



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

# Proyecto BIACOP ES 13/41

Desarrollo de un sistema de medida de la biomasa en transferencias entre jaulas de atún rojo mediante técnicas acústicas y ópticas

---

## INFORME FINAL

01/03/2017

(1) F. DE LA GÁNDARA (COORDINADOR), E. SANTAELLA, J.L. CORT, A. ORTEGA

(2) V. ESPINOSA, V.D. ESTRUCH, E. SOLIVERES, I. PÉREZ-ARJONA, V. PUIG, P. ORDÓÑEZ

(3) G. ANDREU-GARCÍA, V. ATIENZA, J.M. VALIENTE-GONZÁLEZ, P. MUÑOZ-BENAVENT

(4) B. MÈLICH, J.J. NAVARRO, A. LÓPEZ

<sup>1</sup> INSTITUTO ESPAÑOL DE OCEANOGRAFÍA (IEO)

<sup>2</sup> UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA  
INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN PARA LA GESTIÓN INTEGRADA DE ZONAS COSTERAS  
(IGIC)

<sup>3</sup> UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA  
INSTITUTO DE AUTOMÁTICA E INFORMÁTICA INDUSTRIAL (AI2)

<sup>4</sup> GRUP BALFEGÓ (Empresa colaboradora)



Este documento contiene los desarrollos y resultados llevados a cabo en el entorno del proyecto BIACOP

## Contenido

1. Objetivos del proyecto .....	4
2. Introducción .....	4
3. Desarrollo de relaciones biométricas del atún rojo obtenidas a partir de muestreos de sacrificios en una granja de engrase de atunes .....	5
3.1. Resultados y discusión .....	7
3.2. Conclusiones .....	14
4. Sistemas combinados de medidas acústicas y ópticas. ....	16
4.1. Equipamiento óptico para adquisición .....	16
4.1.1. Sistema de visión estereoscópico AQ1.....	16
4.1.2. Sistema de visión estereoscópico AI2 .....	16
4.1.3. Calibración de los sistema de visión estereoscópicos.....	17
4.2. Equipamiento acústico para adquisición .....	18
4.2.1. Equipamiento acústico en jaulas.....	18
4.2.2. Equipamiento acústico en transferencias .....	22
4.3. Estructura para transferencias: diseño del sistema de soporte .....	23
5. Herramientas software desarrolladas .....	29
5.1. Herramientas de análisis de los datos acústicos .....	29
5.1.1. Análisis de los datos acústicos en las jaulas .....	29
5.1.2. Análisis de los datos acústicos durante las transferencias. ....	31
5.2. Herramienta automática de análisis de los datos ópticos.....	35
5.2.1. Posicionamiento de las cámaras .....	36
5.2.2. Procesamiento de frames: segmentación y filtrado .....	36
5.2.3. Modelo deformable 2D del cuerpo del atún.....	37
5.2.4. Correspondencia estéreo .....	40
5.2.5. Mediciones con el sistema de visión estereoscópico .....	41
5.3. Herramienta semiautomática de análisis de los datos ópticos .....	42
5.4. Análisis conjunto óptico-acústico en jaulas.....	43
6. Mediciones automáticas en jaulas.....	45
6.1. Configuración para adquisición en jaulas .....	45
6.2. Campañas de medida realizadas .....	46
6.3. Resultados de medida sólo óptica en jaulas.....	47
6.3.1. Grabaciones con sistema de visión estereoscópico AQ1 .....	47
6.3.2. Grabaciones con sistema de visión estereoscópico AI2.....	73

6.3.3. Comparativa grabaciones AQ1 – grabaciones AI2 .....	74
6.3.4. Conclusiones.....	79
6.4. Resultados de medidas sólo acústicas en jaulas .....	81
6.4.1. Estimación del TS desde el punto de vista ventral.....	81
6.4.2. Dependencia del TS desde el punto de vista ventral con la distancia al transductor.....	93
6.4.3. Conclusiones.....	97
6.5. Resultados conjuntos de las medidas acústicas y ópticas .....	99
6.5.1. Relación del TS desde el punto de vista ventral con la longitud del atún rojo. ....	9999
6.5.2. Relación del TS desde el punto de vista ventral con la anchura del atún rojo. ....	101
6.5.3. Relación del TS desde el punto de vista ventral con el peso del atún rojo.....	104
6.5.4. Conclusiones.....	108
7. Mediciones automáticas en transferencias .....	109
7.1. Configuración para adquisición en transferencias .....	109
7.1.1. Sistemas acústicos.....	109
7.1.2. Sistemas ópticos.....	109
7.2. Resultados de medidas sólo ópticas en transferencias.....	109
7.2.1. Comparativa con sacrificios.....	109
7.2.2. Comparativa de longitud $L$ en el momento de enjaulamiento.....	113
7.2.3. Conclusiones.....	114
7.3. Resultados de medidas sólo acústicas en transferencias.....	116
7.3.1. Resultados de las medidas acústicas: conteo automático.....	116
7.3.2. Conclusiones.....	120
8. Conclusiones .....	121
8.1. Tareas realizadas .....	121
8.2. Conclusiones .....	121
8.2.1. Conclusiones detalladas sobre los desarrollos del Objetivo 1 .....	122
8.2.2. Conclusiones detalladas sobre los desarrollos del Objetivo 2 .....	124
9. Continuidad del proyecto .....	126
10. Bibliografía .....	127
11. Resumen.....	128

## **1. Objetivos del proyecto**

Los objetivos propuestos en el presente trabajo de investigación fueron:

- Objetivo 1: Desarrollar un sistema automatizado de obtención de la distribución de tallas de los atunes en una jaula flotante
- Objetivo 2: Desarrollar una herramienta de estimación de número y biomasa total de atún rojo capturada en el cerco durante el proceso de transferencia entre jaulas de transporte y de engorde. Para ello se propuso el uso combinado de ecosondas y sistemas de vídeo desde una perspectiva ventral.

## **2. Introducción**

En el presente documento se describen las tareas desarrolladas en relación con los objetivos planteados y los resultados obtenidos.

En la sección 3 se muestran las relaciones biométricas para el atún rojo obtenidas a partir de muestreos manuales de atunes engrasados.

En la sección 4 se muestran los equipos que se han desarrollado y utilizado para el cumplimiento de los objetivos. Se detallan las características del sistema combinado acústico-óptico desarrollado para obtener una estimación de la talla y el número de los atunes durante el proceso de transferencia. Del mismo modo, se explica el equipamiento utilizado para el desarrollo de un sistema automático para la obtención automática de la distribución de tallas y el peso medio en una jaula flotante. Se exponen además las diferentes configuraciones de medida propuestas para el proceso de transferencia. Dichas configuraciones han involucrado el desarrollo de una estructura flotante que es colocada entre la jaula emisora (o de transporte) y la jaula receptora (o jaula de engorde) para asegurar la estabilidad de los equipos durante el registro de los datos.

Las herramientas software implementadas para el análisis de los datos acústicos y ópticos obtenidos en los diferentes experimentos se muestran en la sección 5. Dichas herramientas, desarrolladas íntegramente para este proyecto, permiten la automatización de procesos que hasta el momento necesitan de un operador para ser llevadas a cabo.

En la sección 6 se muestran los resultados obtenidos en jaulas flotantes. Se muestran las distribuciones de tallas obtenidas automáticamente mediante el uso de un sistema de visión trabajando desde el punto de vista ventral. Paralelamente se evalúa la posibilidad de obtener el peso medio de los atunes alojados en una jaula flotante a partir de medidas acústicas. Para la obtención de dichos resultados ha sido necesaria la realización de una campaña de medida de 5 meses de duración que se detalla en el segundo apartado de la sección 6.

Finalmente, en la sección 7 se detallan los resultados obtenidos durante los procesos de transferencia. Al igual que en el caso anterior, se detalla en el apartado 7.2 las campañas de medida realizadas para cumplir con el segundo de los objetivos propuestos. Se presentan los resultados del conteo automático de ejemplares obtenido mediante métodos acústicos, y paralelamente se

obtienen distribuciones de talla mediante métodos ópticos adaptando los equipos ópticos y el proceso automático descrito en la sección 5 y que también se utiliza en las jaulas flotantes. La combinación del número de peces y la distribución de tallas permitirán obtener valores de la biomasa transferida.

### **3. Desarrollo de relaciones biométricas del atún rojo obtenidas a partir de muestreos de sacrificios en una granja de engrase de atunes.**

En este punto se estudian las relaciones entre el peso y diferentes medidas biométricas: la longitud, la altura y la anchura máxima de los atunes mediante ajustes estadísticamente significativos y con claro poder predictivo. Con los resultados obtenidos se pretende completar los estudios ya existentes, centrados en relacionar el peso de los atunes con su longitud, que no consideran en ningún caso otra dimensión de los peces, y explorar **la mejora en la estimación del peso de los atunes aportando más dimensiones**, como por ejemplo la anchura, **desde una perspectiva ventral**.

Para ello se parte de datos procedentes de biometrías realizadas en la granja de engrase de atunes que el *Grup Balfegó* tiene frente a la costa de l'Ametlla de Mar en Tarragona. Dichas biometrías fueron realizadas los años 2012 y 2013 y aportaban información de un total de 2911 individuos. La información incluía datos de longitud, peso bruto, altura y sexo de los atunes tomados después del sacrificio tras el periodo de engrase. Además, para 1261 de esas muestras se conocía la anchura máxima.

Con el objetivo de obtener una muestra representativa y realista sobre la que trabajar, evitando efectos indeseables sobre los resultados finales debidos a la existencia de outliers evidentes, antes de realizar el análisis estadístico de los datos se optó por filtrar las muestras atendiendo al tamaño máximo de los atunes. Los últimos trabajos publicados fijan la talla máxima del atún rojo, *Thunnus thynnus*, alrededor de los 331.2 cm ( $L_{max}=319.93\pm 11.3$  cm) (Cort et al., 2013). Por ello, se realizó un filtrado de los datos en el que se eliminaron los individuos cuya longitud excedía de dicho valor (330 cm).

Con los datos filtrados, se realizó el ajuste mínimo cuadrático para diversos modelos matemáticos, cuyas expresiones consideran como variables predictoras diferentes dimensiones de los peces. El objetivo era verificar la validez de expresiones matemáticas que permitieran relacionar dichas dimensiones con el peso de los atunes para, de esta forma, obtener modelos para la predicción del peso del atún engrasado, atendiendo a sus dimensiones.

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

De cara a valorar si cada uno de los modelos considerados es estadísticamente significativo, se calculó el estadístico F, que permite contrastar la hipótesis de que el coeficiente de determinación es no nulo, y por lo tanto el modelo explica de forma estadísticamente significativa ( $p\text{-valor}<0.05$ ) la relación entre variables. El coeficiente de terminación ajustado a grados de libertad ( $R^2$  (d.f.)) ofrece

una idea de la cantidad de variabilidad correspondiente a la variable dependiente explicada por el modelo.

En la Tabla 1 se muestran los modelos considerados (M1-M13) para describir el peso (W) en función de las variables independientes longitud (L), altura (H) y anchura máxima (A), la linealización de cada uno de ellos y los parámetros de ajuste a calcular. Los modelos M1 y M2 establecen relaciones entre el peso y la longitud (L) y la altura (H) de los peces. Los modelos M3, M4, M5 y M6 relacionan el peso con la longitud y la anchura máxima (A). Los modelos M7, M8, M9, M10 y M11 relacionan el peso con las tres dimensiones de los peces: longitud (L), altura (H) y anchura máxima (A). Finalmente, los modelos M12 y M13 sólo relacionan el peso con la longitud del pez y su anchura máxima respectivamente, tal y como suele realizarse habitualmente. Los modelos M6, M7 y M13 son directamente modelos lineales en función de transformaciones de las variables predictoras.

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

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

Tabla 1. Identificador de los modelos, ecuación de los modelos propuestos, y ecuación del modelo linealizado y parámetros a calcular.

En la Tabla 2 se muestran dos modelos considerados para establecer relaciones entre dimensiones de los atunes, concretamente se considera la altura en función de longitud y anchura máxima (M14) y anchura máxima en función de longitud (M15). Dichos modelos se calculan para satisfacer los objetivos del proyecto BIACOP, en el que se implementan nuevos procedimientos experimentales durante las transferencias. En dichos procedimientos se realizan grabaciones desde el punto de vista ventral de los atunes, tanto acústica como ópticamente. Esta metodología permitirá obtener medidas de la longitud y de la anchura máxima de los peces que son transferidos desde las jaulas de transporte a las de engrase.

Para explorar la posibilidad de obtener de manera indirecta la altura de los peces a partir de la longitud y la anchura máxima, se ensayó un ajuste con los datos proporcionados por la empresa *Grup Balfegó* (M14). El modelo M15 será de utilidad en la validación de los datos biométricos obtenidos mediante el nuevo procedimiento experimental probado en las transferencias.

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

Tabla 2. Modelos propuestos para el cálculo de la altura a partir de la longitud y la anchura, y la relación entre la longitud y la anchura máxima. Se presenta su ecuación linealizada para realizar el ajuste lineal por el método de mínimos cuadrados.

Para la validación, se considerarán los datos correspondientes a los 500 individuos reservados inicialmente. Se estima el peso con las diferentes expresiones consideradas y se evalúa la validez del modelo en base al análisis de la diferencia entre el valor real de peso y el valor de peso estimado por cada una de las expresiones evaluadas. Para ello, se analizará la bondad del ajuste en base al coeficiente de determinación no lineal ( $R^2$  (d.f.)). Además, se calcula la media de los errores absolutos (Eam) y el error estándar de los errores absolutos (eEa). Del mismo modo se calculó la media de los errores relativos (Erm) y el error estándar de los errores relativos (eEr). Finalmente, para evaluar si las predicciones de las expresiones obtenidas y las utilizadas para peces salvajes subestiman o sobreestiman el peso se calculó el valor medio de los residuos (resm).

A la hora de validar los modelos, se ha considerado también, como referencia, la expresión de Deguara et al. (2016) que se usa para estimar el peso a partir de la longitud en peces salvajes justo antes o durante la puesta. Este modelo es una concreción de la ecuación 1, con  $a=0.0000287$  y  $b=2.9076$ .

$$W = a \cdot L^b \quad (1)$$

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

### 3.1. Resultados y discusión

La Tabla 3 muestra los valores obtenidos, tras el ajuste realizado con ayuda del software StatGraphics CENTURION XVI (StatPoint Technologies, Inc; 2013), para los parámetros de los distintos modelos. Dicha tabla también informa sobre el valor del coeficiente de determinación ajustado a grados de libertad ( $R^2$ (d.f.)), los grados de libertad y el valor del estadístico F (que se utiliza para calcular el  $p$ -valor asociado al contraste de que el modelo es estadísticamente significativo  $R^2$ (d.f.) $\neq 0$ ) para cada modelo.

Estos indicadores, calculados sobre los modelos linealizados, son adecuados para evaluar la validez de cada modelo por separado, pero, no permiten decidir el modelo más adecuado dado que la linealización proporciona expresiones no comparables (Tabla 1). Los resultados indican que, en todos los casos los modelos son estadísticamente significativos a un nivel de confianza del 95%.

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

Tabla 3. Coeficientes y valores de  $R^2$  (ajustados a grados de libertad de cada uno de los ajustes). Todos con un p-valor por debajo de 0.05

La validación de los modelos, que se ha efectuado con los datos de 500 individuos, se realiza a partir del cálculo de diversos indicadores: el coeficiente de determinación no lineal ajustado a grados de libertad, el error absoluto medio, el error relativo medio, y sus correspondientes errores estándar, y por último el valor medio de los residuos. Este último indicador permite establecer si los valores estimados se adaptan a los valores observados o, por el contrario, subestiman o sobreestiman dichos valores (Tabla 4). La Tabla 4 se completa con los resultados que se obtienen para un modelo de referencia (Deguara et al., 2016) para las relaciones entre la longitud y el peso de los atunes publicada recientemente.



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

Tabla 4. Valores de los parámetros que definen la bondad de los ajustes, que relacionan el peso las dimensiones de los atunes; calculados a partir de los datos reservados para la validación.

Los resultados mostrados en Tabla 4 indican que disponer de la altura o la anchura de los atunes engordados mejora el poder predictivo del modelo dado que aumentan los valores del coeficiente de determinación al tiempo que se reduce tanto el error absoluto medio como el error relativo medio. Lo mismo ocurre considerando las tres dimensiones (longitud, altura y anchura). En el caso de considerar la anchura máxima y la longitud los valores del coeficiente de determinación son ligeramente menores, pero se aprecia un descenso en los valores de error absoluto medio y del error relativo medio, respecto a los obtenidos cuando se utiliza solo una dimensión en el modelo. El modelo 13 (*M13*) nos muestra un ajuste entre el peso de los atunes y su anchura máxima. Revisando los valores obtenidos del ajuste, se aprecian bajos errores absolutos y relativos comparables a los obtenidos al considerar como única dimensión en el ajuste la longitud.

En la Figura 1 se representan los valores observados frente a los predichos para todos los ajustes que consideran una única dimensión para estimar el peso: el modelo presentado por Deguara *et al.* (2016), y los modelos *M12* y *M13*.

En la Figura 2 se muestran los valores de peso observados frente a los valores calculados con el ajuste realizado para todos los modelos que relacionan el peso y al menos dos dimensiones de los atunes (*L*, *H* y *A*).

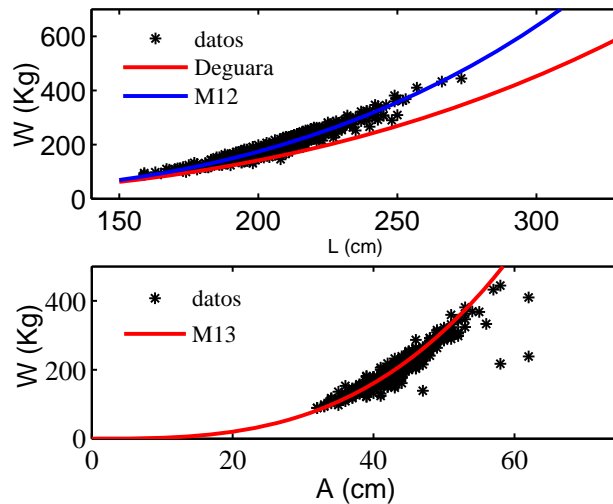


Figura 1. Gráfico del modelo ajustado M12, y el modelo de referencia de Deguara et al. (2016). Gráfico del modelo Ajustado M13 abajo.

El análisis comparativo entre modelos que relacionan el peso con dimensiones del pez se completa con los resultados del análisis ANOVA realizado sobre el error absoluto medio, el error relativo medio y la media de los residuos, correspondiente a los distintos modelos analizados (Tabla 5). Para establecer la homogeneidad de los grupos se ha utilizado el método *LSD* de Fisher, con un nivel de confianza del 95%

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

Tabla 5. Resultados de aplicar el test de múltiples rangos para las medias de los errores absolutos. El valor F es el correspondiente al ANOVA que contrasta la igualdad de todas medias. También se indica la media del error absoluto (en orden creciente) para cada modelo. La última columna indica las variables predictoras y cuando entre dos filas coincide alguna letra, esto indica que no hay diferencias estadísticamente significativas (95%) entre las medias.

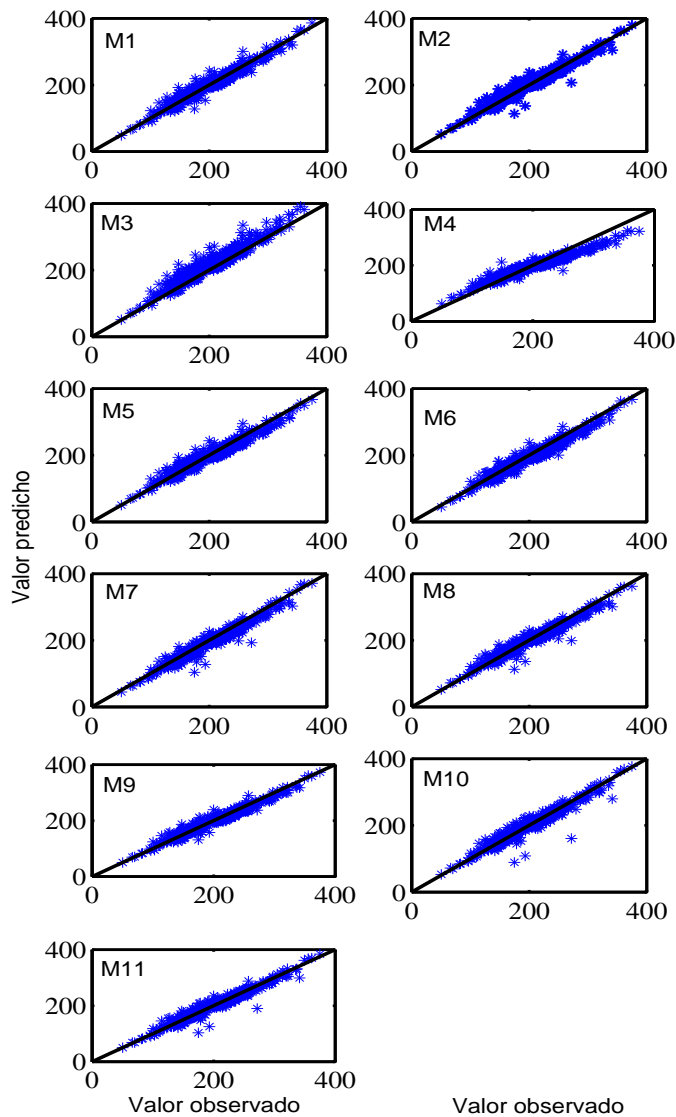


Figura 2. Gráficos de valores de peso observados frente a los predichos para los modelos del 1 al 11.

Si nos fijamos en la Tabla 5, en la que se representa el análisis ANOVA sobre los valores medios del error absoluto para todos los modelos ajustados y el modelo de referencia (Deguara *et al.* 2016); se puede observar que la introducción de más de una dimensión en el ajuste disminuye el valor del error absoluto medio. Queda claro que la introducción de tres dimensiones proporciona los errores absolutos menores (como es el caso de los M10 y M11). En dicha tabla se muestra como los modelos M11, M10, M1, M8, M9, M3 y M2 proporcionan errores absolutos inferiores a los 10 Kg. Si nos fijamos en la Tabla 6, en la que se representan los valores del análisis ANOVA realizado a los errores relativos, se puede observar que estos mismos ajustes (M11, M10, M1, M8, M9, M3 y M2) proporcionan estimaciones del peso con errores por debajo del 5%, valores aceptables y en el mismo rango que los ofrecidos por sistemas de estimación de la talla de manera indirecta como los

formados por cámaras estereoscópicas (Aguado & García, 2006). Tanto en esta tabla como en la anterior se constata además que utilizar una sola dimensión aumenta el error en la predicción del peso. Aunque es reseñable que, utilizar la anchura máxima en lugar de la longitud no aumenta de manera significativa el error, como se desprende de los valores del error medio absoluto y relativo de los *M12*, *M13* y el modelo de referencia de Deguara. Sin embargo, es muy importante recordar que el modelo de referencia (Deguara *et al*, 2016), se ha obtenido para estimar el peso de peces salvajes, habitualmente antes o durante la puesta, no siendo su objetivo los peces capturados y engasados en cautividad posteriormente. Además, es más que plausible suponer que, en el caso de peces salvajes, la longitud sea la dimensión más determinante para la predicción del peso. Por otra parte, en los peces engasados en cautividad, las dimensiones se ven afectadas por las condiciones de vida, de tal modo que el resto de dimensiones, en especial la anchura, ganan relevancia como variables predictoras del peso.

Del mismo modo, en la Tabla 7, queda reflejado el resultado del análisis ANOVA del valor medio de los residuos. En este caso como en los anteriores las mínimas desviaciones se producen para los ajustes *M1*, *M11*, *M2*, *M10*, *M3*, *M9*, *M2* y *M5*, todos ellos con valores menores que 3, siendo excepcionalmente bajos y menores que 1 para los ajustes *M1*, *M11* y *M2*. Este hecho viene a confirmar, que aumentar el número de dimensiones en la determinación del peso mejora las predicciones que ofrecen los ajustes. Del mismo modo deja entrever que, el uso de las expresiones más extendidas para la estimación de los peces en estado salvaje necesitan una adaptación para ajustarse a los valores obtenidos con peces engordados en cautividad, ya que; tienden a sobreestimar los valores del peso. Por el contrario, cuando se ajustan los datos con una única dimensión (longitud (*L*) o anchura (*A*)) como muestran *M12* y *M13*, se tiende a subestimar el peso medio en las predicciones.

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

Tabla 6. Resultados de aplicar el test de múltiples rangos para las medias de los errores relativos El valor F es el correspondiente al ANOVA que contrasta la igualdad de todas medias. También se indica la media del error relativo (en orden creciente) para cada modelo. La última columna indica las variables predictoras y cuando entre dos filas coincide alguna letra, esto indica que no hay diferencias estadísticamente significativas (95%) entre las medias.

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

Tabla 7. Resultados de aplicar el test de múltiples rangos para las medias de los residuos El valor F es el correspondiente al ANOVA que contrasta la igualdad de todas medias. También se indica la media de los residuos para cada modelo. La última columna indica las variables predictoras y cuando entre dos filas coincide alguna letra, esto indica que no hay diferencias estadísticamente significativas (95%) entre las medias.

En la Tabla 8 se resumen los indicadores de bondad de ajuste utilizados para la validación de los modelos que relacionan la altura con la longitud y la anchura máxima y la longitud con la anchura máxima.

<i>Ajuste</i>	<i>R<sup>2</sup>(d.f.)</i>	<i>Eam (kg)</i>	<i>e-Eam (kg)</i>	<i>Erm (%)</i>	<i>e-Erm (%)</i>	<i>Resm (kg)</i>
M14	86.06	1.55	0.07	2.73	0.12	0.21
M15	84.94	1.24	0.05	2.89	0.11	-0.40

Tabla 8. Valores de los parámetros que definen la bondad de los ajustes (Modelos 14 y 15) calculados a partir de los datos reservados para la validación.

En la Tabla 4 y Tabla 8 se incluyen además, el valor medio de los residuos. Como ya se ha indicado, del análisis de valores medios de los residuos se infiere que la mayoría de los modelos sobreestiman el peso de los atunes, no obstante, dicha sobreestimación disminuye al incluir más de una dimensión del atún, siendo cercana a cero para el M1 que incluye la altura y la longitud. Los modelos 12 y 13 subestiman el peso. El primero hace uso sólo de la longitud como variable independiente y el segundo hace uso sólo de la anchura. Que el valor medio de los residuos esté cercano a cero nos indica la fiabilidad de la predicción ofrecida por el ajuste. Para el caso de la determinación de la altura a partir de la longitud y la anchura (M14), el valor medio de los residuos es prácticamente cero, que junto con los valores de los errores menores del 3%, indican la posibilidad de obtener esta dimensión de manera indirecta a partir de las otras dos. Del mismo modo el modelo 15 nos indica que existe una relación entre la longitud y la anchura de los peces engordados, que se comprueba con los bajos errores que se cometen en la predicción y sus residuos cercanos a cero.

En la Figura 1 y en la Tabla 4 se observa que, el uso de la anchura como única variable para predecir el peso ofrece buenos resultados con errores por debajo del 10 %. La Figura 2 y Figura 3 muestran los gráficos de los valores observados frente a los predichos para cada uno de los modelos considerados en la validación.

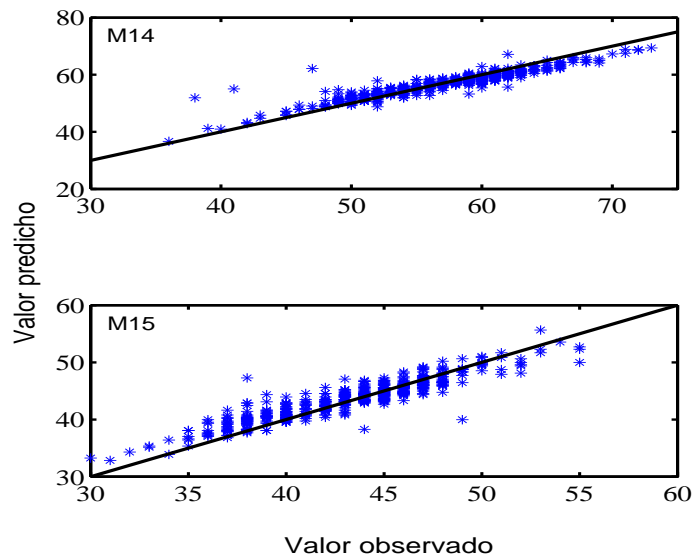


Figura 3. Gráficos de valores observados frente a los predichos para los modelos 14 y 15. Para el modelo M14 se representa el valor predicho frente al observado de la altura (arriba) mientras que para el M15 se representa el valor observado frente al predicho de la anchura (debajo).

### 3.2. Conclusiones

Se constata que **el uso de más de una dimensión mejora la estimación del peso cuando éste ha sido engordado durante meses en cautividad**. El uso de la altura es más común en la realización de biometrías, sobre todo si estas se realizan de manera indirecta (mediante sistemas de visión estereoscópica) pero, a partir del análisis ANOVA realizado, **se demuestra que la anchura máxima de los atunes puede utilizarse como parámetro para la determinación del peso junto con la longitud**. El uso de la anchura máxima ofrece buenos coeficientes de determinación y valores de los errores medios similares a los que se pueden conseguir usando la altura, como se desprende de la comparación de los modelos presentados (M1 y M3).

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

**animales recién capturados para mejorar la estimación del estado de los mismos según el lugar geográfico y época del año.**

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

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

## **4. Sistemas combinados de medidas acústicas y ópticas.**

### **4.1. Equipamiento óptico para adquisición**

Se dispone de dos sistemas de visión estereoscópica para la grabación de vídeo: el sistema AQ1 ("AQ1 Systems," 2013), utilizado actualmente para estimación de biomasa en transferencias y el sistema AI2, desarrollado en el marco del proyecto BIACOP.

#### **4.1.1. Sistema de visión estereoscópica AQ1**

El sistema AQ1 consta de un par estéreo, formado por dos cámaras en color de alta resolución con conexión Gigabit Ethernet. Permite grabar vídeo estereoscópico a 12 fps. Es el sistema utilizado desde julio hasta noviembre en las jaulas de engorde.



#### **4.1.2. Sistema de visión estereoscópica AI2**

El sistema AI2 ha sido desarrollado íntegramente en el marco de este proyecto. Está formado por dos cámaras compactas de alta resolución con interfaz GigE Vision y diseñadas para trabajar en condiciones extremas, que incorporan control preciso de Auto-iris, para regular automáticamente la apertura del iris en función de la iluminación, y sincronización del reloj vía red (PTP Precision Time Protocol), que permite sincronizar el disparo de varias cámaras a la vez, imprescindible para la confección del sistema estereoscópico.

Las cámaras están separadas 80 centímetros e inclinadas 5° cada una respecto al centro en configuración convergente. El encapsulado de las cámaras se realizó en aluminio anodizado duro por una empresa especializada, con conectores de tecnología submarina en cada una de las envolventes y dos cables de 60 metros.

La Figura 4 muestra el sistema estereoscópico AI2 en el laboratorio y su montaje en una plataforma con otros sensores. El sistema estereoscópico AI2 se usa en las grabaciones de las transferencias y en octubre y noviembre en las jaulas de engorde. La distancia focal utilizada en jaulas fue de 10 mm, pero con las conclusiones de los resultados obtenidos, junto con el diseño de la estructura para transferencias, se decidió cambiar las ópticas por otras de distancia focal 6mm. El campo visual de estas ópticas, una vez montados los equipos en la estructura para transferencias, cubre la mayor parte de las puertas de las jaulas, de 10x10 metros.



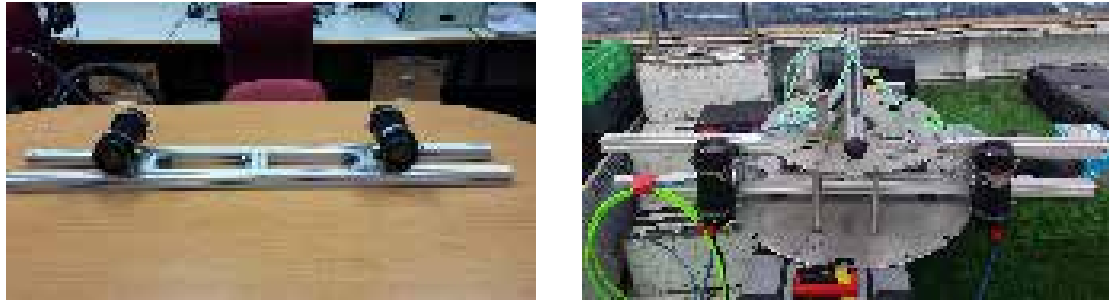


Figura 4. Sistema estereoscópico AI2 desarrollado en el marco de este proyecto.

#### 4.1.3. Calibración de los sistema de visión estereoscópicos

La calibración de los sistemas de visión estereoscópicos es necesaria para estimar la localización de los objetos y convertir mediciones en el plano de la imagen a mediciones reales en 3D. El procedimiento de calibración lo llevamos a cabo en la ICRA (Infraestructura para el Control de la Reproducción del Atún rojo) perteneciente al IEO (Instituto Español de Oceanografía) en Cartagena (Murcia), con la ayuda de buzos experimentados y en un tanque de 20 metros de diámetro y 10 metros de profundidad con agua marina. Los sistemas estereoscópicos se fijaron en un lado del tanque, mientras el buzo movía un patrón *checkboard* de calibración a distintas distancias y orientaciones respecto de las cámaras. La Stereo Calibration Application de la Computer Vision Toolbox de Matlab se usó para detectar la posición de los vértices del patrón y determinar los parámetros de calibración intrínsecos y extrínsecos. Los algoritmos se basan en (Zhang, 1998) y (Heikkila and Silven, 1997).

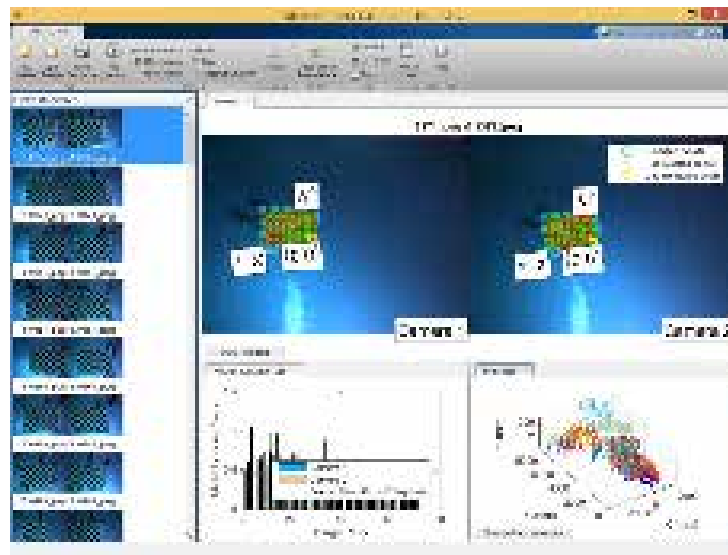


Figura 5. Imagen de la “Stereo Camera Calibration App” de Matlab

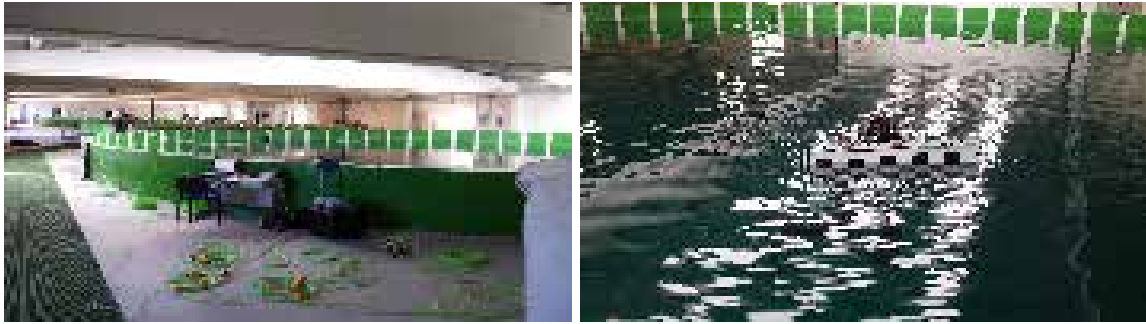


Figura 6. Procedimiento de calibración en las instalaciones del IEO (Instituto Español de Oceanografía) en Cartagena.

Para analizar la precisión de los resultados de la calibración se procesaron 5018 imágenes estéreo. La medida de la diagonal del patrón se convierte a un error proporcional utilizando la Ec. 1, donde  $L_m$  y  $L_r$  son la longitud medida y la real, respectivamente.

$$e = \frac{(L_m - L_r)}{L_r} * 100 \quad (1)$$

Los resultados de la calibración se muestran en la Tabla 9. Un alto porcentaje de las muestras tienen un error menor al 1% y el 100% de las medidas tienen un error menor del 3%.

Sistema estéreo	Módulo del error (%)	Número de muestras	% de muestras
AQ1	$ e  < 1\%$	4813	95.91
	$ e  < 2\%$	4997	99.58
	$ e  < 3\%$	5018	100
AI2	$ e  < 1\%$	4900	97.65
	$ e  < 2\%$	5006	99.76
	$ e  < 3\%$	5018	100

Tabla 9. Precisión en los resultados de la calibración de los sistemas estereoscópicos.

## 4.2. Equipamiento acústico para adquisición

### 4.2.1. Equipamiento acústico en jaulas

Se emplearon dos ecosondas científicas EK60 de Simrad, una junto a un transductor split-beam de 120 kHz (modelo ES120-7C, sus características se muestran en la Tabla 10) y la otra hace uso de un transductor de 200 kHz (modelo ES200-7C cuyos datos pueden consultarse en la Tabla 11). Ambas ecosondas fueron controladas por un único ordenador mediante el puerto Ethernet y con la ayuda de un switch, de manera que trabajaran de forma síncrona. Los dos transductores empleados tenían una apertura a -3 dB de alrededor de 7°. La potencia transmitida es de 90 W para la frecuencia de 200 kHz y de 100 W para la de 120 kHz, la duración del pulso transmitido es de 64  $\mu$ s a las dos frecuencias, así como el intervalo entre pings que es el mínimo permitido por la ecosonda a ambas frecuencias. Se realizaron medidas en cada jaula durante dos horas. Esta configuración fue utilizada en todas las jaulas durante todos los meses de medida. Se solicitó a los buzos de la empresa información sobre las condiciones ambientales (estado del mar, meteorología, temperatura del agua, salinidad y pH).

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>	<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
Tipo	<i>Split-beam</i>	$\vartheta_{-3dB, \theta 1}$ (°)	7.26
Nº serie	666	$\vartheta_{-3dB, \theta 2}$ (°)	7.24
$f$ (kHz)	120	$\psi$	0.0091
$S_{Tx,v}$ (dB ref. 1 $\mu$ Pa/V)	171.5	$\Psi$ (dB)	-20.4
$S_{Tx,i}$ (dB ref. 1 $\mu$ Pa/A)	209.3	$\eta$	0.75
$S_{Rx}$ (dB ref. 1 V/ $\mu$ Pa)	-186.4	$ Z $ ( $\Omega$ )	19.6
$Q_{m\acute{a}x}$	650	$\vartheta(Z)$ (°)	-8.7
$ID_{m\acute{a}x}$ (dB)	28.41	$W_{Tx,m\acute{a}x}$ (W)	1000

Tabla 10. Datos del transductor ES120-7C de Simrad.

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>	<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
Tipo	<i>Split-beam</i>	$\vartheta_{-3dB, \theta 1}$ (°)	7.2
Nº serie	420	$\vartheta_{-3dB, \theta 2}$ (°)	7.0
$f$ (kHz)	200	$\psi$	0.0087
$S_{Tx,v}$ (dB ref. 1 $\mu$ Pa/V)	185.1	$\Psi$ (dB)	-20.6
$S_{Tx,i}$ (dB ref. 1 $\mu$ Pa/A)	210.1	$\eta$	0.75
$S_{Rx}$ (dB ref. 1 V/ $\mu$ Pa)	-190.0	$ Z $ ( $\Omega$ )	17.9
$Q_{m\acute{a}x}$	660.7	$\vartheta(Z)$ (°)	-8.7
$ID_{m\acute{a}x}$ (dB)	28.2	$W_{Tx,m\acute{a}x}$ (W)	1000

Tabla 11. Datos del transductor ES200-7C de Simrad

Ante la imposibilidad de realizar la calibración de los transductores “in situ”, debido a la dificultad para calibrar de manera adecuada en el momento de las medidas, se realizó la calibración en las instalaciones que el IEO tiene en Cartagena (Murcia). En esta Infraestructura para el Control de la Reproducción del Atún Rojo (ICRA), el IEO dispone de un tanque de 3500 m<sup>3</sup> con 22 metros de diámetro y 10 metros de profundidad. Dicho tanque se llenó de agua del mar a la misma temperatura a la que se realizaron las medidas, y se colocaron los equipos en el fondo para realizar la calibración en las mismas condiciones ambientales y a una profundidad similar a la de medida, pero en un ambiente más controlado y con un mecanismo de posicionamiento de la esfera de calibración. Se siguió el procedimiento de calibración descrito por el fabricante en el manual de la ecosonda, haciéndose uso del método del blanco estándar (Simrad, 2008). Se usaron dos esferas diferentes una de 13.7 mm de diámetro para el transductor de 200 kHz y una de cobre de 23mm para el transductor de 120 kHz proporcionadas por Simrad al adquirir los equipos. El software proporcionado por el fabricante dispone de un módulo de calibración que fue usado para realizar dichas calibraciones. El proceso de calibración consiste básicamente en registrar ecos procedentes de la esfera de calibración a través de toda la sección transversal del haz del transductor definida por una apertura angular debida a una caída de -6dB en el patrón de radiación, y comparar el valor del *TS* medido con el valor del *TS* teórico del blanco estándar. A partir del registro de ecos procedentes de dicho blanco estándar se estiman la ganancia del transductor en las dos direcciones, el factor de corrección  $Sa_{corr}$ , y los cuatro parámetros angulares necesarios para compensar el efecto del patrón de radiación (la apertura del haz a -3 dB en las direcciones longitudinal y transversal, y la desviación del eje respecto a la normal en ambas direcciones). El ángulo equivalente y la sensibilidad angular no se determinan en el proceso de calibración.

