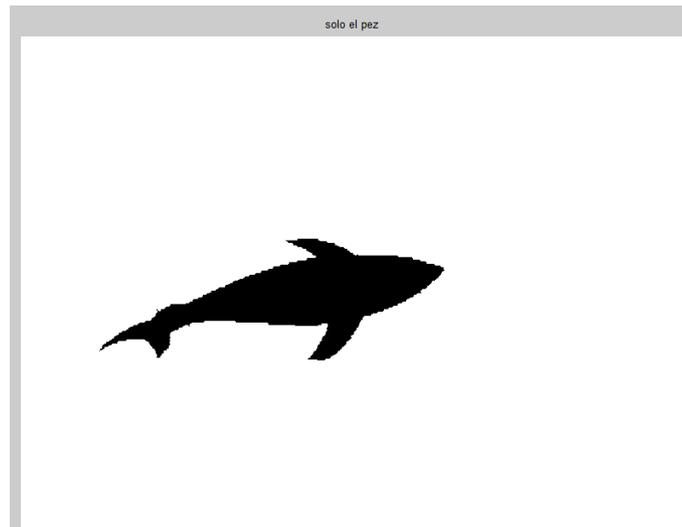


Fig.17. Segmentación del pez a partir de la imagen.

Se calcula el borde del pez segmentado y se aplica el algoritmo clásico para el cálculo de la distancia furcal, marcando una línea recta entre la cola y la nariz del pez. En la Fig.18 se puede observar que este método hace que se pierda exactitud a la hora de estimar la longitud real en píxeles.

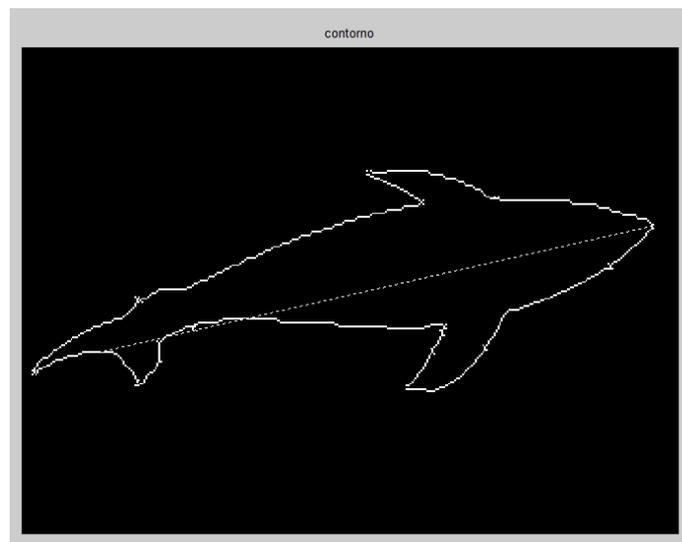


Fig.18. Contorno del pez y línea que une cola y nariz.

El programa también nos pide que marquemos la anchura máxima del pez, en un caso como el de la Fig.18 se haría trazando una línea en horizontal perpendicular a la que se puede apreciar en la imagen. Como se puede apreciar la opción no es la más adecuada así que se opta por la aproximación que se indicó en párrafos anteriores. Se eliminan de la imagen las aletas y se calcula una línea que divida el pez por la mitad. Se realiza el ajuste polinómico de orden 5 de la curva que se calcula, obteniendo valores del coeficiente de correlación por encima de 0.97, por lo que se entiende que es apto.

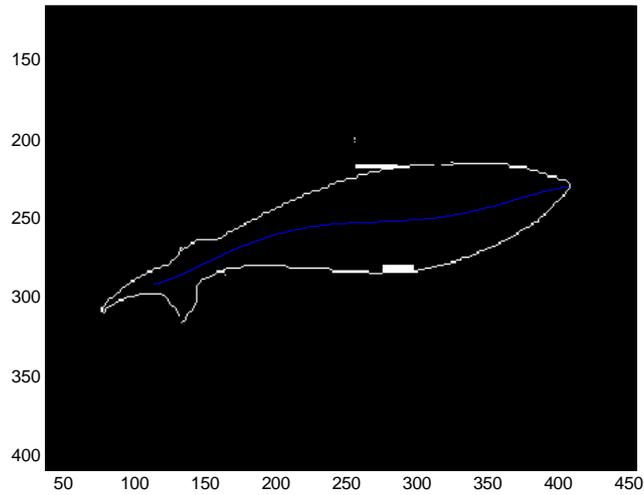


Fig.19. Contorno del pez y curva calculada que une cola y nariz.

A partir de la curva ajustada, se obtiene la distancia de la curva midiendo su longitud a partir de la siguiente formulación matemática:

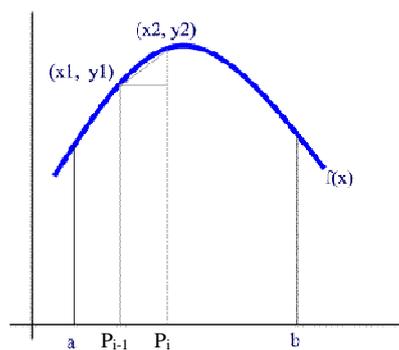


Fig.20. Imagen del cálculo de la longitud del diferencial de una curva.

$$\Delta x_i = x_i - x_{i-1} \quad (23)$$

$$\Delta y_i = f(x_i) - f(x_{i-1}) \quad (24)$$

$$|P_{i-1}P_i| = \sqrt{1 + \left(\frac{\Delta y_i}{\Delta x_i}\right)^2} \cdot \Delta x_i \quad (25)$$

Tras obtener el resultado de esta fórmula tendremos el valor en pixeles de la longitud del pez. Pero necesitamos disponer de este valor en centímetros para poder realizar las representaciones y validar el ensayo que se propone en este documento. Por lo tanto antes de poder obtener este valor

deberemos realizar la calibración de las cámaras que conforman el sistema Vicass, para conocer los parámetros intrínsecos de las cámaras utilizadas.

Para calibrar la cámara no se implementó todo un algoritmo sino que se hizo uso de uno existente de código abierto, hecho especialmente para ser utilizado dentro de Matlab®. El Camera Calibration Toolbox for Matlab (CCT), es un algoritmo para la calibración de una cámara de libre distribución. El funcionamiento del CCT tiene la mayoría de sus bases en [18], con algunas modificaciones. Como puede verse en [19] el algoritmo realiza cuatro funciones principales: calcular los parámetros de la fórmula, calcular los parámetros no lineales, hacer una corrección para proyecciones asimétricas y hacer una corrección general de la imagen [20].

Para poder realizar la calibración, es necesario tomar fotografías de un patrón de calibración que en este caso se trata de un tablero de ajedrez de 8 x 8 cuadros de 42.8 milímetros (los cuadros de la orilla son excluidos a la hora de realizar la calibración con el CCT de Matlab®)

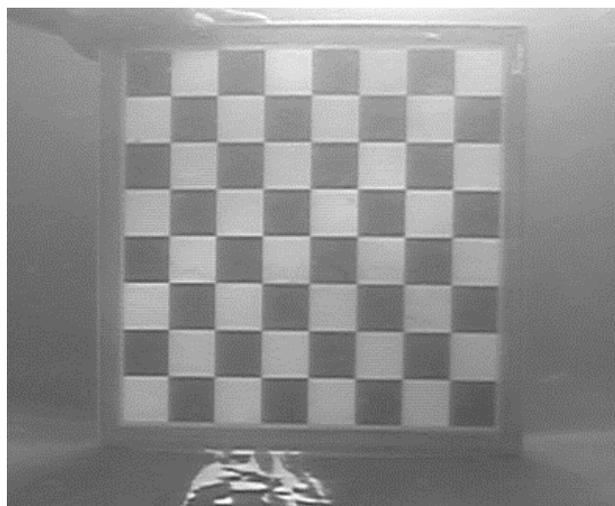


Fig.21. Imagen del patrón de calibración usado.

Durante el proceso de calibración, tanto las cámaras como el patrón se sumergen en un tanque de agua salada que nos cede el IEO en su centro de Mazarrón (Murcia). De este modo se recrean con la mayor similitud las condiciones de uso de la cámara durante el ensayo. Pero no solo esto, el realizar la calibración nos permitirá, en el momento de realizar los cálculos, disponer de la distancia focal adecuada para nuestro ensayo, en el que se produce un cambio de medio, agua/aire, ya que, las lentes se encuentran dentro de una caja estanca. No obstante como se indica en la ecuación 14, la distancia focal dependerá de los índices de refracción y de los radios de curvatura de la lente. Al ser ésta medida de forma empírica estos factores ya están integrados en el valor obtenido, pudiéndose aplicar las ecuaciones 15 y 16 directamente como si de una lente delgada se tratase. Se toman 36 fotografías de este patrón moviéndolo libremente en diferentes posiciones,

para que la cámara tenga diversas perspectivas del mismo y realizar la calibración correctamente. En los anexos de este documento se mostrará como se realizó dicha calibración.

Una vez realizado el proceso de calibración obtenemos los siguientes resultados:

Calibration results after optimization (with uncertainties):

Focal Length:	$fc = [506.86060 \ 509.15223] \pm [1.46823 \ 1.60717]$
Principal point:	$cc = [294.55160 \ 256.16888] \pm [2.85774 \ 2.75918]$
Skew:	$\alpha_c = [0.00087] \pm [0.00129] \Rightarrow$ angle of pixel axes = 89.95006 ± 0.07365 degrees
Distortion:	$kc = [-0.09763 \ 0.04291 \ 0.00275 \ 0.00169 \ 0.06647] \pm [0.02261 \ 0.15400 \ 0.00202 \ 0.00158 \ 0.36433]$
Pixel error:	$err = [0.20711 \ 0.15351]$

De la calibración se desprende que la distancia focal es de 508.006415 pixels, pero necesitamos conocer la distancia focal en milímetros. Para poder calcularla nos fijamos en las hojas de características de la cámara que nos ofrece el fabricante y la fórmula conocida que nos indica que:

$$Tp = \frac{Ld(mm)}{\sqrt{H^2 + V^2}} (mm) \quad (26)$$

donde Tp es tamaño del pixel, Ld es la longitud de la diagonal en mm, H y V representan el número total de pixeles horizontales y verticales respectivamente.

Observando las especificaciones de las cámaras que se adjuntan en los anexos al final del documento, y aplicando la expresión 26 obtenemos un tamaño del pixel de $6,7 \cdot 10^{-3}$ milímetros. De esto se desprende que la distancia focal de nuestras cámaras es de 3.4158 milímetros.

Conociendo el tamaño del pixel y la distancia focal en milímetros seremos capaces de trasladar las longitudes de los peces obtenidas por nuestra pequeña aplicación en Matlab® a longitudes en la realidad. Para ello se aplicaran las leyes fundamentales de la óptica reseñadas en la introducción de este documento. Pero hay que hacer un inciso, la aplicación desarrollada en este trabajo no hace uso de las leyes de la geometría estereoscópica, es decir, solamente se tiene en consideración una de las imágenes tomada por el par de cámaras. En cualquier otro caso se plantearía el problema de conocer la profundidad o distancia a la que se encuentra el objeto del que deseamos conocer el tamaño real, pero en nuestro caso no ocurre, ya que, disponemos para cada imagen una correspondencia con el ecograma que nos permite realizar el cálculo de la distancia a la que se encuentra el pez del objetivo de la cámara.

En el apartado siguiente se realizará una discusión de los resultados obtenidos tras la aplicación a las imágenes del programa desarrollado. Se evaluará su efectividad, al igual que la del ensayo planteado en este documento, para monitorizar las características biométricas de los atunes alojados en jaulas de cultivo.

III. RESULTADOS

En el apartado anterior se ha indicado como encontrar la correspondencia imagen-ecograma, y que, con ayuda del software Sonar5_Pro, se han obtenido los valores de TS medio de las trazas que se corresponden con las imágenes en las que un atún cruza el haz acústico. Además, con ayuda de los ecogramas, conocemos la distancia al a que se encuentra el blanco detectado, así como la distancia a la que se encuentra cada elemento que forma parte del montaje experimental. El paso siguiente es ordenar y procesar los datos almacenados para poder extraer conclusiones, y combinarlos con los datos biométricos que las imágenes, junto con los datos de ecograma, nos permiten conocer.