Tabla 12 se resumen los parámetros obtenidos durante la calibración de las dos ecosondas, cada una trabajando con uno de los transductores (*ES120-7C* y *ES200-7C*). Durante la calibración de la ecosonda *EK60* junto con el transductor *ES120-7C* de 120 kHz se usó una duración de pulso de 64  $\mu$ s; una potencia de transmisión de 100 W, para la ecosonda *EK60* y el transductor *ES200-7C* (200 kHz) se utilizó también 64  $\mu$ s de duración del pulso pero una potencia de transmisión de 90 W. El intervalo entre pings en ambos casos fue de 1 segundo, como recomienda el fabricante en el proceso de calibración. Para el cálculo de la velocidad del sonido se utilizaron los parámetros ambientales medidos en el tanque de calibración (24.2°C de temperatura. 36 ppm de salinidad y un pH de 8.14).

Para una mejor comprensión de la Tabla 12, es necesario explicar que el programa de calibración después de registrar los datos realiza ajustes a dos modelos diferentes: el modelo polinómico y el modelo del haz. Si la forma del modelo polinómico es muy diferente a la forma del modelo del haz, indica que no se han registrado suficientes detecciones. Se ajustan los parámetros del modelo del haz de forma que se minimice el error cuadrático medio (*RMS*) de las detecciones registradas. Los valores obtenidos se utilizan para corregir los parámetros de calibración del sistema. La desviación del modelo respecto a los datos puede utilizarse para validar el proceso de calibración. Se recomiendan valores *RMS* inferiores a 0.2 dB, aunque son aceptables valores de hasta 0.4 dB. Las calibraciones con valores *RMS* superiores a 0.4 dB deben repetirse.

<i>Transductor</i>	<i>ES120-7C</i>	<i>ES200-7C</i>
$T_{ping}$ (s)	1	1
$c$ (m/s)	1537.5	1537.5
$\alpha$ (dB/km)	47.4	84.0
<i>Blanco</i>		
$TS_{teór}$ (dB)	-40.3	-45.3
$TS_{desv}$ (dB)	5.0	5.0
<i>estándar</i>		
$R_m$ (m)	5	5
$R_M$ (m)	8	8
<i>Parámetros</i>		
$TS_{min}$ (dB)	-50.0	-60.0
$mLE$	0.8	0.8
<i>Detección</i>		
$MLE$	1.8	1.8
<i>Ecos</i>		
$MDF$	12.2	8.0
<i>Individuales</i>		
$MCG$ (dB)	6.0	6.0
$EE_{min}$	1.0	1.0
<i>Nº detecciones</i>	345	323
<i>Error RMS</i>	0.16	0.24
$G_{TS}$ (dB)	23.86	24.48
$Sa_{corr}$ (dB)	0.44	-0.37
$\vartheta_{-3dB, \theta_1}$ (°)	6.25	6.41
$\vartheta_{-3dB, \theta_2}$ (°)	6.20	6.35
<i>Parámetros</i>		
$Offset_{\theta_1}$ (°)	-0.01	0.08
<i>Transductor</i>		
$Offset_{\theta_2}$ (°)	-0.04	-0.01
$\Psi$ (dB)	-20.7	-20.7
$\Psi_{calculado}$ (dB) <sup>1</sup>	-21.74	-20.6
$SensAng_{\theta_1}$	23.0	23.0
$SensAng_{\theta_2}$	23.0	23.0

Tabla 12. Resultados obtenidos de la calibración de la EK60 junto con el transductor ES120-7C y de la EK60 junto con el transductor ES200-7C, duración del pulso 64  $\mu$ s.

<sup>1</sup> Calculado según la ecuación empleada por Simrad para estimar el valor de  $\Psi$  a partir de la medida de la apertura del haz a -3 dB.

#### 4.2.2. Equipamiento acústico en transferencias

Se empleó una ecosonda científica EK60 de Simrad junto a un transductor sonar de barrido lateral (Side Scan Sonar, SSS) de 200 kHz. El transductor fue diseñado por la empresa Airmar Technology Corporation especialmente para este proyecto (Figura 7). El transductor tiene 49° de apertura en la dirección perpendicular de nado (teniendo en cuenta la apertura del haz con una caída de -3 dB) y de al menos 0.5° de apertura en la dirección de nado de los peces, observándose la apertura con la misma caída en decibelios que en el caso anterior. De tal forma que se genere una cortina acústica en la dirección perpendicular a la dirección de nado de los atunes.

Este tipo de transductores son mono haz, pero en este caso se pidió al fabricante la posibilidad de convertirlo en uno de haz dividido o split-beam. Para realizar el cambio de mono haz a haz dividido se diseñó una caja que permite la conversión entre ambas tecnologías (Figura 7). Durante las transferencias se ha utilizado en modo single-beam y se almacenan los datos proporcionados por la ecosonda para el análisis de los mismos.

Las especificaciones del transductor se muestran en la Tabla 13. La potencia transmitida durante las pruebas es de 100 W, la duración del pulso transmitido es de 64  $\mu$ s y el intervalo entre pings es el mínimo permitido por la ecosonda. Se solicitó a los buzos de la empresa información sobre las condiciones ambientales (estado del mar, meteorología, temperatura del agua, salinidad y pH).



Figura 7. Detalle del transductor de barrido lateral (izquierda) y de la caja convertora entre tecnología split-beam y single-beam (derecha).

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Tipo	Single-beam/ Split-beam	$\vartheta_{-3dB, \theta_1}$ (°)	0.5
Nº serie	150049-01	$\vartheta_{-3dB, \theta_2}$ (°)	49
$f$ (kHz)	200	$\psi$	0.004
$S_{Tx,v}$ (dB ref. 1 $\mu$ Pa/V)	182	$\Psi$ (dB)	-23.5
$S_{Rx}$ (dB ref. 1 V/ $\mu$ Pa)	-167	$\eta$	0.32
$Q_{máx}$	794	$ Z $ ( $\Omega$ )	50.62
$ID_{máx}$ (dB)	29	$W_{Tx,máx}$ (W)	1000

Tabla 13. Datos del transductor SSS de Airmar.

### 4.3. Estructura para transferencias: diseño del sistema de soporte

Se opta por el diseño de un sistema de soporte (estructura) para los equipos durante las transferencias de las jaulas de transporte a las de engorde de manera que nos asegure:

- estabilidad de los equipos para adquirir datos acústicos y ópticos válidos,
- repetitividad en las operaciones disminuyendo la complejidad de las mismas
- evitar ocasionar estrés por manipulación a los animales en la medida de lo posible

En este apartado se exponen las alternativas contempladas para diseñar una estructura que permita posicionar los equipos de adquisición de datos entre la jaula de transporte y la jaula de engorde; bien sea albergando los equipos en su interior a modo de “túnel” entre jaulas o proporcionando la estabilidad necesaria para colocar los equipos en el interior de la jaula de engorde.

Las Figura 8, Figura 9, Figura 10, Figura 11 y Figura 12 muestran los diferentes diseños ideados, donde se abordan distintas formas de la estructura, buscando estabilidad, y se estudian opciones de ubicación de los equipos de adquisición para obtener datos sin interferencias.

La Figura 8 muestra el diseño de una estructura cúbica rectangular con los equipos centrados en su interior parte baja. Esta estructura permite que los equipos de adquisición estén bien centrados durante las transferencias de peces entre jaulas y evita problemas de interferencias de elementos de la jaula en los datos de adquisición. Este diseño fue la primera propuesta tanto por el equipo de investigadores acústico como por los de Visión por Computador. Sin embargo este tipo de estructura fue descartada tanto por los buzos como por los responsables del cuidado de los atunes por las siguientes razones:

- ambas jaulas ejercen un empuje sobre la estructura (o puerta) produciendo movimientos constantes, haciéndola inestable y una alta probabilidad de producir roturas
- gran distancia que se crea entre las jaulas y que es buena para la adquisición de datos, podría generar espacio suficiente para que los atunes permaneciesen en la estructura y no se produjese una transferencia real entre jaulas

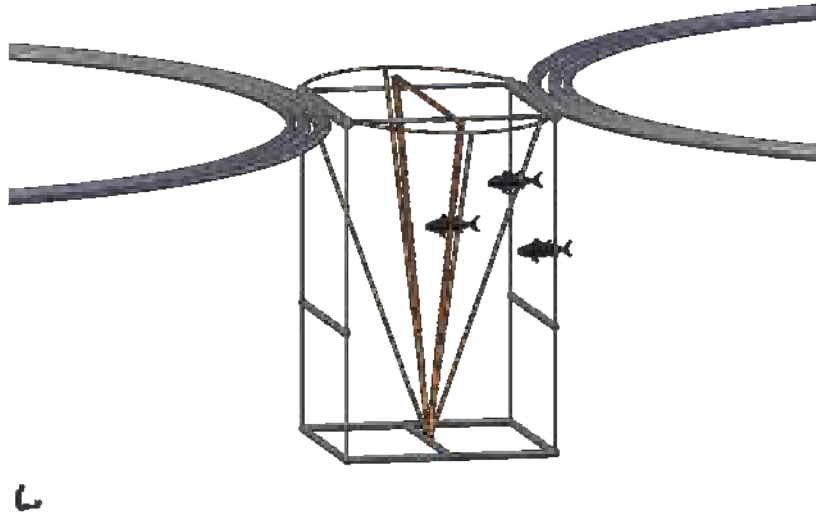


Figura 8. Estructura con forma rectangular, con equipos de adquisición centrados en su interior.

La Figura 9 y Figura 10 muestran una estructura simétrica con forma rómbica. En la estructura de la Figura 9, los equipos de adquisición de datos están colocados en la parte inferior de la misma, con cero grados de inclinación y mirando hacia la superficie. Como se aprecia en dicha figura, los elementos superiores de las jaulas formaron parte de los datos adquiridos, creando interferencias tanto en los datos acústicos como en los ópticos. En estos últimos las imágenes de los peces eran difícilmente diferenciables de partes de las jaulas, por ello se ideó un mecanismo (Figura 10) para que los equipos quedarán dentro de la jaula y evitar estas interferencias.

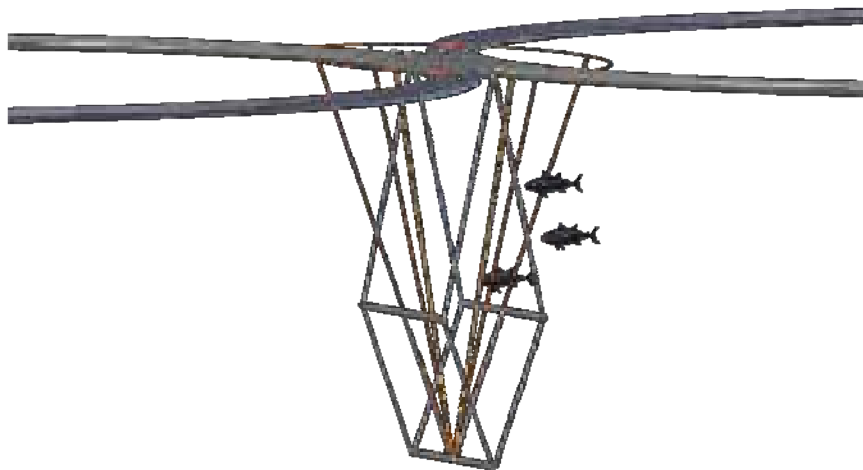


Figura 9. Detalle de la estructura con forma rómbica con los equipos de adquisición en el interior parte inferior. Las líneas y círculos rojos marcan el haz de alcance y área de adquisición de los equipos.

La estructura representada en la Figura 10 mantiene la forma rómbica simétrica, pero se añade un brazo articulado que permite colocar los equipos en la jaula de engorde o jaula receptora de los peces tras la transferencia. Esta localización de los equipos permite la adquisición de datos evitando los elementos propios de las jaulas donde residen los peces, pero tiene el inconveniente de que los equipos se han de introducir en la jaula y ello puede acabar generando estrés a los peces.



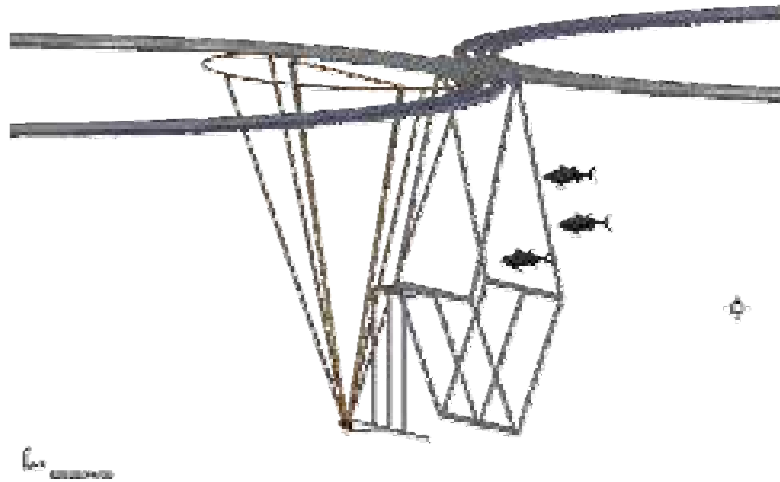


Figura 10. Estructura con forma róbica dotada de un brazo articulado que permite colocar los equipos en el interior de la jaula receptora. Las líneas y círculos rojos marcan el haz de alcance y área de adquisición de los equipos.

Las estructuras representadas en Figura 11 y Figura 12 muestran un diseño que permite orientar los equipos según las necesidades hacia la jaula emisora o receptora. En la Figura 11, el sistema de visión se encuentra orientado hacia la jaula receptora mientras que el sistema acústico presenta dos posiciones sobre el sistema óptico, con cero grados de inclinación o ligeramente desplazado de la misma y con una ligera inclinación (entre 1 y 10 grados) hacia la jaula emisora. Mientras que en la opción de la Figura 12, las cámaras están orientadas hacia la jaula emisora manteniendo la disposición variable, descrita anteriormente, del sistema acústico.

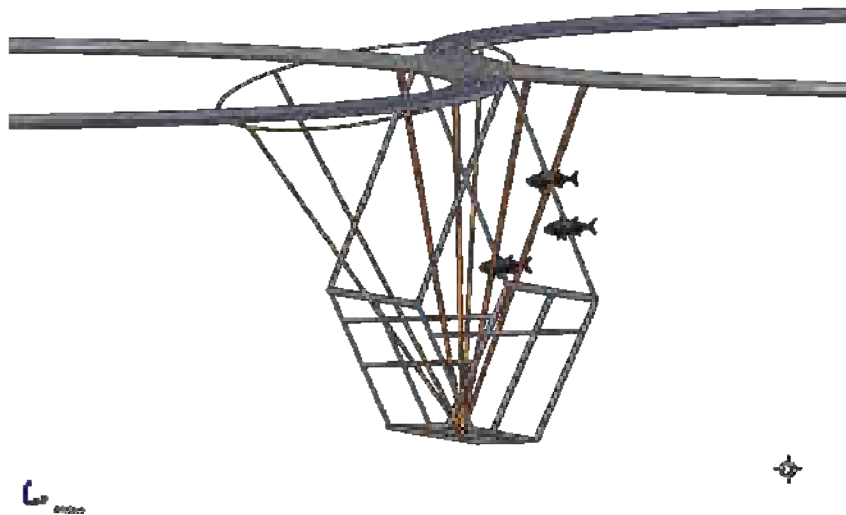


Figura 11. Estructura con forma simétrica y mayor anchura en la parte inferior. Esta estructura permite ubicar los sistemas de adquisición en diferentes orientaciones: con las cámaras orientadas hacia la jaula receptora (o emisora) y el sistema acústico con cero grados y su haz acústico perpendicular a la superficie del mar.

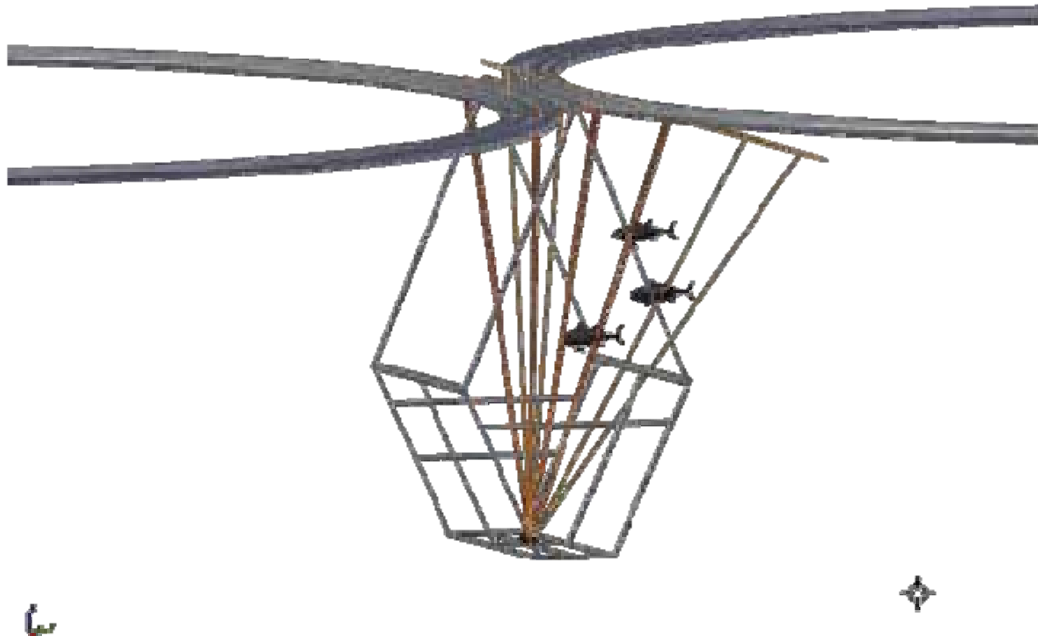


Figura 12. Estructura con forma simétrica y mayor anchura en la parte inferior. Esta estructura permite ubicar los sistemas de adquisición en diferentes orientaciones: con las cámaras orientadas hacia la jaula emisora (o receptora) y el sistema acústico con cero grados y su haz acústico perpendicular a la superficie del mar.

Aunque se propone que el sistema de medida sea capaz de garantizar la visión de toda la puerta durante la transferencia, se puede incluir una cámara adicional como garantía para el control por parte de las autoridades. Dicha cámara autónoma y dotada con un sistema de almacenamiento extraíble estará anclada a la estructura de tal modo que permita una visión total de la puerta durante el proceso de transferencia. Dicha cámara será precintada y estará dotada de una memoria que sólo será accesible al comienzo y al final del proceso por las autoridades. En la Figura 13 se muestra dónde ubicar dicha cámara y el campo de visión que tendría de la puerta.

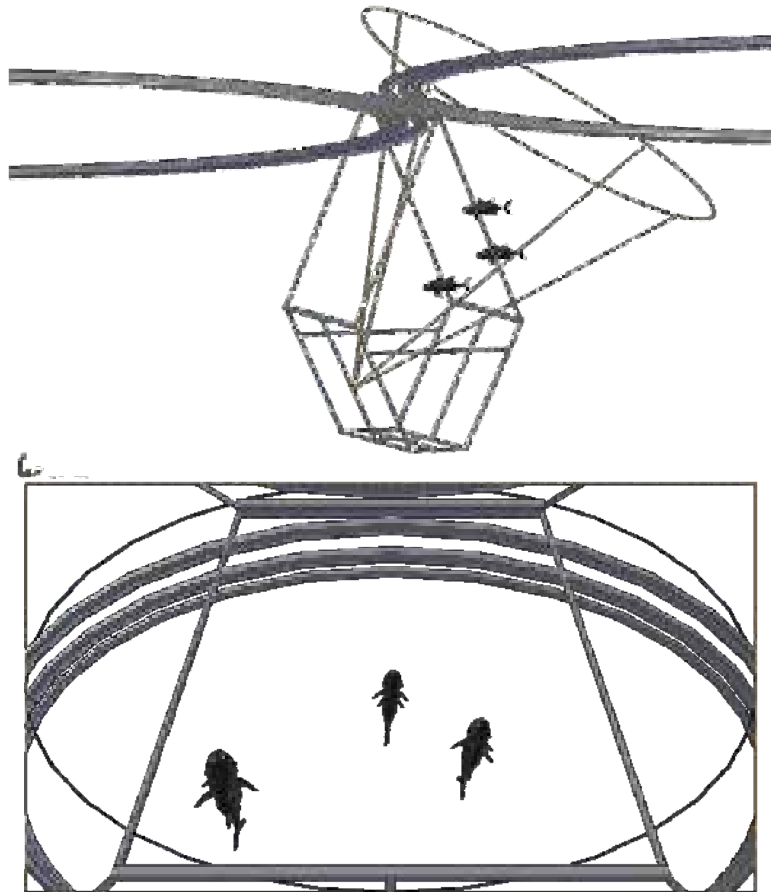


Figura 13. Detalle de la posición en la estructura de la cámara de control.

Tras varias pruebas in situ con las estructuras de Figura 9 y Figura 10, se optó por la estructura representada en Figura 11 y Figura 12, como se aprecia en las imágenes de Figura 14 y Figura 15 tomadas en el puerto en el momento de transportar dicha estructura hasta las jaulas marinas. Las dimensiones finales con las que se construyó dicha estructura son: 10x10 metros en la abertura de la puerta o paso de los atunes, 16 metros la altura máxima y 5 metros de anchura máxima



Figura 14. Imagen de la estructura en el muelle antes de proceder a su transporte a la granja.



Figura 15. Imagen de la estructura colocada entre jaulas en granja

## 5. Herramientas software desarrolladas

### 5.1. Herramientas de análisis de los datos acústicos

#### 5.1.1. Análisis de los datos acústicos en las jaulas

Los datos acústicos se analizaron en dos pasos. Primero fueron tratados con el software Sonar5Pro, para poder obtener los valores compensados del TS después de aplicar el detector de ecos individuales (Single Echo Detector, SED) del citado software (Balk & Lindem, 2011). Este software implementa esta detección de ecos procedentes de un blanco individual atendiendo a criterios de amplitud, duración y fase. Los criterios que tiene en cuenta se resumen en los siguientes:

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

En la Tabla 14 se muestran los parámetros elegidos para el análisis presentado en este punto.

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

Tabla 14. Parámetros del detector de ecos individuales (SED) utilizados.

Para la toma de datos se elige una duración del pulso de 64  $\mu$ s. Por este hecho, las trazas obtenidas con esta configuración de medida son complejas y en ellas se pueden apreciar las diferentes estructuras internas del atún, en este caso desde el punto de vista ventral (Figura 16). El pez, cuando

es insonificado a cortas distancias, deja de ser un blanco puntual y las medidas se ven afectadas por las incertidumbres asociadas a la determinación del *TS* a cortas distancias. Los transductores split-beam son capaces de ofrecer valores del *TS* en los que se compensa dicho valor cuando procede de cualquier punto fuera del eje acústico del transductor, compensado su fase. Este proceso se realiza haciendo uso de la conocida “celda” que se corresponde con la mínima unidad de superficie perpendicular al eje acústico que es capaz de discriminar el transductor a una distancia dada. El tamaño de esta celda determina la resolución espacial en el plano perpendicular al eje acústico, de tal modo que, se consiguen resoluciones mayores a distancias cercanas al transductor. Por esta razón, a cortas distancias, un blanco puntual puede tener un tamaño mayor al tamaño de la celda. Cuando el blanco es un pez, éste puede llegar a ocupar gran parte de la sección del haz e incluso abarcar un diámetro mayor que el diámetro definido por el haz cuando éste decae -3 dB. En estos casos, el blanco deja de ser puntual y puede llegar a cometerse un error significativo en la estimación de la posición angular (Ona *et al.*, 1996; Dawson *et al.*, 2000). Una ecosonda preparada para trabajar con un transductor split-beam, cuando el blanco ocupa más de una celda, aplicaría un único valor de ganancia al corregir el valor del *TS* para compensar el efecto del patrón de radiación, por lo que no podríamos asegurar que dicho valor del *TS* haya sido compensado de manera correcta.

Aunque no se conocen estudios exhaustivos sobre la fisiología interna del atún rojo en el que se describa el tamaño de la vejiga natatoria y se establezcan relaciones entre el tamaño de la vejiga y el tamaño total del pez; sí existen estos trabajos para otras especies como el atún de aleta amarilla. Schaefer & Oliver (1998) indican que, para el atún de aleta amarilla, el tamaño de la vejiga natatoria está en torno a la quinta parte de la longitud total del pez. Por este hecho, y dado que es la vejiga natatoria la responsable de la mayor cantidad de energía dispersada por el pez; se propone reducir el tamaño del pez al de su vejiga y por ello dentro de la traza compleja se elegirá el máximo valor del *TS* (tanto compensado como sin compensar) como el representante de la traza.

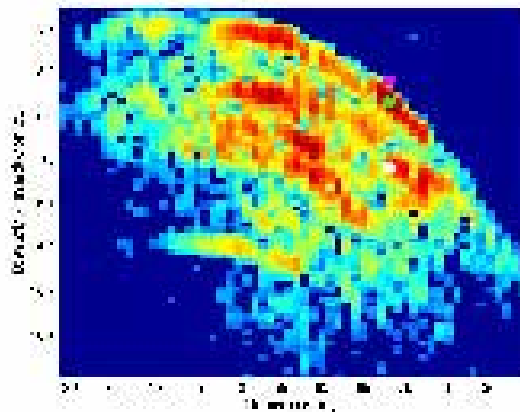


Figura 16. Imagen de una traza aislada en la que se puede observar la complejidad de la misma.

En el segundo paso del análisis de los datos acústicos se utilizó una herramienta implementada en Matlab<sup>®</sup> que permite la detección automática de trazas individuales. De las diferentes trazas aisladas se extraen los parámetros deseados para poder llevar a cabo el análisis: el *TS* máximo (compensado y sin compensar), la distancia al transductor de cada ping que compone la traza, el número de pings que componen la traza y el intervalo temporal de la traza detectada. Durante el análisis automático se fija un umbral para el *TS* de -55 dB y se elimina el primer metro desde la superficie del transductor y las detecciones pegadas a la superficie. Se hace uso del tratamiento

digital de imágenes para poder aislar las trazas. El proceso consiste en la detección y segmentación de regiones por criterios de área y nivel acústico mínimo, de tal manera que se genere un listado de regiones susceptibles de ser atún. Estas regiones candidatas son examinadas y sometidas a un filtrado basado en sus características acústicas y morfológicas (como región). Se establecen por lo tanto criterios de nivel acústico máximo y mínimo, distancia al transductor, número de ping máximo, tamaño máximo y mínimo de la región (que se basa en el área), lo compacta que es la región, la relación entre las dimensiones de la región (alto-ancho) y el valor del número de Euler (The MathWorks Inc., 2014; Gonzalez and Woods, 2008).

### 5.1.2. Análisis de los datos acústicos durante las transferencias.

La herramienta de análisis de datos acústicos ha sido desarrollada en su integridad partiendo de los datos registrados por la ecosonda y el transductor durante los procesos de transferencias.

Los datos acústicos se convirtieron del formato de salida de la ecosonda .raw a un fichero .txt con ayuda del Sonar5 Pro (Balk & Lindem, 2011). Con la ayuda de dicho software se unieron los distintos archivos consiguiéndose uno solo que posteriormente fue convertido a una matriz de datos .mat para su posterior tratamiento en Matlab®.

Se implementó una herramienta en Matlab® que permite la detección de las trazas y el conteo de los ejemplares de atún. Como en el caso de la herramienta mostrada en la sección 5.1.1, en el momento de la detección de las trazas se puede extraer diferentes parámetros para realizar el análisis de las mismas y proceder al conteo de los atunes (TS máximo, la distancia al transductor de cada ping, el número de pings que componen la traza y su correspondiente intervalo temporal). Durante el análisis, para eliminar detecciones de bajo nivel se eligió un umbral de  $-70$  dB, y se eliminó el primer metro desde la superficie del transductor.

La herramienta que se utiliza para aislar las trazas y realizar el conteo de ejemplares combina las técnicas de tratamiento digital de imágenes (aplicándolas al ecograma como si se tratase de una imagen) y los valores de energía devueltos por los peces tras ser alcanzados por el haz acústico. Es necesario hacer uso de una función de ganancia cronovisible conocida como TVG (Time Varied Gain). Esta función compensa la dispersión geométrica del haz y la absorción del medio, de tal modo que, a la salida de la misma se tienen ecos independientes de la distancia al blanco. Asumiendo que el atún está insonificado parcialmente y que puede considerarse un blanco extenso, debido al rango de medida y a la pequeña apertura del haz acústico en la dirección de nado de los peces (que tan solo es de  $0.5^\circ$ ), se aplica el  $20 \log$  como TVG (como indica la ecuación 3).

$$TVG(R) = 2 \cdot TL = 20 \log \frac{R}{R_0} + \alpha \cdot R \quad (3)$$

En la Figura 18 se representa un esquema del procedimiento de análisis seguido para el conteo de los ejemplares de atún durante las transferencias. Una vez que el ecograma es transformado al formato .mat es procesado con el software Matlab®. En la primera parte del procesado se trata el ecograma como si fuera una imagen. Para poder realizar una segmentación de las trazas de atún, se convierte el ecograma a escala de grises y después se transforma en una imagen binaria. A la imagen binaria resultante se le aplican diferentes operaciones morfológicas que nos permiten la

segmentación de las trazas mediante mecanismos de detección de regiones. Entre las operaciones morfológicas utilizadas las más destacadas son un proceso de engorde de las regiones (“thickening”) que permite disponer de trazas más compactas, procedimientos alternos de apertura y cierre, que nos permitían eliminar protuberancias y romper conexiones débiles (opening) y suavizar contornos, rellenar vacíos y pequeños huecos (closing) (Gonzalez & Woods, 2008). Tras las operaciones morfológicas, se procede al etiquetado de las regiones y la extracción de características de las mismas. Este proceso hace uso del algoritmo “union-find” (Marques, 2011) (The MathWorks Inc., 2014) para separar las diferentes regiones y proceder a extraer de ellas diferentes características que nos permitieran el posterior análisis de las mismas para obtener un conteo más ajustado de los peces.

Una vez etiquetadas todas las regiones diferentes encontradas en la imagen, se procede a separar las trazas del fondo y de otras detecciones que se encuentran en el ecograma como la superficie del mar, quedando únicamente las trazas de los atunes que cruzaron el haz acústico durante la transferencia. Estas trazas en la mayoría de las ocasiones van acompañadas de ruido proveniente de diversas fuentes que debe ser eliminado en las partes posteriores del procesado (Figura 17).

Después de separar el fondo y la superficie de posibles trazas, mediante un filtrado por el tamaño del área de las regiones detectadas; se obtiene distribuciones de área y de la energía acústica de las posibles trazas, a partir de las cuales se elige el valor del área mínima que debe tener una región para ser considerada traza y el valor mínimo de la energía acústica que debe tener el punto de máxima energía dentro de la región para que sea considerada traza y no ruido. Este segundo filtrado debe ser refinado en algunos casos, por ello en ese momento la aplicación desarrollada para el conteo solicita la colaboración del operador para que seleccione en el ecograma la zona en la que se encuentran trazas, sin realizar ninguna manipulación más sobre el proceso. Con este sencillo gesto, en el que el operador encuadra con el ratón del ordenador las diferentes molas de peces; el procesado se centra en las partes del ecograma en las que se encuentran los atunes, facilitando la eliminación de ruido y minimizando la posibilidad de falsos positivos (es decir, contar como un atún algo que no lo es).



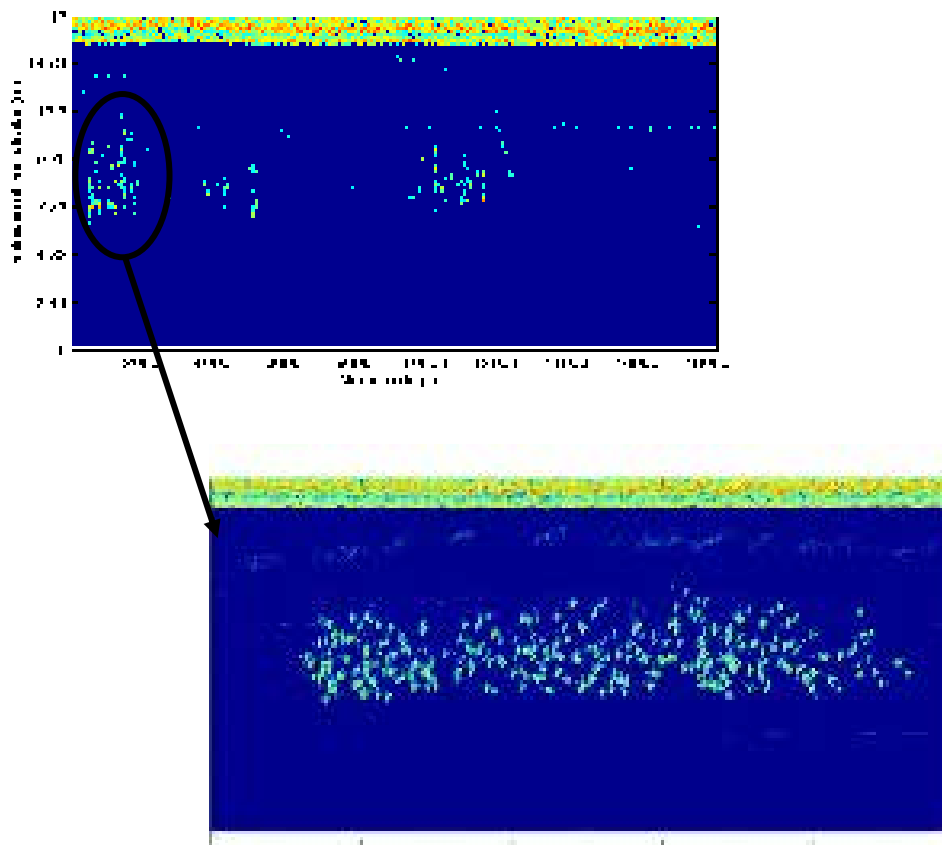


Figura 17. En la parte superior ecograma de la transferencia realizada el día 27-07-2016 entre las jaulas 18 y 20. En la parte inferior detalle de una de las molas de atunes captadas. En ambas imágenes puede apreciarse en azul el fondo y en la parte superior la detección de la superficie (de gran nivel debido al cambio de impedancias agua/aire) además se aprecia leve ruido debido a reflexiones con los diferentes elementos que el haz acústico encuentra en su camino (redes de las jaulas, mecanismos de anclaje de los equipos e incluso otras especies de peces de menor tamaño presentes en las jaulas).

Una vez restringidas las zonas de análisis por un operador, y elegidos de manera automática los umbrales mínimos de área y energía acústica; la aplicación desarrollada somete a las diferentes regiones detectadas a una serie de toma de decisiones en cadena: en ellas se decide si se trata de una región que contiene un atún o varios (mediante criterios de área combinados con otros criterios que se establecen a partir de las características de la región (número de Euler, nivel de solidez de la traza, relación de tamaño entre el alto y el ancho...)).

Cuando la aplicación ya ha decidido si la región contiene un pez o varios, se realiza un estudio del perfil de máximos de la energía acústica para cada uno de los pings que forman la traza o región. Este perfil de máximos, que es tratado mediante un Filtro Savitzky-Golay (Savitzky & Golay, 1964), basado en el cálculo de una regresión polinómica local que permite el suavizado del perfil de máximos manteniendo las características del mismo, es decir, sin perder los máximos y mínimos relativos, ni el ancho de los picos. Esta información, necesaria para el conteo de los peces, desaparece si se hacía uso de otras técnicas de promediado de la señal (como la técnica de la media desplazada de amplio uso en el tratamiento de señales). Este procedimiento se realiza de manera

iterativa hasta encontrar los valores óptimos del filtro. Finalizado este proceso, se procede al primer conteo por parte de la aplicación. Tras este primer conteo, la aplicación solicita al operador una inspección visual de los resultados para poder eliminar ruido (falsos positivos) en caso de que se hubieran producido. Este procedimiento realizado por el operador marcando los posibles falsos positivos en la pantalla con ayuda del ratón los descontaría antes del conteo final. Después de la inspección visual, se analiza la distribución de la energía acústica de los atunes contabilizados, de tal manera que, en los casos que dicho valor supere un umbral máximo, la contribución se consideraría proveniente de la suma de la energía de más de un ejemplar; aumentando el computo de atunes contabilizados en el conteo final.

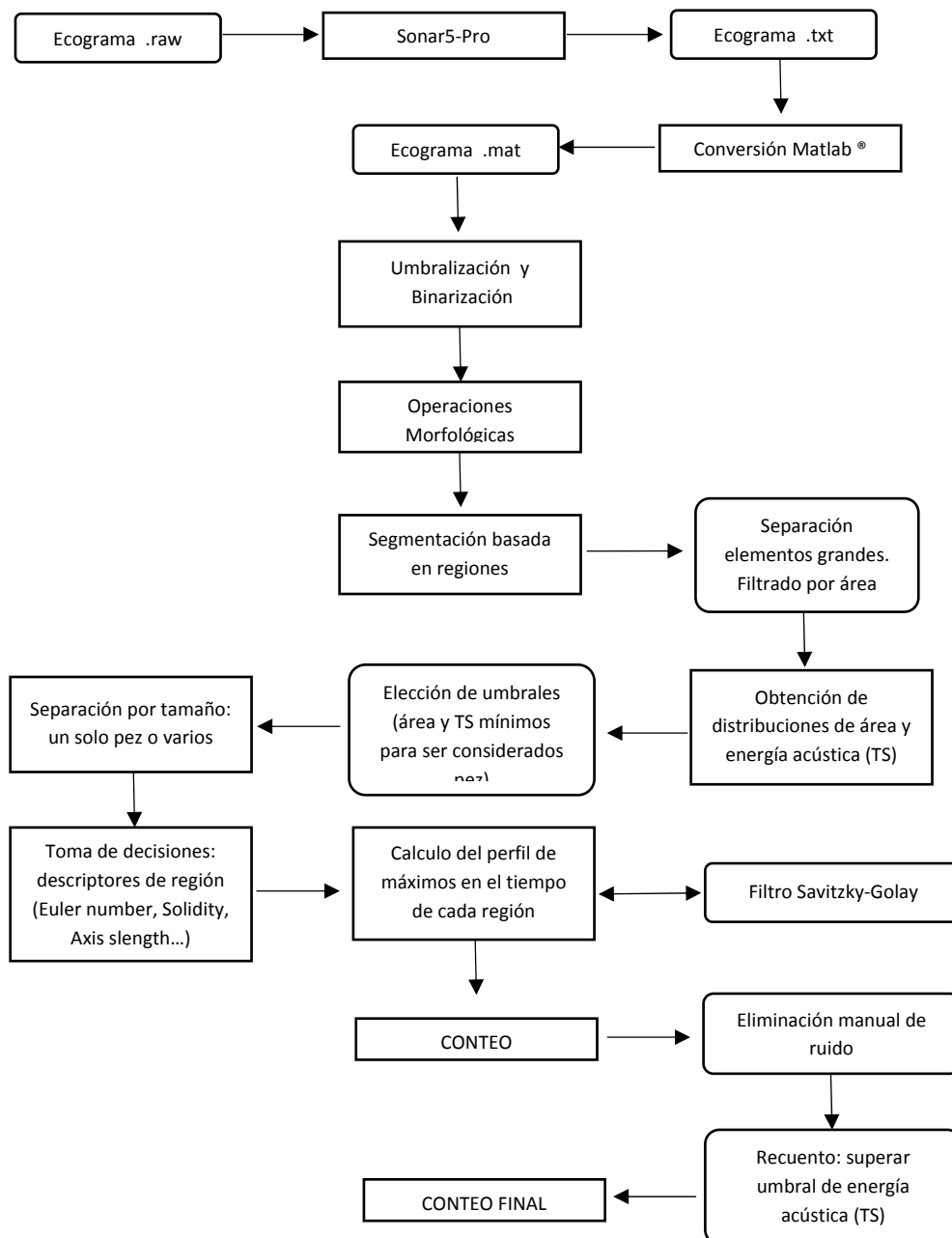


Figura 18. Esquema del procesado de los ecogramas.

Es conocido que cuando dos blancos se encuentran cerca, a la misma distancia del transductor, pero en zonas diferentes dentro del haz, los ecos procedentes de cada uno de los blancos pueden interferir entre ellos, sumándose cuando están en fase (aumentando el valor del eco recibido) o atenuando el valor del eco total recibido cuando no lo están. Para estimar el umbral que decidirá si el eco procede de un solo blanco o de más de uno se analizan los ecos de todos los blancos que se suponen individuales de varias transferencias. Se calculó el valor medio de la distribución de la energía acústica de los peces asilados y su desviación estándar y se observó que el percentil 95 de la distribución superaba en todo caso el valor de la media más la desviación estándar. Se fijó, por lo tanto, el percentil 95 (*P95*) de la distribución de la energía acústica máximo como el valor umbral que debía ser superado para considerar la energía proveniente de más de un pez.

## 5.2. Herramienta automática de análisis de los datos ópticos

El objetivo principal de la herramienta óptica desarrollada es disponer de una aplicación de procesamiento para identificar automáticamente los atunes en vídeos adquiridos en condiciones reales, bajo el agua. Además, al adquirir con el sistema estereoscópico el par de imágenes sincronizadas, la herramienta óptica proporcionará medidas de longitud y anchura de cada individuo detectado automáticamente. Todo ello con el objetivo global de obtener una estimación de la biomasa transferida o de distribución de tallas en jaulas de engorde.

Esta herramienta de análisis ópticos hace uso de técnicas basadas en el análisis y procesamiento de imágenes mediante visión por computador. Además para la identificación de atunes en imágenes utiliza un **modelo deformable 2D del cuerpo del atún** que se adapta al cuerpo del atún en su movimientos y flexiones mientras nada y que ha sido desarrollado íntegramente en el entorno de esta herramienta y para está utilidad. Se trata de utilizar técnicas no intrusivas y automáticas que tienen la ventaja de no estresar a los peces (el estrés puede causarles la muerte) y proporcionar **resultados continuos, objetivos y reproducibles**.

La herramienta de análisis óptico debe superar el hecho de que las imágenes reales de peces bajo el agua son generalmente de mala calidad porque sufren de rango limitado, de iluminación no uniforme, de bajo contraste y de color atenuado. Además, debe trabajar con las limitaciones causadas por la alta variabilidad de las condiciones del agua, las cuales, son difíciles de superar y representan un desafío para el procesamiento de imágenes. La Figura 19 muestra algunos fotogramas de vídeo utilizados en este trabajo que ilustran estas dificultades.

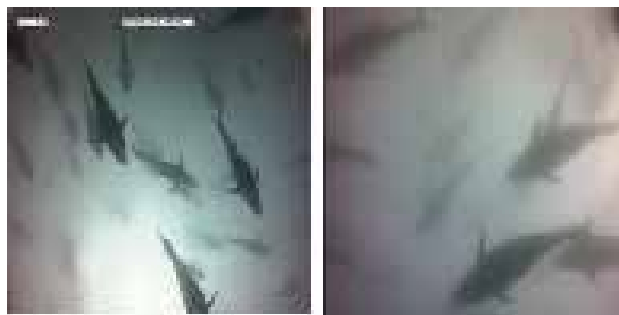


Figura 19. Fotogramas de video adquiridos en condiciones de visibilidad diferentes.

En los siguientes puntos de esta sección se describen los algoritmos de visión por computador involucrados en el proceso de dimensionado de los peces. Los pasos del procesamiento óptico y los resultados más significativos de cada paso se resumen en la Figura 20.

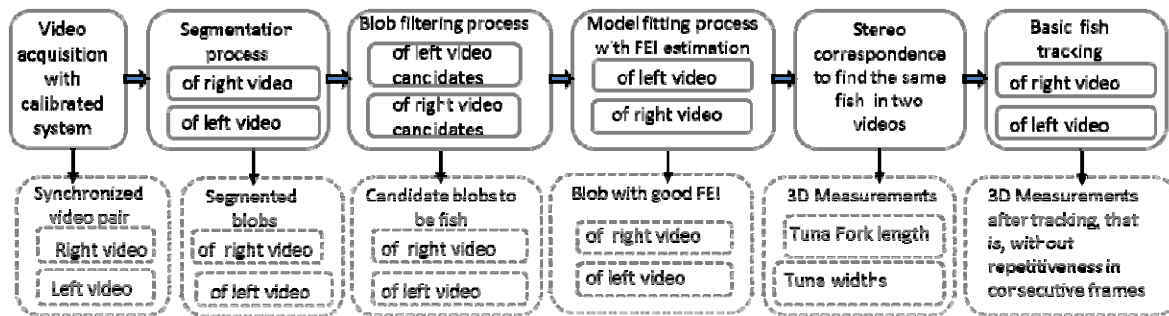


Figura 20. Diagrama que representa, en la primera fila, la secuencia del procesamiento óptico y, en la segunda fila, los resultados de cada paso.

### 5.2.1. Posicionamiento de las cámaras

Las cámaras se posicionarán siempre para tener una visión ventral del pez. Esta disposición de las cámaras tiene tres ventajas para estimar mediciones biométricas. Primera, con esta orientación la luz solar actúa como un sistema de retroiluminación, así los objetos son siempre más oscuros que el agua, lo que nos da la posibilidad de usar esta característica durante el procesamiento. Segunda, se puede observar mejor cuando el pez aparece recto (sin curvatura) para tener una mejor medición de la longitud. Tercera, las medidas más fiables en un sistema estereoscópico se obtienen cuando los peces nadan en un plano ortogonal al eje óptico de la cámara.

### 5.2.2. Procesamiento de frames: segmentación y filtrado

Nuestro procedimiento automático para estimar mediciones de peces en vídeos necesita extraer peces individuales a partir de imágenes. Los algoritmos de procesamiento de frames son aplicados independientemente a imágenes del vídeo izquierdo y derecho.

Se realiza una segmentación frame a frame utilizando técnicas basada en regiones o blobs (grandes objetos binarios), que da como resultado del proceso regiones candidatas a ser atunes.

Las técnicas de segmentación utilizadas, trabajan teniendo en cuenta que los vídeos presentan una luminosidad de fondo no uniforme, que el tono de pescado puede variar cuando se cruza el punto de luz solar e incluso esta tonalidad puede variar desde la cabeza hasta la cola de un mismo individuo. Además considera que en las imágenes el pescado siempre es más oscuro que el fondo ya que los videos están tomados enfocados hacia la superficie del agua.

Los resultados del proceso de segmentación empeoran cuando trabaja con imágenes de baja visibilidad y adquiridas en condiciones de mucho movimiento en el mar, dado a pesar de nuestros anclajes y la estructura propuesta, la cámara también sufre movimientos ligeros debido a las corrientes submarinas. La Figura 21 resume los procesos involucrados en la etapa de segmentación.

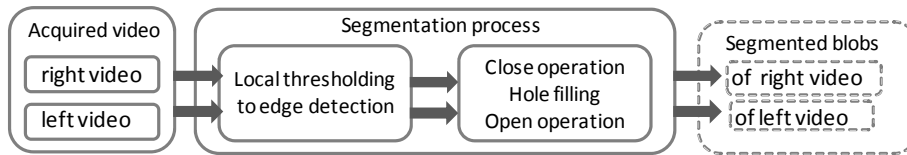


Figura 21. Etapas del proceso de segmentación llevado a cabo

Tras la segmentación se obtiene un conjunto de características de cada uno de los blobs candidatos y se procesan mediante filtros basados en la forma y dimensiones de los objetos.

### 5.2.3. Modelo deformable 2D del cuerpo del atún

La forma real (Figura 22) del cuerpo del atún rojo y algunos datos sobre su cinemática fueron estudiadas para transferir este conocimiento a un modelo 2D deformable que tenga en cuenta la curvatura del cuerpo de atún mientras está nadando. La forma modelada corresponde a una vista del atún desde abajo, ya que observamos durante nuestras adquisiciones de video que esta perspectiva del cuerpo del atún es bastante estable a pesar de sus movimientos y giros al nadar. El modelo desarrollado tiene en cuenta los puntos representativos de la silueta del atún y su gesto de natación.

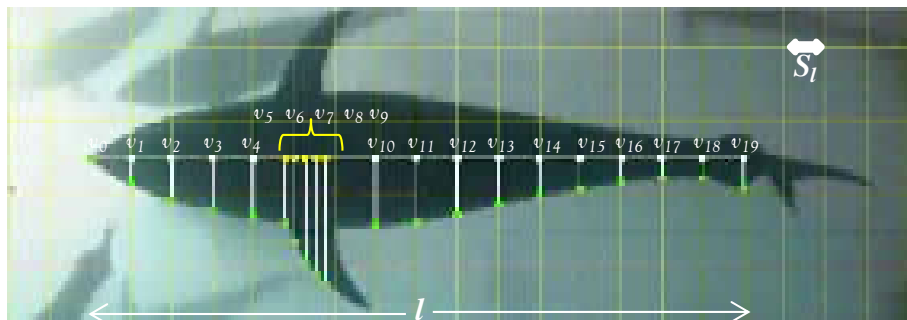


Figura 22. Modelo de contorno del atún utilizado para inferir el modelo 2D. Blanco y amarillo corresponden a puntos de referencia a lo largo de la columna vertebral, los puntos verdes corresponden al extremo del cuerpo del atún.  $S_l$  representa una unidad de medida utilizada de referencia en nuestro modelo.

A partir de 20 vertebras referenciadas obtuvimos un conjunto de coeficientes que nos permiten estimar los extremos del borde del cuerpo del atún a ambos lados de la columna vertebral respecto a dichas vertebras. Estos coeficientes que nos relacionan posición de vertebras y bordes del cuerpo del atún toman los siguientes valores para el caso de un atún no flexionado:  $c^u = [0, 0.7, 1.15, 1.35, 1.55, 1.65, 2.0, 2.5, 2.8, 3.15, 1.7, 1.55, 1.35, 1.1, 0.9, 0.7, 0.55, 0.45, 0.5, 0.75]$

Durante el movimiento de natación, los atunes realizan una flexión global que no se distribuye uniformemente a lo largo de la longitud de su cuerpo. Nosotros estimamos la flexión global de cada atún como el ángulo que formado entre la primera y la última vertebra (vertebras etiquetadas como  $v_0$  y  $v_{19}$  en la Figura 22).

A esta flexión global  $\theta$  contribuyen de manera diferente cada vertebra como muestra la Figura 23. El cálculo de la flexión de cada vertebra se basa en las expresiones:

$$\sum_{i=0}^{19} d\theta_i = \theta; \quad d\theta_i = \frac{\theta * \Delta\theta_i}{\sum_{i=0}^{19} \Delta\theta_j}; \quad \sum_{i=0}^{19} \Delta\theta_i = 16; \quad \forall v_i \in v;$$

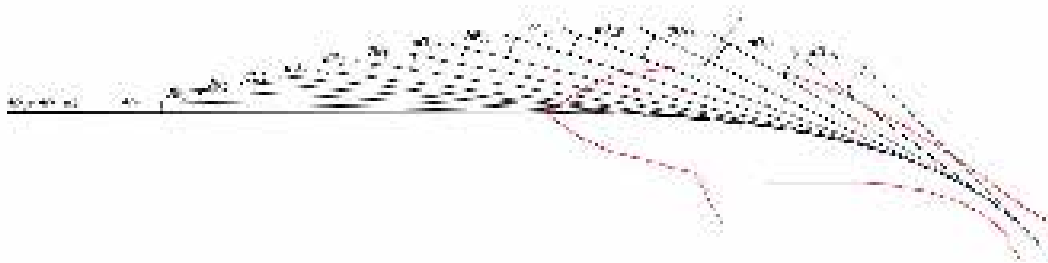


Figura 23. Modelización de la distribución no equitativa de la flexión a lo largo de los segmentos de la columna vertebral.

Los valores de los coeficientes  $\Delta\theta_i$  representan la contribución de la flexión de cada vertebra a la flexión global. Tras un estudio de la flexión de los individuos obtuvimos de cabeza a cola los siguientes valores para los coeficientes de flexión:

$$\Delta\theta = [ 0, 0, 0.64, 0.64, 0.48, 0.48, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.48, 0.64, 0.8, 0.96, 1.12, 1.28, 1.44, 1.92, 2.4, 2.72 ]$$

Los valores de estos coeficientes demuestran alta flexión en las vértebras cercanas a la cola y muy poca flexión en la cabeza. En este caso la flexión parcial de cada vertebra se obtendría con la expresión:

$$d\theta_i = \frac{\theta * \Delta\theta_i}{\sum_{i=0}^{19} \Delta\theta_j}; \quad \sum_{i=0}^{19} \Delta\theta_i = 16; \quad \forall v_i \in v;$$

Con la flexión de cada vertebra se calcula la curvatura de la columna vertebral del atún y se obtienen los puntos de referencia para el contorno de un atún detectado. Teniendo en cuenta las coordenadas de cada vertebra  $v_i = (x_i^v, y_i^v)$  se obtienen las coordenadas de los landmarks  $k_i = (x_i^k, y_i^k)$  utilizando las expresiones siguientes:

$$\begin{aligned} x_i^k &= x_i^v - S_l c_i \sin(\theta_i); & y_i^k &= y_i^v + S_l c_i \cos(\theta_i); & i &= 0, \dots, 19 \\ x_i^k &= x_{i-19}^v + S_l c_{i-19} \sin(\theta_{i-19}); & y_i^k &= y_{i-19}^v - S_l c_{i-19} \cos(\theta_{i-19}); & i &= 20, \dots, 39 \end{aligned}$$

La Figura 24 muestra imágenes obtenidas con nuestras expresiones para las vértebras y landmarks considerando tres flexiones diferentes del atún.

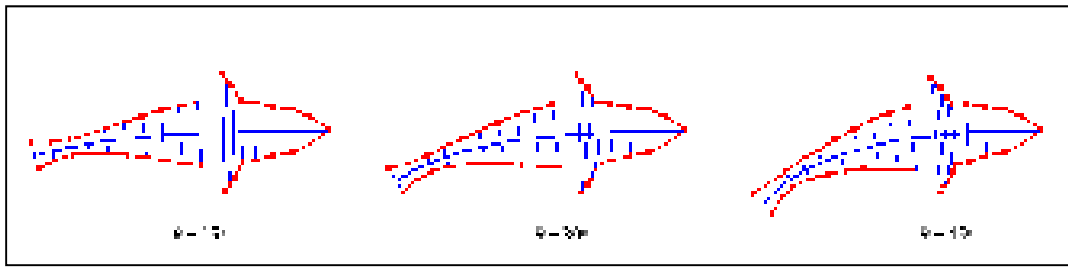


Figura 24. Contornos generados con nuestro modelo considerando tres caso de flexión global del atún  $\theta=15^\circ$ ,  $\theta=30^\circ$  y  $\theta=45^\circ$ .

Además de la capacidad de flexión por medio de parámetros  $\theta$ , nuestro modelo introduce cuatro parámetros (véase la Figura 25), que hacen que el modelo insensible a la traslación y la rotación.

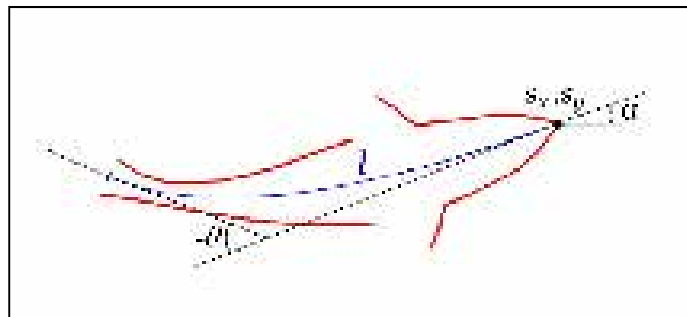


Figura 25. Representación gráfica de  $\mathbf{M} = [s_x, s_y, l, \alpha, \theta]$ , los cinco parámetros que definen el modelo de atún implementado.

Por lo tanto, nuestro modelo  $M$  de atún se define por un vector de cinco parámetros  $\mathbf{M} = [s_x, s_y, l, \alpha, \theta]$  donde: parámetros de traslación  $\mathbf{M} = [s_x, s_y, l, \alpha, \theta]$  y  $\mathbf{M} = [s_x, s_y, l, \alpha, \theta]$  dan la ubicación en la imagen del hocico;  $\mathbf{M} = [s_x, s_y, l, \alpha, \theta]$  es la longitud de la columna vertebral ( $l = 16 S_1$ ), que da el factor de escala;  $\alpha$  indica la rotación rígida del modelo, definido como el ángulo de la cabeza del pez en relación con el eje horizontal, y  $\theta$  es el ángulo de flexión global de la columna vertebral.

Los desarrollos realizadas en la temática del modelo deformable se publicaron en (Atienza-Vanacloig et al., 2016). Se continuó desarrollando el modelo para pasar de discriminar peces individuales a poder medir con precisión. Las siguientes modificaciones fueron introducidas:

- El número de puntos del modelo se ha incrementado a 18 y los puntos se han distribuidos de forma no equidistantes a lo largo de la longitud del pez: se han concentrado más puntos en la cola, una zona crucial para tener una buena estimación de la medición de longitud.
- El área alrededor de la aleta pectoral se evita, porque sus múltiples formas dificultan el ajuste del modelo.
- Un nuevo parámetro de anchura  $w$  se ha añadido a los ya existentes de longitud, orientación y curvatura.

La Figura 26 muestra un ejemplo del ajuste de este modelo modificado. Cabe destacar que el modelo va desde el morro del pez hasta el final de la quilla del pedúnculo caudal. La aleta caudal no puede ser incluida en el modelo debido a su gran variabilidad.

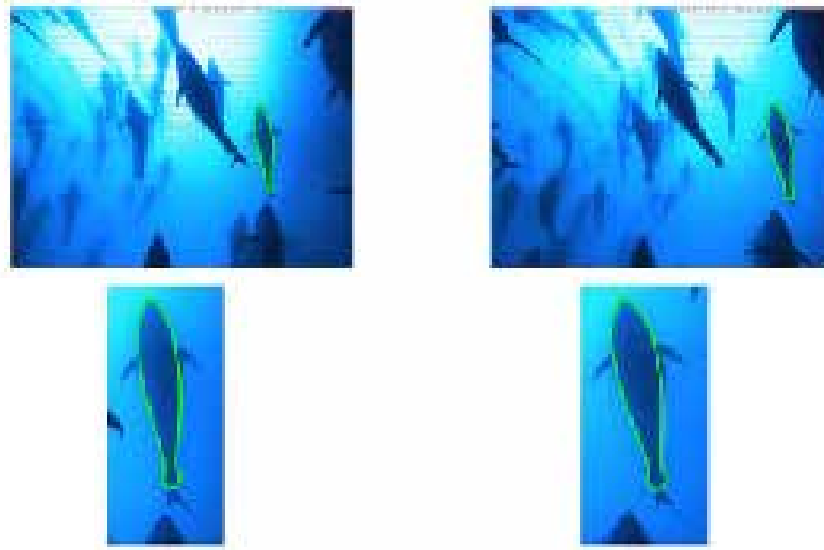


Figura 26. Ejemplo real del proceso de ajuste, en este caso se está utilizando un modelo de atún sin aletas laterales y que incluye el modelado del pedúnculo. Además la imagen representa el proceso para el par de imágenes estereoscópica y selecciona automáticamente un atún sin solapes con otros para obtener medidas biométricas fiables.

#### 5.2.4. Correspondencia estéreo

Dado que la posición relativa entre las dos cámaras del par estereoscópico es conocida gracias al paso previo de calibración, se utiliza la siguiente propiedad de la geometría epipolar para examinar la correspondencia entre peces del par de imágenes: los puntos de las imágenes se proyectan en la otra imagen sobre una línea epipolar. Esto es, conocidos dos puntos característicos del modelo en una de las imágenes, por ejemplo el inicio y fin del pez, los mismos puntos en la otra imagen deben estar sobre la línea epipolar definida por la calibración del par estereoscópico. Sólo existe correspondencia entre pares de imagen si se cumple esta condición. La Figura 27 muestra gráficamente como se obtiene la correspondencia.



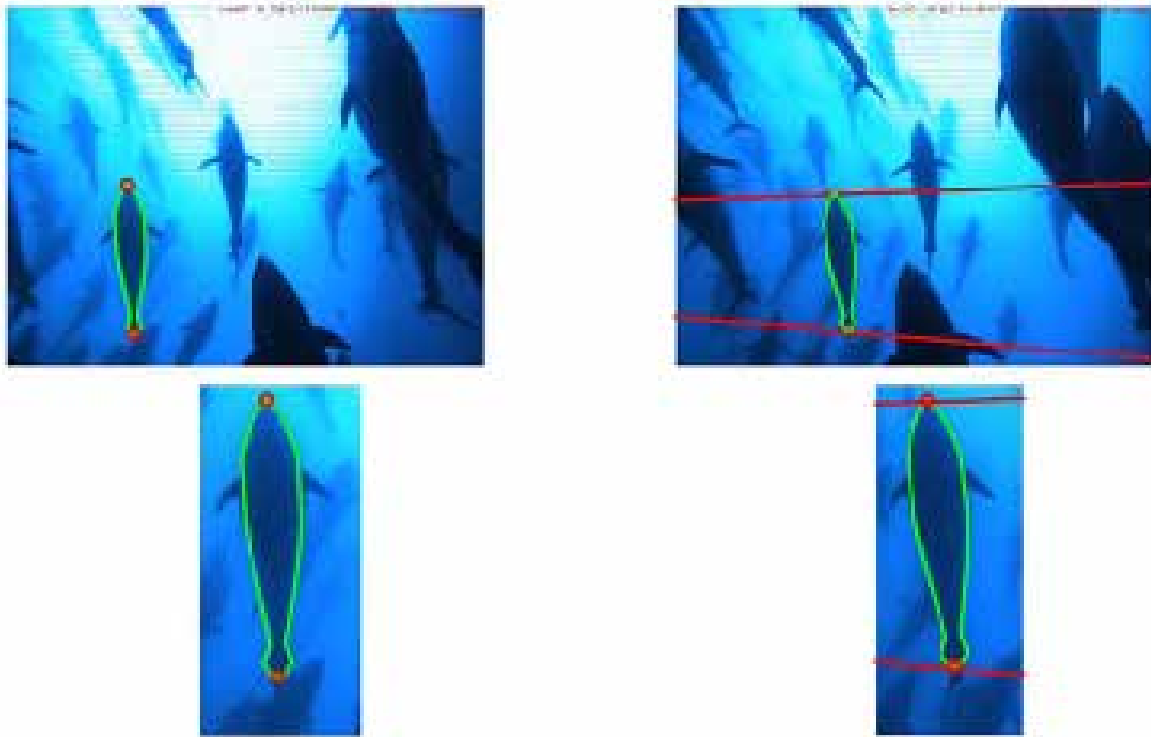


Figura 27. Representación gráfica del cálculo de la correspondencia entre individuos de pares de imágenes.

### 5.2.5. Mediciones con el sistema de visión estereoscópico

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

Para el cálculo de la longitud del pez, se usan las coordenadas 3D de los puntos morro y cola del modelo. La distancia al pez ( $Z$ ) se escoge como la media de las coordenadas  $Z$  de los dos puntos y la longitud 3D se calcula como la distancia euclídea entre estos dos puntos. Los resultados con longitudes o distancias fuera de los intervalos de trabajo son descartados.

Como se ha expuesto anteriormente, la aleta caudal no puede ser incluida en el modelo debido a su gran variabilidad, así que se necesita una relación entre la Fork Length (FL) y la Model Length (ML). Con este propósito, se procesaron manualmente 279 muestras para medir la Fork Length (FL) y compararla con la Model Length (ML). Las muestras debían cumplir los siguientes requisitos: la horquilla de la cola debe ser claramente identificable y debe estar alineada con los puntos morro y cola del modelo, como se puede ver en la Figura 28(a). Se realiza un ajuste polinomial, que da como resultado la relación lineal entre Fork Length (FL) y Model Length (ML) mostrada en Ec. 2.

$$FL = 1.0312 * ML + 0.065641 \quad (2)$$

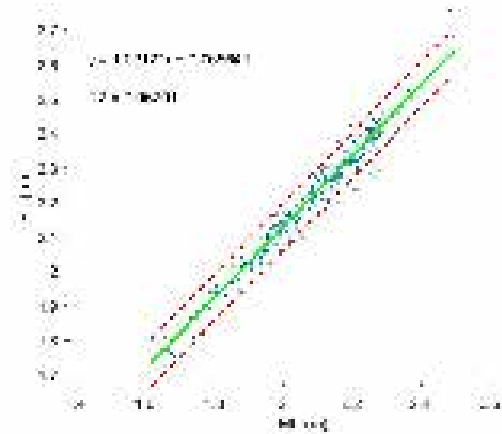
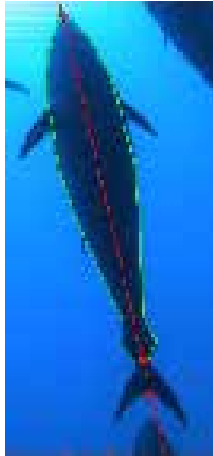


Figura 28. (a) Ejemplo de muestra seleccionada para estudiar la relación entre Fork Length (FL) y Model Length (ML). (b) Ajuste polinomial de la relación entre Fork Length (FL) and Model Length (ML). La línea verde representa el ajuste lineal y las líneas rojas discontinuas el intervalo de confianza del 95%.

Para el cálculo de la anchura de los peces, también se podrían utilizar las coordenadas 3D de los puntos correspondientes del modelo. Sin embargo, estos puntos están más influenciados por la perspectiva de la cámara, porque no son puntos extremos de la silueta. El mismo procedimiento de triangulación usado para el cálculo de longitud implica errores más grandes si los puntos en el par de imágenes no corresponden realmente al mismo punto 3D. Así pues, la propuesta para el cálculo de los anchos es ligeramente diferente. Se parte del modelo con mejor FEI, izquierdo o derecho. Se asume que los puntos característicos del modelo que definen los anchos a ambos lados de la silueta están a la misma distancia, la distancia del pez (Z) y se transforman individualmente al 3D usando esa distancia. El ancho se calcula como la distancia euclídea entre los correspondientes puntos 3D.

### 5.3. Herramienta semiautomática de análisis de los datos ópticos

Esta herramienta gráfica permite obtener longitud y anchura de peces de forma simple y con intervención mínima del usuario. Incorpora controles de navegación para moverse rápidamente por el vídeo y posibilidad de modificar los parámetros de segmentación para adaptarse a situaciones meteorológicas cambiantes que afectan a la visualización de la escena. Esta herramienta permite aumentar considerablemente el número de mediciones, que se añaden a los resultados del procedimiento automático. Los algoritmos de procesamiento son los mismos que los descritos en el apartado anterior.

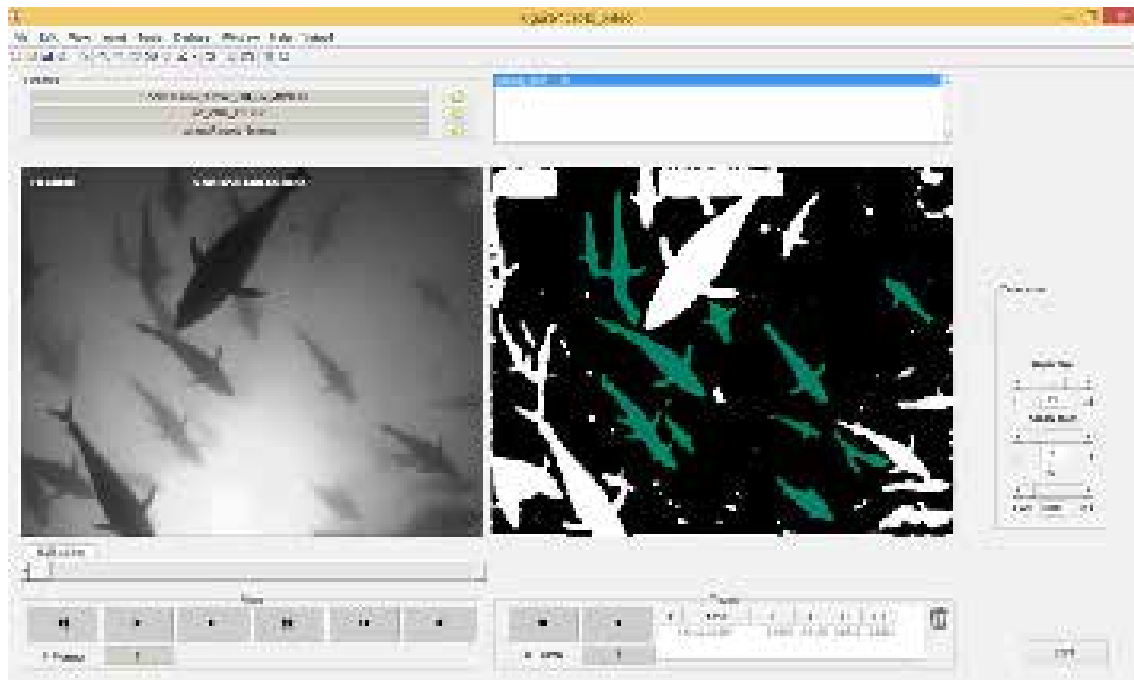


Figura 29. Herramienta semiautomática para medición de atunes.

#### 5.4. Análisis conjunto óptico-acústico en jaulas

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

Hay que indicar en este punto que el sistema estereoscópico (AM100) solo es capaz de realizar medidas con exactitud entre 2 y 10 metros, por lo que la búsqueda de correspondencias acústico-ópticas debía restringirse a ese rango. Pero, además, para garantizar que al menos la vejiga natatoria de los atunes estuviera totalmente insonificada, se optó por restringir el rango de búsqueda para las correspondencias acústico-ópticas entre 5 y 10 metros desde la posición de los sensores. Aunque no se conoce exactamente la relación entre la longitud del atún rojo y el tamaño de su vejiga, otros autores establecen que para especies de túnidos similares dicha relación es de cinco a uno, es decir que la longitud de la vejiga es la quinta parte de la longitud total del atún (Kurt & Oliver, 1998). La apertura del patrón de directividad a -3 dB es de alrededor de 7° para los transductores de ambas frecuencias, lo que indica que son capaces de cubrir una sección circular de 0.6 metros de diámetro, pensando que ese valor es el tamaño máximo de una vejiga que podría estar totalmente insonificada a una distancia de 5 metros, se puede deducir que el tamaño máximo de atún que puede ser medido a 5 metros estaría entorno a los 3 metros de longitud total (Figura 30). Partiendo de todas estas

consideraciones, se aplicaron las limitaciones de rango de búsqueda de las coincidencias acústico-ópticas y de tamaño máximo de los atunes.

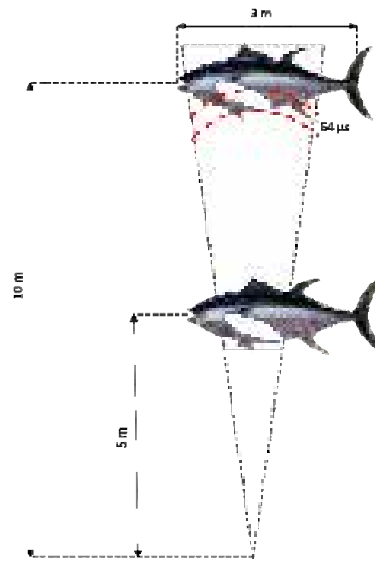


Figura 30. Esquema en el que se muestra una vejiga de un atún de 3 metros totalmente insonificada a 5 metros del transductor.

Una vez obtenidas todas las correspondencias, se agrupan los peces por tamaño, en grupos de 10 cm para el caso de la longitud y en grupos de 2.5 cm cuando se considera la anchura. Para dar un grupo por válido, éste debe disponer al menos de 40 muestras de un determinado tamaño.

## 6. Mediciones automáticas en jaulas

Objetivo 1 del proyecto: Desarrollar un sistema automatizado de obtención de la distribución de tallas de los atunes en una jaula flotante.

### 6.1. Configuración para adquisición en jaulas

En esta sección se describen los sensores acústicos y ópticos utilizados para la adquisición de datos en jaulas de engorde y su disposición en la plataforma flotante. En la Figura 31 se muestran imágenes de la plataforma con los sensores, tomadas durante una de las experimentaciones en jaulas de engorde. La plataforma se sitúa a 20 metros de profundidad en las jaulas de engorde mirando hacia la superficie, para que los sistemas estereoscópicos tengan la visión ventral del pez.

Los sistemas ópticos montados en la adquisición en jaulas han sido tanto el sistema estereoscópico AQ1 como el AI2. El sistema AQ1 monitoriza las jaulas en los cinco meses inmediatamente posteriores a la llegada de los atunes, lo que nos permite extraer información de la evolución de las dimensiones con el tiempo. El sistema AI2 se incorpora a la monitorización en el mes de octubre.

Como se indica en el punto 4.2.1, para el registro de los datos acústicos se utilizan dos ecosondas EK-60 de Simrad trabajando con dos transductores de haz dividido, una trabajando a 120 kHz y la otra a 200 kHz.

Para poder realizar las medidas de manera sincronizada, se utilizó el mismo ordenador para gobernar todos los equipos (ecosondas y cámaras), conectándose todos al ordenador por medio de un switch.

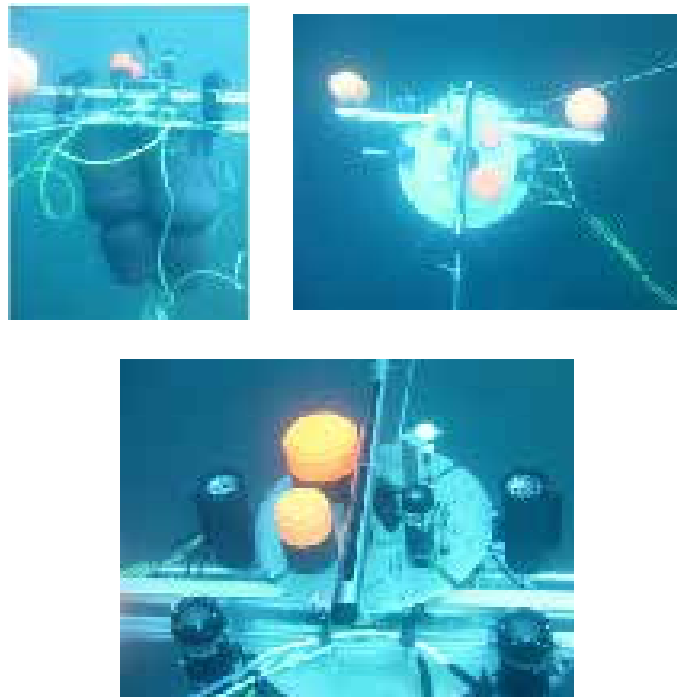


Figura 31. Detalle de la plataforma colocada en las jaulas de engorde con todos los sensores acústicos y ópticos.

## 6.2. Campañas de medida realizadas

En la Tabla 15 se muestra un resumen de los datos recolectados entre julio y noviembre de 2015 en las jaulas del Grup Balfegó.

JAULA 16		
JULIO	SPLIT 200 KHZ + AQ1	SPLIT 120 KHZ + AQ1
AGOSTO	SPLIT 200 KHZ + AQ1	SPLIT 120 KHZ + AQ1
SEPTIEMBRE	SPLIT 200 KHZ + AQ1	SPLIT 120 KHZ + AQ1
OCTUBRE	SPLIT 200 KHZ + AQ1 + AI2	SPLIT 120 KHZ + AQ1 + AI2
NOVIEMBRE	SPLIT 200 KHZ + AQ1	SPLIT 120 KHZ + AQ1
JAULA 18		
JULIO	SPLIT 200 KHZ + AQ1	SPLIT 120 KHZ + AQ1
AGOSTO	SPLIT 200 KHZ	SPLIT 120 KHZ
SEPTIEMBRE	SPLIT 200 KHZ + AQ1	SPLIT 120 KHZ + AQ1
OCTUBRE	SPLIT 200 KHZ + AQ1 + AI2	SPLIT 120 KHZ + AQ1 + AI2
NOVIEMBRE	SPLIT 200 KHZ + AQ1	SPLIT 120 KHZ + AQ1
JAULA 20		
JULIO	SPLIT 200 KHZ + AQ1	SPLIT 120 KHZ + AQ1
AGOSTO	SPLIT 200 KHZ + AQ1	SPLIT 120 KHZ + AQ1
SEPTIEMBRE	SPLIT 200 KHZ + AQ1	SPLIT 120 KHZ + AQ1
OCTUBRE	SPLIT 200 KHZ + AQ1 + AI2	SPLIT 120 KHZ + AQ1 + AI2
NOVIEMBRE	SPLIT 200 KHZ + AQ1	SPLIT 120 KHZ + AQ1

Tabla 15. Datos recolectados entre julio y noviembre de 2015 en las jaulas del Grup Balfegó.

### 6.3. Resultados de medida sólo óptica en jaulas

#### 6.3.1. Grabaciones con sistema de visión estereoscópico AQ1

Se realizaron grabaciones con el sistema de visión estereoscópico AQ1 durante los cinco meses consecutivos después del enjaulamiento, entre julio y noviembre de 2015, en tres jaulas de engorde. No se han podido procesar los vídeos de agosto de la jaula J18 por estar corruptos, ni los de noviembre por las condiciones de mala visibilidad.

Se han procesado automáticamente un total de 12 pares de videos, con una duración aproximada de 120 minutos y con 100000 frames cada uno. Así pues, más de 2 millones de frames han sido analizados. El modelo propuesto ha ajustado satisfactoriamente en imágenes individuales en más de 1.4 millones de blobs, y se han obtenido más de 100000 mediciones 3D. El procedimiento tiene un coste computacional de unas 5 horas por cada jaula y mes. En este sentido, cabe destacar que el objetivo en las jaulas es obtener el máximo número de muestras posible, sin ser tan importante el tiempo de cómputo. Se prevé trabajar en la optimización del procedimiento y de la implementación para conseguir disminuir el tiempo de cómputo de cara a aplicaciones donde el tiempo es un factor importante, como por ejemplo para la estimación in situ de biomasa en transferencias entre jaulas.

	NÚMERO DE FRAMES	AJUSTE DEL MODELO		MEDICIONES 3D
		VIDEOS IZQUIERDA	VIDEOS DERECHA	
JULIO	648180	212562	231973	31717
AGOSTO	324750	184316	192719	25389
SEPTIEMBRE	646220	199090	181340	31215
OCTUBRE	650210	124712	129521	16695
TOTAL	2269360	720680	735553	105016

Tabla 16. Número de frames, número de ajustes satisfactorios del modelo y mediciones 3D obtenidas automáticamente en las tres jaulas entre julio y octubre.

En la Tabla 17 se puede observar el número de muestras que se han extraído de cada una de las grabaciones con el software automático desarrollado en el proyecto Biacop.

AQ1	J16	J18	J20	TOTAL
JULIO	3874	19521	7536	<b>30931</b>
AGOSTO	7598	-	16991	<b>24589</b>
SEPTIEMBRE	4915	14994	11901	<b>31810</b>
OCTUBRE	6106	3365	5709	<b>15180</b>
NOVIEMBRE	-	-	-	-
<b>TOTAL</b>	<b>22493</b>	<b>37880</b>	<b>42137</b>	<b>102510</b>

Tabla 17. Muestras extraídas con el procedimiento automático en las jaulas del Grup Balfegó con grabaciones AQ1

Se plantean los siguientes puntos para validar el procedimiento de medida y obtener relaciones biométricas a lo largo del tiempo en las jaulas de engorde:

- Evolución de longitud (L) por jaulas y meses.
- Evolución de distintos anchos ( $A_i$ ) por jaulas y meses
- Relación longitud – anchos (L- $A_i$ ) por jaulas y meses.
- Comparativa de longitud (L) con datos aportados por la inspección de pesca y por el Grup Balfegó en el momento de enjaulamiento.
- Comparativa de longitud (L) con sacrificios.

Las distribuciones estadísticas se presentan en histogramas normalizados, con la dimensión a medir en el eje X y el porcentaje de muestras del total en el eje Y.

En las leyendas de las figuras que lo requieran, se especifica la media de la dimensión a medir ( $\bar{L}$  o  $\bar{D}$ ) el número de muestras analizadas (n) y el número de peces en el momento de la grabación (p).

De entre todas las grabaciones, se observa un hecho aislado en septiembre J18 aparece un número elevado de muestras en longitudes menores, entre 1 y 1.80 metros (ver Figura 32). Según los datos aportados por el Grup Balfegó en J18 hubo muy pocos sacrificios de ejemplares entre grabaciones y no hubo ninguna incorporación, había prácticamente los mismos peces en todos los meses. La explicación a este fenómeno estaría relacionada con el comportamiento de los peces o la situación concreta de los equipos de medida en la jaula.

Este comportamiento no aparece en ningún otro mes ni jaula, por lo que se decide hacer la comparativa sin incluir dichas muestras.

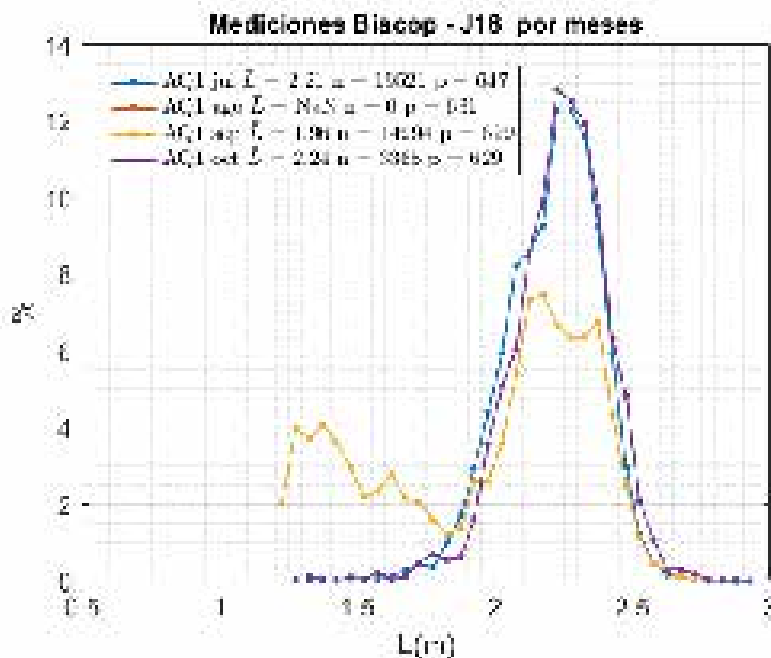


Figura 32. Elevado número de muestras pequeñas en septiembre J18, excluidas en la comparativa.  $\bar{L}$ , media de longitud; n, número de muestras analizadas; p, número de peces en el momento de la grabación.



### 6.3.1.1. Evolución de longitud (L) por jaulas y meses.

En la Figura 33 se muestran las distribuciones de longitud L a lo largo de los meses, por jaulas (Figura 33a, Figura 33b, Figura 33c) y con todas las jaulas juntas (Figura 33d).