Para comenzar con la presentación de resultados se muestra la distribución del TS para las trazas acústicas detectadas, tanto para las medidas ventrales como dorsales.

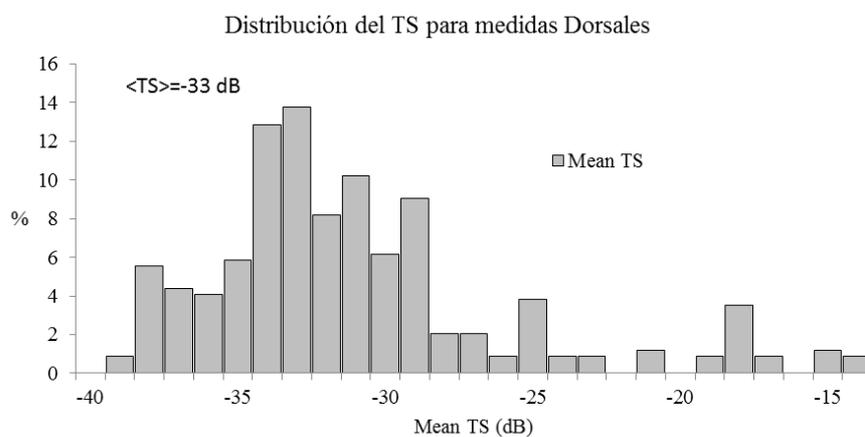


Fig.22. Distribución del Target Strength para medidas dorsales

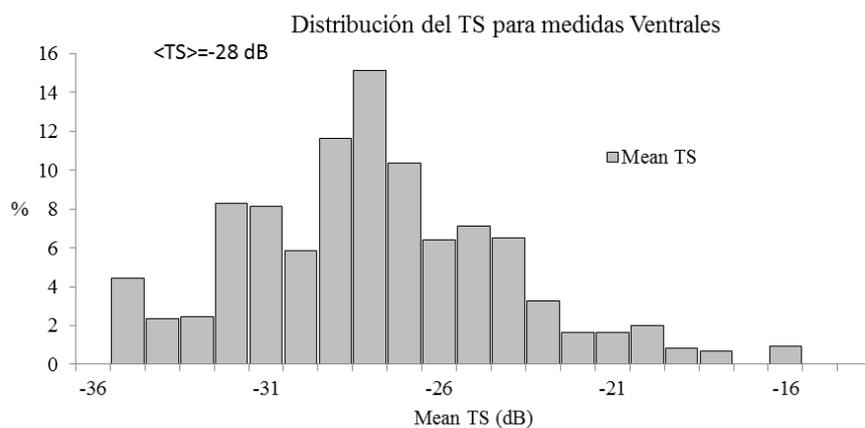


Fig.23. Distribución del Target Strength para medidas ventrales

En la Fig.22 podemos ver que, las medidas dorsales del TS, muestra una distribución que tiende a ser bimodal. Además, los valores de TS obtenidos son mayores que los que aparecen en la bibliografía para especies y tamaños similares, este hecho es asumible al haber utilizado una frecuencia mayor a la que se usa habitualmente en la bibliografía para peces de este tamaño.[17].

Se ha comentado en apartados anteriores, que las ecosondas científicas, en principio, aplican el mismo patrón de directividad en la emisión y en la recepción, pero se ha de tener en cuenta que cuando un pez es detectado por el haz acústico, este actúa como fuente y posee también un patrón directivo como tal. Cuando un pez cruza nadando el haz acústico, los ecos provenientes de los lóbulos laterales y del lóbulo principal de la vejiga natatoria, pueden ser detectados, produciendo distribuciones multimodales. Es conocido que, para peces de longitudes furcales grandes, la vejiga natatoria se puede asimilar a un cilindro de manera más exacta que para las especies de menor tamaño, el lóbulo principal de la misma se hace más estrecho, y por tanto, la posibilidad de ser detectados decrece, por este motivo, para peces de mayor longitud la tendencia a distribuciones unimodales aumenta [21].

Para el caso de las medidas ventrales (Fig. 23), la distribución se presenta más unimodal y simétrica. Este hecho se debe, en gran parte a que, para medidas ventrales, la vejiga hace que el pez sea menos direccional que en el caso de las medidas dorsales, debido a la morfometría de la vejiga. En las medidas dorsales el efecto del esqueleto minimiza el de la vejiga aunque sin llegar a anularlo, como se ha descrito en el párrafo anterior. Desde el punto de vista ventral, la vejiga aparece más redondeada que dorsalmente, este hecho reduce la directividad. Esto puede explicar también que, el TS para las medidas ventrales sea mayor que para las dorsales, ya que, la vejiga es la responsable del 90% de la energía acústica reflejada por el pez. Hay que recordar, además, que la directividad aumenta con la frecuencia, en este experimento se ha usado transductores de 200 kHz y 7° de ancho de haz, por ello era de esperar, distribuciones marcadamente multimodales que sin embargo no se producen.

Otro punto crítico a tener en cuenta es la relación que existe entre el atún y el área del haz acústico que lo insonifica, y el hecho que, muchas medidas en jaulas están afectadas por los efectos del campo cercano. Al realizar las medidas de peces de este tamaño en jaulas, se asume que el pez no está lo suficientemente lejos para considerar el campo acústico dispersado como un campo lejano; y que además, no se podrá considerar como un blanco puntual localizado dentro del haz. Recordando que los transductores también tienen una zona de campo cercano que hay que evitar, la combinación de ambos nos puede llevar a obtener valores no fiables del TS.

El principal problema es la dificultad que existe para obtener la función correcta de TVG (time varying gain) que se debe aplicar, cuando el pez es grande en comparación con el área del haz en el plano en el que lo atraviesa. Por esta misma razón, se espera un error asociado a la medición de la fase en la ecosonda split-beam, previo a la compensación de la señal recibida con el TVG.

Por esta razón, se estudia la dependencia del TS con la distancia al transductor como se muestra en las siguientes figuras (Fig. 24 y Fig.25). En ellas podemos ver que, para un número delimitado de trazas, del que se compone este estudio preliminar, los valores del TS medio para medidas ventrales evolucionan con la distancia a un valor estable. Para el caso de las medidas dorsales, la literatura indica que para atunes nadando en libertad, el valor del TS medio debe variar con la profundidad [22]. Pero en nuestro experimento, la escala utilizada dista mucho de la usada en la bibliografía al respecto, al tratarse de mediciones dentro de una jaula y limitar las detecciones al espacio que existe entre la superficie y la posición de las cámaras. Por ello, nuestros datos dorsales presentan una dependencia más compleja con la distancia al transductor que las medidas ventrales, que es debida a los efectos de campo cercano mencionados anteriormente.

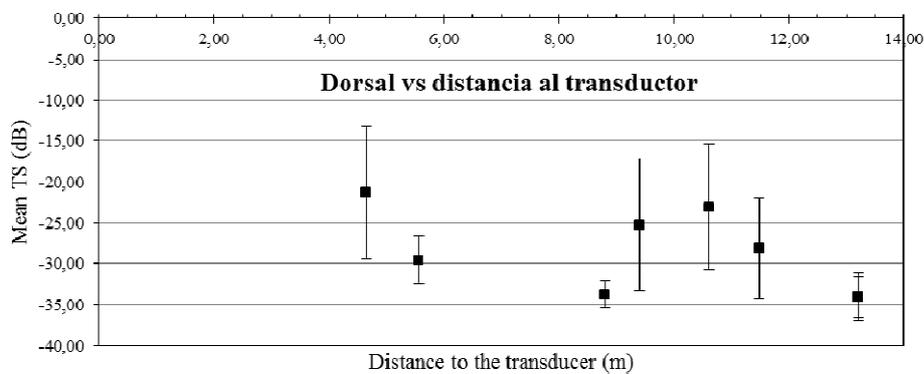


Fig.24. Relación del TS con la distancia al transductor para medidas dorsales

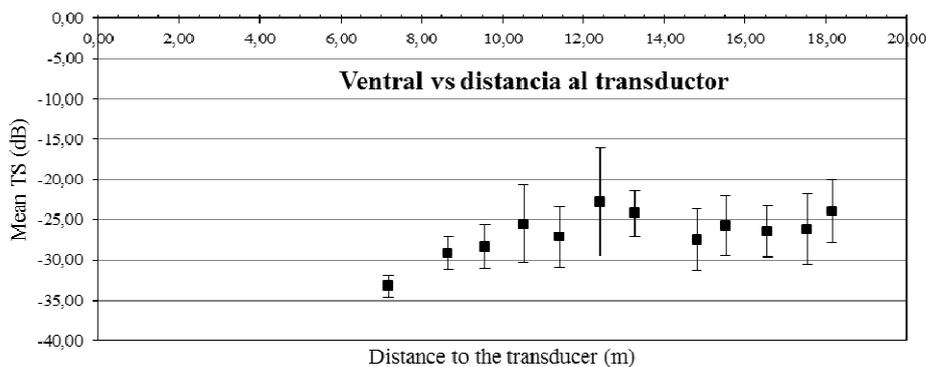


Fig.25. Relación del TS con la distancia al transductor para medidas ventrales

Las consideraciones anteriores son cruciales para poder realizar una evaluación de la relación existente entre el valor del TS y el tamaño obtenido a partir de las medidas biométricas proporcionadas por el sistema óptico.

Con ayuda del código en Matlab® implementado se ha podido realizar la medición de algunos especímenes y se puede establecer una relación con el valor medio del TS del mismo. Este valor,

como se ha explicado en párrafos anteriores, se obtiene del ecograma a partir de la correspondencia temporal imagen-ecograma.

Antes de realizar la representación de los valores obtenidos, es imprescindible cuantificar el error absoluto que estamos cometiendo, comparando nuestros resultados con las medidas de longitud de los peces que nos proporciona el IEO. En la Tabla 1, se referencia el error absoluto obtenido al estimar la longitud de los peces con el software de medida que nos proporciona el sistema Vicass; tanto en la llamada configuración habitual, como en la configuración elegida para la realización de este experimento. Queda claro a la vista de dichos valores que el cambio de configuración aumenta el error absoluto, es de esperar pues, que la medida de las longitudes mediante la aplicación informática desarrollada también aumente dicho error absoluto. Aunque, para una lectura realista de los resultados, hay que tener en cuenta dos factores importantes. El primero de ellos se refiere a la idoneidad del sistema óptico utilizado para esta configuración, pues como se indica en párrafos anteriores se trata de un sistema pensado para realizar medidas con una profundidad de campo pequeña que ha sido modificado para obtener una mayor profundidad de campo manteniendo un error aceptable. El segundo factor a destacar, la captura de las fotografías, al realizarse de manera automática, no se controla que todas las imágenes sean susceptibles de ser tratadas con nuestra aplicación, y por tanto, la medición del espécimen pueda ser llevada a cabo.

En la Tabla 2 realizaremos una comparación de los tres métodos de medida de la longitud de los peces utilizados en este trabajo:

disposición	Longitud media en cm	$\varepsilon(\%)$
Habitual (Vicass)	164 \pm 7	4.3
Ventral(Vicass)	165 \pm 13	7.9
Medidas con Matlab	167 \pm 26	15.5

Tabla 2: Valores medios y desviación típica de todos los métodos de medida de la longitud utilizados

Los valores obtenidos de la longitud media a partir de nuestra aplicación en Matlab®, proporcionan un aumento significativo del error absoluto, pero no un aumento de la longitud media que nos obligue a desestimar el método. Claro está, que es necesaria una revisión del mismo para minimizar el error, pero no hay que olvidar que este trabajo se presenta como una primera aproximación al problema y por tanto explora metodologías. Además, es de destacar, la posibilidad que la aplicación desarrollada nos ofrece a la hora de estimar la longitud de los atunes fotografiados; una vez seleccionadas las imágenes con atunes susceptibles de ser medidas, la cantidad de mediciones aumenta de manera significativa respecto a la cantidad de mediciones que el software del sistema Vicass nos permitía realizar para esta configuración (con el software

Vicass solo el 4% de las imágenes podían ser medidas mientras que el porcentaje aumenta al 20% con nuestra aplicación).