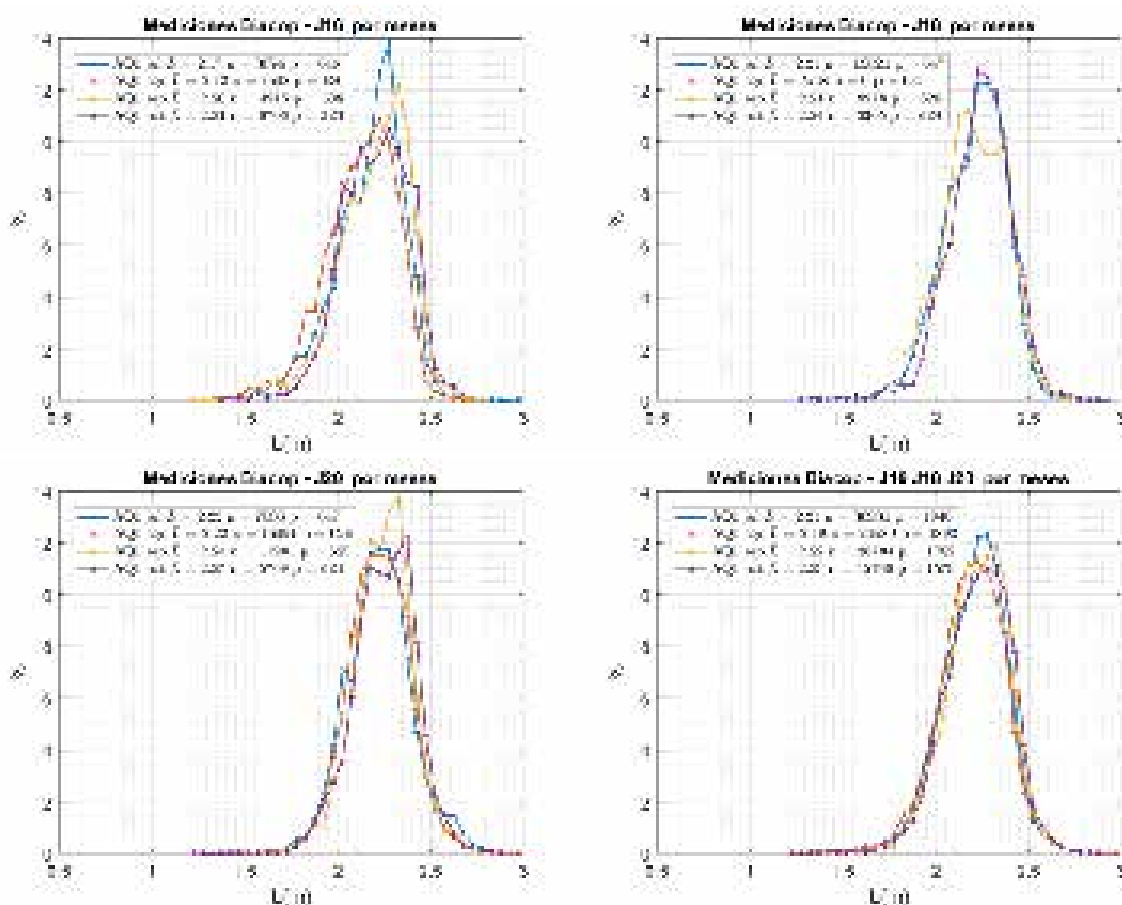


Figura 33. Distribuciones de longitud L con grabaciones AQ1 por meses en las jaulas del Grup Balfegó.

$\bar{L}$ , media de longitud; n, número de muestras analizadas; p, número de peces en el momento de la grabación.

### Conclusiones

Según se puede comprobar en la Figura 33d, donde se agrupan las muestras de todas las jaulas, las distribuciones de longitud son muy similares a lo largo de los meses. Esto implica que durante los meses de grabación, de julio a octubre, la longitud se mantiene más o menos constante, como se muestra en la Figura 34.

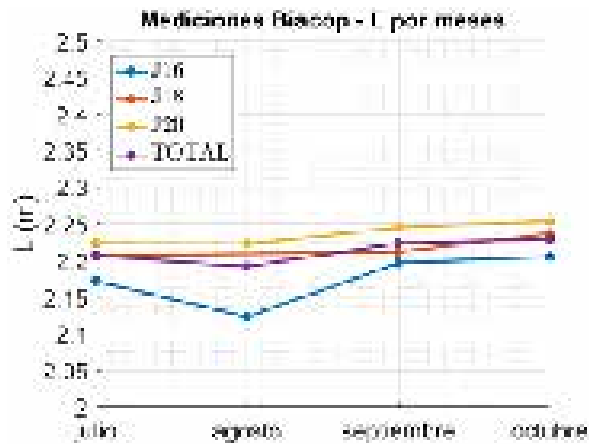


Figura 34. Evolución de la media de longitud L a lo largo de los meses

### 6.3.1.2. Evolución de distintos anchos ( $A_i$ ) por jaulas y meses

Se establecen cinco puntos de la silueta del pez para estudiar el engorde con los meses, tal y como se muestra en la Figura 35.



Figura 35. Puntos de estudio del engorde de los peces con los meses.

En la Figura 36 se muestran las distribuciones de ancho máximo  $A_1$  a lo largo de los meses, por jaulas (Figura 36a, Figura 36b, Figura 36c y Figura 36d). En Figura 37, Figura 38, Figura 39 y Figura 40 se hace lo mismo para los anchos  $A_2$ ,  $A_3$ ,  $A_4$  y  $A_5$ .

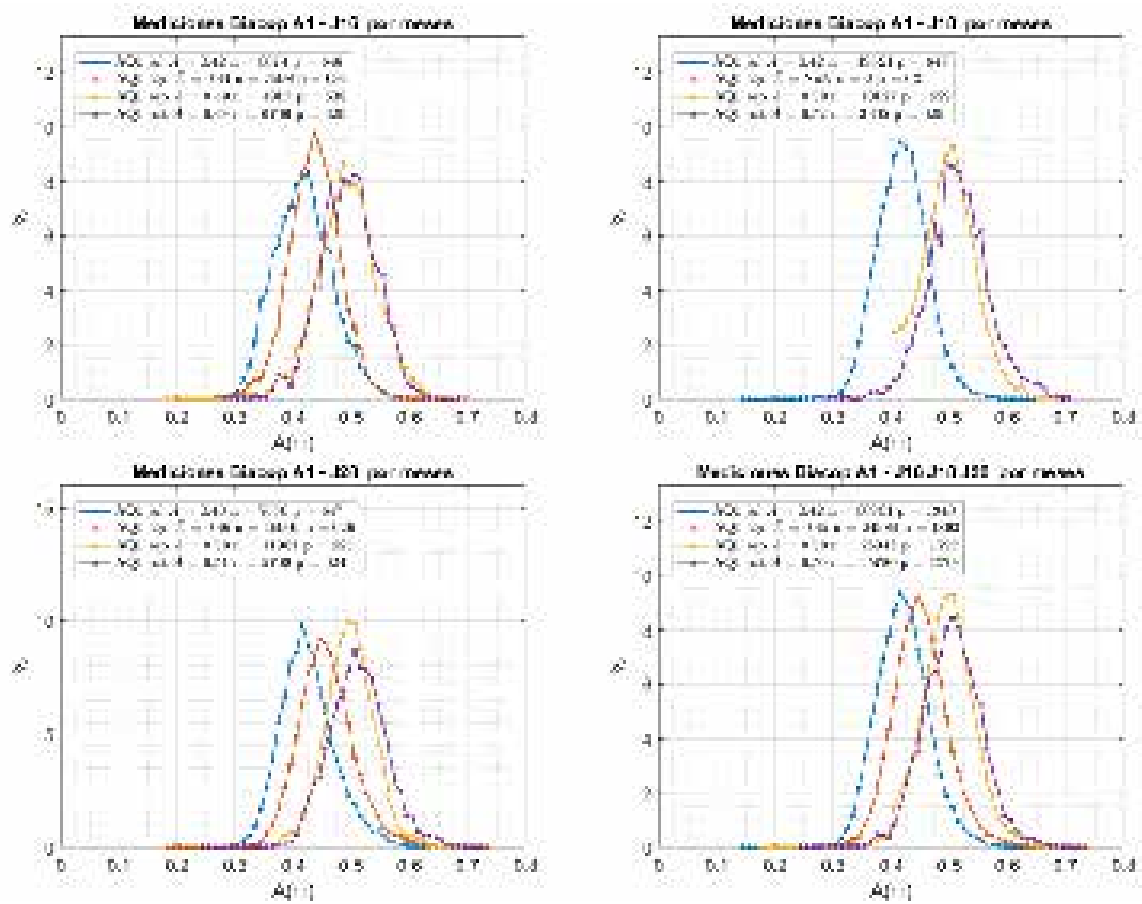


Figura 36. Distribuciones de ancho máximo  $A_1$  con grabaciones AQ1 por meses en las jaulas del Grup Balfegó.  $\bar{A}$ , media de ancho; n, número de muestras analizadas; p, número de peces en el momento de la grabación.

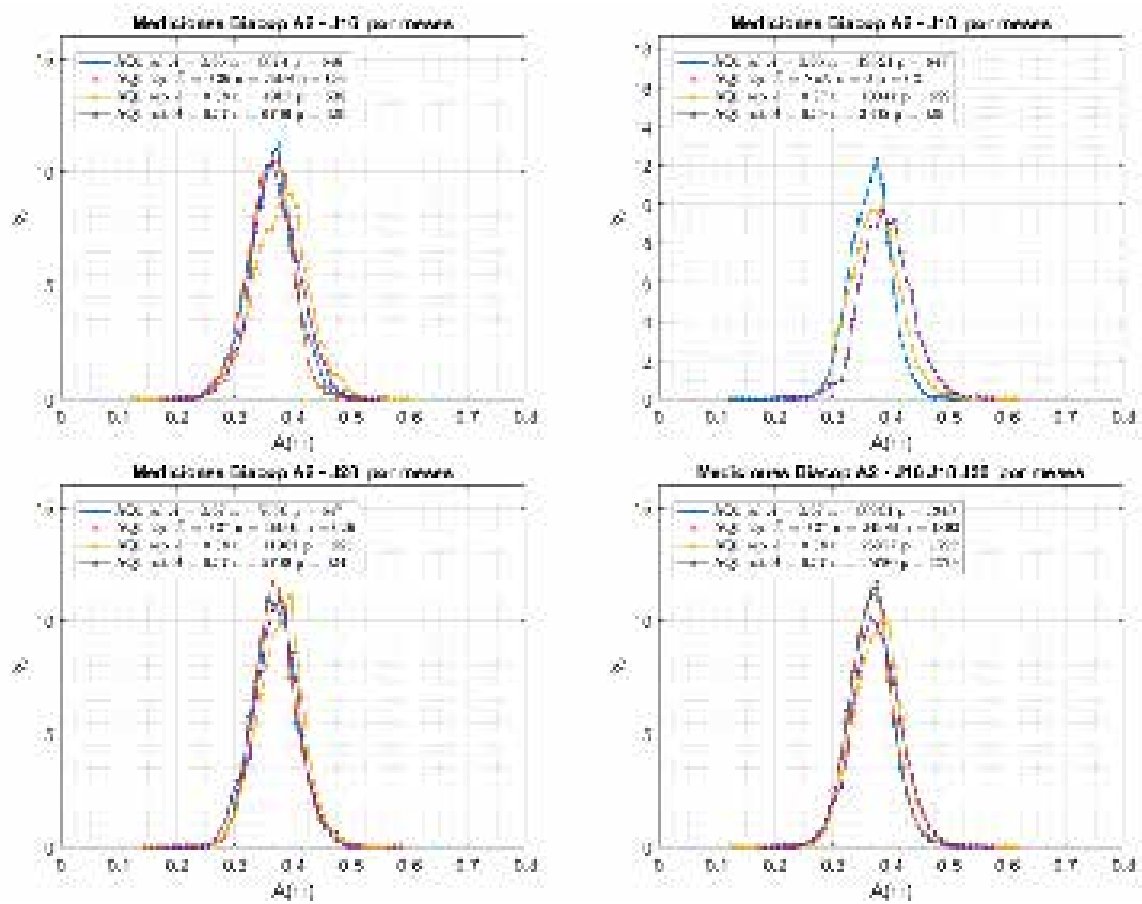


Figura 37. Distribuciones de ancho  $A_2$  con grabaciones AQ1 por meses en las jaulas del Grup Balfegó.  $\bar{A}_2$ , media de ancho;  $n$ , número de muestras analizadas;  $p$ , número de peces en el momento de la grabación.

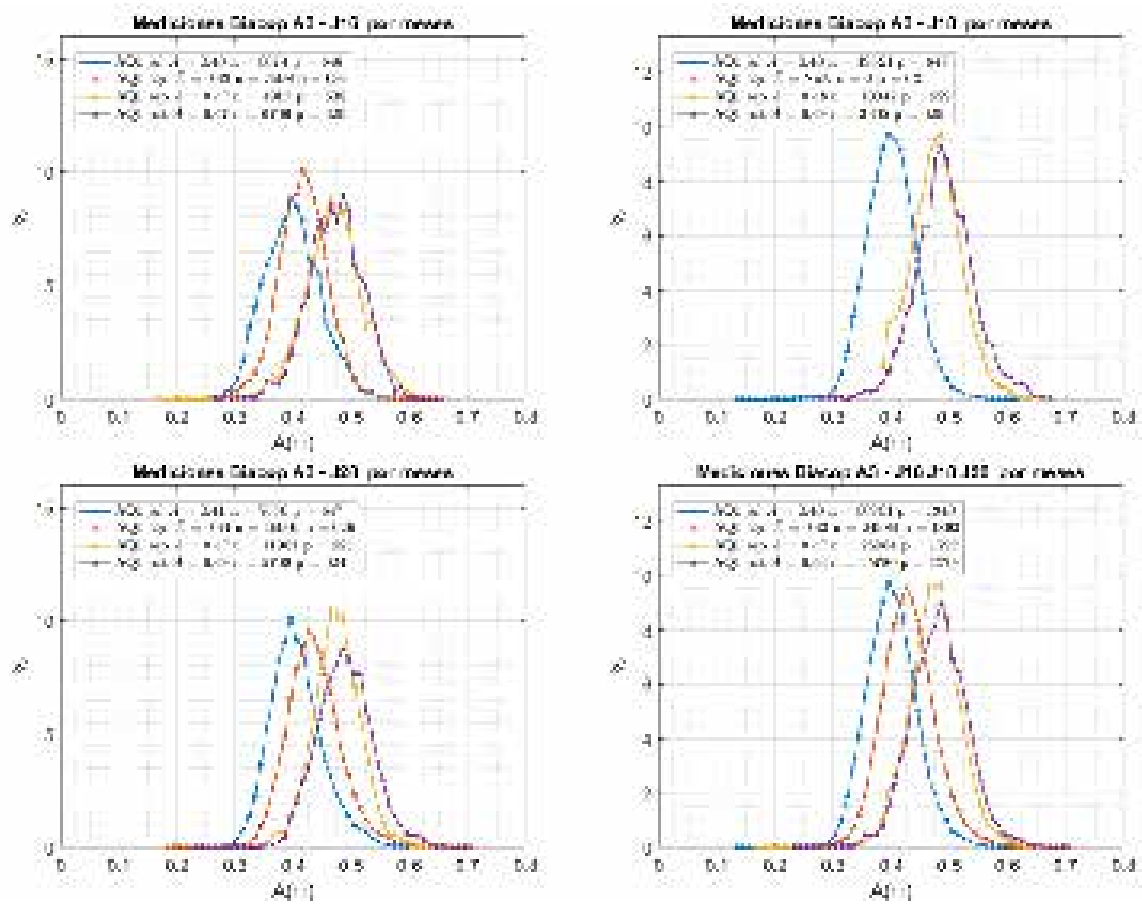


Figura 38. Distribuciones de ancho  $A_3$  con grabaciones AQ1 por meses en las jaulas del Grup Balfegó.  $\bar{A}_j$ , media de ancho; n, número de muestras analizadas; p, número de peces en el momento de la grabación.

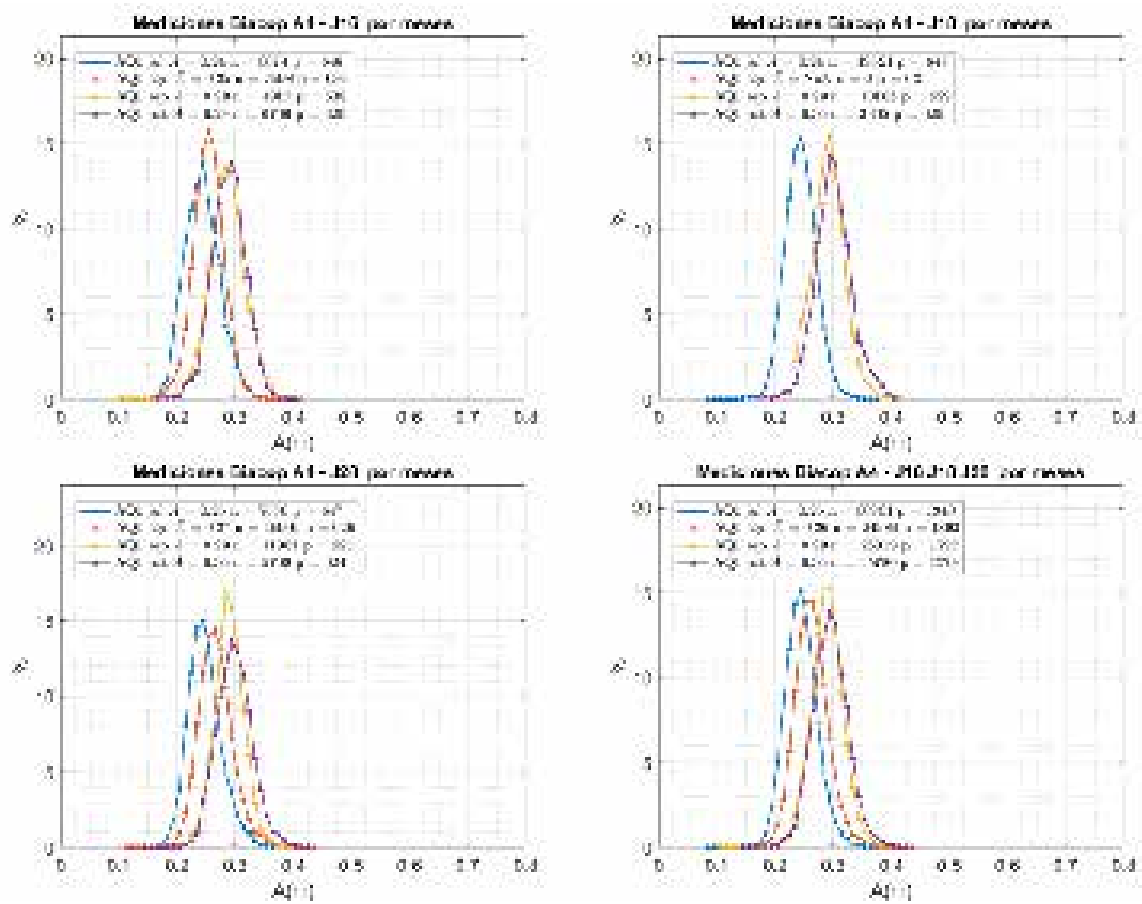


Figura 39. Distribuciones de ancho máximo  $A_4$  con grabaciones AQ1 por meses en las jaulas del Grup Balfegó.  $\bar{A}_4$ , media de ancho; n, número de muestras analizadas; p, número de peces en el momento de la grabación.

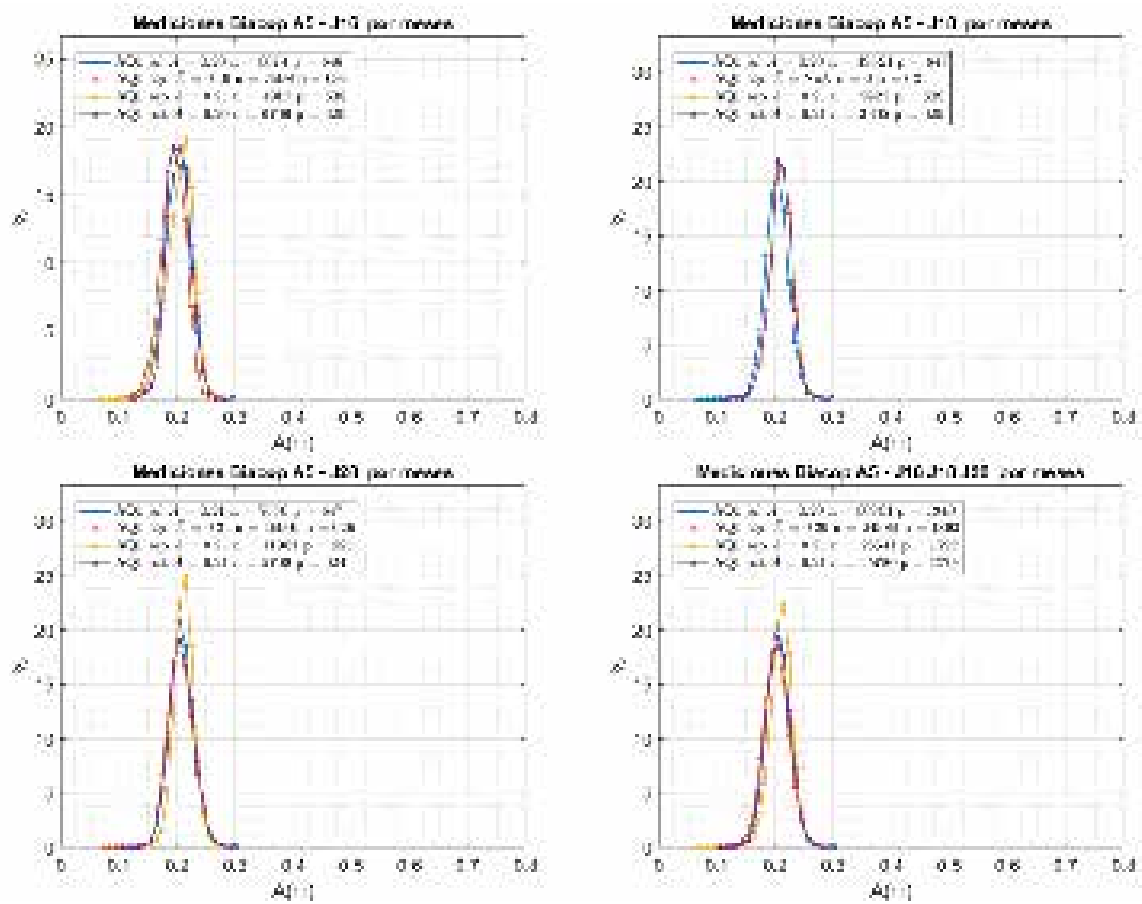


Figura 40. Distribuciones de ancho máximo  $A_5$  con grabaciones AQ1 por meses en las jaulas del Grup Balfegó.  $\bar{A}$ , media de ancho; n, número de muestras analizadas; p, número de peces en el momento de la grabación.

## Conclusiones

Según se puede comprobar en Figura 36d, Figura 37d, Figura 38d, Figura 39d y Figura 40d, donde se agrupan las muestras de todas las jaulas, las distribuciones de anchos mantienen la misma forma, pero algunas están desplazadas a lo largo de los meses. Esto implica que durante los meses de grabación, de julio a octubre, la media de algunos anchos varía mientras otras se mantienen constantes. En la Figura 41 se muestra las variaciones de cada uno de los anchos por jaulas y con todas las jaulas juntas y en la Figura 42 la evolución de los anchos juntando todas las jaulas.

Las medias de ancho máximo  $A_1$  y los anchos  $A_3$  y  $A_4$  se incrementan notablemente durante los dos primeros meses, mientras que se incrementa muy poco (menos de 1 cm) en el tercero. En cambio los anchos  $A_2$  y  $A_5$  no varían.

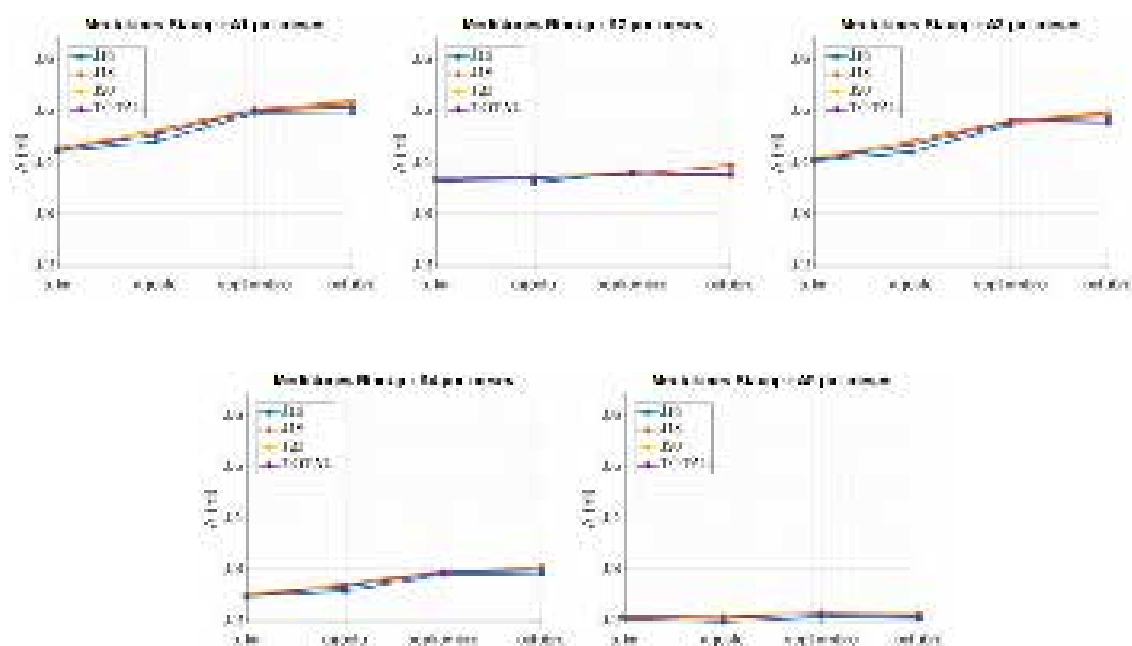


Figura 41. Evolución de la media de ancho máximo  $A_1$  y anchos  $A_2$ ,  $A_3$ ,  $A_4$  y  $A_5$  por jaulas y todas las jaulas juntos a lo largo de los meses.

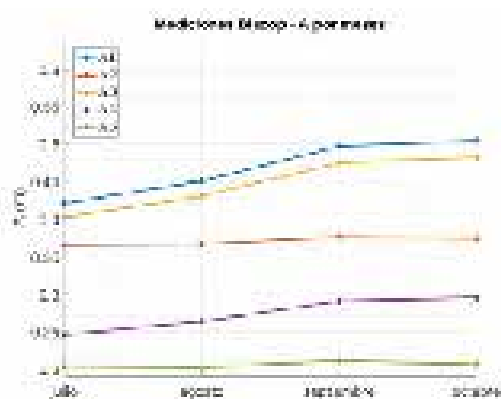


Figura 42. Evolución de la media de ancho máximo  $A_1$  y anchos  $A_2$ ,  $A_3$ ,  $A_4$  y  $A_5$  con todas las jaulas juntas a lo largo de los meses.



### 6.3.1.3. Relación longitud – anchos ( $L-A_i$ ) por jaulas y meses.

Se pretende analizar la relación  $L-A_i$  y su evolución a lo largo de los meses. Para ello, la información se presenta en dos tipos de gráficas: la primera, un diagrama de dispersión con todas las muestras que relaciona  $L$  y  $A_i$  por meses, agrupando todas las jaulas; la segunda, una relación con  $L$  discretizada en intervalos de 5 centímetros en el eje de abscisas y la media de los anchos  $\bar{A}_i$  para cada uno de los intervalos de longitud en el eje de ordenadas, por jaulas y agrupando las jaulas. Estas gráficas se repiten para cada uno de los anchos: **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y Figura 44 para  $A_1$ ; Figura 45 y Figura 46 para  $A_2$ ; Figura 47 y Figura 48 para  $A_3$ ; Figura 49 y Figura 50 para  $A_4$ ; Figura 51 y Figura 52 para  $A_5$ .

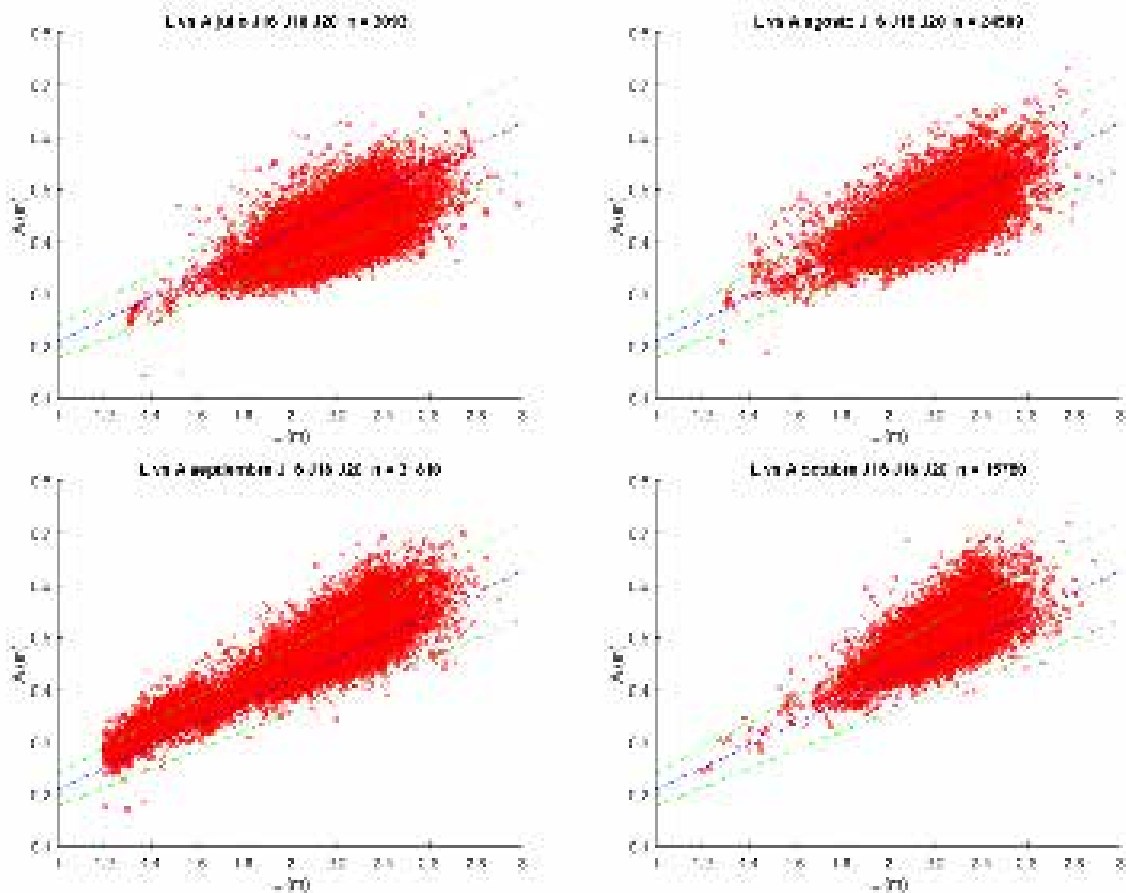


Figura 43. Diagrama de dispersión de longitud  $L$  frente a ancho máximo  $A_1$  con grabaciones AQ1 por meses en las jaulas del Grup Balfegó.

Las líneas discontinuas marcan la relación  $L - A$  teórica con un margen de  $\pm 15\%$

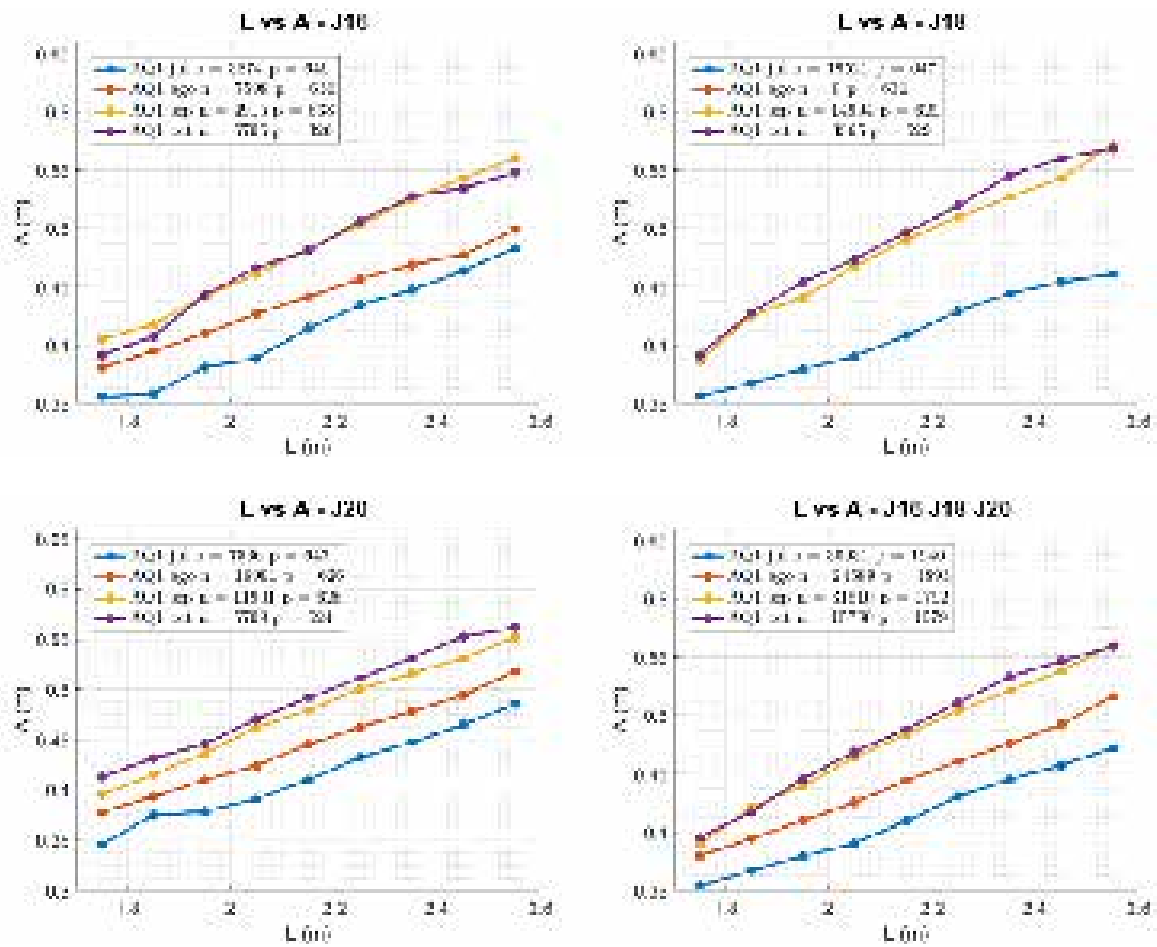


Figura 44. Relación entre longitud  $L$  y ancho máximo  $A_1$  discretizada cada 5 centímetros en  $L$  con grabaciones AQ1 por meses en las jaulas del Grup Balfegó.  
 $n$ , número de muestras analizadas;  $p$ , número de peces en el momento de la grabación

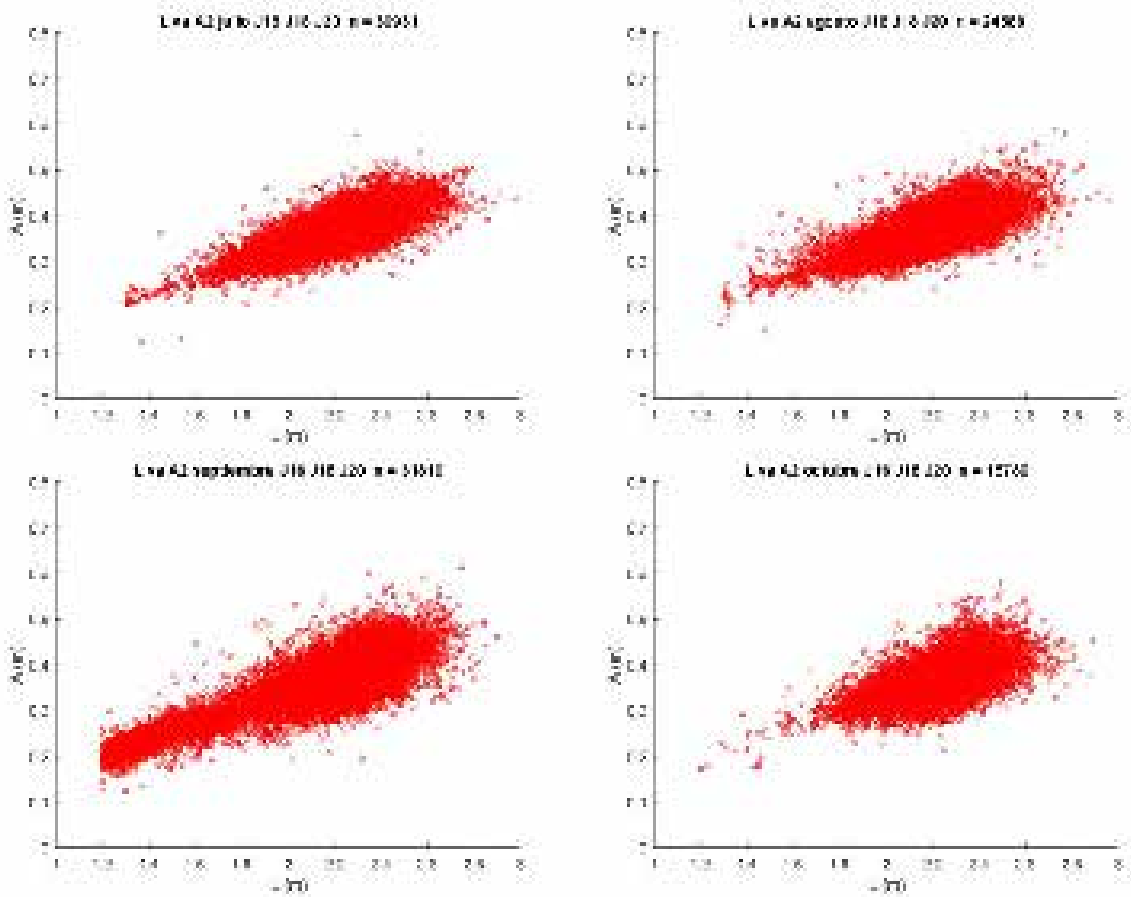


Figura 45. Diagrama de dispersión de longitud L frente a ancho máximo A con grabaciones AQ1 por meses en las jaulas del Grup Balfegó.  
Las líneas discontinuas marcan la relación L – A teórica con un margen de +/-15%

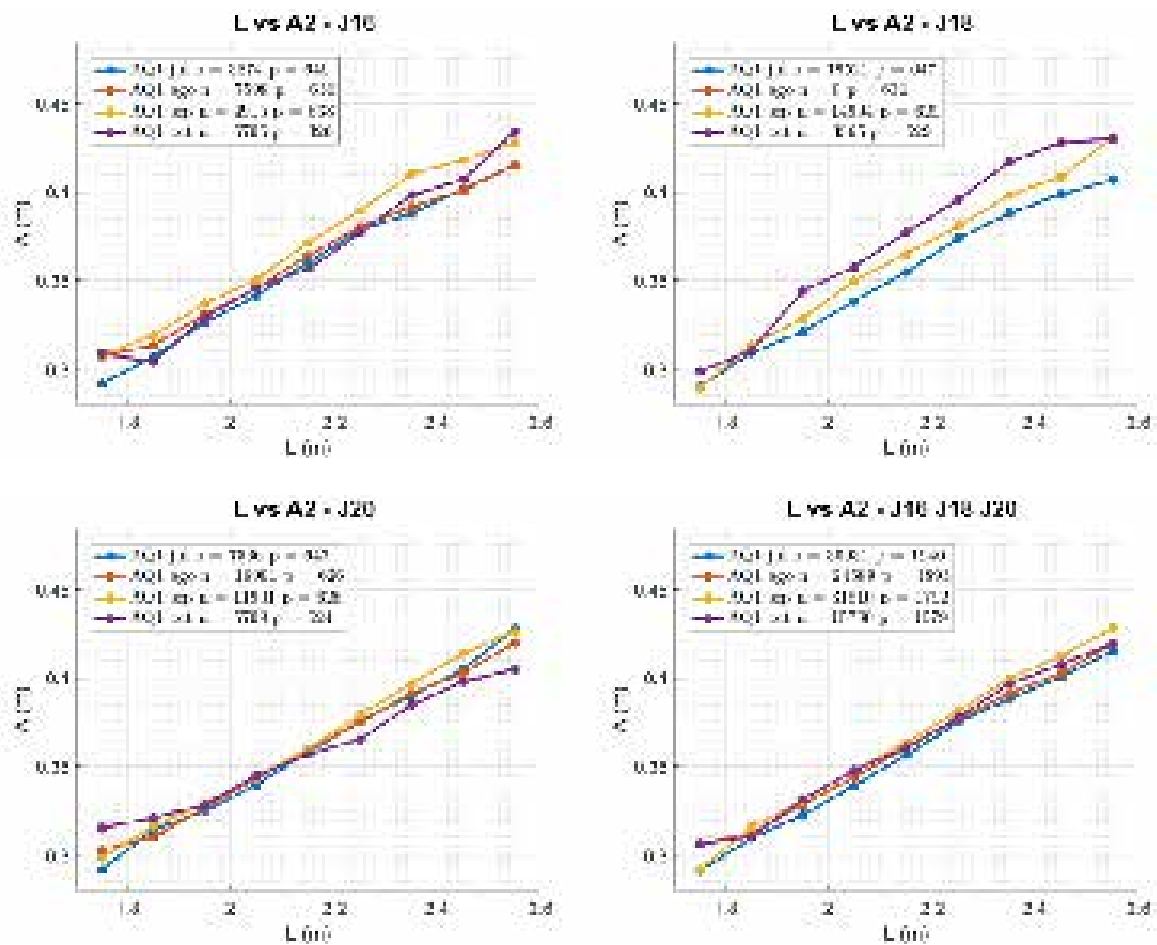


Figura 46. Relación entre longitud L y ancho máximo A discretizada cada 5 centímetros en L con grabaciones AQ1 por meses en las jaulas del Grup Balfegó.