Teniendo en cuenta todas las prerrogativas formuladas en párrafos anteriores, se realiza una representación del valor del TS medio de las trazas que se pueden relacionar con una imagen medible de un atún. No existe en la bibliografía, hasta el momento, ninguna representación de este tipo para la especie que nos ocupa, el atún rojo, aunque si para otras especies y la metodología para la representación que se toma es la misma [21, 22].

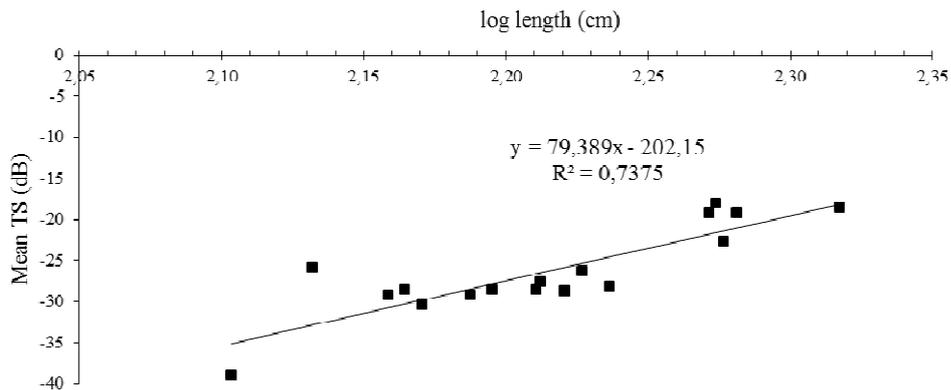


Fig.26. Relación del TS con la longitud de los atunes

En la Fig.26 se muestra la representación de los valores obtenidos que nos permiten relacionar el TS con la longitud de los atunes, y la ecuación que los relaciona de manera lineal. La bibliografía nos indica que para poder ser tomada en cuenta como una relación válida, el coeficiente de correlación debería ser alto, en este caso no lo es (0.7375); no obstante, y como se indica durante todo este trabajo, aunque los resultados obtenidos se adaptan a la ortodoxia, no podemos olvidar que se trata de datos de un experimento preliminar. Por la cantidad de datos manejados, que son pocos para poder realizar un tratamiento estadístico y poder establecer teorías de manera clara; solamente podemos inferir que la metodología de medida implementada, puede ser efectiva para el fin marcado por este trabajo; poder monitorizar mediante métodos no intrusivos el crecimiento de los atunes en las jaulas de cría.

IV. CONCLUSIONES

Durante todo el documento, se ha hecho hincapié, en que estábamos frente a un desarrollo experimental de carácter preliminar, que pretendía analizar si la metodología utilizada era apta para los objetivos marcados. A la vista de los resultados se puede establecer que los objetivos han sido alcanzados de manera satisfactoria.

El uso combinado de técnicas acústicas y ópticas permite asignar correspondencias entre los valores del Target Strength (TS) y el tamaño de un determinado pez. Este hecho, permite mejorar las condiciones de monitorización de los atunes en cautividad. Contando, además, con la información adicional que el sistema óptico nos proporciona en cuanto al comportamiento de los especímenes durante la toma de medidas.

El experimento nos muestra que, las medidas ventrales del TS nos proporcionan información sobre el estado de crecimiento de los atunes alojados en la jaula. Sin embargo, las medidas dorsales muestran, al igual que en otros experimentos [21], resultados más ambiguos.

Este documento, presenta resultados preliminares de un proyecto que continua en desarrollo, pendiente de nuevas campañas de medidas que permitan dilucidar si las tendencias mostradas en este trabajo se mantienen. Por esta razón, los valores cuantitativos mostrados a lo largo de estas páginas, deberán ser revisados y ajustados con la finalidad de obtener mayores correlaciones entre los valores del TS y la longitud de los peces. De este modo, se obtendrán relaciones con un grado de fiabilidad mayor, y por lo tanto, la capacidad de controlar el crecimiento de los atunes en cautividad y la posibilidad de minimizar costes durante su engorde aumentarán.

V. LINEAS FUTURAS

Se expondrá en este punto las líneas de trabajo futuras que este experimento deja abiertas. Todas ellas irán dirigidas a la mejora de un sistema de monitorización de peces en jaulas de cultivo, que permita hacer eficiente y rentable la cría de peces en cautividad, ya que, se trata de un sector económico en expansión y cuyo desarrollo es de vital importancia, debido a la merma en los recursos pesqueros y a la necesidad de hacer sostenible ecológicamente el consumo de peces por el ser humano para su alimentación.

Para poder obtener valores del TS más adecuados, deberá investigarse que valor del TVG es necesario aplicar para obtener valores fiables en la configuración de medida elegida, de tal manera que, se reduzca las desviaciones introducidas al encontrarnos sometidos a los efectos del campo cercano.

Es conveniente, también, desarrollar algoritmos de procesamiento de los ecogramas que nos permitan asignar de manera automática cada imagen con su correspondiente traza acústica. De este modo, el tiempo de análisis se reducirá, ya que, en este trabajo se ha realizado esta asignación imagen-traza de manera manual, mecanismo apto para una aproximación al problema pero no para poder usar este tipo de configuración en granjas marinas.

Es necesario mejorar los algoritmos de procesamiento de las imágenes, de manera que, nos permita realizar una detección automática del espécimen a medir, y poder estimar su longitud de manera lo más exacta posible, reduciendo los errores mostrados en este documento. Para ello, creemos sustancial, un cambio en el sistema de adquisición de los datos ópticos. Ya que la ecosonda nos facilita información sobre la distancia a la que se encuentra el pez, se contempla la posibilidad de usar una sola cámara para la toma de imágenes. Se trabaja ya, en la caracterización de cámaras IP de alta resolución y distancia focal pequeña, que colocadas junto al transductor en el fondo de la jaula, nos proporcionen una sola imagen del pez mientras atraviesa el haz acústico, y a partir de ellas poder inferir la longitud del mismo. Además, para minimizar la cantidad de información a tratar, y optimizar los recursos (tanto a nivel hardware como software), se prevé implementar algoritmos de detección de presencia, para que solo se tomen medidas cuando el pez este dentro del haz acústico (total o parcialmente).

Al disponer de un espacio libre de obstáculos, ya que el sistema óptico y acústico (formado por una cámara y un transductor) estarán colocados en el fondo de la jaula; los datos acústicos y ópticos obtenidos estarán más limpios y su procesado será más sencillo.

Para poder obtener mayor información y corroborar las tendencias mostradas en este documento, sería interesante el uso de diferentes transductores, con frecuencias de trabajo menores, de este modo se podrán establecer relaciones longitud furcal-TS adecuadas que permitan la monitorización efectiva de los atunes a diferentes frecuencias, y además, se podrá conocer las

desviaciones introducidas al aumentar la frecuencia de trabajo, pudiendo conocer de manera más adecuada como afecta el campo cercano a la media del TS y si es necesario disponer de especímenes totalmente insonificados para poder controlar su crecimiento de manera más exacta.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado bajo el soporte del 7º Programa Marco Europeo y dentro del Proyecto SELFDOTT (From capture based to self-sustained aquaculture and domestication of bluefin tuna *Thunnus thynnus*(GA 212797)). No obstante, no refleja necesariamente sus puntos de vista y de ninguna manera anticipa la futura política de la Comisión en este ámbito. En los anexos se incluye una comunicación oral a congreso en relación con este trabajo.

Agradezco personalmente a Fernando de la Gandara y Javier Viguri, así como al resto del equipo del IEO en su sede de Mazarrón (Murcia), su colaboración e inestimable ayuda durante la realización de las medidas y en el asesoramiento durante el proceso de tratamiento de los datos. Así como a Ester Soliveres por su participación en la realización de las medidas y apoyo en el manejo de los equipos. No me gustaría olvidarme de Carlos David Llorens por su ayuda técnica y paciencia.

REFERENCIAS

- [1] Ortega, A., Viguri, J., Belmonte, A. y De la Gándara, F., 2009. *Resultados preliminares de los 30 primeros días de cultivo larvario de atún rojo (Thunnus thynnus)*, en el IEO. In: Libro de resúmenes del XII Congreso Nacional de Acuicultura. Madrid Noviembre de 2009, 584-585 pp.
- [2] De la Gándara, F., Mylonas, C.C., Coves, D. Bridges, C.R., Belmonte Rios, A., Vassallo-Agius, R., Rosenfeld, H., Medina, A., Demetrio, G. Falcon, J. Sveinsvoll, K., Ghysen, A. and Deguara, S. 2009. The challenge of domestication of bluefin tuna *Thunnus thynnus*- Highlights of the SELFDOTT project from 2008-2009. Proceedings of the 2nd Global COE Program Symposium of Kinki University, 2009. *Sustainable Aquaculture of the Bluefin and Yellowfin Tuna - Closing the Life Cycle for Commercial Production*". Adelaide (Australia) December 1-2: 70-72 pp. Kenneth G. Foote, "Summary of methods for determining fish target strength at ultrasonic frequencies", ICES J. mar. Sci., 48:211-217 (1991).
- [3] Bridges, C.R., Borutta, F., Krohn, O. and Schulz, S. 2009. *Broodstock monitoring, handling and induction techniques. Recent advances in Atlantic bluefin tuna (Thunnus thynnus) reproduction. Proceedings of the 2nd Global COE Program Symposium of Kinki University, 2009. "Sustainable Aquaculture of the Bluefin and Yellowfin Tuna - Closing the Life Cycle for Commercial Production"*. Adelaide (Australia) December 1-2: 20-24 pp.
- [4] www.ieo.es
- [5] David N. MacLennan, E. John Simmonds. *Fisheries acoustics*. Chapman & Hall, 1992.
- [6] Xavier Lurton. *An introduction to underwater acoustics. Principles and applications*. Springer & Praxis, 2002.
- [7] K.A. Johannesson, R.B. Mitson. *Fisheries acoustics – A practical manual for aquatic biomass estimation*. FAO Fisheries Technical Paper 240. 1983.
- [8] Herman Medwin, C.S. Clay. *Fundamentals of acoustical oceanography*. Academic Press, 1998.
- [9] Jiménez Camacho, E. *Medición de distancias por medio de procesamiento de imágenes y triangulación, haciendo uso de cámaras de video*. Universidad de las Américas Puebla Escuela de Ingeniería Departamento de Computación, Electrónica y Mecatrónica, 2009
- [10] Tipler Paul A, *Física*, Reverté, 1996
- [11] Capell Muñoz, I. *Sistema estereoscópico para teleoperación asistida y supervisión de tareas robotizadas*. Escola Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona. 2006
- [12] Hartley, Richard and Zisserman, Andrew, *Multiple View Geometry in Computer Vision*, (2da. Edición). Cambridge University Press, Reino Unido, 2003.
- [13] Kongsberg Maritime AS. *Simrad ER60. Scientific echo sounder software. Reference manual. Release 2.2.0*. www.simrad.com 2008.
- [14] H. Balk, T. Lindem. *Sonar4 and Sonar5_Pro Post processing systems, Operator manual v. 5.9.8*, University of Oslo, Norway . , (2008).
- [15] Bertrand, A; Josse, E.; and Massé J.; *In situ acoustic target strength measurement of tuna associated with a fish aggregating* . ICES Journal of Marine Science, 57:911-918. (2000)
- [16] Sainz-Pardo, S, Espinosa V. *Dorsal TS measurement analysis and tuna behavior in sea cages*. ECUA 2010.

- [17] Bertrand, A; Josse, E.;; *Tuna target-strength related to fish length and swimbladder volume* . ICES Journal of Marine Science, 57:1143-1146. (2000)
- [18] Zhang, Zhengyou, *Flexible Camera Calibration By Viewing a Plane From Unknown Orientations*, , Technical Report, Microsoft Research, Redmond, USA 1998.
- [19] Heikkilä, Janne and Silvén, Olli, *A Four-step Camera Calibration Procedure with Implicit Image Correction*, , *Proceedings CVPR'97*, IEEE Computer Society, Washington, USA 1997.
- [20] Bouguet, Jean-Yves, *Camera Calibration Toolbox for Matlab*, , California Institute of Technology, California, USA. 2008.
- [21] Knudsen F.R. ,Fosseidengen J.E. , Oppedal F. ,Karlsen O, *Hydroacoustic monitoring of fish in sea cages: target strength (TS) measurements on Atlantic salmon (Salmo salar)*. Fisheries Research 69:205-209. (2004).
- [22] Bertrand, A; Josse, E.; and Massé J.; *In situ acoustic target strength measurement of bigeye (Thunnus obesus) and yellow tuna (Thunnus albacores) by coupling split-beam echosounder observations and sonic tracking*. ICES Journal of Marine Science, 56: 51-60. (1999)

ANEXOS

Anexo 1. Cálculo del coeficiente de absorción del agua del mar y de la velocidad de propagación del sonido en el agua del mar

En el agua del mar se producen absorciones adicionales asociadas a inhomogeneidades, tales como las sales disueltas, los sólidos en suspensión o las burbujas. Esta atenuación se debe a mecanismos de absorción que transforman la energía acústica en energía térmica y a mecanismos que dispersan la energía acústica fuera del haz.

Se han desarrollado una serie de ecuaciones para predecir el coeficiente de absorción según la frecuencia, la temperatura, la salinidad, la profundidad y el pH del agua. Las ecuaciones más recientes de Francois y Garrison (1982) son las más precisas para calcular el coeficiente de absorción [5]. El coeficiente de absorción se obtiene como la suma de las tres componentes que representan la absorción debida al ácido bórico, al sulfato de magnesio y la viscosidad

$$\beta = f^2 \left[\left(\frac{A_1 f_1}{f_1^2 + f^2} \right) + \left(\frac{A_2 P_2 f_2}{f_2^2 + f^2} \right) + A_3 + P_3 \right] (dB / Km) \quad (27)$$

En agua dulce los dos primeros sumandos son insignificantes y la absorción se puede considerar enteramente viscosa, siendo $\beta = f^2 \cdot A_3 \cdot P_3$. Mientras que, en el agua del mar es necesario considerar todos los factores de la ecuación (27).

$$A_1 = \left(\frac{8.86}{c} \right) \cdot 10^{(0.78 \cdot pH - 5)} \quad (28)$$

$$f_1 = 2.8 \left(\frac{s}{35} \right)^{0.5} \cdot 10^{\left(4 - \frac{1245}{T+273} \right)} \quad (29)$$

$$A_2 = 21.44 \cdot \left(\frac{s}{c} \right) \cdot (1 + 0.025 \cdot T) \quad (30)$$

$$P_2 = 1 - 1.34 \cdot 10^{-4} \cdot D + 6.2 \cdot 10^{-9} \cdot D^2 \quad (31)$$

$$f_2 = \frac{8.17 \cdot 10^{8 \cdot \left(\frac{1990}{T+273} \right)}}{1 + 0.0018(s - 35)} \quad (32)$$

$$P_3 = 1 - 3.83 \cdot 10^{-5} \cdot D + 4.9 \cdot 10^{-10} \cdot D^2 \quad (33)$$

El valor de A_3 depende de la temperatura. Si $T \leq 20^\circ C$

$$A_3 = 4.973 \cdot 10^{-4} - 2.59 \cdot 10^{-5} \cdot T + 9.11 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 - 1.5 \cdot 10^{-8} \cdot T^3 \quad (34)$$

Y si $T > 20^\circ C$

$$A_3 = 3.964 \cdot 10^{-4} - 1.146 \cdot 10^{-5} \cdot T + 1.45 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 - 6.5 \cdot 10^{-8} \cdot T^3 \quad (35)$$

En estas expresiones T es la temperatura ($^\circ C$), s es la salinidad (ppm o %), D la profundidad (m) y f es la frecuencia de interés (KHz). Este modelo predice el coeficiente con un 5% de error para

temperaturas entre -1.8 y 30°C , salinidades de 20 a 35 ppm y frecuencias de 400 KHz a 1 MHz. El pH oscila entre 7.8 y 8.2. Si se desconoce el valor del pH y la salinidad se suele asumir que el pH es 8 y la salinidad 32 ppm.

Al igual que la absorción la velocidad del sonido c en el agua del mar depende de la temperatura, de la profundidad y la salinidad.

Puede predecirse con ayuda de ecuaciones empíricas. La ecuación de Mackenzie (1981) es el método más recomendado para realizar un cálculo preciso de la velocidad del sonido, c , conociendo las condiciones ambientales del agua [5]. Presenta un error del 1%, la fórmula de Mackenzie es:

$$c = 1448.96 + 4.591 \cdot T - 0.05304 \cdot T^2 + 2.374 \cdot 10^{-4} \cdot T^3 + 1.34 \cdot (s - 35) + 0.0163 \cdot D + 1.675 \cdot 10^{-7} \cdot D^2 - 0.01025 \cdot T \cdot (s - 35) - 7.139 \cdot 10^{-13} \cdot T \cdot D^3 \quad (36)$$

Donde T es la temperatura ($^{\circ}\text{C}$), s es la salinidad (ppm) y D la profundidad (m), proporcionan la velocidad c (m/s). Esta ecuación es válida para temperaturas de -2 a 30°C , salinidades de 25 a 40 ppm y profundidades de 0 a 8000m. Dentro de estos rangos el error estándar de la predicción de la velocidad del sonido es de ± 0.7 m/s. Para profundidades inferiores a 1000 m el último término de la ecuación puede ser ignorado porque es muy pequeño.

Frecuentemente, en muchos cálculos es adecuado utilizar una velocidad nominal de 1500 m/s, que es la velocidad típica de las medidas en aguas superficiales que cubren las placas continentales en latitudes medias. A esta velocidad nominal está asociada al a impedancia acústica característica del agua $\rho \cdot c = 1.54 \cdot 10^6$ Pa·s/m.

Si se desconoce el valor de la salinidad se recomienda suponer una salinidad de 32 ppm, al igual que en el coeficiente de absorción.

Anexo 2 La ecuación del sonar

La ecuación del sonar puede escribirse como:

$$EL - NL \geq DT (dB_{ref} P_{ref}) \quad (37)$$

donde EL es el nivel de eco recibido por el sistema sonar, NL es el nivel de ruido detectado y DT es el umbral de detección [8]. En sistemas activos el nivel de eco recibido depende del nivel de señal transmitida, las pérdidas de propagación y la potencia del blanco. El nivel de ruido detectado, tiene en cuenta, entre otras, las contribuciones del ruido ambiente y del ruido de reverberación, y se caracteriza por la densidad espectral de potencia. El umbral de detección, es el valor que ha de exceder el nivel de eco por encima del nivel de ruido para poder discriminar un blanco. En caso de que se cumpla esta condición existe un 50% de probabilidad de acertar en la detección de un eco.

La ecuación del sonar comprende todos aquellos efectos que sufre la señal desde su transmisión hasta su recepción. En un sistema de sónar activo el pulso transmitido se origina mediante el transmisor, con un nivel de fuente SL. Este frente de ondas acústico se propaga hasta encontrar un blanco, sufriendo unas pérdidas TL debidas a la propagación de la onda en el agua. Parte de la energía que incide sobre el blanco se refleja en dirección de vuelta al sistema sónar, quedando caracterizada por la potencia del blanco TS. Esta onda reflejada vuelve a sufrir pérdidas por propagación TL', hasta que llega la receptor, donde se recibe la señal con un nivel EL. Por tanto el nivel de eco recibido es:

$$EL = SL - TL + TS - TL' (dB_{ref} P_{ref}) \quad (37)$$

EL nivel de ruido detectado depende del nivel de ruido generado por las diferentes fuentes de ruido NL (ruido ambiente, reverberación, interferencias acústicas, ruido provocado por el mismo sónar...). Se ha de tener en cuenta que la ecuación del sónar está expresada en niveles de intensidad. Sin embargo, en las ecuaciones anteriores las magnitudes expresadas en dB se referencian a una presión P_{ref} . Es decir, se emplea una unidad de referencia correspondiente a una onda de 1 Pa de presión eficaz que se propaga por el agua. Por tanto, el uso de esta referencia implica una equivalencia entre nivel de presión y nivel de intensidad de una onda acústica. Se puede emplear indistintamente una presión de referencia de 1Pa o 1μPa, aunque en años anteriores se empleaba una referencia de 1μbar. No obstante, se recomienda el uso de unidades del sistema internacional para expresar los niveles de presión sonora.

Las expresiones matemáticas y la fórmula de cálculo de cada uno de los parámetros que forman la ecuación del sónar podrán consultarse en la bibliografía, entre otras referencias las señaladas en este trabajo [5,6,7,8], a excepción de la potencia el blanco, TS, que se comenta en la introducción de este documento.

Anexo 3 Especificaciones del transductor utilizado.ES200-7C

Simrad ES200-7C
Split beam echo sounder transducer

Introduction

The Simrad ES200-7C is a split-beam composite transducer with a large bandwidth. This provides a fine range resolution, which is important for single fish detection and target strength measurement. The transducer has four quadrants.

Order number

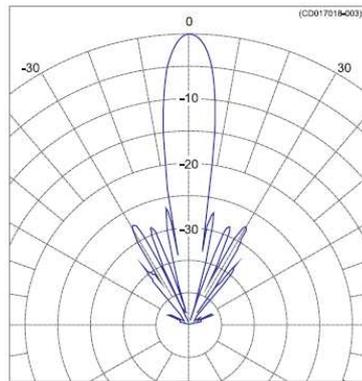
KSV-203003



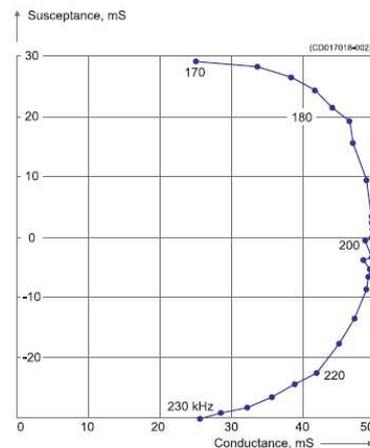
Technical specifications

The following specifications are valid when all four quadrants are wired in parallel.