n, número de muestras analizadas; p, número de peces en el momento de la grabación

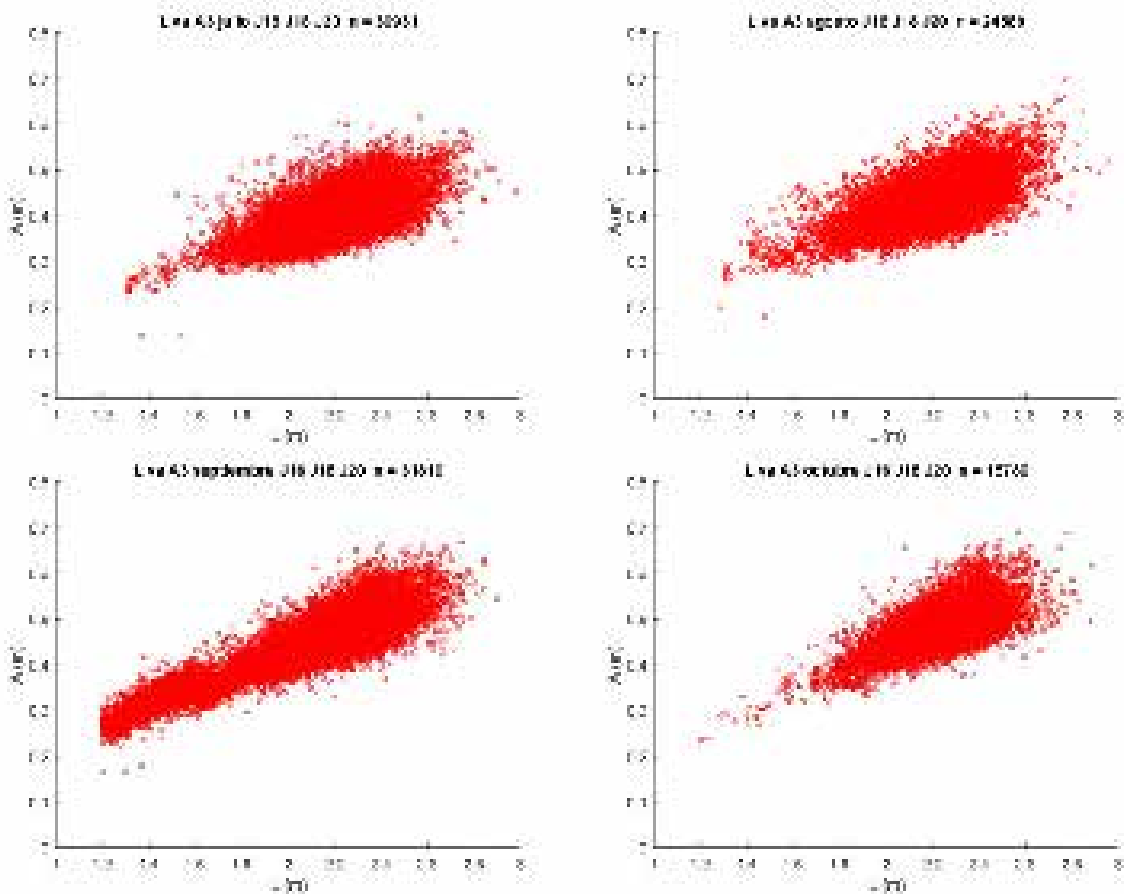


Figura 47. Diagrama de dispersión de longitud  $L$  frente a ancho máximo  $A$  con grabaciones AQ1 por meses en las jaulas del Grup Balfegó.  
Las líneas discontinuas marcan la relación  $L - A$  teórica con un margen de  $\pm 15\%$

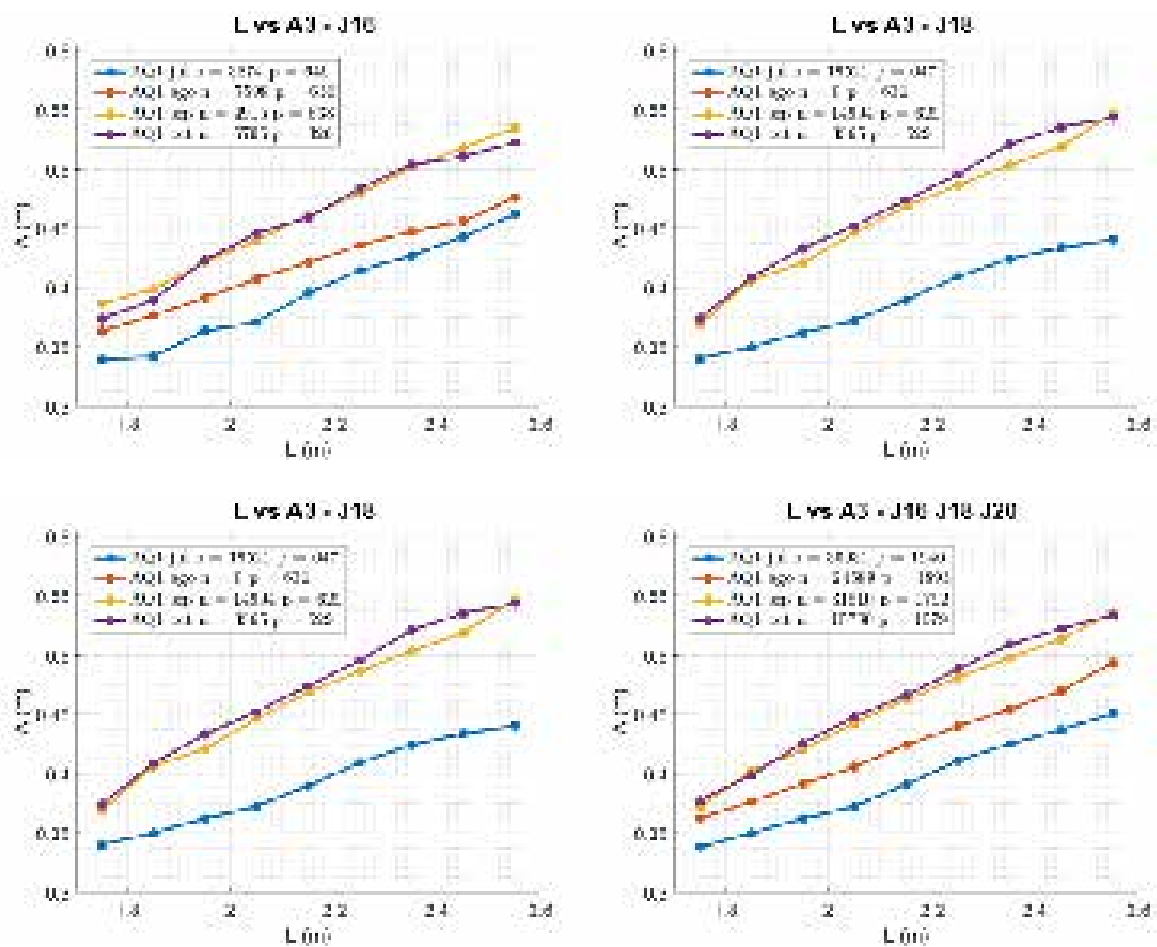


Figura 48. Relación entre longitud L y ancho máximo A discretizada cada 5 centímetros en L con grabaciones AQ1 por meses en las jaulas del Grup Balfegó.  
n, número de muestras analizadas; p, número de peces en el momento de la grabación

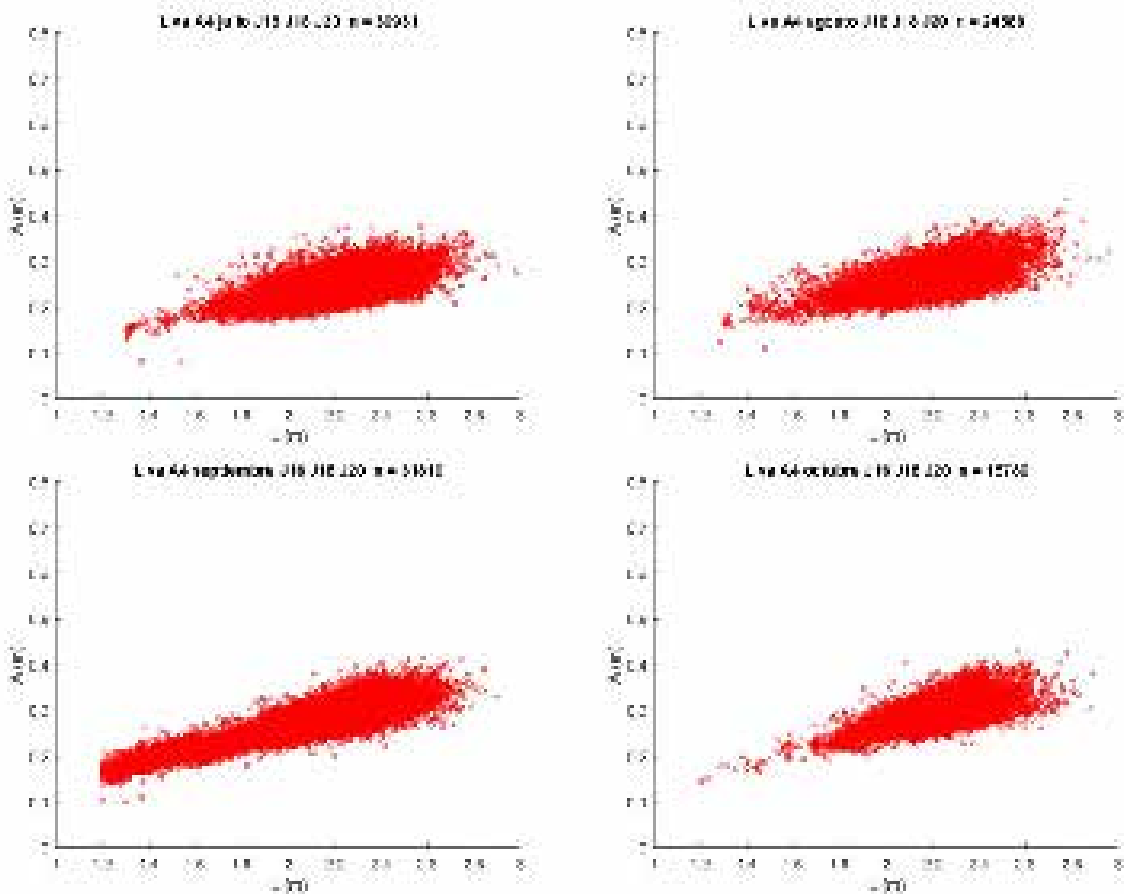


Figura 49. Diagrama de dispersión de longitud L frente a ancho máximo A con grabaciones AQ1 por meses en las jaulas del Grup Balfegó.  
Las líneas discontinuas marcan la relación L – A teórica con un margen de +/-15%

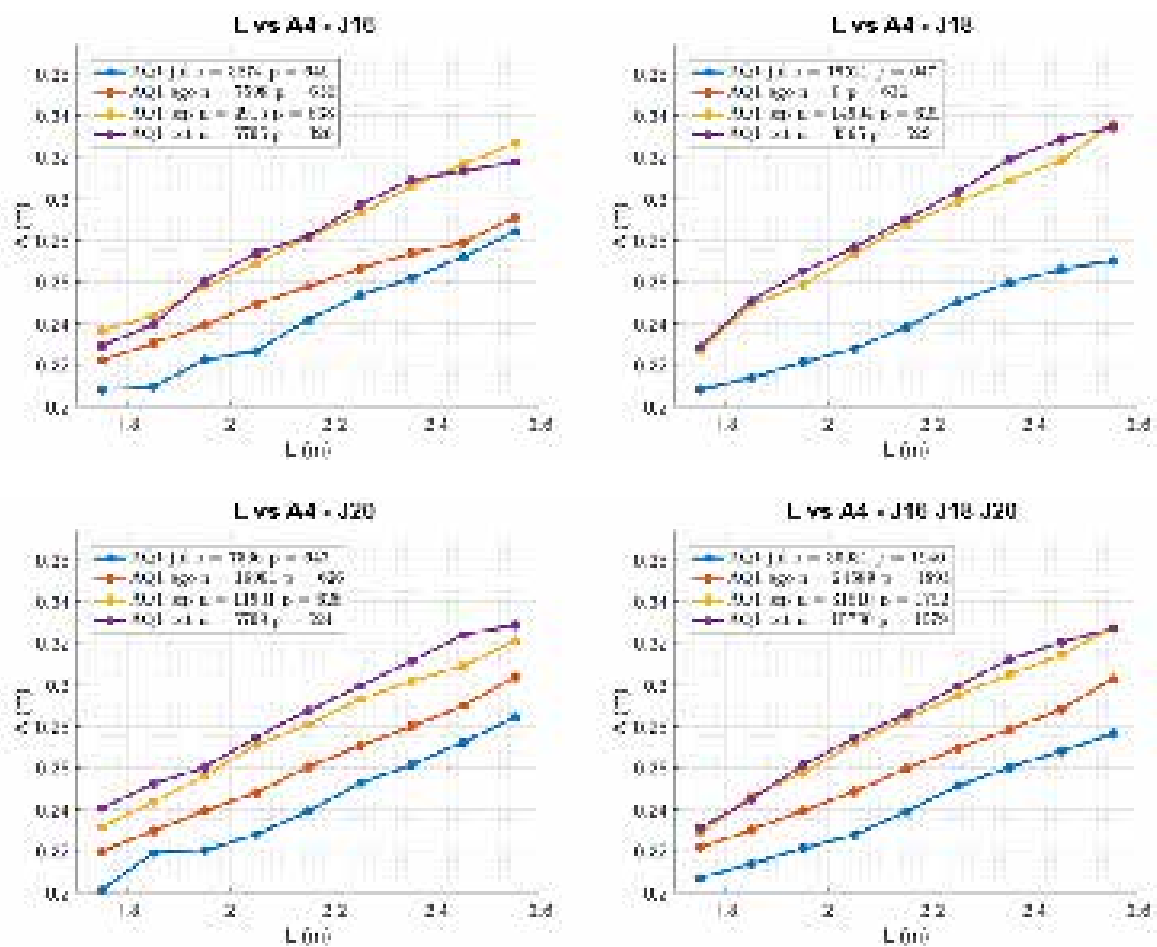


Figura 50. Relación entre longitud  $L$  y ancho máximo  $A$  discretizada cada 5 centímetros en  $L$  con grabaciones AQ1 por meses en las jaulas del Grup Balfegó.

$n$ , número de muestras analizadas;  $p$ , número de peces en el momento de la grabación



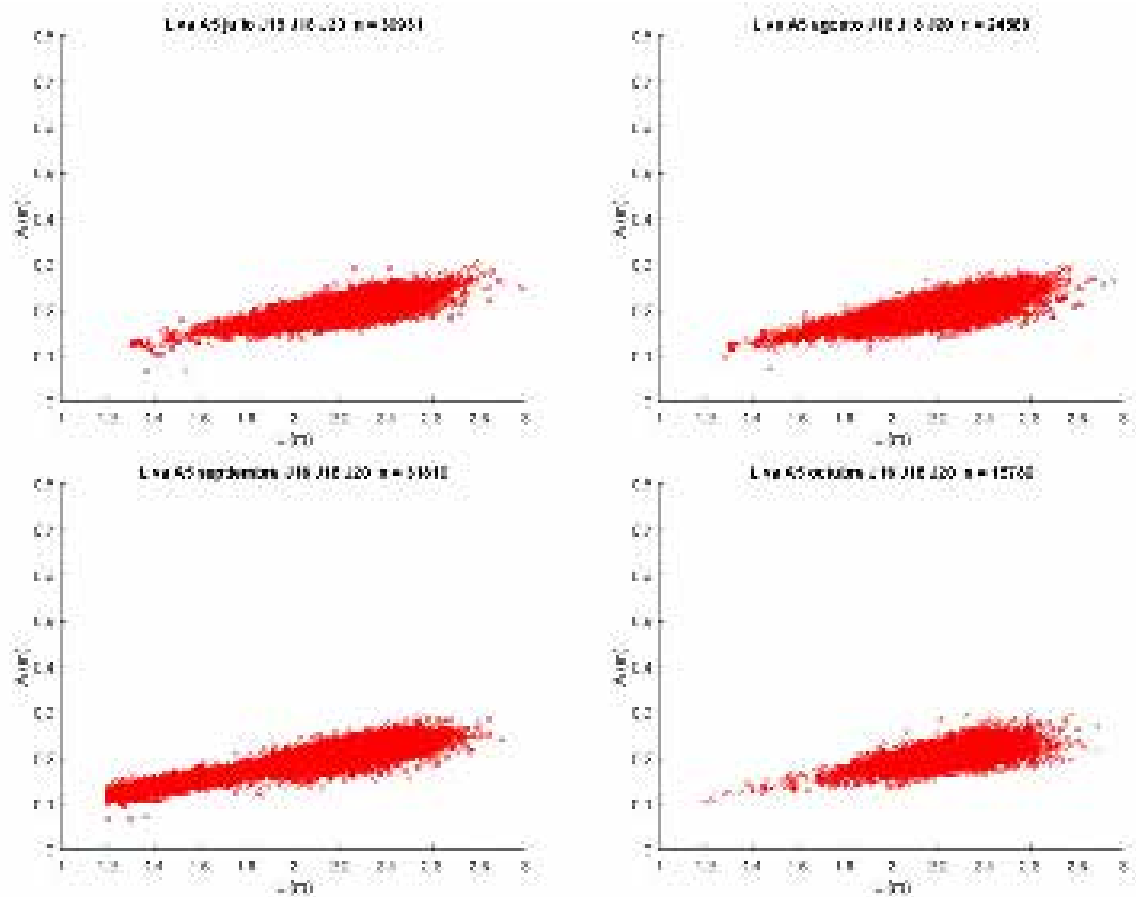


Figura 51. Diagrama de dispersión de longitud  $L$  frente a ancho máximo  $A$  con grabaciones AQ1 por meses en las jaulas del Grup Balfegó.  
Las líneas discontinuas marcan la relación  $L - A$  teórica con un margen de  $\pm 15\%$

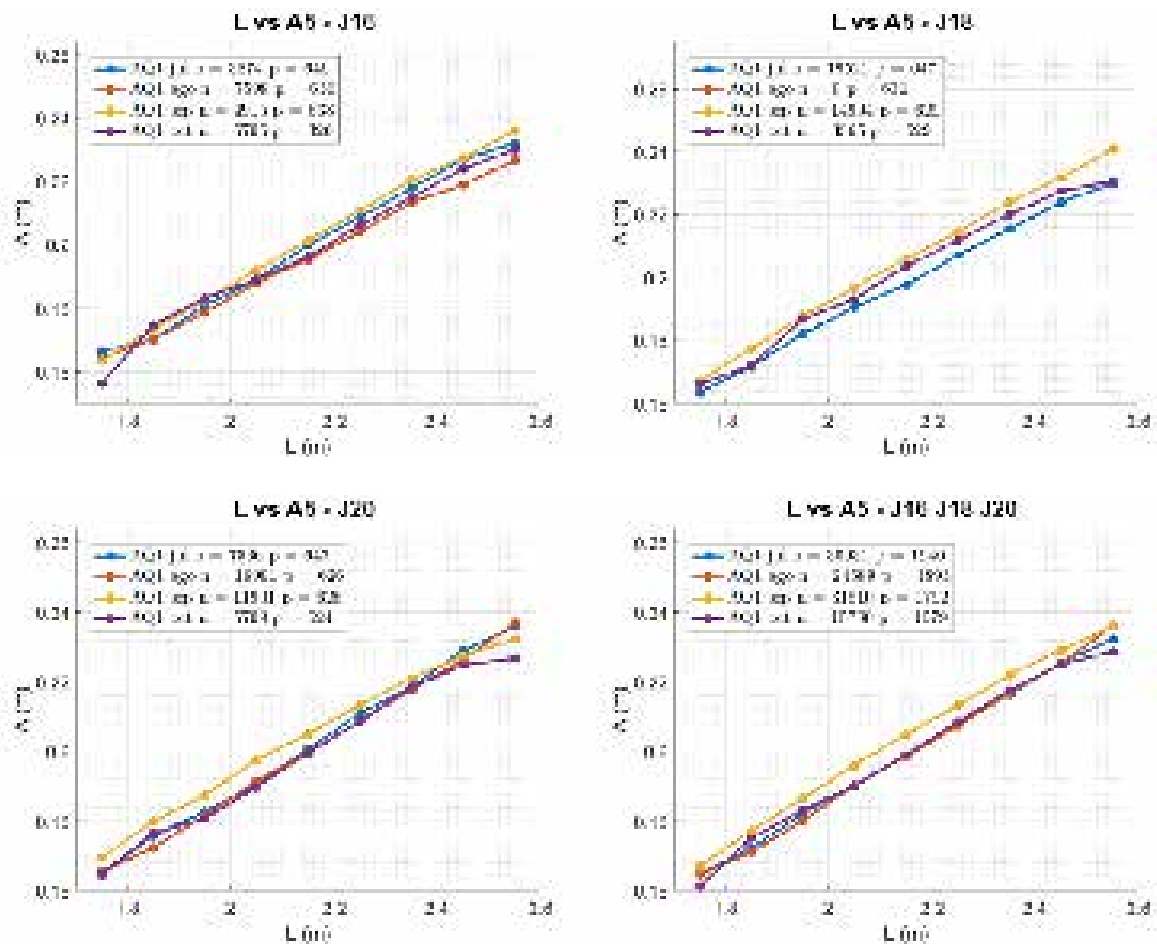


Figura 52. Relación entre longitud L y ancho máximo A discretizada cada 5 centímetros en L con grabaciones AQ1 por meses en las jaulas del Grup Balfegó.  
n, número de muestras analizadas; p, número de peces en el momento de la grabación

Se centra el estudio en la información que agrupa todas las jaulas, que se muestra resumida en la Figura 53.

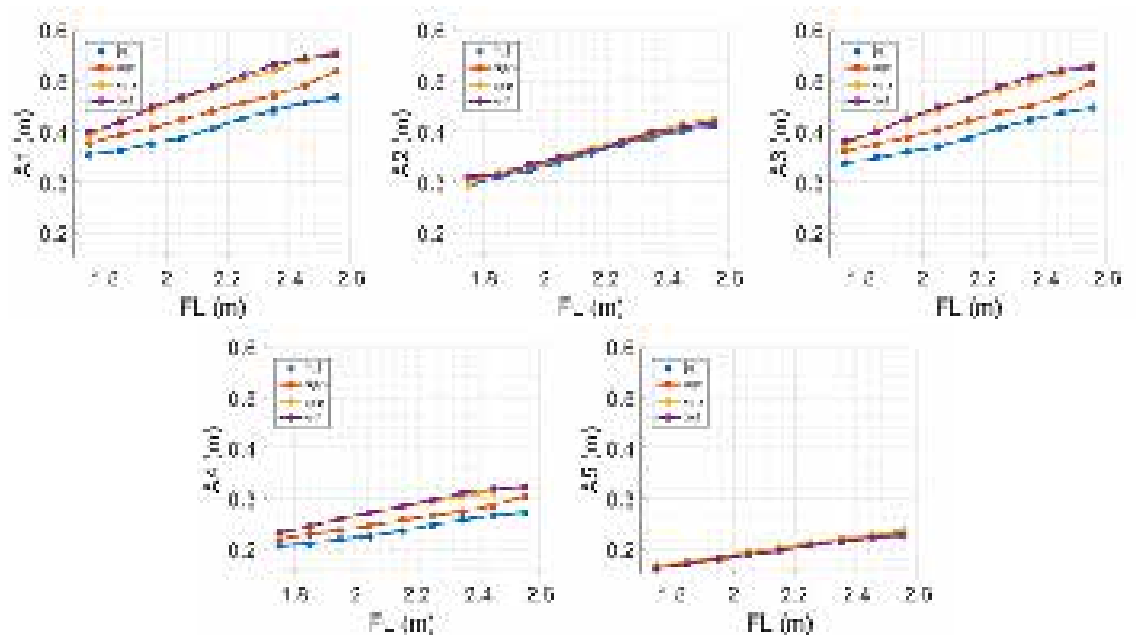


Figura 53. Relación entre FL (Fork Length, que equivale a L) y  $A_i$  por meses agrupando todas las jaulas.

Se puede observar una fuerte relación lineal entre L y  $A_i$ . El ajuste a un modelo lineal, y su coeficiente de determinación  $R^2$ , se muestran en la Tabla 18.

	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$
JUL	$A = 0.150 * FL + 0.086$ $R^2 = 0.993$	$A = 0.153 * FL + 0.027$ $R^2 = 0.996$	$A = 0.144 * FL + 0.081$ $R^2 = 0.993$	$A = 0.090 * FL + 0.046$ $R^2 = 0.992$	$A = 0.086 * FL + 0.013$ $R^2 = 0.999$
AUG	$A = 0.170 * FL + 0.077$ $R^2 = 0.992$	$A = 0.149 * FL + 0.042$ $R^2 = 0.997$	$A = 0.163 * FL + 0.072$ $R^2 = 0.992$	$A = 0.101 * FL + 0.040$ $R^2 = 0.991$	$A = 0.092 * FL + 0.002$ $R^2 = 0.997$
SEP	$A = 0.204 * FL + 0.043$ $R^2 = 0.995$	$A = 0.165 * FL + 0.011$ $R^2 = 0.994$	$A = 0.194 * FL + 0.041$ $R^2 = 0.995$	$A = 0.118 * FL + 0.027$ $R^2 = 0.995$	$A = 0.087 * FL + 0.015$ $R^2 = 0.997$
OCT	$A = 0.201 * FL + 0.052$ $R^2 = 0.988$	$A = 0.144 * FL + 0.054$ $R^2 = 0.988$	$A = 0.192 * FL + 0.049$ $R^2 = 0.987$	$A = 0.119 * FL + 0.028$ $R^2 = 0.986$	$A = 0.084 * FL + 0.018$ $R^2 = 0.992$

Tabla 18. Ajuste lineal entre L y  $A_i$  por meses.

### Conclusiones

Se obtienen altos coeficiente de determinación  $R^2$  para todos los anchos  $A_i$  y todos los meses.

### 6.3.1.4. Factor de engorde

Se define un factor de engorde para cada ancho  $A_i$  como el incremento relativo al ancho inicial en julio  $A_{ij}$ :

$$F_i = 1 + \frac{(A_i - A_{ij})}{A_{ij}} \quad (3)$$

La evolución en el tiempo de la media de los factores de engorde  $\bar{F}_i$  se muestra en la Figura 54(a).  $\bar{F}_2$  y  $\bar{F}_5$  son prácticamente constantes, mientras que  $\bar{F}_1$ ,  $\bar{F}_3$  y  $\bar{F}_4$  se incrementan linealmente durante los dos primeros meses y muy poco en el tercer mes.

Centrando el estudio en los factores que sí que varían, y particularmente en el factor de engorde asociado al ancho máximo  $F_1$ , se puede observar en la Figura 54(b) el valor del factor de engorde dependiendo de la longitud del pez, discretizada cada 5 centímetros. Como se puede apreciar, el factor de engorde es prácticamente el mismo para  $L \in [2, 2.50]$ , intervalo con el mayor número de muestras; se incrementa con la longitud para  $L < 2$ , sobre todo en septiembre y octubre; y muestra un comportamiento diferente dependiendo del mes para  $L > 2.50$ , quizás porque hay pocas muestras en ese intervalo.

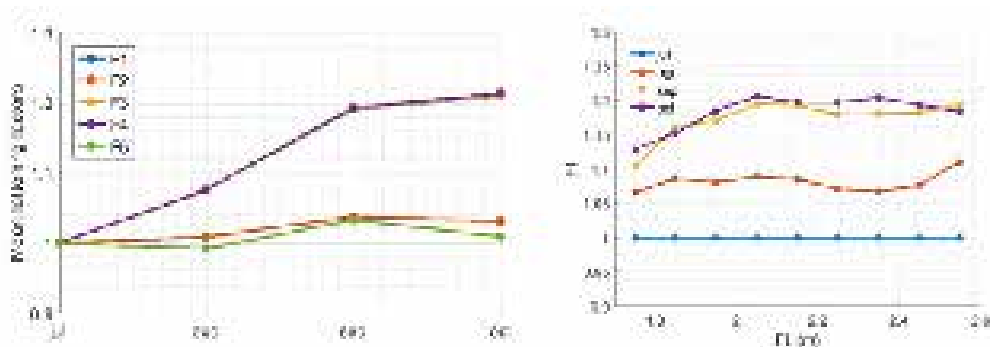


Figura 54. (a) Evolución de la media de los factores de engorde.  
(b) Factor de engorde  $F_1$  en función de la longitud (FL)

### Conclusiones

Se observa un claro aumento en la media de los factores de engorde  $\bar{F}_1$ ,  $\bar{F}_3$  y  $\bar{F}_4$  durante los dos primeros meses y muy poco en el tercero. Además, dichos factores se mantienen prácticamente constantes para peces con  $L \in [2, 2.50]$ .

### 6.3.1.5. Comparativa de longitud $L$ en el momento de enjaulamiento

En el momento de enjaulamiento (junio de 2015) contamos con datos aportados por la inspección de pesca y por el Grup Balfegó de las transferencias de junio 2015 desde las jaulas transporte ESP011 y ESP007 a las jaulas J16, J18 y J20 de granja de engorde. Además, disponemos también de datos de sacrificios históricos en esas fechas. Estos datos se comparan con las mediciones realizadas en el mes de julio, por ser el más próximo en el tiempo. En la Tabla 19 se muestra fecha de la grabación, número de peces en las jaulas y mediciones automáticas realizadas.

	J16	J18	J20	TOTAL
FECHA	3 JUL 2015	2 JUL 2015	1 JUL 2015	
PECES	646	647	647	<b>1940</b>
JULIO	3874	19521	7536	<b>30931</b>

Tabla 19. Fecha de la grabación, número de peces en las jaulas y mediciones automáticas realizadas.

### Datos de mediciones de la inspección de pesca

- Transferencias de 12 y 16 de junio 2015 desde jaulas transporte ESP011 y ESP007 a jaulas J16, J18 y J20 de granja de engorde. Datos obtenidos por los inspectores de pesca utilizando el software AQ1 siguiendo el protocolo oficial.
- Grabaciones de 1, 2 y 3 de julio de 2015 en las jaulas J16, J18 y J20. Datos obtenidos con el software automático desarrollado en el proyecto Biacop.

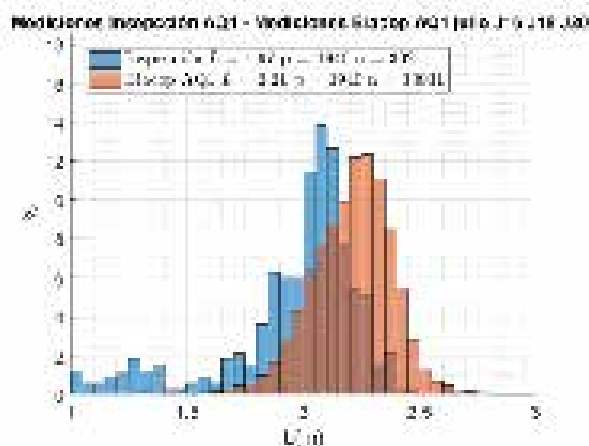


Figura 55. Comparativa de longitud L: datos inspección vs mediciones automáticas Biacop  
 $\bar{L}$ , media de longitud; n, número de muestras analizadas; p, número de peces en el momento de la grabación.

### Datos de mediciones del Grup Balfegó

Sobre las mismas grabaciones de la inspección de pesca, el Grup Balfegó intenta muestrear el mayor número de peces posible para tener una mejor estimación de la población. En la Figura 56 se muestra el número de peces y mediciones realizadas en el enjaulamiento y en los traspasos internos entre jaulas.

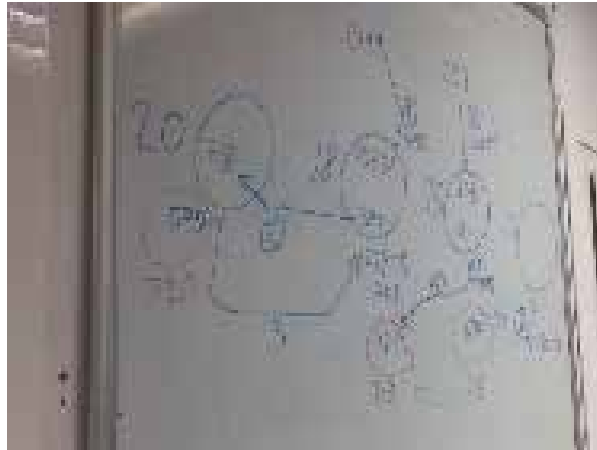


Figura 56. Número de peces y mediciones realizadas por el Grup Balfegó en el momento del enjaulamiento y en los trasposos entre jaulas.

- De los 1063 que llegan con la jaula de transporte 011 se miden 549 peces.
- De los 878 que llegan con la jaula de transporte 007 se miden 352 peces.
- De los 57 que se incorporan a la J16 procedentes de la J14 se miden 25 peces.

Para la comparativa entre las mediciones realizadas por el Grup Balfegó y las mediciones automáticas Biacop se agrupan las mediciones de todas las jaulas. Las distribuciones se muestran en la Figura 57.

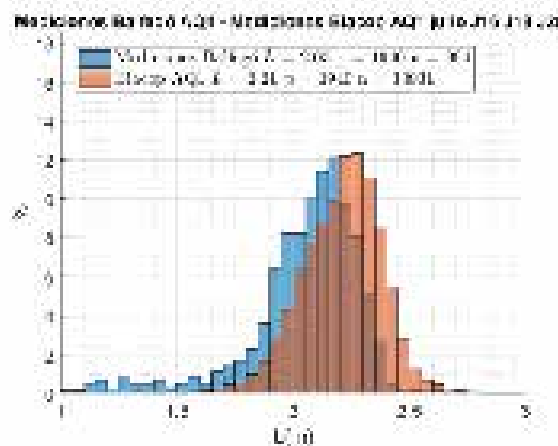


Figura 57. Comparativa de longitud L: datos mediciones Balfegó vs mediciones automáticas Biacop  
 $\bar{L}$ , media de longitud; n, número de muestras analizadas; p, número de peces en el momento de la grabación.

Se dispone de 101 sacrificios realizados entre 2010 y 2016 de peces en época de campaña de pesca (entre 8 y 22 de junio), antes de pasar a las jaulas de engorde. Si se toma esto como distribución de peces a la entrada y se compara con las mediciones realizadas entre el 1 y el 3 de julio de 2015 en las distintas jaulas tenemos:

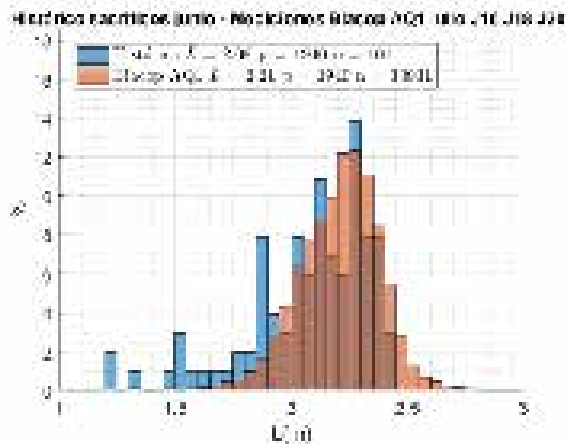


Figura 58. Comparativa de longitud L: datos históricos de sacrificios vs mediciones automáticas Biacop.  $\bar{L}$ , media de longitud; n, número de muestras analizadas; p, número de peces en el momento de la grabación.

### Conclusiones

En el caso de los sacrificios históricos (Figura 58), las distribuciones de longitud son similares, aunque en los sacrificios históricos hay más proporción de peces pequeños. De todos modos, 101 muestras son pocas para hacer conclusiones fiables.

En el caso de los inspectores (Figura 55), con 332 muestras se obtiene una media de longitud de 1.97 m y en el caso del Grup Balfegó (Figura 57), con 994 se obtiene una media de 2.05 m. Al tratarse de un software de medición manual existe un error de operario que puede ser distinto en el caso del Grup Balfegó y en el caso de los inspectores de pesca. Sin embargo, tratándose de la misma grabación, del mismo software de medida y teniendo en cuenta que el software limita el porcentaje de error, una diferencia de 8 centímetros de media sería más atribuible al muestreo que al error de operario. El número de muestras tomadas en las mediciones puede afectar mucho a la distribución de longitudes. La distribución del Grup Balfegó, con mayor número de mediciones (Figura 57) se asemeja bastante en distribución a las mediciones automáticas Biacop, pero desplazada ligeramente a longitudes inferiores.

#### 6.3.1.6. Comparativa de longitud L con sacrificios

Para realizar esta comparativa se utilizan las muestras extraídas con el software automático desarrollado en el proyecto Biacop y los datos de los sacrificios realizados por el Grup Balfegó. En la Tabla 20, Tabla 21 y Tabla 22 se resume el número de muestras extraídas, el número de peces en el momento de la grabación y los sacrificios para cada una de las jaulas de estudio. Se tienen en cuenta los sacrificios anteriores a enero, porque a partir de esas fechas se producen traspasos de peces entre jaulas, que alteran las poblaciones y la estadística.

J16			
	NÚMERO DE MUESTRAS	NÚMERO DE PECES	SACRIFICIOS
3 JUL	3923	646	10 (6 JUL – 31 JUL)
5 AGO	8180	636	98 (7 AGO – 17 SEP)
18 SEP	3996	538	212 (20 SEP – 8 OCT)
9 OCT	7402	326	118 (12 OCT – 19 OCT)
6 NOV		208	-
DIC		208	198 (7 DIC – 10 ENE)

Tabla 20. Número de muestras extraídas automáticamente, número de peces en el momento de la grabación y sacrificios en la jaula J16 del Grup Balfegó.

J18			
	NÚMERO DE MUESTRAS	NÚMERO DE PECES	SACRIFICIOS
2 JUL	20143	647	16 (6 JUL – 31 JUL)
6 AGO	-	631	2 (6 AGO – 7 AGO)
17 SEP	15208	629	-
8 OCT	3474	629	2 (3 NOV – 4 NOV)
5 NOV		627	2 (2 DIC)
DIC		625	507 (16 DIC – 29 DIC)

Tabla 21. Número de muestras extraídas automáticamente, número de peces en el momento de la grabación y sacrificios en la jaula J18 del Grup Balfegó.

J20			
	NÚMERO DE MUESTRAS	NÚMERO DE PECES	SACRIFICIOS
1 JUL	7651	647	21 (6 JUL – 5 AGO)
7 AGO	17209	626	1 (17 AGO)
16 SEP	12011	625	1 (13 SEP)
7 OCT	5819	624	1 (3 NOV)
4 NOV		623	-
DIC		623	51 (21 – 29 DIC)
ENE		572	264 (18 ENE – 16 FEB)

Tabla 22. . Número de muestras extraídas automáticamente, número de peces en el momento de la grabación y sacrificios en la jaula J20 del Grup Balfegó.

Se compara la distribución de las grabaciones de octubre con los sacrificios posteriores a dicha fecha, por ser donde se concentran la mayoría de los sacrificios. La Figura 59 muestra los histogramas normalizados por jaulas y agrupando todas las jaulas.



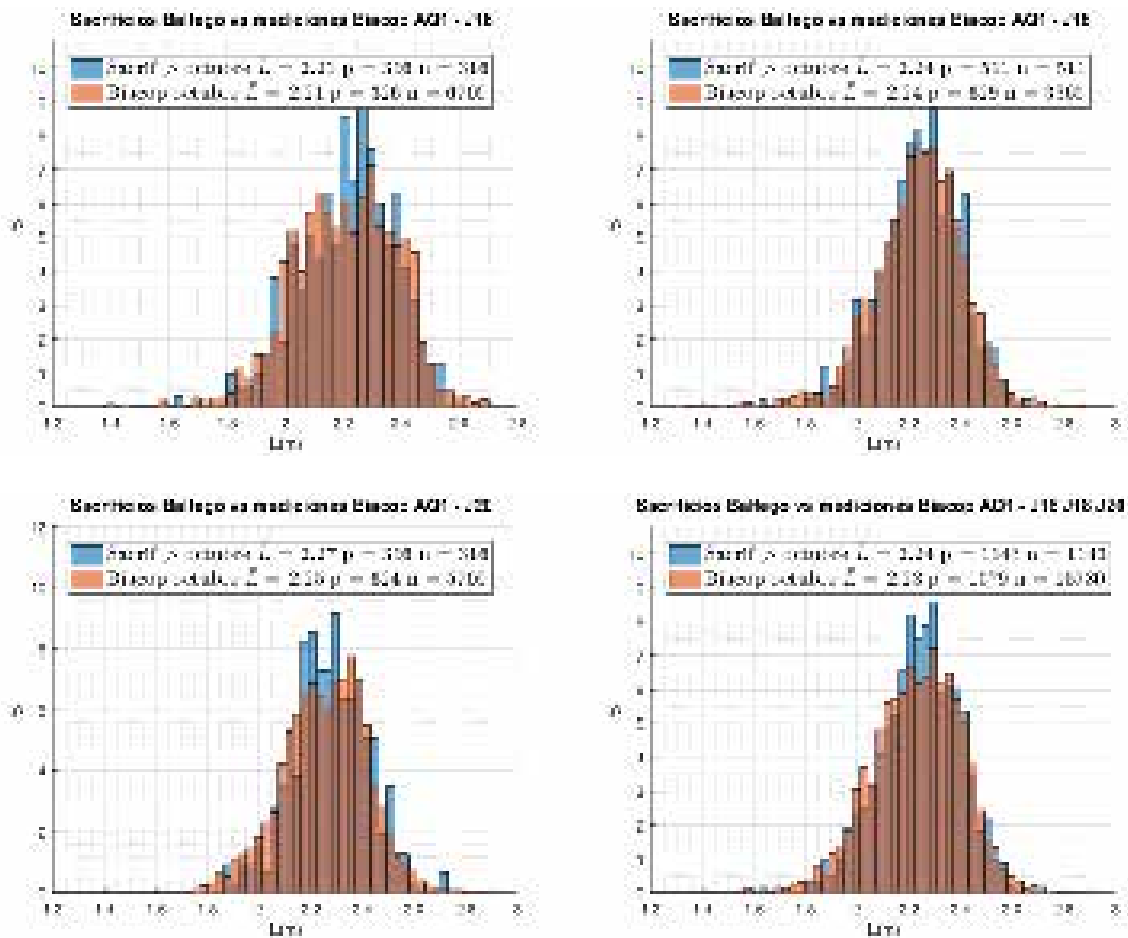


Figura 59. Distribuciones de longitud  $L$  por meses en las jaulas del Grup Balfegó comparado con sacrificios.  $\bar{L}$ , media de longitud;  $n$ , número de muestras analizadas;  $p$ , número de peces en el momento de la grabación

### Conclusiones

Según se puede comprobar en la Figura 59, las distribuciones y medias de las mediciones automáticas se asemejan mucho a las distribuciones y medias de los sacrificios. Los buenos resultados que se desprenden de esta comparativa validan el procedimiento utilizado para la obtención de distribuciones estadísticas de longitud en jaulas de engorde.