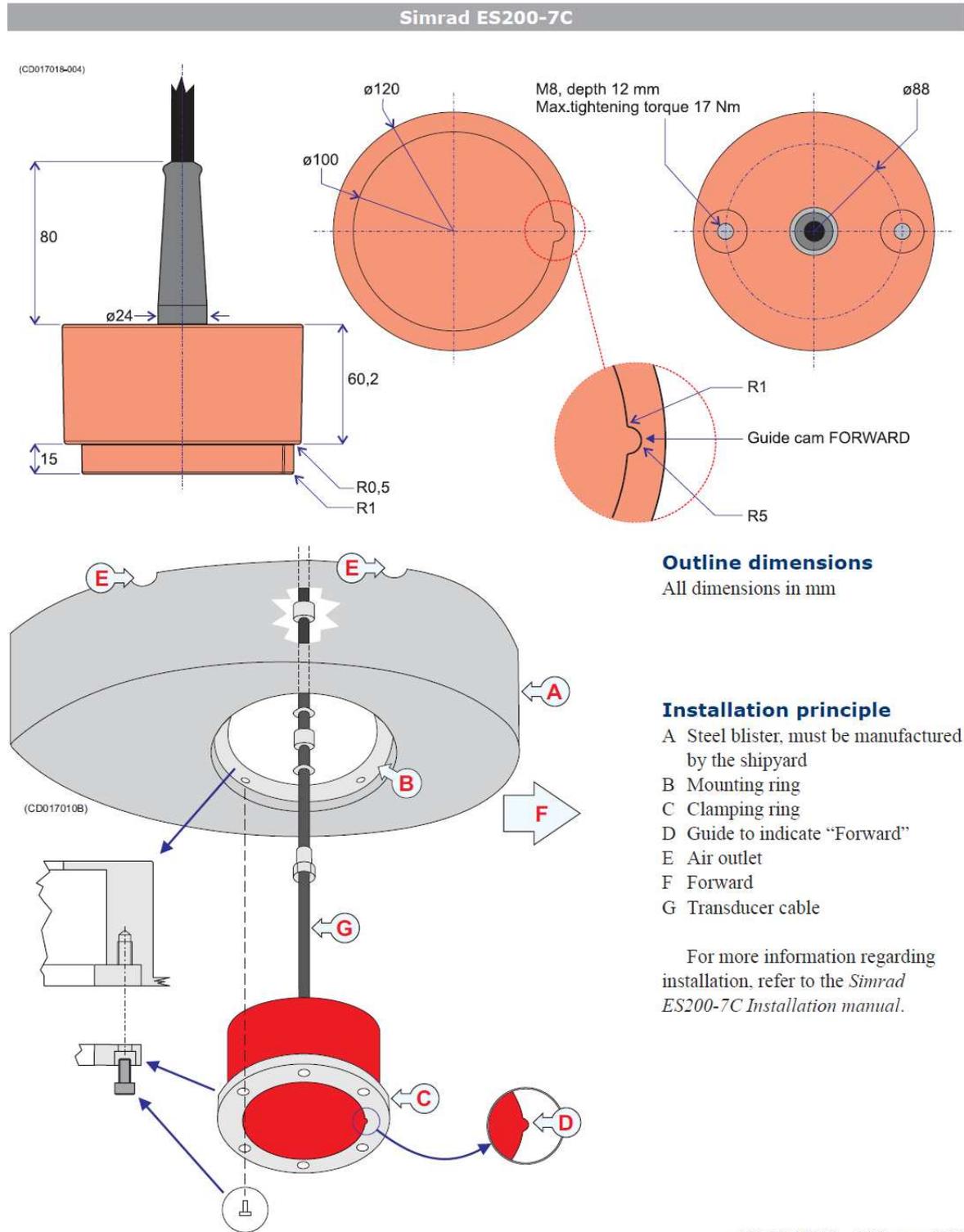
- Resonant frequency: 200 kHz
- Circular beamwidth: 7 deg
- Directivity:
 - D: 650
 - DI = 10 log D: 28 dB
- Equivalent two-way beam angle:
 - Ψ : 0.009
 - 10 log Ψ : -20.5 dB
- Side lobes: Less than -23 dB
- Back radiation: Less than -40 dB
- Nominal impedance: 19 Ω (Each quadrant: 75 Ω)
- Transmitting response: 185 dB re 1 μ Pa per V
- Receiving sensitivity, open circuit: -190 dB re 1V per μ Pa
- Electro-acoustic efficiency: 0.75
- Max. pulse power input: 1000 W
- Max. continuous input: 10 W
- Max. transducer depth: 20 m
- Cable length: 20 m
- Cable diameter: 10.6 mm
- Weight: 1.1 kg
- Storage temperature: -20° to 70°C



Beam pattern



Admittance

**Simrad**

Kongsberg Maritime AS
Strandpromenaden 50
P.O.Box 111
N-3191 Horten, Norway

Telephone: +47 33 03 40 00
Telefax: +47 33 04 29 87
www.simrad.com
simrad.sales@simrad.com

SIMRAD

Anexo 4 Especificaciones las cámaras utilizadas en el sistema Vicass. CCTV Cámara WV-BP330/WV-BP332/WV-BP334 de Panasonic

SPECIFICATIONS

Pick-up Device:	768 (H) x 494 (V) pixels, Interline Transfer CCD
Scanning Area:	4.9 (H) x 3.7 (V) mm (Equivalent to scanning area of 1/3" pick-up tube)
Synchronization:	Internal, External, Line-locked or Multiplexed vertical drive (VD2) selectable
Scanning System:	2 : 1 interlace
Scanning:	525 lines / 60 fields / 30 frames
Horizontal:	15.734 kHz
Vertical:	59.94 Hz
Horizontal Resolution:	570 lines
Video Output:	1.0 V[p-p] EIA composite 75 Ω / BNC connector
Signal-to-Noise Ratio:	50 dB (AGC OFF)
Electronic Light Control:	Equivalent to continuous variable shutter speed between 1/60 s and 1/10 000 s
Minimum Illumination:	0.08 lx (0.008 footcandle) at F1.4, AGC ON
Gain Control:	AGC ON (+18 dB) or OFF selectable
Lens Mount:	C-mount or CS-mount selectable
Ambient Operating Temperature:	-10°C - +50°C (14°F - 122°F)
Ambient Operating Humidity:	Less than 90%
Power Source and	WV-BP330: 120V AC, 60 Hz, 3.5W
Power Consumption:	WV-BP332: 12V DC, 250 mA
	WV-BP334: 24V AC, 60 Hz, 3.5W

Dimensions (without lens):	67 (W) x 55 (H) x 123 (D) mm [2-5/8" (W) x 2-3/16" (H) x 4-13/16" (D)]
Weights (without lens):	WV-BP330: 0.52kg (1.40lbs) WV-BP332: 0.445kg (0.98lbs) WV-BP334: 0.470kg (1.04lbs)

Weights and dimensions indicated are approximate.
Specifications are subject to change without notice.

Anexo 5 Aplicación implementada en Matlab®.

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Este programa realiza la estimación de la longitud de los peces que aparecen en las %
% fotografías tomadas mediante técnicas de tratamiento digital de imagen. Se aplica %
% binarización segmentado, se calcula el borde del pez y se aplican técnicas para %
% obtener su eje de simetría y aproximarlos a una curva, de la que se mide su longitud.%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

clear all
clc

```

```

%seleccionamos la imagen que queremos cargar, se carga y se muestra por
%pantalla
[filename,pathname] = uigetfile({'*.tif'} , 'Seleccione imágenes:');
A=imread(filename);
figure
imshow(A)
title('imagen original');
pause
close
%convertimos la imagen en una imagen binaria asignándole un umbral
A2=A>=100;

```

```

%procedemos a realizar el segmentado de la imagen, intentamos quedarnos con
%el pez de mayor tamaño y centrado en la imagen, si está cerca de alguno de
%los bordes la imagen no podrá ser tenida en cuenta por el usuario a la
%hora de la carga desde archivo
SE=strel('diamond',1);
IM2=imerode(A2,SE);
figure
imshow(IM2);
IM=imdilate(IM2,SE);

```

```

%se pide al usuario que señale que es blanco y que es negro para que el
%programa tenga una idea clara de que es el fondo de la imagen y sea más
%fácil segmentarlo, una vez segmentado se convierte la imagen
%lógica en valores únicos de ceros y unos ya que después de la búsqueda de
%fronteras aparecen valores distintos de ceros y unos (como por ejemplo
%-1)
msgbox('Marca donde esta la zona blanca y donde esta la zona negra')
pause
[B,L]=bwboundaries(A2,'holes');
P=bwselect(L);
PP=P-IM;

```

```

for i=1:480
    for j=1:640
        if PP(i,j)~=1
            PP(i,j)=0;
        end
    end
end
end

```

```
%se asignan clases que nos permitirán distinguir entre elementos, el fondo
%ha sido asignado como el elemento de mayor tamaño por su nivel de gris,
%y por su conectividad, por ello el elemento que nos interesa es el segundo
%en tamaño, es decir el segundo en cantidad de número de pixeles ocupados en
%la pantalla.
```

```
[M num] = bwlabel(PP,8);
x=zeros(1,num);
for k=0:num
    a=0;
    for i=1:480
        for j=1:640
            if M(i,j)==k
                a=a+1;
                x(k+1)=a;
            end
        end
    end
end
```

```
% en este paso se elimina el fondo, es decir, el elemento que posee mayor
% cantidad de pixeles ocupando la imagen, se realiza el mismo proceso ahora
% para quedarnos con el segundo elemento con mayor cantidad de pixeles.
```

```
[cuanto donde]=max(x);
x(donde)=0;
[quanto donde]=max(x);
```

```
for i=1:480
    for j=1:640
        if M(i,j)==donde-1
            M(i,j)=0;
        else
            M(i,j)=1;
        end
    end
end
end
imshow(M);
title('solo el pez');
pause
close
```

```
%calculamos el esqueleto de la imagen
```

```
MM=not(M);
W3 = bwmorph(MM, 'thin', Inf);
```

```
%calculamos el contorno del pez aislado y se muestra por pantalla
```

```
E=edge(M, 'prewitt');
```

```

imshow(E);
title('contorno');
pause

% se marca una línea del largo y el ancho del pez segmentado en pantalla,
% este paso nos ayudara a decidir si el pez está colocado en posición
% horizontal o vertical y el programa realiza los pasos de acuerdo con el
% mayor de los vectores.

msgbox('Marca primero la línea horizontal de derecha a izquierda y luego la línea
vertical de arriba a abajo')
pause
[cxh, cyh, c, xih, yih]=improfile;
[cxv, cyv, cv, xiv, yiv]=improfile;

%en este paso debemos eliminar las aletas, para ello marcaremos puntos por
%todo el borde de las mismas para que el programa los elimine
msgbox('Marca todos los puntos que componen cada aleta y presiona enter, repite para
la otra')
pause
[xa1, ya1, c1]=impixel(E);
[xa2, ya2, c2]=impixel(E);

xa1=sort(xa1);
xa2=sort(xa2);
ya1=sort(ya1);
ya2=sort(ya2);

xih=round(xih);
yih=round(yih);
xiih=xih(2)-xih(1);
yiih=yih(2)-yih(1);
cxh=round(cxh);
cyh=round(cyh);
xiv=round(xiv);
yiv=round(yiv);
xiiv=xiv(2)-xiv(1);
yiiv=yiv(2)-yiv(1);
cxv=round(cxv);
cyv=round(cyv);

% se calcula la distancia para las líneas marcadas en horizontal y
% vertical, nos servirá de referencia ya que sería una valor bastante
% aproximado si el pez estuviera totalmente recto

dish=sqrt((xiih^2)+(yiih^2));
disv=sqrt((xiiv^2)+(yiiv^2));

%almacenamos el contorno del pez por si deseamos utilizarlos en pasos
%posteriores.
EE=E;

```

```

%con este if y su correspondiente else distinguiremos si el pez esta en
%horizontal o vertical.

if disv>dish
    dist=round(disv);%dist es el valor de la distancia en pixeles si es recto
    recta2=zeros(2,length(cyv));%inicializa el vector donde se almacenará la recta de
ajuste
    cont2=1;%inicializa el contador

%Elimina las aletas
    for i=xa11(1):xa11(end)
        for j=ya11(1):ya11(end)
            EE(j,i)=0;
        end
    end
    for i=xa22(1):xa22(end)
        for j=ya22(1):ya22(end)
            EE(j,i)=0;
        end
    end
[ca1,cb1,cab1,xab1,yab1]=improfile;
[ca2,cb2,cab2,xab2,yab2]=improfile;
ca1=round(ca1);
ca2=round(ca2);
cb1=round(cb1);
cb2=round(cb2);

%rellena la zona de las aletas con unos
    for k=1:length(ca1)
        EE(cb1(k),ca1(k))=1;
    end
    for k=1:length(ca2)
        EE(cb2(k),ca2(k))=1;
    end

    avery=cb1(1)-ya11(1);
    avery2=cb2(1)-ya22(1);

    if avery>length(ca1)
        calbis=ones(avery,1);
        calbis(1:length(ca1))=ca1;
        calbis(length(ca1)+1:end)=ca1(end);
    else
        calbis=ones(avery,1);
        calbis(1:avery)=ca1(1:avery);
    end
    if avery2>length(ca2)
        ca2bis=ones(avery2,1);
        ca2bis(1:length(ca2))=ca2;
        ca2bis(length(ca2)+1:end)=ca2(end);
    else

```

```

    ca2bis=ones(avery2, 1);
    ca2bis(1:avery2)=ca2(1:avery2);
end

for k=ya11(1):cb1(1)
    for n=1:avery
        EE(k, ca1bis(n))=1;

        end
    end
for k=ya22(1):cb2(1)
    for n=1:avery2
        EE(k, ca2bis(n))=1;
        end
    end

%eliminamos puntos espúreos que puedan haberse quedado
EE = bwmorph(EE, 'spur');
SEE=strel('diamond', 200);
IM22=imerode(EE, SEE);
IMM=imdilate(IM22, SEE);
EE = bwmorph(EE, 'spur');
SEE=strel('diamond', 200);
IM22=imerode(EE, SEE);
IMM=imdilate(IM22, SEE);

%calculamos la curva que parte el pez por la mitad
for i=cyv(1):cyv(end)

    puntos2=find(EE(i, :)==1);
    kk2=isempty(puntos2);

    if kk2==1

        recta2(:, cont2)=[recta(1, cont2-1) i];

    else
        pmx2=(puntos2(end)+puntos2(1))/2;
        recta2(:, cont2)=[pmx2 i];
        cont2=cont2+1;
    end
end

% una vez calculada la recta realizamos el ajuste polinómico
xp=recta2(2, :);
yp=recta2(1, :);
ajuste=polyfit(xp, yp, 5);
ais=polyval(ajuste, cyv);
figure
plot(ais)
hold on
plot(yp)

```

```

title('recta y ajuste');
pause
close

%calculamos la longitud de la curva ajustada.
for valy=2:length(ais)
    incry(valy-1)=ais(valy)-ais(valy-1);
end

for valxy=1:length(incry)
    PiP(valxy)=sqrt(1+(incry(valxy)^2));
end
distcurv=sum(PiP);

else

    dist=round(dish);%dist es el valor de la distancia en pixeles si es recto
    recta=zeros(2,length(cxh));%inicializa el vector donde se almacenará la recta de
ajuste
    cont=1;%inicializa el contador
    %Elimina las aletas
    for i=xa11(1):xa11(end)
        for j=ya11(1):ya11(end)
            EE(j,i)=0;
        end
    end
    for i=xa22(1):xa22(end)
        for j=ya22(1):ya22(end)
            EE(j,i)=0;
        end
    end
    [ca1,cb1,cab1,xab1,yab1]=improfile;
    [ca2,cb2,cab2,xab2,yab2]=improfile;
    ca1=round(ca1);
    ca2=round(ca2);
    cb1=round(cb1);
    cb2=round(cb2);
    for k=1:length(ca1)
        EE(cb1(k),ca1(k))=1;
    end

    % Rellena el espacio de las aletas con unos
    for k=1:length(ca2)
        EE(cb2(k),ca2(k))=1;
    end

    averx=ca1(1)-xa11(1);
    averx2=ca2(1)-xa22(1);

    if averx>length(cb1)

```

```

    cb1bis=ones(averx, 1);
    cb1bis(1:length(cb1))=cb1;
    cb1bis(length(cb1)+1:end)=cb1(end);
else
    cb1bis=ones(averx, 1);
    cb1bis(1:averx)=cb1(1:averx);
end
if averx2>length(cb2)
    cb2bis=ones(averx2, 1);
    cb2bis(1:length(cb2))=cb2;
    cb2bis(length(cb2)+1:end)=cb2(end);
else
    cb2bis=ones(averx2, 1);
    cb2bis(1:averx2)=cb2(1:averx2);
end

for k=xa11(1):ca1(1)
    for n=1:averx
        EE(cb1bis(n), k)=1;

        end
    end
for k=xa22(1):ca2(1)
    for n=1:averx2
        EE(cb2bis(n), k)=1;

        end
    end

%eliminamos puntos espúreos que puedan haberse quedado
EE = bwmorph(EE, 'spur');
SEE=strel('diamond', 200);
IM22=imerode(EE, SEE);
IMM=imdilate(IM22, SEE);
EE = bwmorph(EE, 'spur');
SEE=strel('diamond', 200);
IM22=imerode(EE, SEE);
IMM=imdilate(IM22, SEE);

%calculamos la curva que parte el pez por la mitad
for i=cxh(1):cxh(end)

    puntos=find(EE(:, i)==1);
    kk=isempty(puntos);
    if kk==1

        recta(:, cont)=[recta(1, cont-1) i];
    else
        pmx=(puntos(end)+puntos(1))/2;
        recta(:, cont)=[pmx i];
        cont=cont+1;
    end
end
end

```

```

% una vez calculada la recta realizamos el ajuste polinómico
xp=recta(2, :);
yp=recta(1, :);
ajuste=polyfit(xp, yp, 5);
ais=polyval(ajuste, cxh);
figure
plot(ais)
hold on
plot(yp)
title('recta y ajuste');
pause
close

%calculamos la longitud de la curva ajustada.
for valy=2:length(ais)
    incry(valy-1)=ais(valy)-ais(valy-1);
end

for valxy=1:length(incry)
    PiP(valxy)=sqrt(1+(incry(valxy)^2));
end
distcurv=sum(PiP);
end

%Ahora realizamos los cálculos ópticos. Para ello se solicita la distancia
%del pez a la cámara en cm

msgbox(' Introduce la distancia a la que está el pez de las cámaras en cm'
pause
answer = inputdlg(' prompt', 'dlg_title')
R=str2double(answer(1, 1));

%Se calcula s' y el aumento lateral para dicha distancia conociendo la distancia focal
% en nuestras condiciones de trabajo la distancia focal es 0.34158 mm
s_prima=(1/((1/R)+(1/0.34158)));
aum_later=s_prima/(-R);

%Se sabe que el tamaño del pixel es 6.4e-3, por ello se calcula el valor
%del objeto en la pantalla del CCD
tCCD=6.4e-3*distcurv;