### 6.3.2. Grabaciones con sistema de visión estereoscópico AI2

Se dispone de grabaciones de octubre para todas las jaulas con el sistema estereoscópico AI2. En la Tabla 23 se puede observar el número de muestras que se han extraído de cada una de las grabaciones con el software automático desarrollado en el proyecto Biacop.

AI2	J16	J18	J20	TOTAL
OCTUBRE	8379	7277	3777	19433

Tabla 23. Muestras extraídas con el procedimiento automático en las jaulas del Grup Balfegó con grabaciones AI2

En la Figura 60 se muestra las distribuciones de longitud  $L$  con grabaciones AI2 en las jaulas del Grup Balfegó comparado con sacrificios.

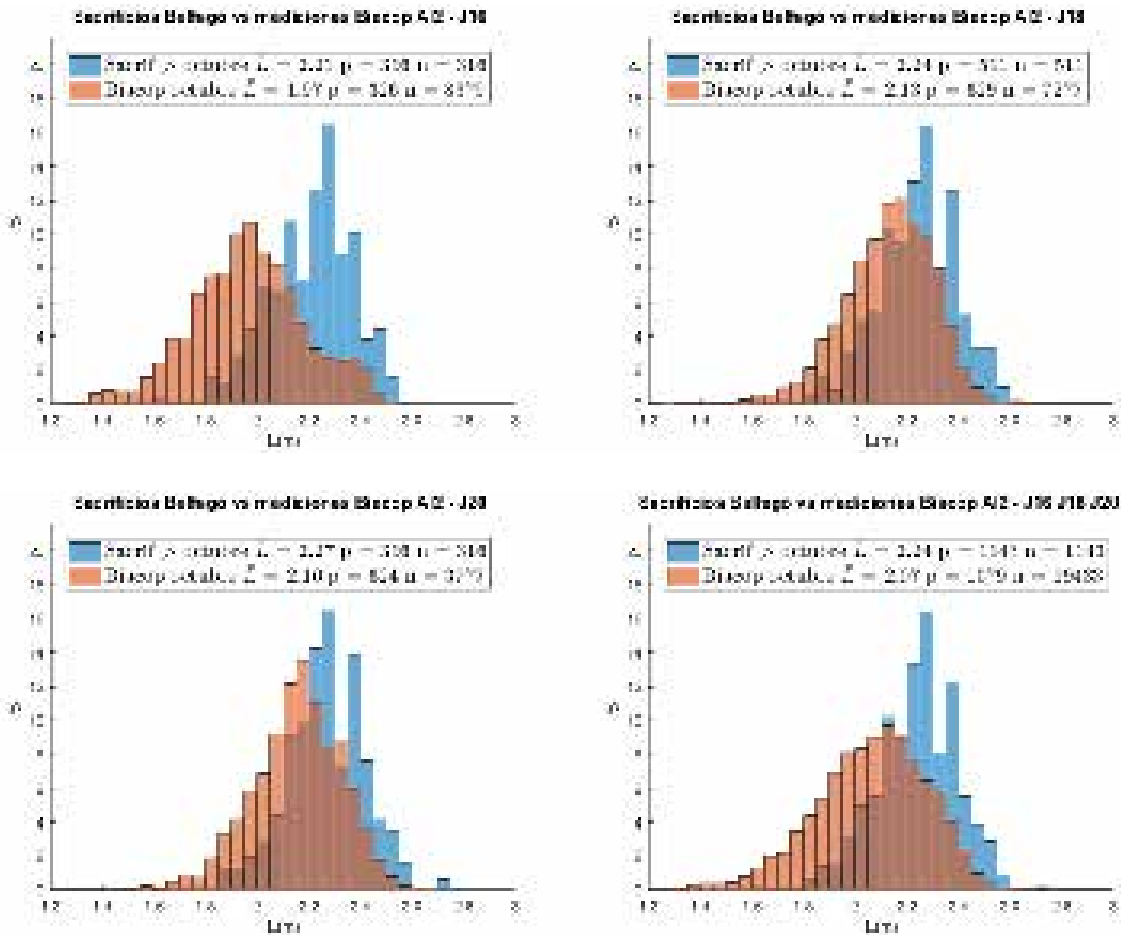


Figura 60. Distribuciones de longitud L con grabaciones AI2 en las jaulas del Grup Balfegó comparado con sacrificios.  $\bar{L}$ , media de longitud; n, número de muestras analizadas; p, número de peces en el momento de la grabación.

### Conclusiones

Las mediciones con las grabaciones AI2 difieren, por defecto, de los sacrificios y se observa un comportamiento diferente al resto en la J16.

### 6.3.3. Comparativa grabaciones AQ1 – grabaciones AI2

Para realizar estas comparativas se utilizan los datos de Tabla 20, Tabla 21 y Tabla 22, donde se resumía el número de muestras extraídas con grabaciones AQ1, el número de peces en el momento de la grabación y los sacrificios en cada una de las jaulas de estudio; y de Tabla 23 que resume el número de muestras obtenidas con las grabaciones AI2.

La comparativa de longitud (L) entre mediciones obtenidas con las grabaciones AQ1 y con las grabaciones AI2 por jaulas y con todas las jaulas juntas se muestra en la Figura 61.

Tal y como muestra la Figura 62, los rangos de distancia de medida Z son diferentes para las grabaciones AQ1 y las grabaciones AI2. Para estudiar cómo afecta esta diferencia, se limita la observación a peces situados a distancias entre 6 y 10 metros, por ser donde se solapan las mediciones de los dos sistemas de grabación. Los resultados se muestran en la Figura 63.

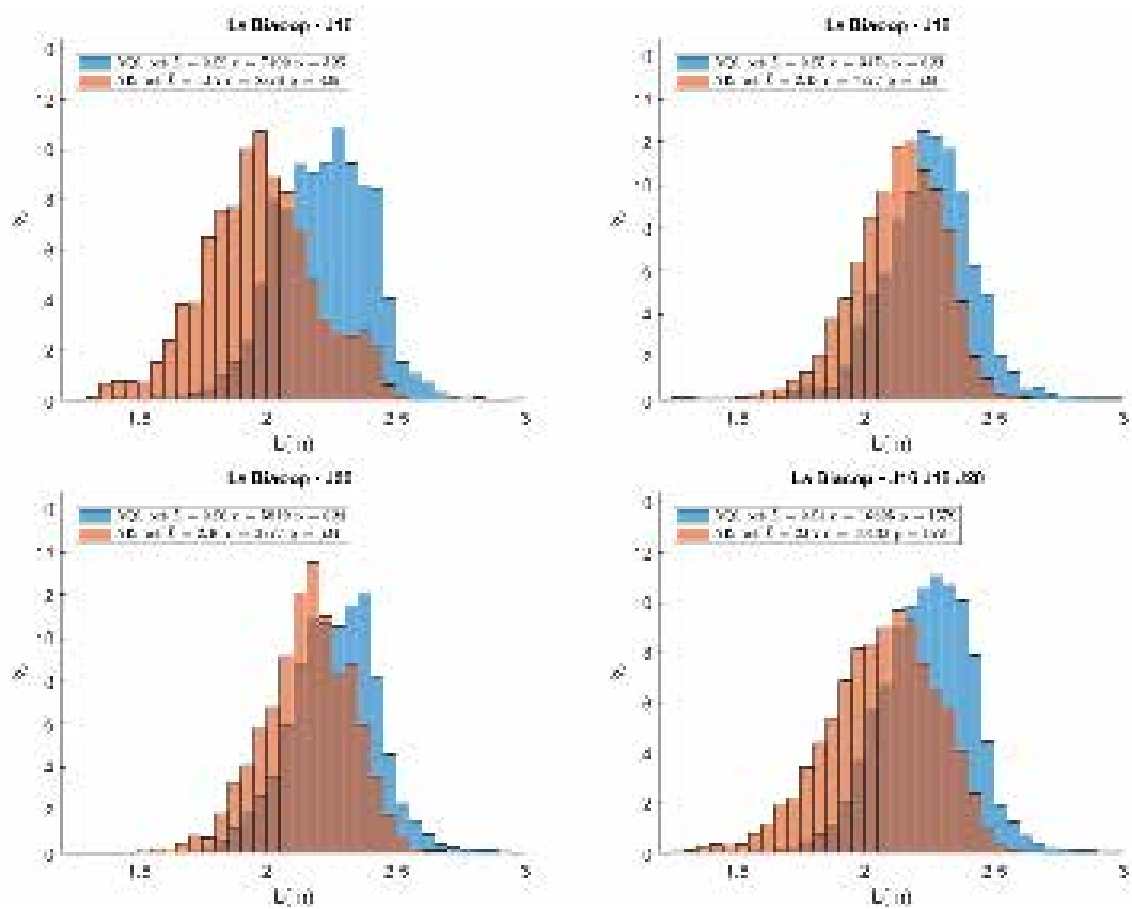


Figura 61. Distribuciones de longitud L con grabaciones AI2 vs grabaciones AQ1 en las jaulas del Grup Balfegó.  $\bar{L}$ , media de longitud; n, número de muestras analizadas; p, número de peces en el momento de la grabación.

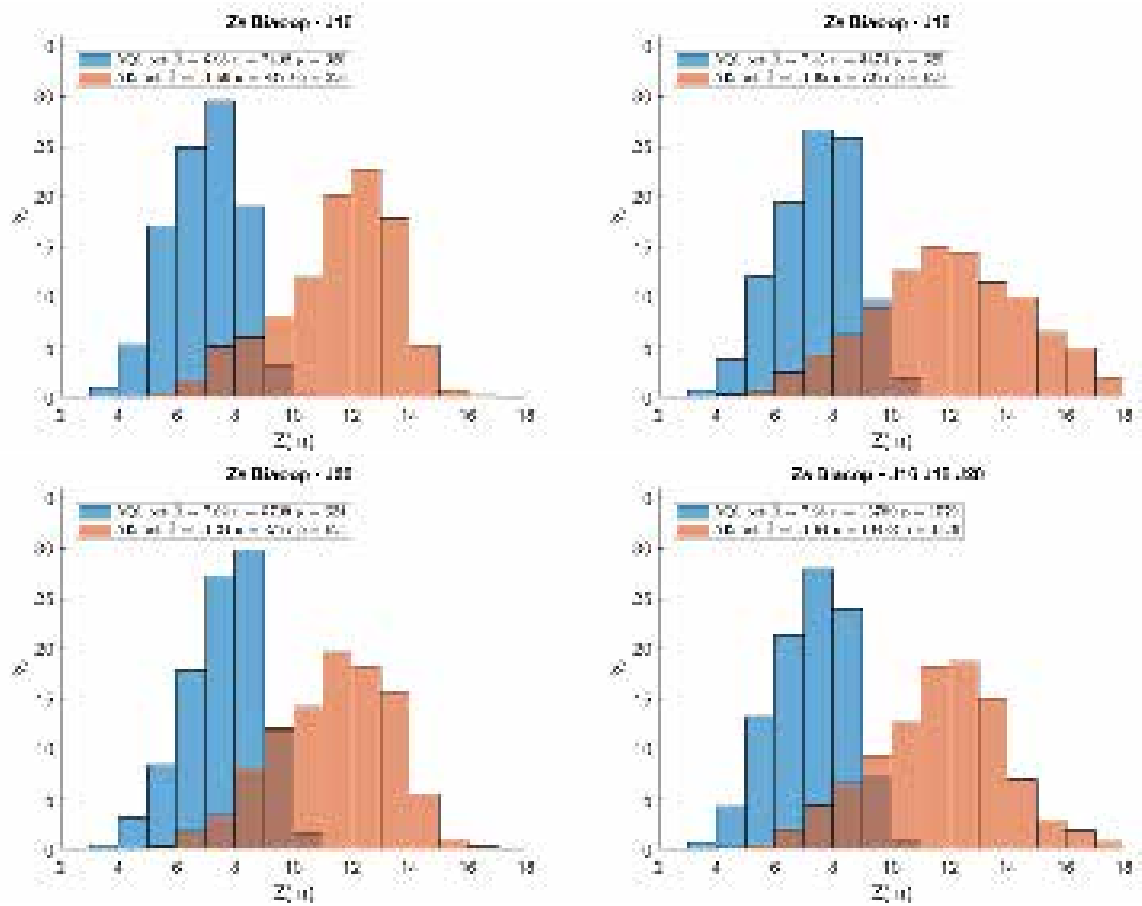


Figura 62. Distribuciones de distancias de medida  $Z$  con grabaciones AI2 vs grabaciones AQ1 en las jaulas del Grup Balfegó.  $\bar{Z}$ , distancia media;  $n$ , número de muestras analizadas;  $p$ , número de peces en el momento de la grabación

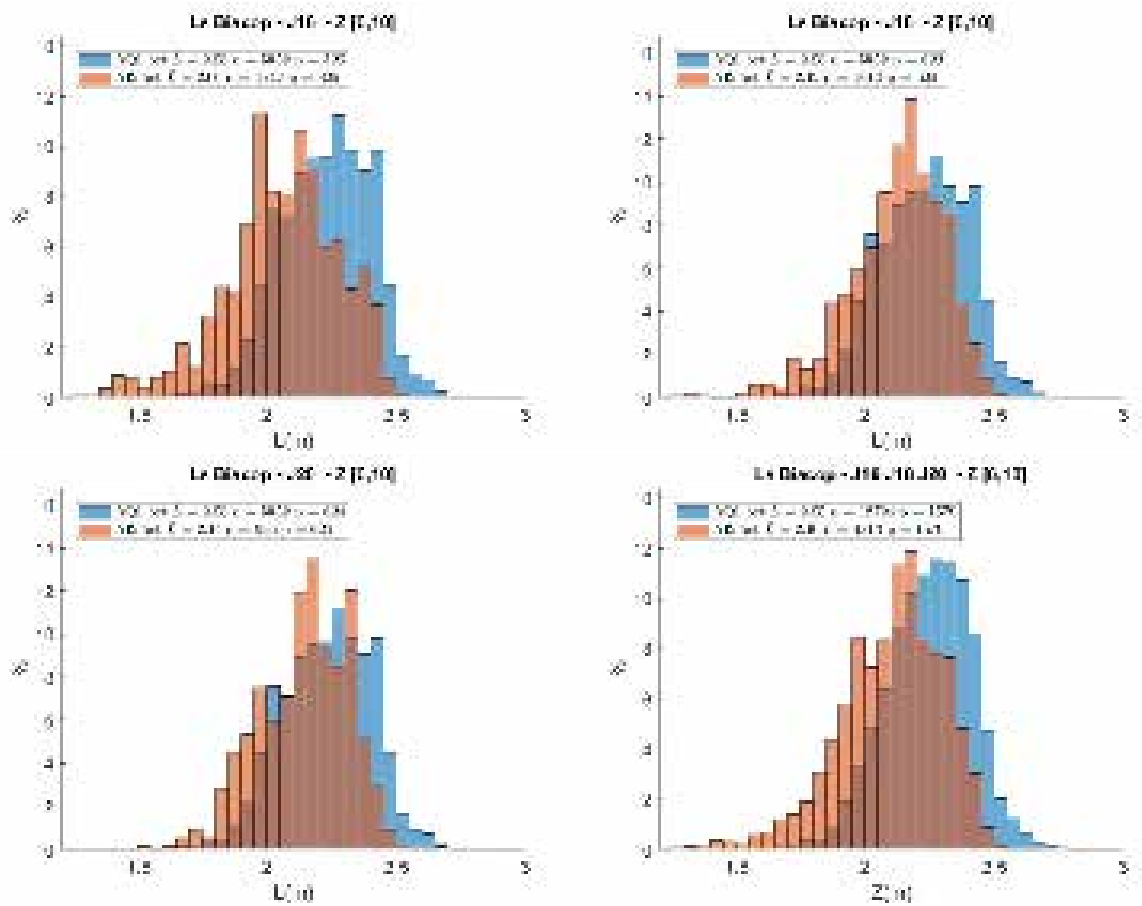


Figura 63. Distribuciones de longitud  $L$  con grabaciones AI2 vs grabaciones AQ1 en diferentes rangos de distancia  $Z$  a las cámaras en la jaula J16 del Grup Balfegó.

$\bar{L}$ , media de longitud;  $n$ , número de muestras analizadas;  $p$ , número de peces en el momento de la grabación

Durante las grabaciones, además de los sensores de visión se utilizan también sensores acústicos. Se puede realizar un análisis conjunto óptico-acústico que correlacione la información de los distintos sensores. El análisis exhaustivo se realizará en otros apartados, pero en este caso vamos a utilizar la información de las trazas acústicas para localizar el mismo pez en las distintas grabaciones. Así pues, se puede identificar mediciones de un mismo pez con grabaciones AQ1 y AI2. La Tabla 24 muestra las detecciones conjuntas óptico-acústicas. Se utilizan las 237 detecciones con mediciones sobre grabaciones AQ1 y AI2 para hacer una comparativa, que se muestra en la Figura 64.

		detecciones conjuntas óptico-acústicas			
		SPLIT 120 KHz + SPLIT 200KHz			
		JAULA 16	JAULA 18	JAULA 20	TOTAL
OCTUBRE	AQ1	475	297	367	1139
	AI2	754	719	482	1955
	conjuntas	115	81	41	237

Tabla 24. Detecciones conjuntas óptico-acústicas por jaulas.

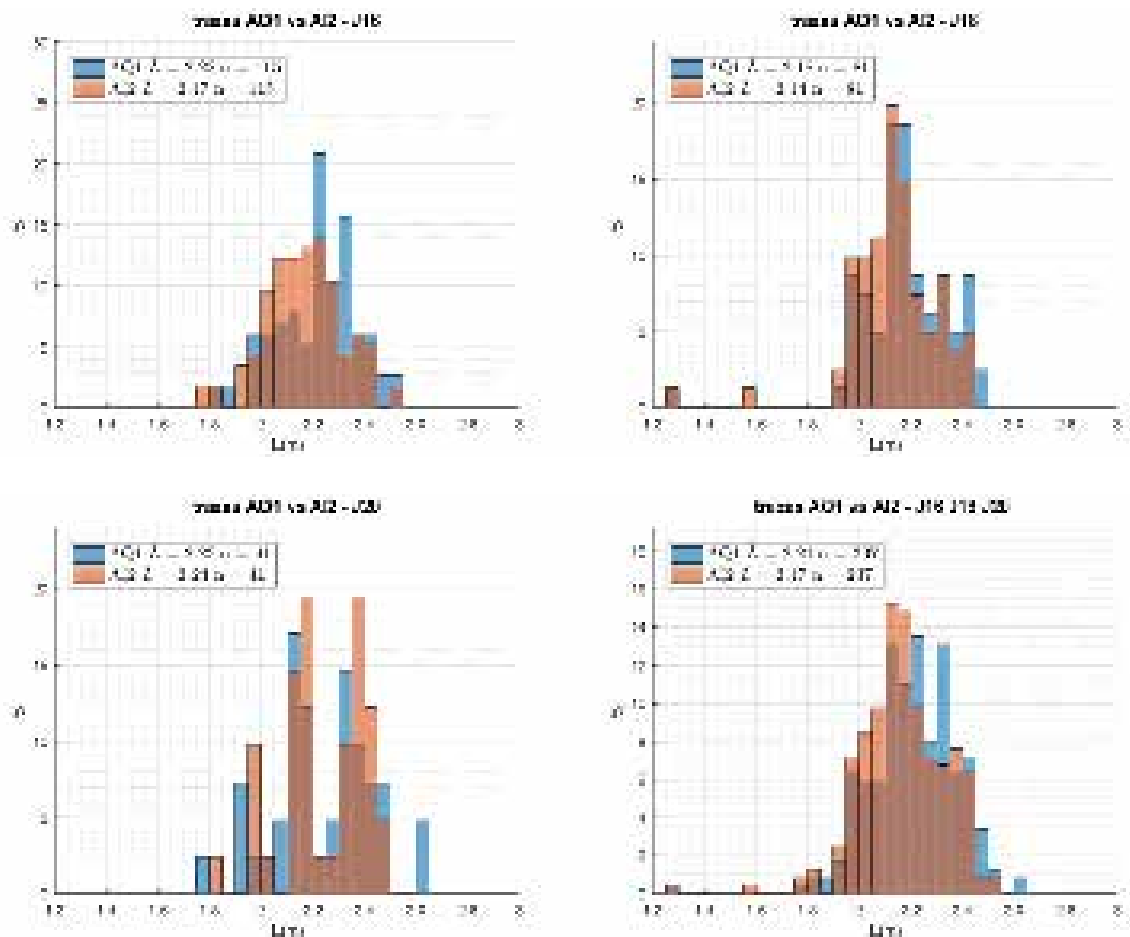


Figura 64. Distribuciones de longitud L con grabaciones AI2 vs grabaciones AQ1 en trazas con SPLIT120 en las jaulas del Grup Balfegó.

$\bar{L}$ , media de longitud; n, número de muestras analizadas; p, número de peces en el momento de la grabación.

## Conclusiones

En la Figura 63 se observa que al limitar el rango de distancias de las mediciones entre 6 y 10 metros las distribuciones con grabaciones AQ1 y grabaciones AI2 se asemejan más y las longitudes medias se acercan.

En la Figura 64 se comprueba que si se centra el estudio en las muestras con mediciones en las dos grabaciones, la diferencia es de unos pocos centímetros de media. Por lo tanto, las explicaciones a la diferencia en las distribuciones de jaulas habría que atribuir las al muestreo debido al distinto rango de distancias de medida de las ópticas.

### **6.3.4. Conclusiones**

Aspectos relevantes relacionados con las dimensiones de los peces y su evolución en el tiempo son esenciales para acuicultores para optimizar regímenes de alimentación y estrategias de captura. El sistema automático de estimación de tallas desarrollado en el marco de este proyecto tiene unas de sus aplicaciones principales en la monitorización de biomasa individual, a partir de la estimación de longitud y anchura de los peces, en granjas de acuicultura.

Durante este proyecto, se ha recogido una gran cantidad de datos durante los cinco meses consecutivos después del enjaulamiento de los peces, de julio a noviembre, en tres jaulas de engorde de atún rojo del Grup Balfegó. Más de 60 horas de vídeo en 14 pares de vídeos han sido adquiridos con el sistema estereoscópico AQ1, dos millones de frames han sido procesados, con un buen ajuste del modelo propuesto en más de 1.4 millones de blobs en imágenes individuales, de los que se han obtenido más de 100000 mediciones 3D. Estas mediciones se han analizado para investigar cuestiones de interés para acuicultores, biólogos e investigadores. No pueden tratarse como conclusiones, pero pueden ayudar a encontrar algunas explicaciones:

- ¿Cómo evoluciona la longitud de los peces con el tiempo? Se han obtenido variaciones de longitud de unos pocos centímetros.

- ¿Cómo evoluciona el ancho de los peces con el tiempo?

Se han obtenido evoluciones diferentes dependiendo de la zona del pez: mientras que los puntos en la cabeza y en la zona final del pez no muestran ninguna variación, los puntos entre la aleta pectoral y la quilla del pedúnculo caudal muestran un claro incremento en ancho. Además, ese incremento se produce básicamente durante los dos primeros meses.

- ¿Existe una relación lineal entre longitud y ancho? Según los datos procesados, existe una fuerte relación lineal: se han obtenido coeficientes de determinación  $R^2$  muy altos para todos los anchos  $A_i$  y todos los meses.

- ¿Se puede establecer un factor de engorde?

Se ha definido un factor de engorde para cada ancho  $A_i$ , como el incremento relativo al ancho del primer mes. La evolución del factor de engorde es similar, como cabe esperar, a la evolución de los anchos. Se han obtenido evoluciones diferentes dependiendo de la zona del pez: mientras que los puntos en la cabeza y en la zona final del pez no muestran ninguna variación, los puntos entre la aleta pectoral y la quilla del pedúnculo caudal muestran un engorde que crece linealmente durante

los dos primeros meses y poco durante el tercero. Además, el factor de engorde cambia dependiendo del tamaño del pez: la proporción de engorde es prácticamente la misma para  $L \in [2, 2.50]$ , donde se acumulan la mayoría de muestras, y muestras un comportamiento diferente fuera de ese intervalo, quizás por haber menor número de muestras.

Las longitudes obtenidas con el procedimiento automático se han comparado con datos oficiales: en el momento de entrada en las jaulas, con la estimación de inspección de pesca y medidas propias del Grup Balfegó, y al final con los sacrificios realizados por el Grup Balfegó. Las distribuciones y medias de las mediciones automáticas se asemejan mucho a las distribuciones y medias de los sacrificios. Los buenos resultados que se desprenden de esta comparativa validan el procedimiento utilizado para la obtención de distribuciones estadísticas de longitud y ancho en jaulas de engorde. En cuanto al momento de enjaulamiento, se observa una cierta discrepancia con las mediciones proporcionadas por la inspección de pesca y por el Grup Balfegó. La longitud media entre los datos proporcionados por inspección de pesca en junio y los sacrificios en octubre experimenta un incremento de 1.97m a 2.24m. La longitud media entre las mediciones Balfegó en junio y los sacrificios en octubre experimenta un incremento de 2.05m a 2.24m. La longitud media por meses con las mediciones automáticas Biacop pasa de 2.21m en junio a 2.23m en octubre, siendo de 2.24m la media de sacrificios en octubre. O sea, los peces crecen de media: 27cm con los datos de la inspección de pesca, 19cm con los datos del Grup Balfegó y 2cm con los datos automáticos de Biacop.

En el mes de octubre se incorpora el sensor de visión estereoscópico AI2 a las grabaciones. Las distribuciones de longitud obtenidas difieren un poco respecto a las obtenidas por el AQ1. Se observa que dicha diferencia viene motivada por la diferencia en la distancia focal de la óptica, que hace que el rango de distancias a la que se concentran la mayoría de las mediciones sea diferente: [5,9] m con AQ1 y [8,14] m con AI2. Fruto de este análisis y, motivado además por las necesidades concretas de la estructura para transferencias, se decidió cambiar la óptica de 10 mm a 6 mm de distancia focal.



## 6.4. Resultados de medidas sólo acústicas en jaulas

### 6.4.1. Estimación del TS desde el punto de vista ventral.

En este punto se presentan los resultados obtenidos para el *TS* de detecciones individuales en cada una de las jaulas bajo estudio para cada uno de los meses que duró el experimento. En la Figura 65 y la Figura 66 se muestran las distribuciones de probabilidad para el *TS*<sub>max</sub> (*TS* máximo sin compensar) y para el *TS*<sub>cmax</sub> (*TS* máximo compensado) para las dos frecuencias bajo estudio 120 y 200 kHz para la jaula J16 y representadas para todos los meses que dura el estudio. Las distribuciones del *TS*<sub>max</sub> a 120 kHz tienen carácter unimodal hasta el mes de noviembre, al igual que ocurre para 200 kHz que en noviembre presenta una bimodalidad más acusada que para 120 kHz. Para el caso del *TS*<sub>cmax</sub> son unimodales en todos los meses presentando colas en los meses de octubre y noviembre para ambas frecuencias y una distribución mucho más ancha para el mes de agosto en el caso de la frecuencia de 200 kHz. Además, en la Tabla 25 y la Tabla 26 se detallan los valores medios del *TS* máximo compensado y sin compensar para la jaula J16, la desviación típica de las distribuciones del *TS*, el tamaño medio de los atunes y el número de muestras analizadas para cada una de las frecuencias estudiadas. La bajada de los valores medios del *TS* en el mes de agosto vienen acompañados por una bajada de la longitud media de los peces medidos, esto nos indica que se muestrearon en este caso peces de menor tamaño que durante el mes de julio. Durante los meses siguientes la longitud media aumenta entre 3 y 4 cm, sin embargo; el *TS* no aumenta, sino que disminuye. Este hecho puede ir asociado al proceso de engrase de los atunes que aun creciendo en tamaño puede apantallar parte de la energía acústica procedente de su vejiga por el aumento de la grasa en la zona ventral. A este hecho habría que sumar la probable contribución del comportamiento de los atunes dentro de la jaula (velocidad de nado, inclinación respecto a la cara del transductor...) que produce una gran variabilidad en los valores del *TS*, sobre todo a tan cortas distancias. Sin embargo, si tenemos en cuenta la desviación típica presentada por las diferentes distribuciones no se puede afirmar que existan variaciones significativas del *TS*<sub>max</sub> a ninguna de las dos frecuencias solo observándose variaciones en los valores del *TS*<sub>cmax</sub> entre los meses de julio y agosto para ambas frecuencias.

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

Tabla 25. Valores de la longitud media, numero de trazas, media y desviación típica del TS máximo compensado y sin compensar para las medidas dorsales realizadas a 120 kHz en la jaula J16 durante todos los meses del estudio.

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

Tabla 26. Valores de la longitud media, numero de trazas, media y desviación típica del TS máximo compensado y sin compensar para las medidas dorsales realizadas a 200 kHz en la jaula J16 durante todos los meses del estudio.

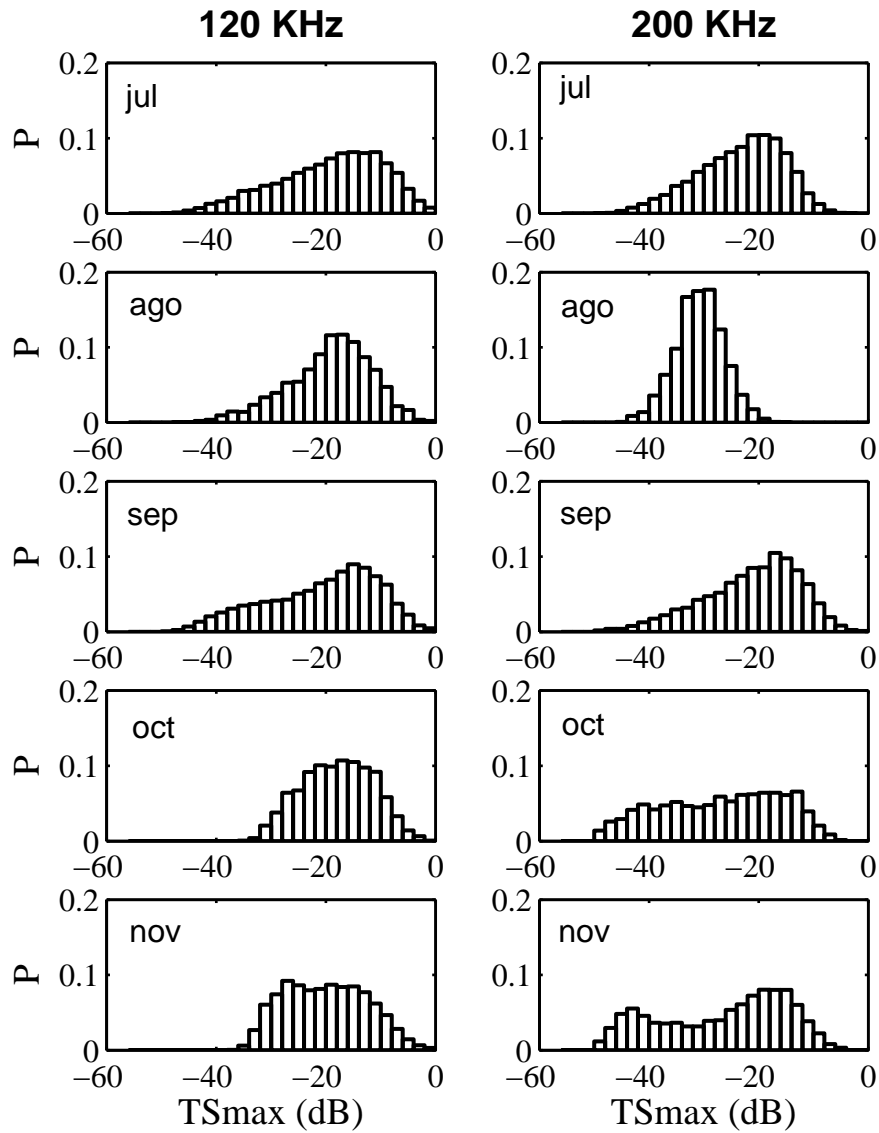


Figura 65. Densidad de probabilidad del TS máximo sin compensar de las trazas aisladas de la jaula J16. A la izquierda para 120 kHz y a la derecha para 200 kHz. Se presentan ordenadas por el mes de medida (la correspondencia julio, agosto, septiembre, octubre y noviembre).

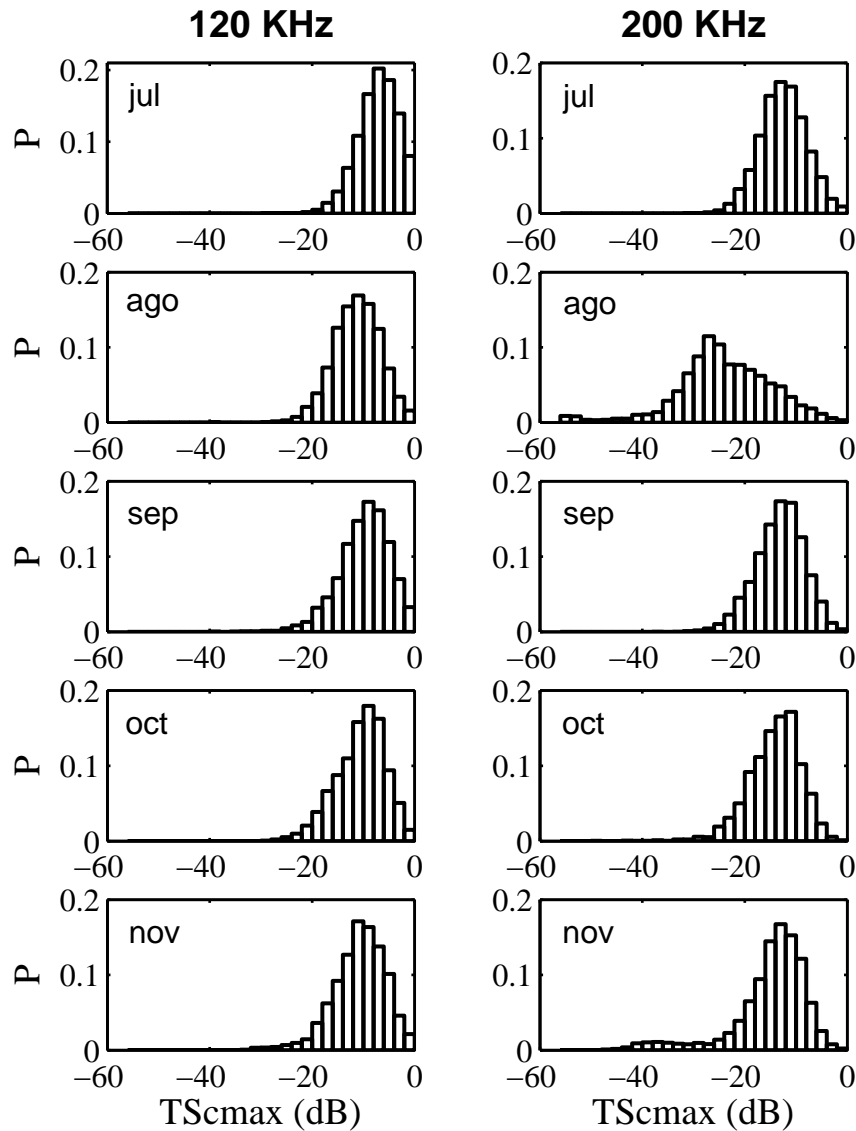


Figura 66. Densidad de probabilidad del TS máximo compensado de las trazas aisladas de la jaula J16. A la izquierda para 120 kHz y a la derecha para 200 kHz. Se presentan ordenadas por el mes de medida (la correspondencia julio, agosto, septiembre, octubre y noviembre).

Para la jaula J18 se representan los datos de la misma forma; en la Figura 67 y la Figura 68 representan las distribuciones de probabilidad para el TSmax y para el TSmax (para las dos frecuencias y para todos los meses que dura el estudio). En este caso las distribuciones del TSmax son más anchas mostrando grandes colas hacia los valores más pequeños. Aunque no se aprecia comportamientos marcadamente unimodales solo se intuye una posible bimodalidad para el caso de la frecuencia más baja durante el mes de noviembre. Sin embargo, si nos fijamos en las distribuciones del TSmax nos encontramos distribuciones marcadamente unimodales para todos los meses (para ambas frecuencias) con un ligero ensanchamiento durante el mes de octubre. En la Tabla 27, y la Tabla 28 se muestran valores medios del TSmax y del TSmax a ambas frecuencias, al igual que en el caso de la jaula J16, la variabilidad del TS puede atribuirse, como ya se ha comentado, a la suma de varios factores, la configuración de medida (que solo permite medir el TS a cortas

distancias entre 5 y 18 metros), el comportamiento de los peces dentro de la jaula, al que se une además el hecho del engrase de los atunes que puede aumentar dicha variabilidad.

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

Tabla 27. Valores de la longitud media, numero de trazas, media y desviación típica del TS máximo compensado y sin compensar para las medidas dorsales realizadas a 120 kHz en la jaula J18 durante todos los meses del estudio.

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

Tabla 28. Valores de la longitud media, numero de trazas, media y desviación típica del TS máximo compensado y sin compensar para las medidas dorsales realizadas a 200 kHz en la jaula J18 durante todos los meses del estudio.

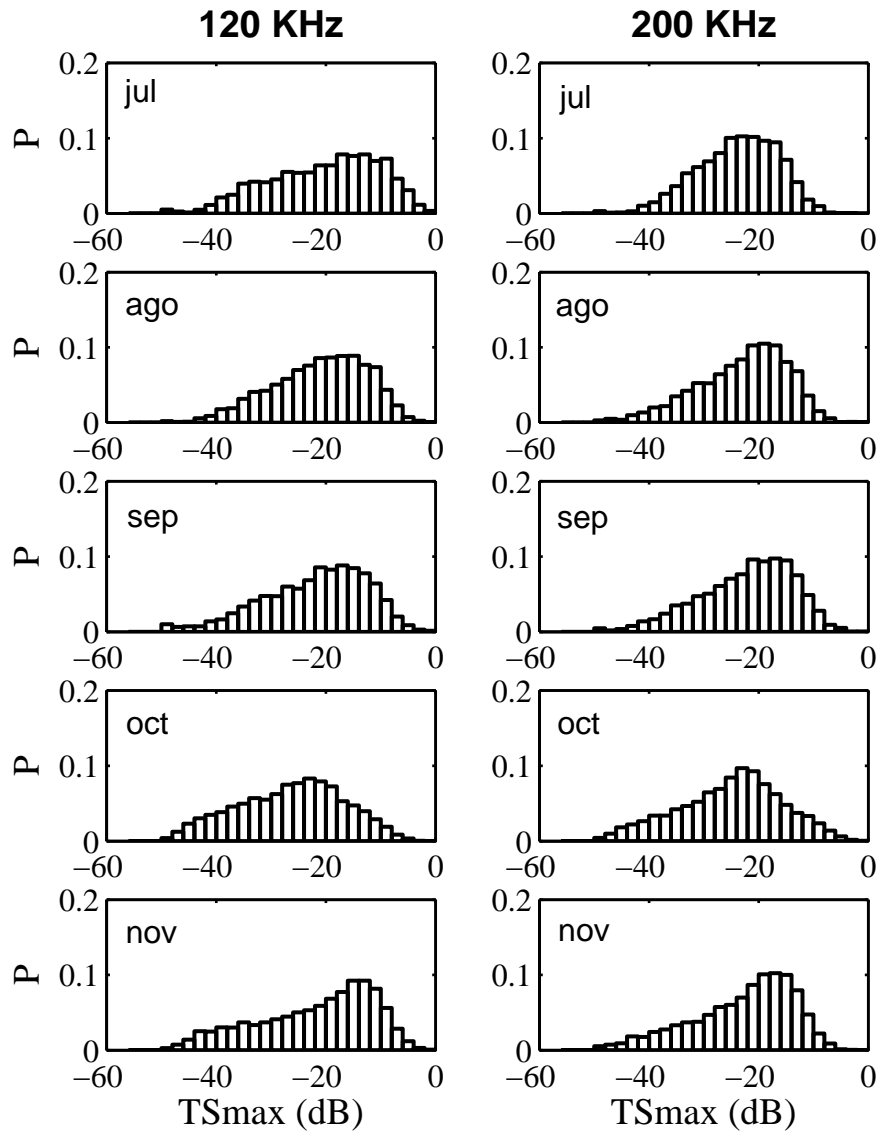


Figura 67. Densidad de probabilidad del TS máximo sin compensar de las trazas aisladas de la jaula J18. A la izquierda para 120 kHz y a la derecha para 200 kHz. Se presentan ordenadas por el mes de medida (la correspondencia julio, agosto, septiembre, octubre y noviembre).