%Finalmente calculamos el tamaño del objeto en la realidad
tamano=-tCCD/aum_later;

```

Anexo 6 Calibración de la cámara con el toolbox de MATLAB® CCT.

Para correr el programa de calibración es necesario tomar primero fotografías de un patrón de calibración para que después sean leídas por el programa. El patrón de calibración utilizado en este trabajo fue uno de forma de tablero de ajedrez de 8 x 8 cuadros de 42,8 milímetros cada uno, como puede observarse en la Fig. 26 (los cuadros de la orilla son excluidos a la hora de detectar el patrón en MATLAB®)

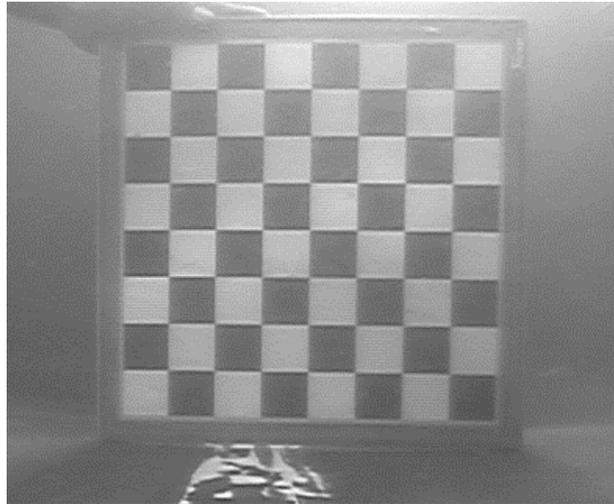


Fig.26. Imagen del patrón de calibración usado.

Después se toman varias fotografías de este patrón, pero moviéndolo libremente en diferentes posiciones, para que la cámara tenga diversas tomas del mismo y pueda así realizar la calibración correctamente. En los siguientes párrafos se mostrará cómo se fue haciendo paso a paso la calibración de la cámara del sistema Vicass.

Se tomaron 36 fotografías con el patrón de calibración de la Fig.26 en diferentes posiciones. El primer paso fue cargarlas en CCT. La Fig. 27 muestra el menú principal del CCT. Para cargar las imágenes se presiona el botón image names y se seleccionan las imágenes que se encuentran previamente guardadas en memoria. Después de ser cargadas por el programa se visualizan automáticamente como imágenes en miniatura como se muestra en la Fig.28



Fig.27. Menú CCT.

Calibration images

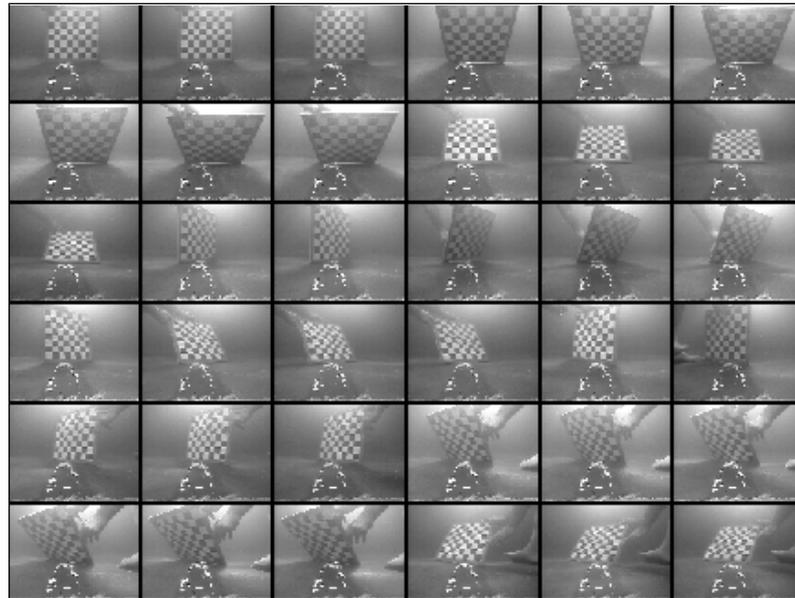


Fig.28. Patrón de calibración en las 36 diferentes posiciones, fotografiado dentro de un tanque de agua.

Luego se extraen las esquinas de los patrones en cada una de las imágenes, presionando el botón *extract grid corners*, en la ventana de CCT. La herramienta permite trabajar con un subconjunto de las imágenes cargadas o con todas las imágenes, seleccionando esto en las opciones presentes para el botón *extract grid corners*. Se hace *click* en las cuatro esquinas del patrón de *calibración* y CCT selecciona automáticamente las demás esquinas, que son las que se ven en la Fig.29. Existe la posibilidad de que el programa no encuentre correctamente dónde están estas esquinas, por lo que en ocasiones es necesario seleccionarlás manualmente; sin embargo, esto no fue necesario porque la lente no tiene distorsiones considerables (para este caso) y entonces funciona bien con el método automático.

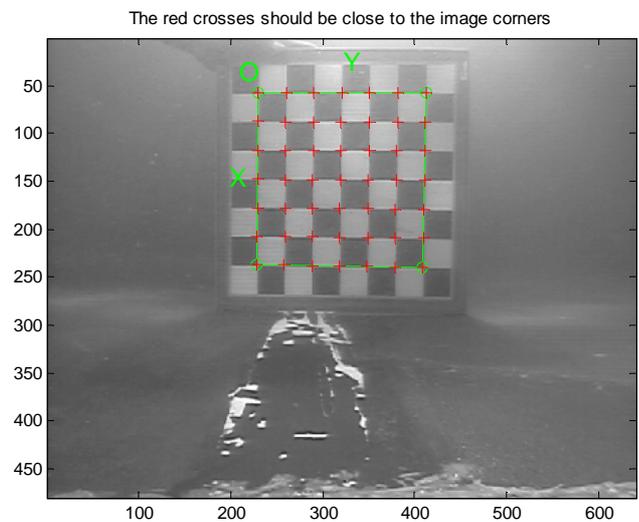


Fig.29. Extracción de las esquinas

De la misma manera que se obtuvieron las esquinas del patrón de calibración para esta toma, se obtienen también para las restantes tomas que se muestran en la Fig. 28, hasta tener las esquinas detectadas en todas las imágenes. Hasta este punto, la herramienta de calibración es capaz de llevar a cabo el algoritmo de calibración dado que ya posee la información necesaria para hacer los cálculos de los parámetros extrínsecos e intrínsecos. Se corre el algoritmo de calibración al presionar el botón *calibration* en el menú principal.

Después de que la calibración de la cámara ha sido llevada a cabo, es posible observar la información de las diferentes posiciones del patrón de calibración de acuerdo al programa, como se muestra en la Fig. 30.

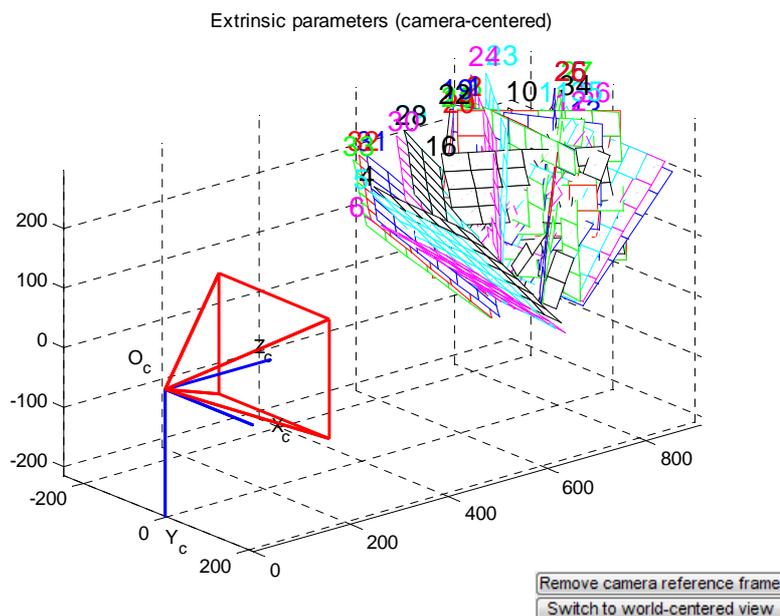


Fig.30. Diferentes posiciones del patrón de calibración (en píxeles)

La parte de interés para este proyecto es la información que se encuentra en la pirámide roja, es decir, los parámetros intrínsecos. Se puede verificar que para las diferentes tomas, los parámetros intrínsecos (pirámide roja) son siempre los mismos, sin embargo, los parámetros extrínsecos son diferentes siempre; es decir, para cada toma (o cada cuadrícula de 8 x 8 en esta imagen) los parámetros son únicos. Esto puede verse también como si el parámetro de calibración estuviera siempre fijo. Si este fuera el caso, en teoría sería la cámara la que se mueve y es precisamente esto lo que indican los parámetros extrínsecos. Obsérvese la Fig. 31 para este caso.

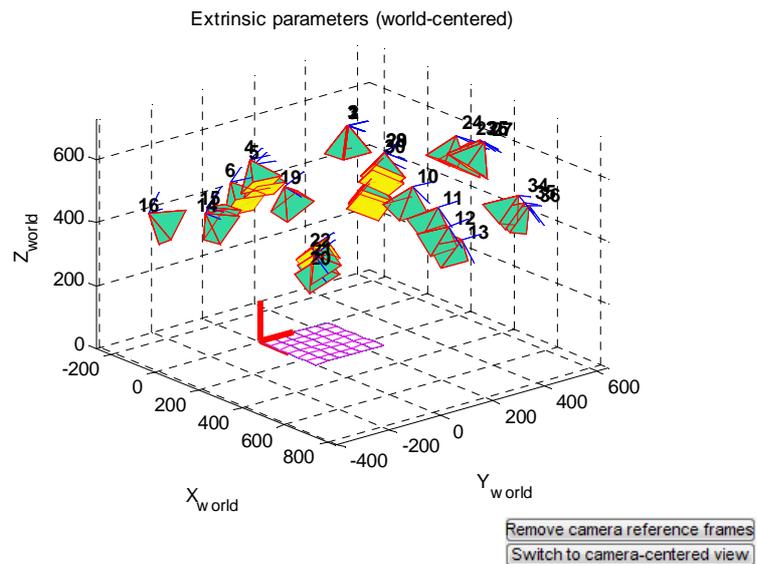


Fig.31. Patrón de calibración fijo (en píxeles)

Esta vista nos muestra cómo estaría posicionada la cámara si en vez de mover el patrón de calibración, se moviera la cámara en diferentes posiciones; que es otra forma de entender los parámetros extrínsecos que indican la posición de la cámara con respecto a lo que se está fotografiando. En esta figura es posible ver que la pirámide roja (que es la cámara) tiene la misma anatomía en todas partes, y que sólo está en diferente posición.

Después de correr el CCT por completo, el resultado que se obtiene para la distancia focal es estimado en 509.006415 píxeles. Teniendo así una distancia focal en milímetros de 3.4158.

Anexo 7. Proceeding ECUA-2010 Experimental setup for monitoring the growth of tuna in cages by the combined use of acoustic and optical techniques.

Experimental setup for monitoring the growth of tuna in cages by the combined use of acoustic and optical techniques.

Vicente Puig¹, Víctor Espinosa¹, Ester Soliveres¹, Fernando de la Gandara², Aurelio Ortega², Antonio Belmonte³

¹ I.G.I.C. (Instituto de Investigación para la Gestión Integrada de Zonas Costeras) - Polytechnic University of Valencia, C/ Paraninfo, 1 46730 Grao de Gandía (Valencia - Spain) vpuipon@epsg.upv.es essogon@epsg.upv.es vespinos@fis.upv.es.

² IEO (Instituto Español de Oceanografía) Centro Oceanográfico de Murcia Planta de Cultivos Marinos Ctra. de la Azohía s/n 30860 - Puerto de Mazarrón (Murcia Spain) fernando.delagandara@mu.ieo.es aurelio.ortega@mu.ieo.es

³ CALADEROS DEL MEDITERRANEO, S.L. c/ Andrés Cegarra Cayuela 30360 La Unión (Murcia-España). antonio.belmonte@taxon.es

In the frame of the European project SELFDOTT (From capture based to self-sustained aquaculture and domestication of bluefin tuna, *Thunnus thynnus*) an experimental setup to estimate the biomass of caged bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) farms in the Spanish Mediterranean coast is presented. The aim is to monitor individuals during all stages of growth. To do this, we propose a combined system of acoustic and optical techniques (both non-intrusive), in order to obtain values of target strength of the specimens and information on the orientation of tuna in the acoustic beam and the fish size. To achieve a complete information, an experiment has been designed that allows us to get the acoustic measurements ventral and dorsal individuals accommodated in the cage (using in a first attempt a multiplexed echosounder with two 200KHz split-beam transducers), while stereoscopic systems provides visual information and allows estimate the size and weight of the specimens captured by the system. Preliminary results indicate that combined use of both techniques provides more precise values of the parameters needed to determine the TS as a function of fish orientation and for proper monitoring of tuna in floating cages.

1 Introduction

In order to alleviate the pressure on the wild fishery of the bluefin tuna and aid in its conservation, the domestication of this fish and the development of a sustainable aquaculture industry are necessary. The SELFDOTT project (From capture based to self sustained aquaculture and domestication of Bluefin tuna, *Thunnus thynnus*) is implementing the knowledge on the reproduction of bluefin tuna in captivity. It aims to establish the knowledge-base required for controlled development of eggs, larvae and suitable and environmentally performing feeds. It was launched in January 2008 and is funded under the 7th FP Cooperation Work Programme: Food, Agriculture and Fisheries, and Biotechnology. While the life cycle is to be closed [1] [2] [3], efforts should be joined to design growth control mechanisms that make the process efficient and ecologically and economical sustainable for breeders.

With this aim, this paper proposes an experimental setup that combines acoustic measurements (dorsal and ventral) with optical techniques, to obtain biometric information on a non-intrusive concept, allowing monitoring of weight gain of specimens and optimizing of resources management.

Different aspects must be evaluated, like the capability of synchronizing scientific echosounders and commercial biometric video-based systems, the correspondence of images and acoustical traces in echograms, the consistency

of TS measurements in a near range configuration (given the big size of animals related to the acoustic beam volume), the feasibility of relating TS (dorsal or ventral) versus tuna size, etc.

This experiment was conceived as a first approach to the problem and rises the expectations open so far in [4] to obtain parameters showing the biometric behavior and state of the specimens in the aquaculture cages.

2 Material and methods

2.1 Experimental setup

The measurements were conducted in cages (depth of 20 m and 25 m in diameter) installed in the Mediterranean Spanish coast in El Gorguel (Cartagena), and tuna in them are at different stages of growth. The tests were carried out in the cage R5 that houses reproductive tuna. These scientific breeding cages are coordinated by the IEO (Spanish Institute of Oceanography).

As stated above we disposed an acoustical and an optical system. The optical system (AkvaSmart Vicass) provides visual information of the specimens during measurement (behavior and orientation) as well as the length of the same (it is a stereoscopic recording system designed for use in fish farming composed of two identical cameras mounted on a metal frame and whose optical centers are aligned and

separated 15"; a field computer allows the manipulation of the cameras and image acquisition manually or automatically). The acoustic system consists of two split-beam transducers of 200 kHz, and a multiplexer to operate them simultaneously with a Simrad EK60 scientific echosounder, governed by the same field computer than the optical system, therefore providing the necessary synchronization through the internal computer clock.

The experimental scheme is shown in Figure 1. One of the transducers is placed 20 m from the surface (at the bottom of the cage) oriented to the surface (to take ventral recordings) and the other aligned with the first, is placed on the surface oriented to the bottom so that provide us dorsal information from specimens that pass through the beam. Finally the Vicass is placed 13 m from the surface, and aligned with the acoustical beams, with the objectives of both cameras oriented toward the surface.

The equipment is not placed in the center of the cage but slightly displaced to one edge (7 meters from the perimeter of the cage) so that the probability that a fish pass through the beam is larger because the specimens in captivity swim describing circular motion near the perimeter of the cage.

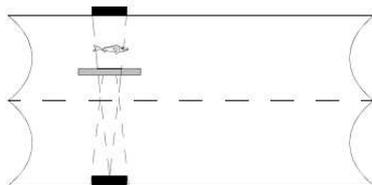


Fig. 1 Measurement system, echo-sounders in black Vicass in gray

All equipment is operated from a boat moored near the cage. For the echosounder we choose an interval of 0.2 s between pings, and we captured images with the Vicass system every 2 seconds.

2.2 Procedure

The pictures and echograms obtained during the measurement process are stored for later analysis.

On one hand the analysis begins with the selection of images. The temporal information of the selected ones is recorded for later comparison with the echograms traces. On the other hand, the processing of acoustic data is performed using software Sonar5_Pro [5] and sophisticated tools that the program provides for the treatment of individual echoes (SED). A high threshold (of -35 dB) is applied to the sonograms, thereby disposing of echograms cleaner for manual detection of traces, and the identification of events in the echogram related to the image of fish crossing the acoustic beam, marking these detections as possible acoustical tuna traces.

Once the manual selection of traces has been accomplished, the program can do automatic detection using the parameters stored during the manual process. Due to the parameters chosen to perform the test (frequency of the transducers, the interval between pings, beam width, distance to the transducers ...) and the size and speed of the specimens, in this particular case, we had to fix that each trace should contain at least three echoes (pings).

2.3 Optical information processing

Stereoscopic vision allows to determine biometric parameters of fish without handling them [6]. Akvasmart Vicass is one of the few available commercial systems that, through image analysis, is optimized to obtain size information of farmed fish.

In recent years it has extended the use of such systems in floating cages in the sea, in particular those where bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) is fattened. Several studies suggest that the use of these systems is useful for estimating the length and weight of specimens and thus to improve the efficiency in the breeding of this species in captivity [7] [8].

The image processing software developed by Akvasmart needs a lateral image to estimate biometric parameters like the fork length, the maximum height and weight. For the specific case of bluefin tuna, this system shows absolute errors of around 4% compared with manual measurements of the length [7].

The proposed experimental system is based in the alternate ventral measurement of images. For this reason, before conducting the test, it was necessary to validate (compare) the ventral image measurements with the usual configuration of a stereoscopic system (lateral), estimating the deviation that occurs when the fork length is calculated from ventral images instead of dorsal images. From images obtained by the two measurement procedures (lateral and ventral), the fork length and mean absolute error is calculated (Table 1).

Configuration	Mean fork length (cm)	ε (%)
Lateral	164 ± 7	4,3
Ventral	165 ± 13	7,9

Table 1

These size values will be correlated to the mean TS of bluefin tuna. The aim of this work is to obtain a methodological approach to obtain this relationship.

3 Results

After finding the echogram-image relationship, as shown in Fig. 2, mean TS is calculated for each of the traces found.

Figure 3 shows the TS distribution of all the detected acoustical traces, for ventral and dorsal aspects. We can see that the dorsal TS measurements offer a bi- or trimodal distribution, which can be explained by the detection of the main lobe and two lateral lobes of the swimbladder, crossing the acoustic beam, what has been described for

other species [8]. For bluefin tuna at this stage, because of its length, the distribution tends to be more unimodal than smaller ones. Ventral data tend also to be unimodal, because the morphometry of the swimbladder, more rounded than the dorsal side, reducing directivity. In any case these distributions and the TS absolute values must be carefully considered since we offer preliminary results of the validation of a experimental setup. However, the distributions reflect the paradigmatic characteristics shown by other species at lower frequencies. This leads us to believe that the implemented monitoring method can be effective for this case study.

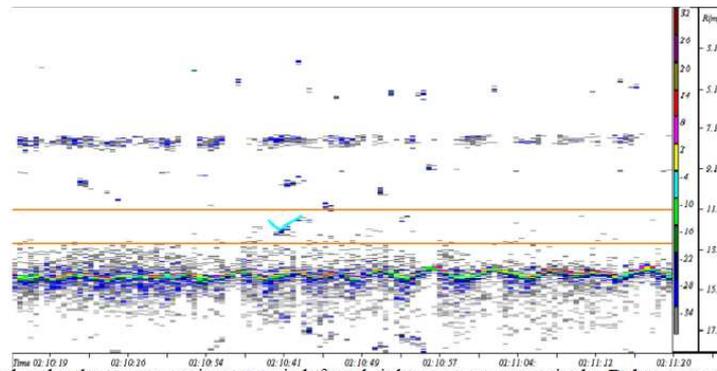
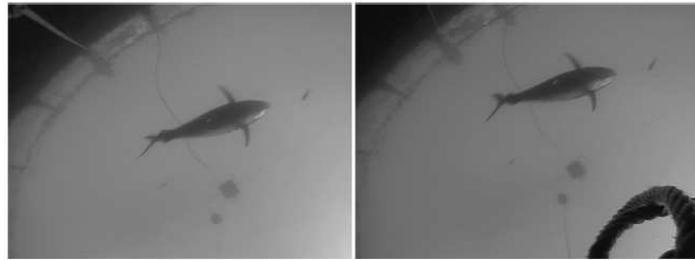


Fig. 2: Images taken by the stereoscopic system is left and right cameras respectively. Below sonogram obtained with Sonar5_Pro, which shows the trace that corresponds to the image

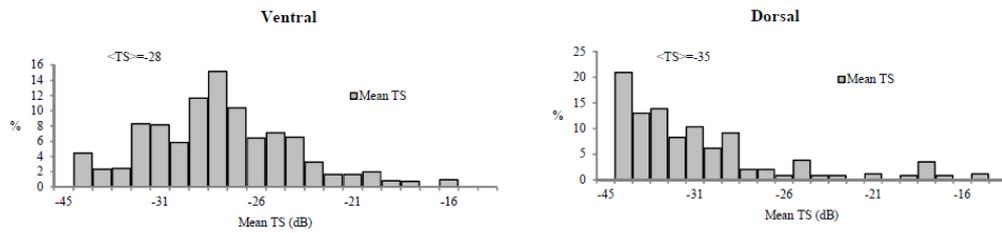


Fig. 3: Target strength distribution for dorsal and ventral recordings.

Another critical point to be taken into account is the relationship between the tuna and beam area size, and the fact most cage measurements are affected by a near range error related to different non realistic assumptions: the fish are not far enough to consider the dispersed acoustic field as a far-field, and/or they can not be taken as punctually

located inside the beam, with the corresponding error in the phase determination performed by the split-beam echosounder previous to the beam compensation gain. For these reasons we have studied the dependence of the TS values with transducer distance (Figure 4).

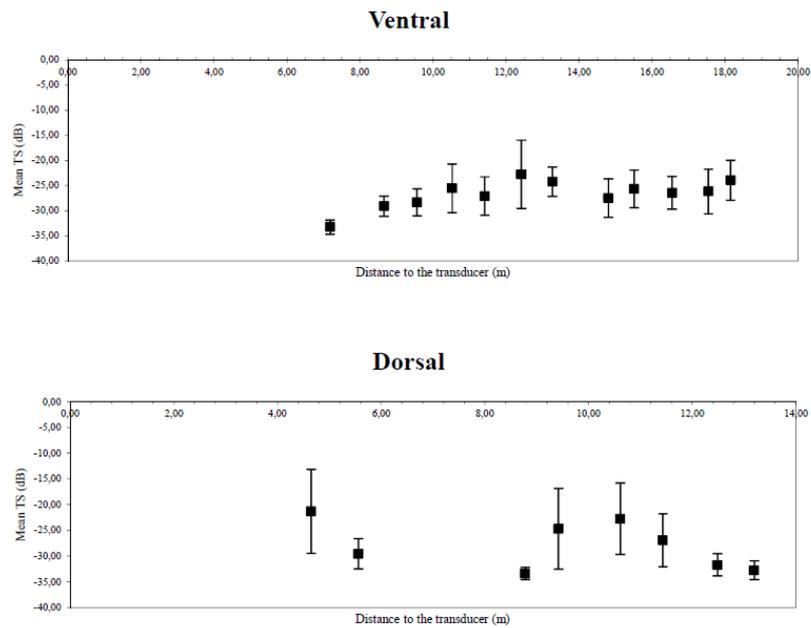


Fig. 4 Mean TS measurement in relation to distance to the transducer from Ventral and Dorsal recordings.

For the limited number of traces of this preliminary study, we can appreciate that mean ventral TS evolves with distance to an apparent stable value. In the case of dorsal measurements, the literature indicates that in the wild, varies with depth [9], but the scale of our experiment is far away from those of the reported data. Our dorsal data exhibit a more complex dependence with transducer distance than the ventral ones what can be related to the near field effects described above. This considerations are

crucial, to evaluate any TS versus size relationship based on optical biometric information, and in Fig. 5, we plot a first ventral TS to length relationship for bluefin tuna. The mean TS of each traces is calculated and depicted for every measured length in the corresponding image. This must be considered just a methodological description but promising results are expected.

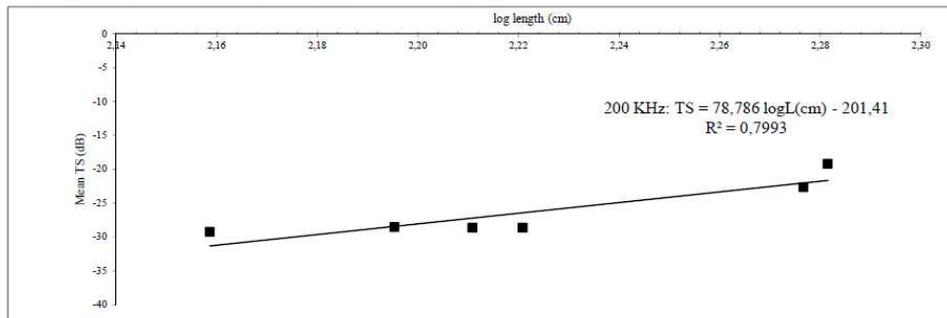


Fig.5 TS to fork length relationship

4 Conclusion

The combined use of acoustic and optical techniques permits to assign the correspondences between TS values and specific animal size. It can improve the monitoring conditions of captive bluefin tuna, with additional information to the established stereoscopic video systems.

The experiment showed that the ventral TS measurements provide information of the growing stage of specimens. However, dorsal measurements show, like in other experiments [8], poor results.

This paper shows preliminary results of work in progress, with new data collection campaigns. For this reason, the quantitative values provided will be reviewed and adjusted to achieve the highest correlations between TS and length.

Current works are also addressed to improve the methodology on different lines: implementing more automated and efficient image processing algorithms for the measurement of fork length and width of tuna from ventral images, and setting relationships between that value and weight of the fish. Also we develop the echogram processing algorithm for the automated assignment of traces and images.

5 Acknowledgements.

The authors are grateful to Juan Ramón Prieto and Javier Viguri for their technical assistance. This work has been supported by the 7th Frame Program European Project SELFDOTT. From capture based to self-sustained

aquaculture and domestication of bluefin tuna, *Thunnus thynnus* (GA 212797). It does not necessarily reflect its views and in no way anticipates the Commission's future policy in this area.

References

- [1] Ortega, A., Viguri, J., Belmonte, A. y De la Gándara, F., 2009. Resultados preliminares de los 30 primeros días de cultivo larvario de atún rojo (*Thunnus thynnus*), en el IEO. In: *Libro de resúmenes del XII Congreso Nacional de Acuicultura*. Madrid Noviembre de 2009, 584-585 pp.
- [2] De la Gándara, F., Mylonas, C.C., Coves, D. Bridges, C.R., Belmonte Rios, A., Vassallo-Agius, R., Rosenfeld, H., Medina, A., Demetrio, G. Falcon, J. Sveinsvoll, K., Ghysen, A. and Deguara, S. 2009. The challenge of domestication of bluefin tuna *Thunnus thynnus*- Highlights of the SELFDOTT project from 2008-2009. Proceedings of the 2nd Global COE Program Symposium of Kinki University, 2009. "Sustainable Aquaculture of the Bluefin and Yellowfin Tuna - Closing the Life Cycle for Commercial Production". Adelaide (Australia) December 1-2: 70-72 pp. Kenneth G. Foote, "Summary of methods for determining fish target strength at ultrasonic frequencies", *ICES J. mar. Sci.*, 48:211-217 (1991).
- [3] Bridges, C.R., Borutta, F., Krohn, O. and Schulz, S. 2009. Broodstock monitoring, handling and induction techniques. Recent advances in Atlantic bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) reproduction. Proceedings of the 2nd Global COE Program Symposium of Kinki Uni-

- versity, 2009. "Sustainable Aquaculture of the Bluefin and Yellowfin Tuna - Closing the Life Cycle for Commercial Production". *Adelaide (Australia) December 1-2: 20-24 pp.*
- [4] F. de la Gándara, J. Miquel, M. Iglesias, A. Belmonte, E. Ayora, A. García-Gómez, (2008) Using Echo-sounder system to study the vertical movements of captive bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) in floating cages, *European Aquaculture Society Special Publication 35:171-172 H.*
- [5] H. Balk, T. Lindem, (2008). Sonar4 and Sonar5_Pro Post processing systems, Operator manual v. 5.9.8, *University of Oslo, Norway.*
- [6] Ruff, B.P.; Marchant, J.A.; Frost, A.R. (1995). Fish sizing and monitoring using a stereo image analysis system applied to fish farming. *Aquacultural Engineering 14: 155-173.*
- [7] Aguado, F.; García, B.; (2009). Estimación de la biomasa de especies en cultivo por métodos no invasivos: adecuación y puesta a punto de las técnicas para diversas especies en el Atlántico y en el Mediterráneo. *IM-IDA.*
- [8] Knudsen F.R. ,Fosseidengen J.E. , Oppedal F. , Karlsen O, Ona E.(2004). Hydroacoustic monitoring of fish in sea cages: target strength (TS) measurements on Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Fisheries Research 69:205-209.*
- [9] Bertrand, A; Josse, E.; and Massé J.; (1999) In situ acoustic target strength measurement of bigeye (*Thunnus obesus*) and yellow tuna (*Thunnus albacores*) by coupling split-beam echosounder observations and sonic tracking. *ICES Journal of Marine Science, 56: 51-60.*