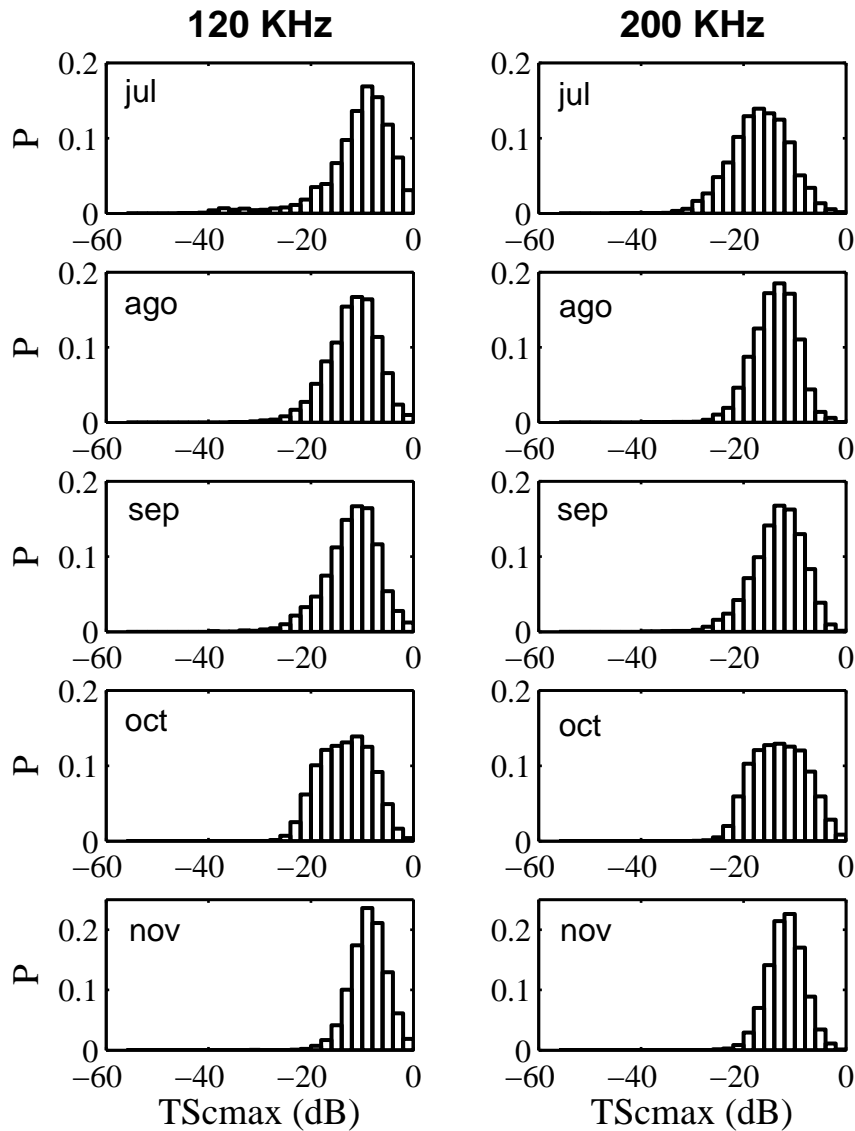


Figura 68. Densidad de probabilidad del TS máximo compensado de las trazas aisladas de la jaula J18. A la izquierda para 120 kHz y a la derecha para 200 kHz. Se presentan ordenadas por el mes de medida (la correspondencia julio, agosto, septiembre, octubre y noviembre).

Ocurre exactamente lo mismo para la jaula J20 que lo descrito para la jaula J18, es decir, las distribuciones del TScmax (Figura 69) se muestran unimodales pero con colas más alargadas hacia los valores más pequeños, presentando tendencia a la bimodalidad durante el mes de octubre. Durante el mes de noviembre la distribución a 120 kHz presenta varios modos mientras que a 200 kHz se vuelve claramente unimodal. Si nos fijamos en las distribuciones del TScmax, como ya ocurría para la J18, las distribuciones son marcadamente unimodales (Figura 70).

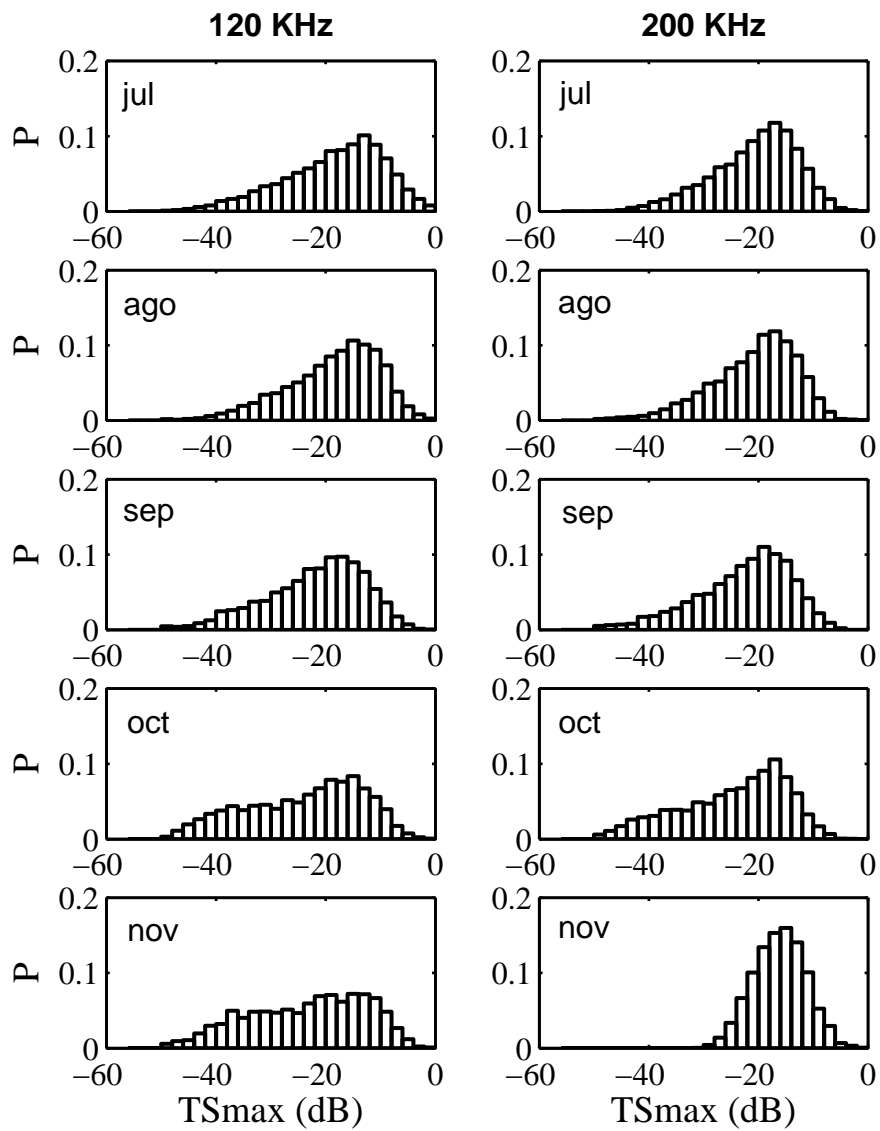


Figura 69. Densidad de probabilidad del TS máximo sin compensar de las trazas aisladas de la jaula J20. A la izquierda para 120 kHz y a la derecha para 200 kHz. Se presentan ordenadas por el mes de medida (la correspondencia julio, agosto, septiembre, octubre y noviembre).



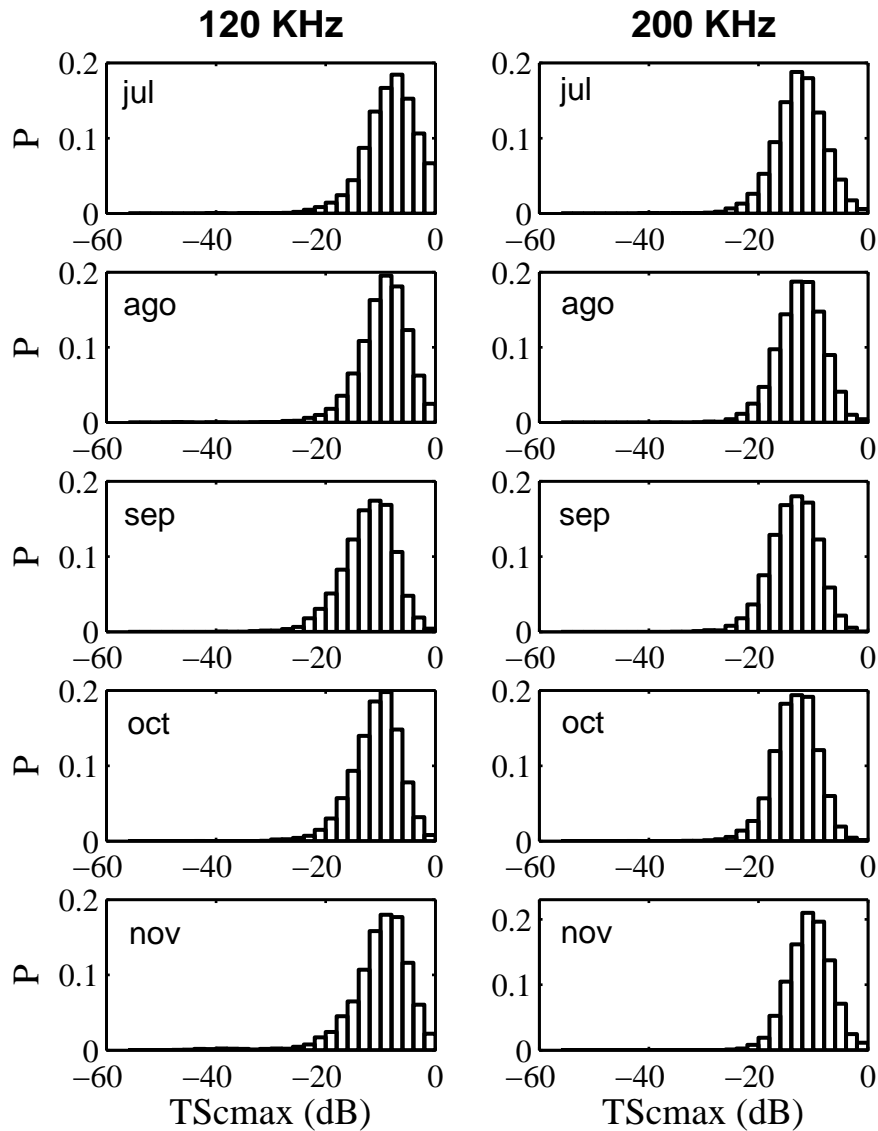


Figura 70. Densidad de probabilidad del TS máximo compensado de las trazas aisladas de la jaula J20. A la izquierda para 120 kHz y a la derecha para 200 kHz. Se presentan ordenadas por el mes de medida (la correspondencia julio, agosto, septiembre, octubre y noviembre).

Al igual que en los casos anteriores la Tabla 29 y la Tabla 30, no permiten observar variaciones significativas del TSmax y del TScomp a ninguna de las dos frecuencias.

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

Tabla 29. Valores de la longitud media, numero de trazas, media y desviación típica del TS máximo compensado y sin compensar para las medidas dorsales realizadas a 120 kHz en la jaula J20 durante todos los meses del estudio.

Mes	<i>f=200 kHz</i> Jaula J20			<i>TSmax</i>		<i>TScmax</i>	
	$\bar{L}$ (cm)	Nº de trazas	Distancia máx (m)	$\mu$ (dB)	$\sigma$ (dB)	$\mu$ (dB)	$\sigma$ (dB)
julio	222	10077	19	-15.65	7.81	-10.37	4.48
agosto	222	6719	19	-15.99	7.85	-10.49	4.23
septiembre	224	7299	19	-17.06	8.58	-11.64	4.27
octubre	225	6624	19	-17.75	9.67	-11.54	4.02
noviembre	---	3330	19	-13.73	4.74	-9.07	3.81

Tabla 30. Valores de la longitud media, numero de trazas, media y desviación típica del TS máximo compensado y sin compensar para las medidas dorsales realizadas a 200 kHz en la jaula J18 durante todos los meses del estudio.

Se opta finalmente por unir las detecciones de todas las jaulas para cada una de las frecuencias, de tal manera que se disponga de distribuciones por meses de la suma de las tres jaulas. Los resultados se muestran en las Figura 71 y Figura 72.

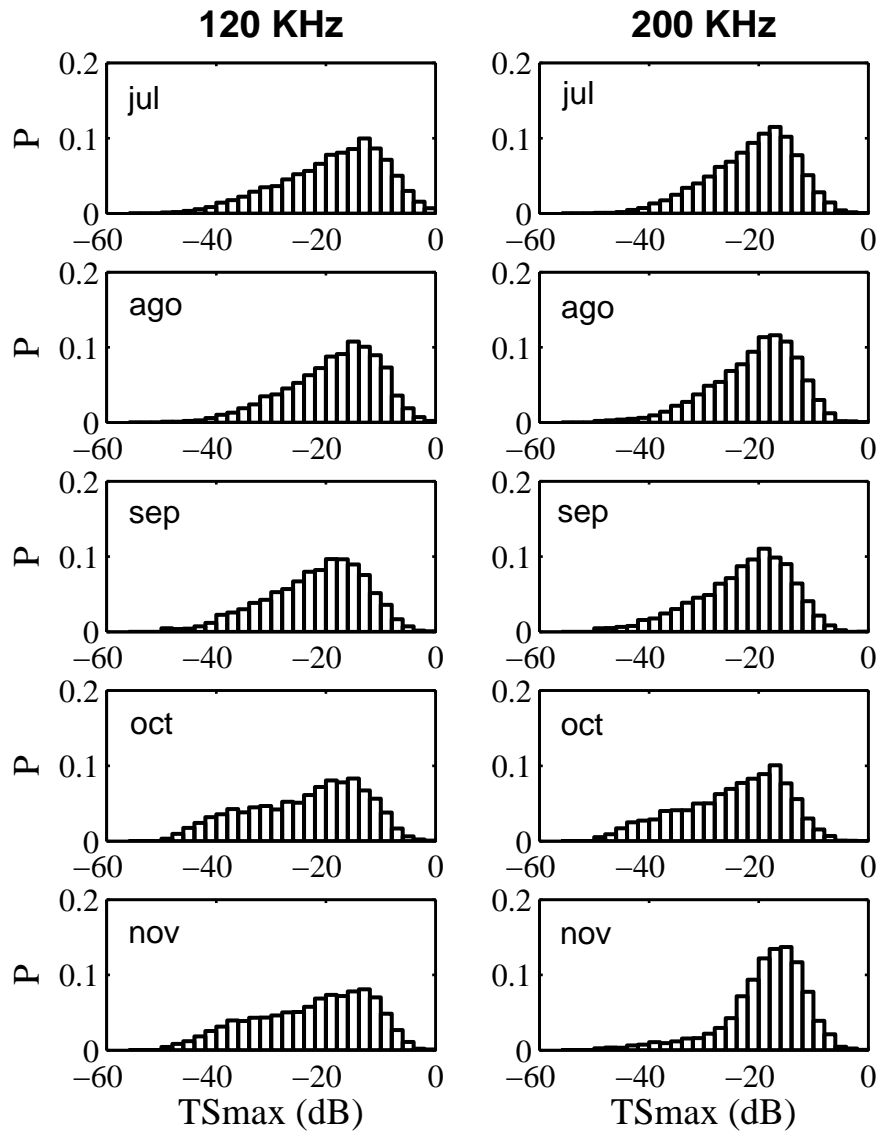


Figura 71. Densidad de probabilidad del TS máximo sin compensar de las trazas aisladas de todas las jaulas. A la izquierda para 120 kHz a la derecha para 200 kHz. Se presentan ordenadas por el mes de medida (la correspondencia julio, agosto, septiembre, octubre y noviembre).

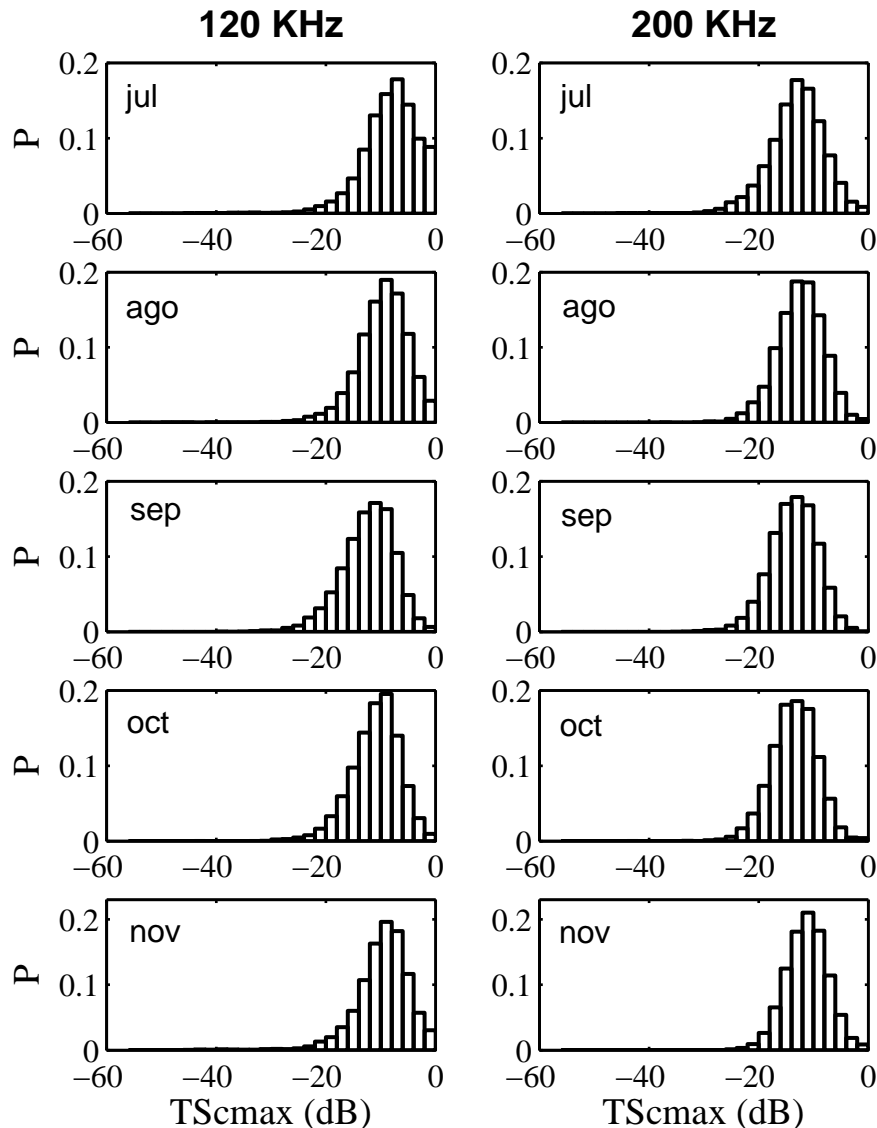


Figura 72. Densidad de probabilidad del TS máximo compensado de las trazas aisladas de todas las jaulas. A la izquierda para 120 kHz a la derecha para 200 kHz. Se presentan ordenadas por el mes de medida (la correspondencia julio, agosto, septiembre, octubre y noviembre).

Para el caso del TScmax unir todos los datos de las tres jaulas no cambia los resultados obtenidos, se siguen mostrando distribuciones unimodales con colas en la parte de los valores más pequeños durante los primeros tres meses apareciendo indicios de bimodalidad en octubre y en noviembre para la frecuencia de 120 kHz, comportándose el mes de noviembre a 200 kHz como el resto de los meses. El TScmax repite el mismo comportamiento también presentando distribuciones unimodales todos los meses a ambas frecuencias. Finalmente, a la vista de los datos mostrados en la Tabla 31 y la

Tabla 32 queda patente que no se pueden encontrar variaciones claras del TS con el tiempo, no obstante, para el caso de 120 kHz parece apreciarse una disminución del TScmax los tres primeros meses que se recupera a partir de octubre. El caso de 200 kHz estaría más acorde con los valores de longitud media mostrados para cada mes. Dichos valores parecen mantenerse constantes al igual que los valores del TScmax para 200 kHz de frecuencia.

<i>f=120 kHz</i>	<i>Jaula J16+J18+J20</i>			<i>TSmax</i>		<i>TScmax</i>	
	<i>Mes</i>	$\bar{L}$ (cm)	<i>Nº de trazas</i>	<i>Distancia máx (m)</i>	$\mu$ (dB)	$\sigma$ (dB)	$\mu$ (dB)
julio	221	26052	19	-12,22	9,33	-5.69	5.32
agosto	219	14790	19	-13,27	8,42	-7.57	4.70
septiembre	222	20994	19	-15,76	8,84	-10.02	4.90
octubre	223	25387	19	-15,88	10,36	-8.49	4.53
noviembre	---	16058	19	-14,94	10,39	-9.16	5.28

Tabla 31. Valores de la longitud media, numero de trazas, media y desviación típica del TS máximo compensado y sin compensar para las medidas dorsales realizadas a 120 kHz en la jaula J18 durante todos los meses del estudio.

<i>f=200 kHz</i>	<i>Jaula J16+J18+J20</i>			<i>TSmax</i>		<i>TScmax</i>	
	<i>Mes</i>	$\bar{L}$ (cm)	<i>Nº de trazas</i>	<i>Distancia máx (m)</i>	$\mu$ (dB)	$\sigma$ (dB)	$\mu$ (dB)
julio	221	28383	19	-15,98	7,83	-9,28	5,09
agosto	219	13512	19	-16,00	7,80	-10,53	4,27
septiembre	222	19832	19	-17,14	8,45	-11,72	4,34
octubre	223	18862	19	-18,00	9,44	-11,49	4,20
noviembre	---	16744	19	-14,76	7,54	-9,41	3,87

Tabla 32. Valores de la longitud media, numero de trazas, media y desviación típica del TS máximo compensado y sin compensar para las medidas dorsales realizadas a 200 kHz en la jaula J18 durante todos los meses del estudio.

Como se ha descrito en el presente apartado, no se puede hablar de una tendencia clara de los valores del TS (ni compensado, ni sin compensar) asociado al proceso de engrase. Durante los meses de medida el TS cambia, pero no puede establecerse una causa única responsable de dicho cambio, sino que dicha variación se debe a la suma de múltiples factores: el hecho de realizar las medidas a distancias cortas, el comportamiento de los peces al que se suma el proceso de engrase que modifica los parámetros biométricos como, sobre todo la anchura media de los atunes en las jaulas y su factor de condición, manteniéndose la longitud media durante los meses de estudio.

#### 6.4.2. Dependencia del TS desde el punto de vista ventral con la distancia al transductor.

En este punto, se realiza un estudio de la dependencia del TS (compensado y sin compensar) con la distancia al transductor. El estudio se realiza por meses y por jaulas para cada una de las frecuencias. Finalmente se unen los datos de todas las jaulas y se realiza el análisis para ambas frecuencias por meses. Se pretende conocer cómo se comporta el TS a medida que nos alejamos del transductor.

Se calcula el valor medio del *TS* máximo desde el punto de vista ventral en capas de un metro, de tal modo que debe haber al menos 50 muestras (500 cuando se consideran los datos de las tres jaulas juntas) en la capa para que la media se considere válida, de este modo, se eliminan valores medios afectados por pocas detecciones que generan valores aberrantes en los extremos (zonas muy cercanas o muy alejadas) donde nadan menos individuos produciéndose menos registros.

En la Figura 73 podemos observar cómo se comporta el *TS*<sub>max</sub> a las dos frecuencias para cada una de las jaulas (de la 16 a la 20 en orden descendente) y finalmente para todas las jaulas juntas. A la vista de las gráficas puede observarse que a 120 kHz la J16 presenta un *TS* que crece con la distancia al a fuente, siendo ese efecto más acusado para julio. En esta jaula se produce un desplome del *TS* para las capas más lejanas del mes de septiembre, seguramente por efecto del comportamiento de los peces en dicha capa. Para la jaula J18 se produce una gran caída del *TS*<sub>max</sub> durante el mes de octubre asociado al comportamiento de los peces durante la toma de datos, conjugado con un cambio en los parámetros biométricos debidos al engrase. Este efecto no puede apreciarse en noviembre para esta jaula debido a la disminución notable de detecciones. Para la J20 se observa una disminución del *TS*<sub>max</sub> con los meses, pero no se aprecia ninguna dependencia con la distancia al transductor. Noviembre en esta jaula rompe la tendencia mostrando un mayor valor medio por capa que el mes de octubre. Al unir los datos de todas las jaulas para esta frecuencia puede apreciarse que, para los meses de julio agosto y septiembre existe una dependencia del *TS* con la distancia ya que aumenta con ella, la tendencia se muestra con menos claridad en el mes de noviembre, mientras que en el mes de octubre no parece apreciarse dicha tendencia.

Si nos fijamos en la columna derecha de la Figura 73 se observa que para la frecuencia de 200 kHz la jaula J16 presenta un aumento del *TS*<sub>max</sub> a medida que se aleja del transductor produciéndose una caída en las capas superiores debido a la disminución de detecciones que conforman la media. Esta tendencia es menos marcada el mes de agosto que ofrece además valores medios del *TS*<sub>max</sub> por capas mucho menores. El caso de la J18 es completamente distinto mostrando el aumento del *TS* con la distancia todos los meses y con valores del *TS*<sub>max</sub> medio por capas más cercano entre meses. Con la jaula J20 ocurre lo mismo el *TS*<sub>max</sub> aumenta con la distancia excepto para las capas más superficiales en la que la falta de detecciones hace disminuir la media. Existen dos particularidades el mes de octubre tiene un aumento del *TS* con la distancia menor y el mes de noviembre ofrece valores medios por capas ligeramente superiores a los del resto de los meses. Si nos fijamos en la suma de todos los datos, se observa claramente dicha dependencia del *TS*<sub>max</sub> con la distancia que se va suavizando con los meses de manera que para julio es muy marcada y para los meses de octubre y noviembre lo es menos, presentando estos meses, además, mayores valores medios en las capas más cercanas que el resto de meses y ligeros descensos en las capas superiores creándose una zona de mayor estabilidad entre 5 y 10 metros para octubre y entre 6 y 11 metros para noviembre.

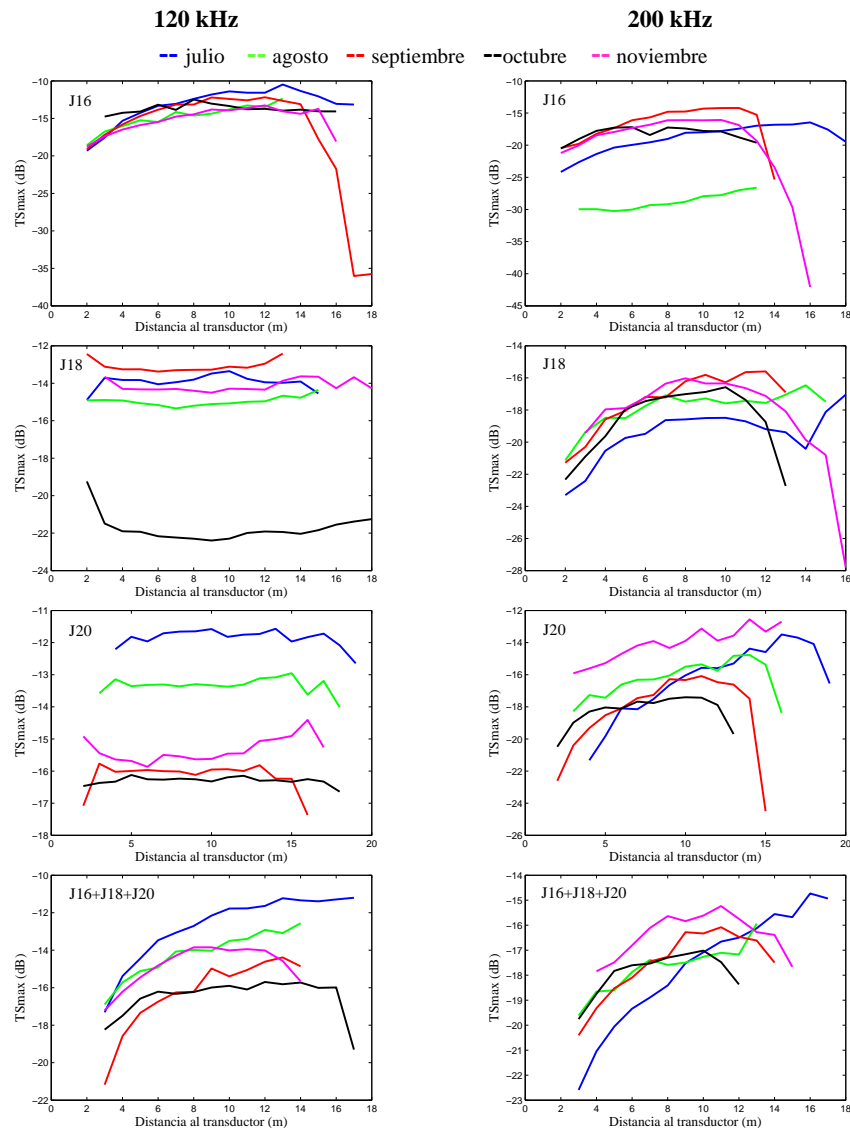


Figura 73. Dependencia del  $TS_{max}$  con la distancia al transductor para las dos frecuencias y todas las jaulas por separado y unidas. Aparecen en la parte superior J16, segunda fila J18, después J20 y abajo todas las jaulas juntas. En la columna izquierda datos de 120 kHz mientras que en la derecha datos para 200kHz. Sobre las gráficas la correspondencia de los meses con los colores de las líneas.

En la Figura 74, se repite el mismo esquema de presentación de datos, esta vez con el valor del promedio del  $TS$  máximo compensado por capas. A la frecuencia de 120 kHz la J16 presenta aumento del  $TS_{cmx}$  con la distancia, aunque de manera más suavizada, aparecen dos discordancias, agosto presenta valores del  $TS_{cmx}$  medio por capas menor que el resto, y noviembre ofrece valores con una gran variabilidad, en este último caso, asociados seguramente al comportamiento de los peces durante la toma de datos. La jaula J18 a esta frecuencia muestra menos aumento del  $TS$  con la distancia manteniéndose bastante estable casi todos los meses excepto el mes de octubre que ofrece valores medios del  $TS_{cmx}$  muy elevados que van disminuyendo hasta encontrar un mínimo cerca de los 8 metros para volver a crecer de manera extrema hasta llegar a las capas más superficiales. En la J20, a 120kHz, el  $TS_{cmx}$  parece no

depender de la distancia, pero si muestra variabilidad con los meses de medida, teniendo valores medios muy altos en julio, que decrecen los meses de agosto y septiembre (hasta formar tres líneas casi paralelas, pero que vuelven a crecer los meses de octubre y noviembre, aunque no alcanzan los valores de julio. Si nos fijamos en la suma de todos los datos, se observa una leve crecida del TScmax a medida que aumenta la distancia al transductor, aunque se suaviza para los meses de octubre y noviembre. En cuanto a la variabilidad por meses, se repite la tendencia mostrada en la jaula J20, en la que parece que el promedio del TS compensado máximo por capas disminuye con los meses hasta septiembre para luego aumentar los meses de octubre y noviembre sin llegar a alcanzar los valores del mes de julio.

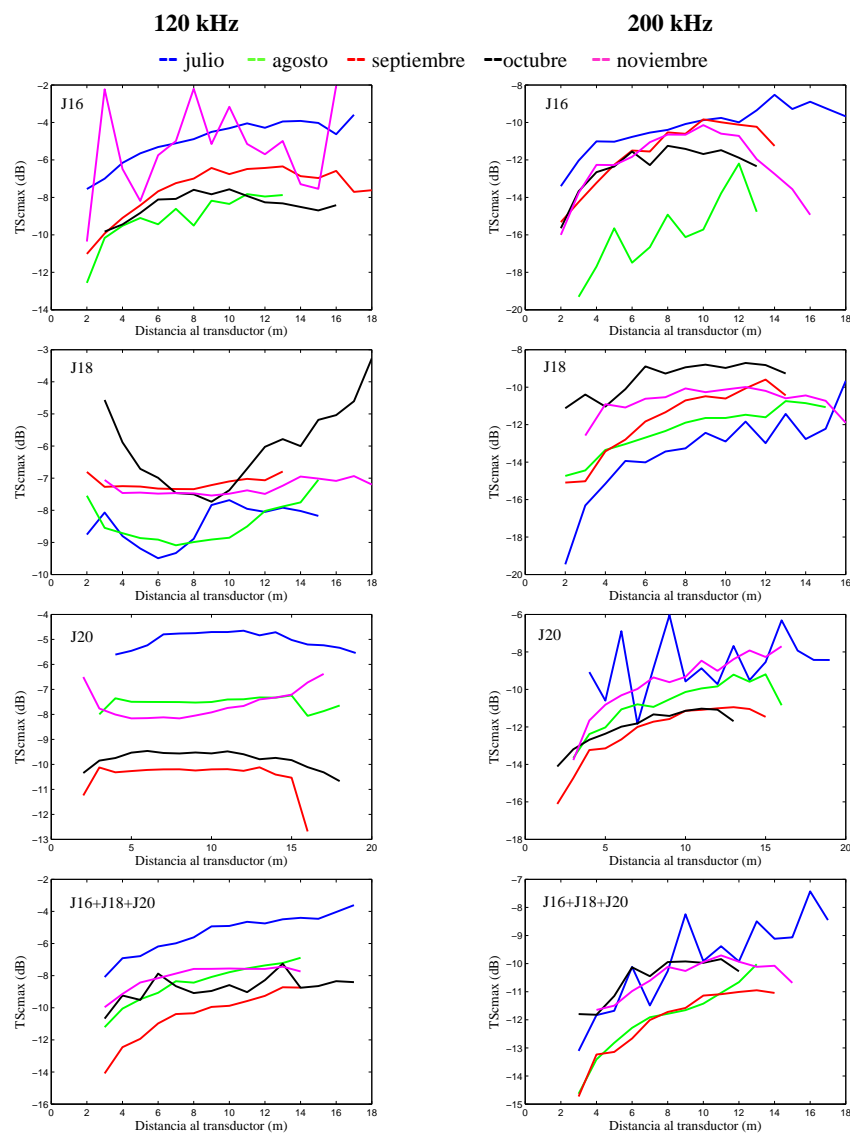


Figura 74. Dependencia del TScmax con la distancia al transductor para las dos frecuencias y todas las jaulas por separado y unidas. Aparecen en la parte superior J16, segunda fila J18, después J20 y abajo todas las jaulas juntas. En la columna izquierda datos de 120 kHz mientras que en la derecha datos para 200 kHz. Sobre las gráficas la correspondencia de los meses con los colores de las líneas.



El TS compensado a 200 kHz presenta para la jaula 16 dependencia con la distancia aumentando 6 dB entre las capas más cercanas y las más lejanas. En esta jaula se vuelve a repetir el efecto de que los valores del mes de agosto difieran de los del resto al ser marcadamente inferiores que el resto de los meses. La J18, sigue mostrando aumento del TScmax con la distancia produciéndose un fenómeno no visto hasta ahora, los valores medios crecen con el tiempo hasta el mes de octubre para disminuir ligeramente el mes de noviembre. La jaula J20, muestra el efecto temporal ya comentado, en el que los valores medios por capas decrecen hasta el mes de septiembre para recuperarse los meses de octubre y noviembre, con la salvedad de que en este caso el mes de noviembre casi alcanza los valores medios del mes de julio. En cuanto a la tendencia mostrada por el TScmax con la distancia, se aprecia un aumento a medida que se aleja del transductor, excepto para el mes de julio en el que la oscilación de los valores es muy abrupta entre capas. Este efecto ya mostrado durante otros meses en otras jaulas puede asociarse al comportamiento de los atunes durante el tiempo de medida. Finalmente, viendo todos los datos juntos, se aprecia de manera más acusada el aumento del TScmax con la distancia, del mismo modo que se aprecia el efecto de los diferentes meses de medida, disminuyendo los valores medios por capas entre julio y agosto, manteniéndose en septiembre al mismo nivel que en agosto para después recuperarse en octubre y noviembre hasta valores similares a los de julio, pero suavizándose el efecto de la distancia en el TScmax sobre todo a partir de los 8 metros.

A la vista de estas gráficas, se puede pensar que el TS (compensado y sin compensar) muestran dependencia con la distancia a ambas frecuencias, este fenómeno se observa mejor cuando se incluyen todos los datos de las tres jaulas en una misma gráfica, lo que nos lleva a pensar que es necesaria una gran cantidad de detecciones por capa para obtener valores representativos del TS en la misma (se requerían al menos 500 detecciones para considerar la media). Para el TSmax la dependencia parece mayor a 200 kHz, y este fenómeno se repite cuando el valor del TS está compensado.

La variabilidad del TS esperada debido a la configuración de medida (al encontrarnos a cortas distancias y frente a blancos de gran tamaño), se ve incrementada por el comportamiento de los peces durante las medidas, como se refleja en algunas de las gráficas en las que se muestran oscilaciones de los valores medios muy abruptas entre capas. Se observa la repetición de un fenómeno, que tal vez, este asociado al cambio en el factor de condición de los peces debido al proceso de engrase. En más de una ocasión los valores medios disminuyen con los meses hasta septiembre momento en el que se recuperan (para los meses de octubre y noviembre). Este hecho, pone de manifiesto la necesidad de un estudio intensivo sobre como se ve afectado el valor del TS con la distancia dentro de una jaula con la ayuda de métodos de simulación numérica, apoyados a posteriori por nuevas campañas de medidas en las jaulas que ayuden a clarificar que efectos se deben a la incertidumbre de la determinación del TS a cortas distancias, y cuales se pueden asociar al comportamiento de los peces y/o a los cambios en las condiciones biométricas de los atunes (aumento de la longitud, de la anchura o del factor de condición).

### **6.4.3. Conclusiones**

En el análisis acústico se ha utilizado el TS máximo de las trazas, entendiendo que este valor procede de la energía devuelta por la vejiga natatoria, ya que se sabe, que para las especies que la poseen, la

vejiga es la responsable de la mayor cantidad de la energía devuelta por un pez al ser alcanzado por la onda acústica. La configuración de medida y el tamaño de los peces introducen incertidumbre en la determinación exacta del  $TS$ , por lo que se decide realizar un estudio para los valores compensado y sin compensar de este parámetro para valorar cual se adecúa mejor a las condiciones de medida.

El procedimiento de medida se ha visto limitado por el hecho de haber sido realizado en jaulas de engrase, este hecho, introduce incertidumbres en la determinación del  $TS$  asociadas a las medidas a cortas distancias y al tamaño de los peces estudiados. Se observa que, en la mayoría de los casos, las distribuciones de  $TS$  mostradas tienen carácter unimodal. Este hecho corrobora los resultados obtenidos para otras especies en los que dicha unimodalidad en las distribuciones del  $TS$  suelen asociarse a la baja directividad de la vejiga a las frecuencias de estudio o al enmascaramiento de los lóbulos laterales del transductor bien por el ruido ambiental o bien porque se encuentran en una dirección muy lejana al eje acústico por lo que la probabilidad de su detección disminuye (Knudsen *et al.*, 2004). No obstante, algunas de las distribuciones no están exentas de ensanchamientos excesivos y en alguna de ellas claro carácter bimodal cuando observamos los valores del  $TS_{max}$ . Este fenómeno es atribuible al comportamiento de los peces durante las medidas, ya que, se ven afectados por trabajo en la jaula para la disposición de los equipos y también por los trabajos que se realizan en las otras jaulas consecuencia de las necesidades de la planta de engrase. En trabajos recientes, se ha demostrado, que, aunque posee un alto grado de adaptabilidad, el atún rojo es capaz de reaccionar a estímulos externos con una variación del comportamiento habitual. Este hecho se añade a la gran cantidad de factores de variabilidad que pueden afectar medidas de este tipo. Sin embargo, las distribuciones del  $TS_{max}$  si mantienen el carácter unimodal, ofreciendo distribuciones estrechas y compactas. Los valores medios del  $TS$  de cada mes (si nos fijamos en los datos de las tres jaulas a la vez) se ciñen a los mostrados por los datos ópticos, es decir, no existe una variabilidad de la media con el tiempo, como tampoco parece existir cuando se mide la longitud media de los peces cada mes que parece constante con el tiempo.

Finalmente se ha realizado un estudio de la dependencia del  $TS$  con la distancia al transductor. En el estudio el  $TS$  (compensado y sin compensar) muestra dependencia con la distancia. Uniendo los datos de todas las jaulas para cada una de las frecuencias estudiadas se aprecia mejor dicho efecto debido al aumento de detecciones en cada capa. Esta dependencia es más acusada a la frecuencia de 200 kHz que a la de 120 kHz, siendo las pendientes mayores cuando la energía retrodispersada por los peces no está compensada. Se han observado efectos asociados al comportamiento de los peces que conllevan gran variabilidad del  $TS$  entre capas cercanas, del mismo modo, se ha podido constatar que en repetidas ocasiones los valores medios se comportan de la misma manera, disminuyendo paulatinamente los meses de julio, agosto y septiembre y aumentando los meses de octubre y noviembre. Esta tendencia se ha repetido para las dos frecuencias consideradas.

Es importante realizar nuevos estudios que permitan discernir como varía el  $TS$  dentro de una jaula marina para el engrase de atunes, así como estudiar como se ve afectado el valor de este parámetro cuando se miden peces grandes a cortas distancias. De este modo, podrán aislarse las posibles causas de la variabilidad de los resultados asociadas a la configuración de medida y las derivadas del comportamiento de los peces (y del proceso de engrase de los mismos).

## 6.5. Resultados conjuntos de las medidas acústicas y ópticas

### 6.5.1. Relación del TS desde el punto de vista ventral con la longitud del atún rojo.

Se pretende en este apartado, conseguir una relación del *TS* con la longitud para el aspecto ventral del atún rojo. Para poder conseguir dicho ajuste se parte de pares de datos acústico-ópticos en el que un determinado atún es medido acústicamente y grabado con el sistema de visión estereoscópica simultáneamente de manera que la correspondencia *TS*-Longitud es única.

El estudio de la dependencia del logaritmo de la longitud de los atunes (medida en las imágenes) con los valores del *TS*<sub>max</sub> y el *TS*<sub>cm</sub> se realiza mediante un ajuste lineal por ser el más usado en la estimación de biomasa con herramientas acústicas (Ecuación (4)). Para evaluar la bondad del ajuste se hace uso del coeficiente de determinación y el p-valor del análisis de la varianza.

$$TS(dB) = a \cdot \log_{10} L(cm) + b \quad (4)$$

Para poder obtener un par acústico-óptico, el atún, debía estar entre 5 y 10 metros de los sensores, aislado en cada par de imágenes para ser segmentado correctamente, recto en el instante del máximo acústico (5 frames antes o después) y debía poderse establecer una correspondencia entre las dos imágenes del par estéreo (sección 5.4). Como consecuencia del cumplimiento de todas estas condiciones la cantidad de coincidencias acústico-ópticas obtenidas para cada mes y cada jaula no fue muy elevada, ya que después los datos registrados fueron ordenados por tamaño de los atunes. Por este hecho se optó por juntar todos los datos de todas las jaulas y todos los meses con la finalidad de estudiar si es posible obtener una relación entre la longitud y el *TS* para peces engrasados en cautividad. Al no conocer las estrategias de alimentación seguidas por la empresa en cada una de las jaulas, y como no se dispone de medidas ópticas en el mes de agosto para una de ellas, se decide eliminar dicho mes de los datos para no afectar al resultado final. Por lo tanto, se usan las correspondencias acústico-ópticas de los meses de julio, septiembre y octubre.

Además, con la finalidad de disponer de los mejores ajustes posibles se realizó un filtrado por la inclinación de los peces, calculada a partir del par de imágenes estéreo. En la Tabla 33 se muestran los valores de los ajustes obtenidos para la frecuencia de 120 kHz y en la Tabla 34 para 200 kHz. En dichas tablas se presentan ajustes lineales para diferentes inclinaciones de los atunes tanto para el *TS* compensado y coma para el *TS* sin compensar.

A la vista de los resultados se produce el mejor ajuste cuando los peces están inclinados entre -5° y 5° para la frecuencia de 120 kHz. No existen diferencias en la calidad de los ajustes para el *TS*<sub>max</sub> y el *TS*<sub>cm</sub>, siendo las pendientes similares en ambos casos. Para el caso de la frecuencia de 200 kHz los datos varían y se obtienen mejores ajustes para el *TS*<sub>cm</sub> que para el *TS* sin compensar. Además, aunque en el intervalo angular entre -5° y 5° produce muy buenos ajustes con una gran cantidad de correspondencias acústico-ópticas, se producen mejores ajustes para el intervalo entre 0° y 5°, con una menor cantidad de coincidencias (el análisis de los datos se realiza con menos de la mitad de muestras). En el caso de 200 kHz la pendiente es baja para el *TS*<sub>max</sub> y mayor para el *TS*<sub>cm</sub>, sin poderse establecer un ajuste para el *TS*<sub>max</sub> cuando la inclinación oscila entre -5° y 0°.

Los ajustes son estadísticamente significativos con un nivel de confianza del 95% (como indican los valores de la columna del p-valor) para la frecuencia de 120 kHz tanto para el TSmax como para el TSmax. Sin embargo, para la frecuencia de 200 kHz el nivel de confianza se mantiene en los mismos niveles excepto para el caso del último intervalo en el que baja al 93% para el TS compensado y no encontrándose ajuste cuando el TS no se compensa.

$TS(dB)=a \cdot \log_{10} L(cm)+b$						$f=120 \text{ kHz}$			
TSmax						TSmax			
grupo	Número de detecciones	a	b	R <sup>2</sup>	p-valor	a	b	R <sup>2</sup>	p-valor
-5° a 5°	1236	24.33	-70.87	0.71	0.00	20.97	-57.48	0.74	0.00
-10° a 10°	2092	25.90	-74.47	0.70	0.00	23.68	-63.94	0.60	0.00
20° a 20°	2776	25.56	-73.72	0.64	0.00	24.42	-65.49	0.57	0.00
0° a 5°	467	31.28	-86.52	0.65	0.00	31.95	-81.97	0.62	0.00
-5° a 0°	656	31.94	-87.61	0.65	0.00	31.82	-81.56	0.60	0.00

Tabla 33. Resultados del ajuste lineal del TS máximo de las trazas (compensado y sin compensar) para la frecuencia de 120 kHz

En el intervalo entre -5° y 5°, para el TSmax, la pendiente a 200 kHz está en torno a 20 (21.14) y la ordenada en el origen es 61.28. En este mismo intervalo a la frecuencia de 120 kHz la pendiente también está cerca de 20 (20.97) y la ordenada en el origen es similar a la encontrada en el caso anterior pero un poco menor (57.48).

No existen datos que evalúen el TS del atún rojo desde el punto de vista ventral, ni se conocen de otro tipo de túridos, como sí ocurría para las medidas realizadas dorsalmente. Hsueh-Jung *et al.*, (2011), en su experimento realizado en tanques con rabil (*Thunnus albacares*), evalúan el TS frente a la inclinación de los atunes, a 200 kHz aunque desde el punto de vista dorsal. En sus estudios concluyen que las orientaciones más frecuentes de nado están entre -5° y 1°. En el caso del presente experimento las orientaciones más frecuentes están entre -5° y 5° mientras atraviesan el haz acústico (para ambas frecuencias) por este hecho se elige el ajuste de este intervalo como el más representativo. No podemos establecer comparaciones con trabajos realizados para otras especies de atunes similares, ya que, ninguno presenta medidas desde el punto de vista ventral, donde la reflexión de la vejiga natatoria se hace más presente. Dichos trabajos establecen ajustes entre el TS y el logaritmo de la longitud con diferentes pendientes para la misma especie de atún. Para el caso de *Thunnus albacares* en estudios desde el punto de vista dorsal, autores como Manik (2009) indican que la pendiente es 19.80 (usando frecuencias de 38 kHz y hasta 500 metros de profundidad),

mientras que otros la sitúan en 25.26 a la misma frecuencia y en el mismo rango de profundidades (Bertrand & Josse, 2000).

$TS(dB)=a \cdot \log_{10}L(cm)+b$						$f=200 \text{ kHz}$			
<i>TScmax</i>						<i>TScmax</i>			
<i>grupo</i>	<i>Número de detecciones</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	$R^2$	<i>p-valor</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	$R^2$	<i>p-valor</i>
-5° a 5°	1271	12.01	-45.55	0.54	0.05	21.14	-61.28	0.85	0.00
-10° a 10°	2184	12.69	-47.51	0.67	0.02	19.63	-58.02	0.83	0.00
20° a 20°	2849	17.11	-57.64	0.62	0.00	11.94	-40.00	0.47	0.01
0° a 5°	541	34.19	-97.63	0.95	0.00	41.15	-107.88	0.90	0.00
-5° a 0°	656	NA	NA	NA	NA	9.36	-34.08	0.50	0.07

NA significa que no se encuentra ajuste

Tabla 34. Resultados del ajuste lineal del TS máximo de las trazas (compensado y sin compensar) para la frecuencia de 200 kHz.

En este experimento se pretende establecer si se puede evaluar el *TS* del atún rojo desde el punto de vista ventral en una jaula de engrase, teniendo en cuenta únicamente las detecciones acústicas encontradas en una pequeña capa de 5 metros (entre 5 y 10 metros del transductor); en la que es posible realizar medidas fiables con el sistema óptico. El hecho del confinamiento de los peces no es trivial, ya que el estado de los peces en este tipo de instalaciones difiere del que tienen en estado salvaje. Los atunes en las jaulas se ven obligados a adaptar su comportamiento a las condiciones en las que viven, modificando la velocidad de nado y las excursiones en la columna de agua. En la sección 3 se comprobó que el proceso de engrase modifica los parámetros biométricos respecto a los de los peces que viven en estado salvaje. La conjunción de todas estas variables junto con las del experimento (frecuencia y distancia de medida principalmente) influyen de manera notable en los valores de las pendientes y las constantes obtenidas en los ajustes presentados.

### 6.5.2. Relación del *TS* desde el punto de vista ventral con la anchura del atún rojo.

De las medidas ópticas se obtuvo la longitud de los peces y su anchura, por ello, se estudia también si existe una relación del *TS* medido ventralmente con la anchura del atún rojo. El procedimiento para la obtención de resultados es el mismo que para el caso de la longitud y se busca en ajuste entre el *TSmax* y el *TScmax* para las dos frecuencias (120 y 200 kHz) como ya se hizo en el apartado

anterior. Se recurre a la Ecuación (4), variando el logaritmo de la longitud por el de la anchura utilizando los mismos evaluadores de la bondad de los ajustes (coeficiente de determinación y el p-valor del análisis de la varianza). Tras el análisis de los datos, solo se han encontrado correspondencias estadísticamente significativas para el caso de la anchura máxima (1 en la Figura 35).

No se han encontrado ajustes para la frecuencia de 120 kHz. A dicha frecuencia los ajustes entre el *TS* (tanto compensado como sin compensar) tienen pendientes muy bajas y coeficientes de correlación en torno a 0.1. Si nos fijamos en la Figura 75, podemos ver los datos para el intervalo de inclinación entre  $-5^\circ$  y  $5^\circ$ . En la dicha Figura se aprecia como para las anchuras intermedias el valor del *TS* es mayor de lo que lo es para las anchuras mayores donde el *TS* parece disminuir del mismo modo que ocurre con las anchuras menores. Este efecto no puede atribuirse a ningún factor en concreto, aunque pueda deberse a la suma de varios de los descritos a lo largo de la presente tesis y que son intrínsecos a las medidas del *TS* a cortas distancias, al comportamiento de los peces en las jaulas y seguramente, son consecuencia del engrase de los peces dentro de las jaulas. Es indispensable la realización de un estudio mediante técnicas de simulación de la situación descrita para poder averiguar la dependencia de estos resultados con algunos de los factores mentados, así como la realización de una campaña de medidas que avale los resultados de dichas simulaciones.

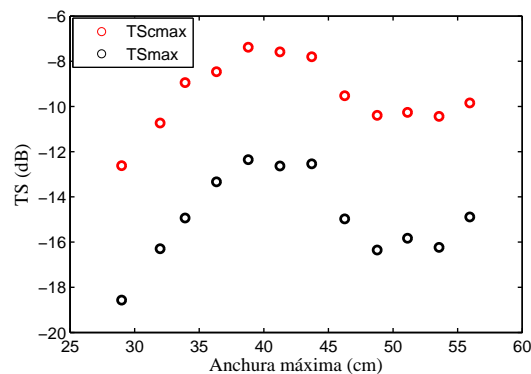


Figura 75. Datos para el ajuste el ajuste entre el *TS* y la anchura máxima a la frecuencia de 120 kHz.

Sin embargo, en la Tabla 35 se muestran los valores de los ajustes obtenidos para la frecuencia de 200 kHz. En ella se aprecia que los ajustes son buenos tanto para el *TS*max como para el *TSc*max, produciéndose mejores ajustes cuanto más ancho es el intervalo de orientaciones consideradas. La pendiente se mantiene relativamente constante para el *TS* (sin compensar y compensado) para los tres primeros intervalos, pero no ocurre lo mismo para el intervalo entre  $0^\circ$  y  $5^\circ$ , en el que aumenta la pendiente hasta casi el doble aumentando también el valor del coeficiente de correlación. No obstante, en este caso la cantidad de correspondencias acústico-ópticas consideradas es mucho menor que en el resto de los casos. No se encuentra ajustes válidos para el caso del último intervalo entre  $-5^\circ$  y  $0^\circ$  para ninguno de las dos variantes del *TS* consideradas.

Los resultados obtenidos al ajustar el *TS* con el logaritmo de la anchura máxima para 200 kHz (en el intervalo de inclinación entre  $-5^\circ$  y  $5^\circ$ ), siguen una tendencia similar a la encontrada para la longitud a esa misma frecuencia (Figura 76). De manera diferente ocurre con la frecuencia de 120 kHz, a la

que la correlación entre la longitud y la energía retrodispersada por los atunes no se repite cuando se utiliza la anchura máxima en los ajustes.

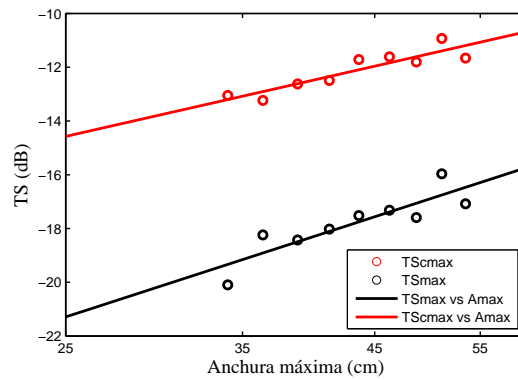


Figura 76. Datos para el ajuste el ajuste entre el TS y la anchura máxima a la frecuencia de 200 kHz.

		$TS(dB)=a \cdot \log_{10} A_{max}(cm)+b$				$f=200 \text{ kHz}$			
		$TS_{max}$				$TS_{max}$			
<i>grupo</i>	<i>Número de detecciones</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R<sup>2</sup></i>	<i>p-valor</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R<sup>2</sup></i>	<i>p-valor</i>
-5° a 5°	1236	14.60	-41.70	0.76	0.00	10.24	-28.89	0.82	0.00
-10° a 10°	2092	13.96	-40.91	0.83	0.00	11.67	-31.38	0.90	0.00
20° a 20°	2776	14.08	-41.09	0.82	0.00	9.93	-28.60	0.93	0.00
0° a 5°	467	24.51	-57.78	0.82	0.00	20.47	-45.19	0.95	0.00
-5° a 0°	656	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

NA significa que no se encuentra ajuste

Tabla 35. Resultados del ajuste lineal del TS máximo de las trazas (compensado y sin compensar) para la frecuencia de 200

### 6.5.3. Relación del TS desde el punto de vista ventral con el peso del atún rojo.

En la sección 3 de este documento se han obtenido diferentes expresiones que relacionan las diferentes dimensiones del atún rojo (longitud, anchura máxima y altura) con el peso. La masa (o peso) es el parámetro biométrico que se suele emplear en gestión de las explotaciones acuícolas y por ello se busca en este apartado un procedimiento para obtener dicho parámetro a partir de herramientas acústicas, es decir, a partir del TS.

En los puntos anteriores se han presentado expresiones que relacionan el TS con la longitud y con la anchura. La finalidad de dichas expresiones es evaluar si las técnicas acústicas son aptas para el control del engrase del atún rojo en jaulas marinas. Para ello, como ya se ha explicado, se evalúa una capa de 5 metros (comprendida entre los metros 5 y 10 desde el transductor y el sistema estereoscópico de visión). En dicha capa se puede asegurar medidas de longitud y anchura, y además se puede evaluar la energía máxima retrodispersada por los peces suponiendo que toda la vejiga queda totalmente insonificada.

La Ecuación 5 se utiliza para obtener valores de longitud a partir de los valores del TS obtenidos por medida directa. Al igual que en el caso inverso, el valor de la longitud (o de la anchura máxima) a partir del TS puede obtenerse linealizando la Ecuación 5 y ajustando mediante el método de los mínimos cuadrados. En la Tabla 36 se muestran los resultados de dicho ajuste lineal para el intervalo de orientaciones entre  $-5^\circ$  y  $5^\circ$ , para el TS<sub>max</sub> y el TS<sub>cmax</sub> a las dos frecuencias de trabajo.

$$L(cm) = a \cdot 10^{b \cdot TS(dB)} \quad (5)$$

$L(cm)=a \cdot 10^{b \cdot TS(dB)}$	TS <sub>max</sub>		TS <sub>cmax</sub>	
	120 kHz	200 kHz	120 kHz	200 kHz
a	531.2391	1238.7	414.4480	654.9528
b	0.0290365	0.0451517	0.0350988	0.0404361
R <sup>2</sup>	0.71	0.54	0.74	0.86
p-valor	0.00	0.05	0.00	0.00

Tabla 36. Resultados del ajuste lineal de la longitud a partir del TS máximo de las trazas (compensado y sin compensar) para las dos frecuencias bajo estudio.

A partir de los datos de la Tabla 36 y sabiendo que el TS promedio en la capa considerada toma los valores que se indican en la Tabla 38 se puede calcular la longitud media de los peces. Si nos fijamos en los datos ópticos y en los del sacrificio para las tres jaulas que se muestran en la Tabla 37, tenemos los datos resultantes de juntar las tres jaulas cada uno de los meses, tomando el promedio de los meses de julio, septiembre y octubre (ya que los datos de agosto no se incluyeron en el análisis como se indicó en el punto 7.3), tenemos que tras medir 73505 muestras la longitud media



es de 223 cm, mientras que del sacrificio de 1143 atunes la longitud media es de 224 cm. Se calcula el error en la estimación de la longitud media a partir del valor del *TS* obteniéndose en todo caso errores maximos cercanos al 7%. Cuando se considera el *TS* compensado el error de estimación disminuye a ambas frecuencias, siendo muy pequeño a la frecuencia de 200 kHz y cercano al 5 % para la de 120 kHz.

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

Tabla 37. Resumen de los datos resultantes de la comparación de las mediciones automáticas del mes de octubre con los sacrificios de cada una de las jaulas.

	<i>TSmax</i>		<i>TSmax</i>	
	<i>120 kHz</i>	<i>200 kHz</i>	<i>120 kHz</i>	<i>200 kHz</i>
<i>TS (dB)</i>	-14.03	-17.77	-8.32	-11.58
<i><math>\bar{L}</math> (cm)</i>	207.89	209.46	211.57	222.82
<i>Error respecto de la medida óptica (%)</i>	6.8	6.1	5.1	0.1
<i>Error respecto del sacrificio (%)</i>	7.2	6.5	5.5	0.5

Tabla 38. *TS* (compensado y sin compensar) promedio y Longitud resultante de aplicar las expresiones de la Tabla 36 en la capa considerada a ambas frecuencias.

Si realizamos el mismo procedimiento para la estimación de la anchura máxima a partir del *TS*, obtenemos los datos mostrados en la Tabla 39. En este caso no se pueden realizar predicciones para la frecuencia de 120 kHz, ya que, ha sido imposible ajustar los valores del ancho de los peces a los valores de la energía acústica retrodispersada por los mismos a dicha frecuencia.

En la Tabla 40 se muestran los valores de la anchura máxima promedio calculada a partir de las expresiones mostradas en la Tabla 39. En este caso no se dispone de datos sobre la anchura en el sacrificio, únicamente se tienen los datos de la anchura medida ópticamente, que como se muestra en la Tabla 41 tras medir 73505 muestras (sin tener en cuenta los datos de agosto como en el caso anterior) la anchura máxima media es de 47.33 cm. Los errores en la estimación de la anchura

máxima son menores del 10 % como para el caso de la longitud, disminuyendo, como también ocurría con la longitud, cuando se usa los valores del TScmax.

$A_{max}(cm)=a \cdot 10^{b \cdot TS(dB)}$	TScmax		TScmax	
	120 kHz	200 kHz	120 kHz	200 kHz
a	---	370.3992	---	408.4510
b	---	0.0523516	---	0.0803887
R <sup>2</sup>	---	0.76	---	0.82
p-valor	---	0.00	---	0.00

Tabla 39. Resultados del ajuste lineal de la anchura máxima a partir del TS máximo de las trazas (compensado y sin compensar) para 200 kHz.

	TScmax	TScmax
TS (dB)	-17.77	-11.58
$\overline{A_{max}}$ (cm)	43.49	47.89
Error respecto de la medida óptica (%)	8.1	1.2

Tabla 40. TS (compensado y sin compensar) promedio y Ancho máximo resultante de aplicar las expresiones de la Tabla 39 en la capa considerada a 200 kHz.

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

Tabla 41. Anchura media en el punto 1 ( $A_1$ ) para cada una de las jaulas durante todos los meses del estudio.

Finalmente se evalúa la posibilidad de conocer la masa promedio a partir del valor del TS, aprovechando para ello, las expresiones presentadas en la sección 3 y que permiten el cálculo del peso promedio a partir de las dimensiones del atún. Se calcula el valor de la masa con todas las expresiones presentadas en la Tabla 1 y se compara con el valor de la masa media de los sacrificios de los atunes proporcionado por la empresa. Los valores de la longitud y la anchura máxima utilizados serán los calculados a partir de los datos acústicos, para el caso de las expresiones que necesiten de la altura de los peces, esta se determinará mediante la expresión M14, presentada en la Tabla 2 que relaciona la altura con la longitud y la anchura máxima. Se realiza únicamente estos cálculos para la frecuencia de 200 kHz por disponer de la longitud y la anchura máxima. La masa promedio ( $\bar{P}$ ) es proporcionada por la empresa a partir de los sacrificios y es de 258.57 kg. Los

resultados se muestran en la Tabla 42, para evaluar la bondad de las predicciones del peso promedio se calcula el error absoluto medio (*Eam*) y el error relativo medio (*Erm*). En dicha tabla se puede apreciar que para el *TScmax* a 200 kHz los errores al predecir la masa a partir del TS no están cerca del 5 %. Aumentan para la M4 y disminuyen de manera sorprendente para la M12 y la M3. Excepto para la M12 y la M13 se subestima la masa entre 6 y 18 kg, para el caso de estas dos primeras se sobreestima el valor del peso medio entre 4 y 17 kg. Cuando se toman los valores del *TSmax* crecen colocándose por encima del 17 % y llegando hasta casi el 30 %.

$\bar{P} = 258.57 \text{ kg}$		$f = 200 \text{ kHz}$				
		<i>TSmax</i>			<i>TScmax</i>	
<i>Modelc</i>	<i>Peso (Kg)</i>	<i>Eam (kg)</i>	<i>erm (%)</i>	<i>Peso (kg)</i>	<i>Eam (kg)</i>	<i>Erm (%)</i>
M1	202,02	56,54	27,98	244,45	14,11	5,77
M2	201,22	57,35	28,50	245,89	12,68	5,16
M3	201,18	57,39	28,53	251,79	6,78	2,69
M4	199,38	59,19	29,69	239,97	18,60	7,75
M5	200,71	57,86	28,83	245,50	13,07	5,33
M6	195,97	62,60	31,94	245,11	13,46	5,49
M7	194,28	64,29	33,09	244,13	14,44	5,91
M8	200,23	58,34	29,13	246,86	11,71	4,75
M9	200,56	58,01	28,92	245,73	12,84	5,23
M10	200,39	58,18	29,03	244,09	14,48	5,93
M11	200,87	57,70	28,72	245,72	12,85	5,23
M12	215,85	42,72	19,79	263,42	4,85	1,84
M13	206,71	51,86	25,09	276,01	17,44	6,32

Tabla 42. Estimación de la masa promedio a partir de la longitud media y la anchura máxima obtenida por métodos acústicos para una frecuencia de 200 kHz.

Estos resultados indican la posibilidad de obtener valores acertados de la masa promedio de una jaula de atunes de manera indirecta a partir de medidas acústicas. El procedimiento de predicción de la masa desarrollado en este punto puede ser de gran utilidad en las plantas de engrase de atunes, ya que, permite una conversión entre datos acústicos y biomasa en las jaulas mediante una metodología novedosa. Como ya se indicó en la sección 3, los errores en la estimación de la masa para peces engrasados haciendo uso de expresiones que solo tienen en cuenta la longitud puede minimizarse añadiendo más dimensiones en la expresión utilizada para predecir la masa. El procedimiento desarrollado en el presente capítulo abre la posibilidad de obtener los valores medios de la longitud y la anchura de los peces a partir de medidas acústicas, y el cálculo de la altura media de los peces mediante una expresión ajustada para peces engrasados.

No obstante, ante la imposibilidad de establecer relaciones entre el ancho máximo y una de las dos frecuencias bajo estudio, se hace patente la necesidad de profundizar en el análisis de la

configuración de medida elegida mediante técnicas de simulación y nuevos experimentos que clarifiquen los fenómenos (tanto físicos como de comportamiento de los animales) que imposibilitan que se repita a 120 kHz las tendencias mostradas por los datos a 200 kHz.

#### 6.5.4. Conclusiones.

En este punto se ha presentado una técnica novedosa para la determinación del peso del atún rojo en jaulas de engrase de atunes mediante el uso combinado de técnicas acústicas y ópticas. Este sistema mixto, del que ya se habían realizado pruebas satisfactorias (Puig *et al.*, 2012); ha sido sustancialmente mejorado integrando la medición de peces automática a partir de pares de imágenes estereoscópicas (Atienza-Vanacloig *et al.*, 2016) y la detección de las trazas de los atunes también de modo automático.

Combinando los datos acústicos y ópticos se han podido encontrar relaciones entre el *TS* máximo medido de forma ventral y la longitud del atún rojo a las frecuencias de 120 y 200 kHz. El análisis de los datos acústicos y ópticos de manera combinada nos ofrece la oportunidad de encontrar relaciones no solo entre la energía retrodispersada por los atunes (*TS*) y su longitud, si no, en el caso de la frecuencia de 200 kHz, además estas relaciones se pueden establecer también con la anchura máxima de los peces. Este hecho nos ha permitido, como se ha demostrado, calcular el peso medio de los atunes engrasados a partir del valor medio de la energía acústica evaluado en una capa entre 5 y 10 metros desde el transductor. Esta limitación, impuesta por el sistema de visión, limita el tamaño máximo de los peces que se pueden medir a 3 metros, partiendo de la hipótesis de la capacidad de insonificar la vejiga natatoria al completo de un atún de dicho tamaño a 5 metros de distancia. No se conoce la relación exacta entre el tamaño (o volumen) de la vejiga natatoria del atún rojo y su longitud como si se conoce para otras especies de atún (Schaefer & Oliver, 1998), pero la similitud en otros factores biológicos, nos permite partir de la hipótesis de que, del mismo modo que para el atún de aleta amarilla, debe tener cerca de la quinta parte de la longitud total del pez. Todas estas hipótesis de trabajo deberán ser, a posteriori, validadas mediante simulaciones con métodos numéricos. Aun contando con dicha limitación, se ha demostrado que el uso del *TScmax* a 200 kHz es válido para estimar el peso medio de los atunes. El valor del peso medio calculado a partir del *TScmax* a 200 kHz, ha podido predecirse haciendo uso de las diferentes expresiones mostradas en la sección 3 y que se han desarrollado para peces engrasados en jaulas marinas. Los resultados muestran desviaciones del 5% en la determinación de la masa media cuando se hace uso de más de una de las dimensiones del atún (largo, alto y ancho máximo).

El uso del sistema estereoscópico de visión de manera sincronizada con los equipos acústicos, ha permitido conocer la inclinación de los peces respecto a la cara del transductor en el momento de ser insonificados. Gracias a ello, se han establecido relaciones del *TS* frente al tamaño de los peces con diferentes grados de orientación. Observándose que, la orientación más habitual de nado oscila entre  $-5^\circ$  y  $5^\circ$ . Otros trabajos con túnidos en tanques, realizados desde el punto de vista dorsal, fijaban entre  $-5^\circ$  y  $1^\circ$  las orientaciones más habituales (Hsueh-Jung *et al.*, 2011).

## 7. Mediciones automáticas en transferencias

Objetivo 2 del proyecto: Desarrollar una herramienta de estimación de número y biomasa total de atún rojo capturada en el cerco durante el proceso de transferencia entre jaulas de transporte y de engorde. Para ello se propuso el uso combinado de ecosondas y sistemas de vídeo desde una perspectiva ventral.

### 7.1. Configuración para adquisición en transferencias

En esta sección se describen los sensores acústicos y ópticos utilizados para la adquisición de datos durante las transferencias. Se posicionan utilizando la estructura diseñada exclusivamente para las transferencias, que se ha expuesto en el punto 4.2.

#### 7.1.1. Sistemas acústicos

#### 7.1.2. Sistemas ópticos

El sistema óptico montado en la adquisición para transferencias es exclusivamente el sistema estereoscópico AI2.

### 7.2. Resultados de medidas sólo ópticas en transferencias

En la Tabla 43 se muestra las transferencias realizadas en las jaulas del Grup Balfegó.

TRANSFERENCIAS Y SENSORES UTILIZADOS						
		Jaulas	nº peces	Sensores	Observaciones	Estructura
13 – JUL – 2016	T1	J20 – J18	576	SSS + CAM AI2	Mala visibilidad por estructura	Figura 9
	T2	J18 – J20	576	SSS + CAM AI2		
20 – JUL – 2016	T1	J20 – J18	576	SSS + 1CAM AI2	Una cámara no disponible por accidente	Figura 10
	T2	J18 – J20	576	SSS + 1CAM AI2		
27 – JUL – 2016	T1	J20 – J18	576	SSS + CAM AI2		Figura 10
	T2	J18 – J20	576	SSS + CAM AI2		
26 – OCT – 2016	T1	J20 – J18	503	SSS + CAM AI2		Figura 11 y Figura 12
	T2	J18 – J20	503	SSS + CAM AI2		

Tabla 43. Transferencias realizadas en las jaulas del Grup Balfegó.

Centramos el estudio óptico en las transferencias de 27 de julio de 2016 y 26 de octubre de 2016, pues disponemos de las grabaciones con el par estereoscópico AI2. Para analizar la validez de las distribuciones se comparan los resultados con los sacrificios y con las mediciones realizadas por el Grup Balfegó en el momento de enjaulamiento (junio). Por los requisitos de diseño de la estructura para transferencias, las mediciones se sitúan a distancias entre 10 y 16 metros.

#### 7.2.1. Comparativa con sacrificios

Para realizar esta comparativa se utilizan las muestras extraídas con el software automático desarrollado en el proyecto Biacop y los datos de los sacrificios realizados por el Grup Balfegó. Hasta la fecha, se tienen datos de 288 sacrificios posteriores a la grabación de julio (de los 576 peces que había) y de 215 posteriores a la grabación de octubre (de los 503 peces que había).

En la Figura 77 se muestran los histogramas normalizados que comparan la distribución de longitud de los sacrificios con las distribuciones de longitud obtenidas con el software automático en las transferencias de 27 de julio de 2016, de ida (T1) y de vuelta (T2). En T2 pasan mucho más tranquilos, por lo que se pueden medir más muestras. Está transferencia se realizó con la estructura descrita en la Figura 10: estructura con forma rómbica dotada de un brazo articulado que permite colocar los equipos en el interior de la jaula receptora.

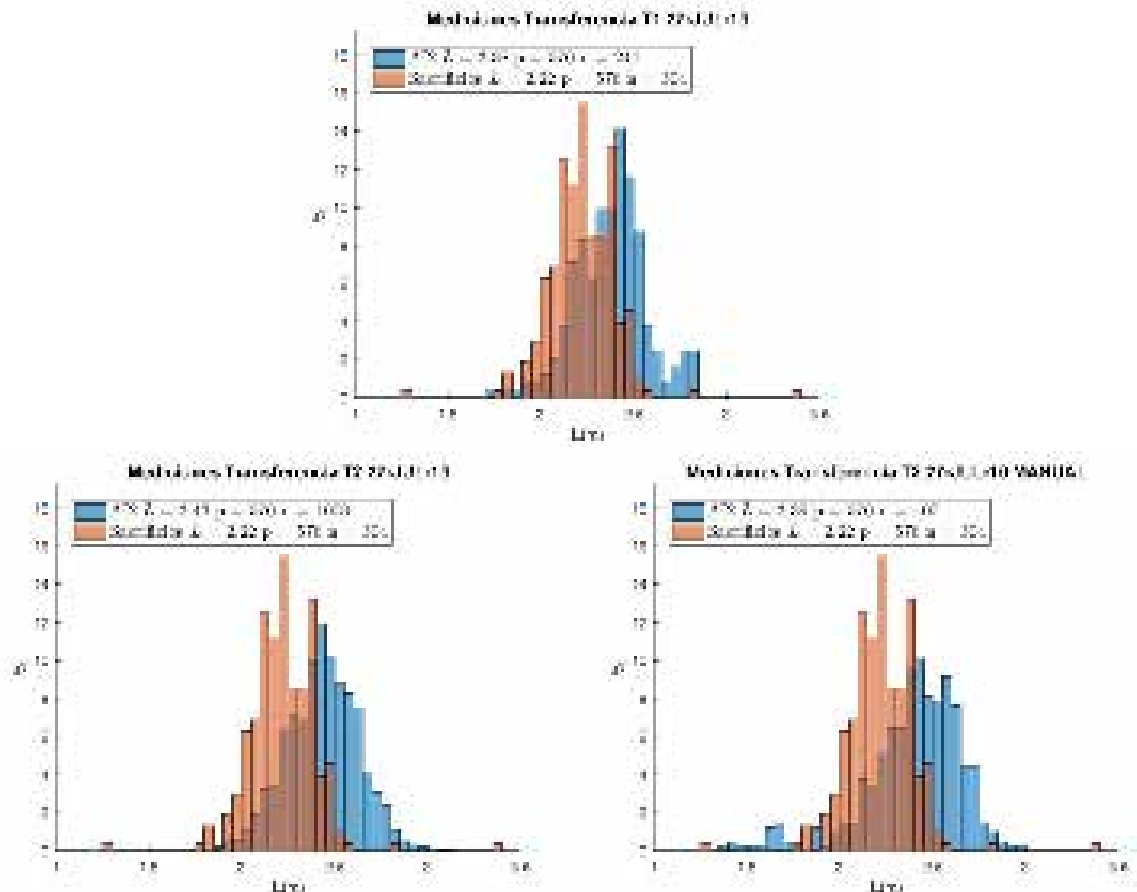


Figura 77. Distribuciones de longitud L con grabaciones AI2 en las transferencias T1 y T2 de 27 de julio de 2016 en las jaulas del Grup Balfegó.

En la Figura 77 se añade una tercera distribución, obtenida con la herramienta semiautomática. En estas mediciones se comprueba visualmente el ajuste del modelo para descartar falsos positivos que puedan alterar las distribuciones. Sin embargo, la distribución obtenida de forma semiautomática es muy similar a la obtenida automáticamente, con lo que se descarta que la diferencia con los sacrificios sea por falsos positivos.

En la Figura 78 se muestran los histogramas normalizados de las transferencias de 26 de octubre de 2016, de ida (T1) y de vuelta (T2). Esta transferencia se realizó con la estructura descrita en Figura 11 y Figura 12: estructura con forma simétrica y mayor anchura en la parte inferior, con las cámaras orientadas hacia la jaula receptora. Se utiliza el procedimiento semiautomático para aumentar el número de muestras.

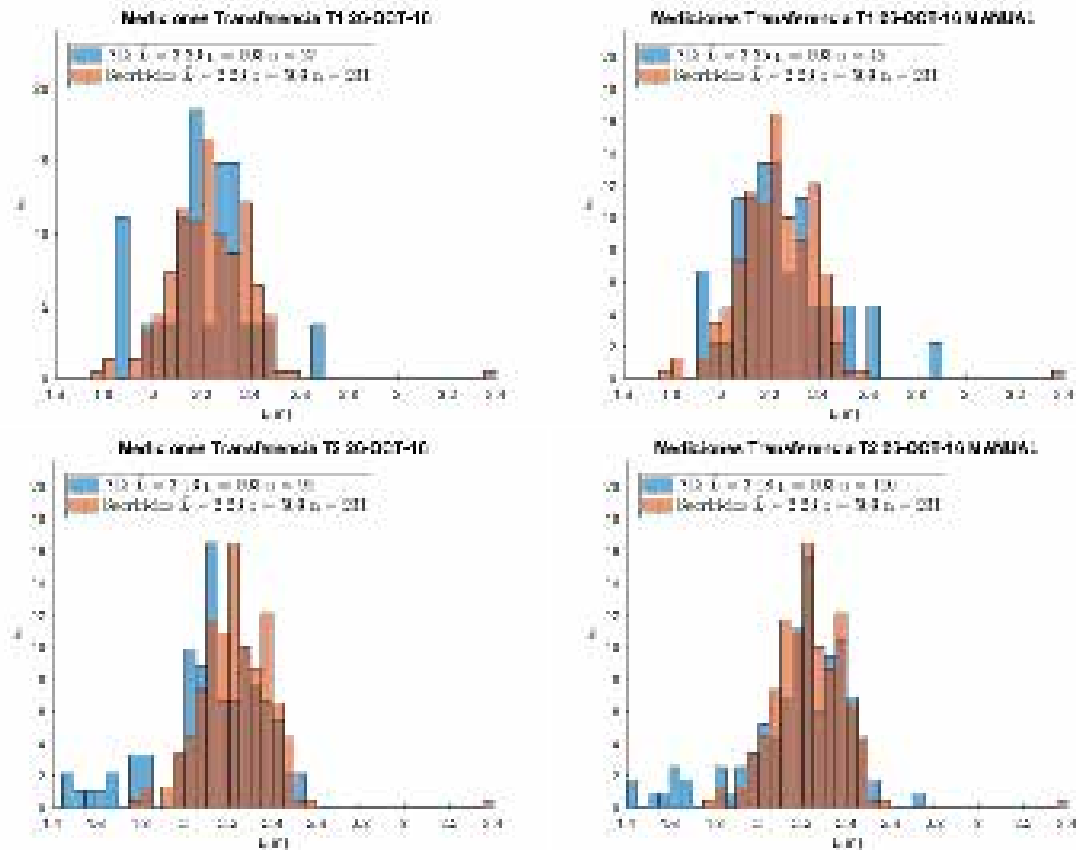


Figura 78. Distribuciones de longitud  $L$  con grabaciones A12 en la transferencia T1 y T2 de 26 de octubre de 2016 en las jaulas del Grup Balfegó. (a) y (c) Procedimiento automático. (b) y (d) Procedimiento semiautomático.

Si se tiene en cuenta que los sacrificios son selectivos, porque se evita sacrificar a los peces más pequeños, y se excluye del muestreo a los peces de longitud menor a 1.90 metros, se obtiene la distribución mostrada en la Figura 79.

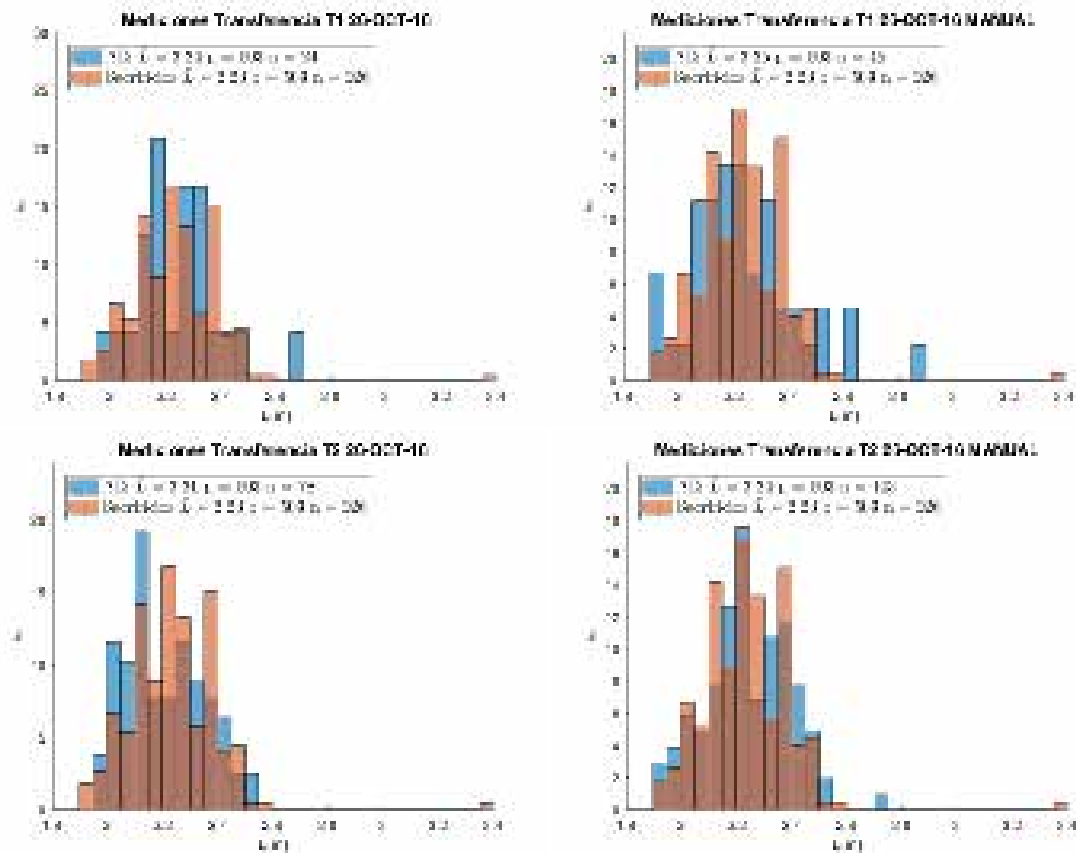


Figura 79. Distribuciones de longitud  $L$  con grabaciones AI2 en la transferencia T2 de 26 de octubre de 2016 en las jaulas filtrado para peces con  $L > 1.90$  m. (a) y (c) Procedimiento automático. (b) y (d) Procedimiento semiautomático.





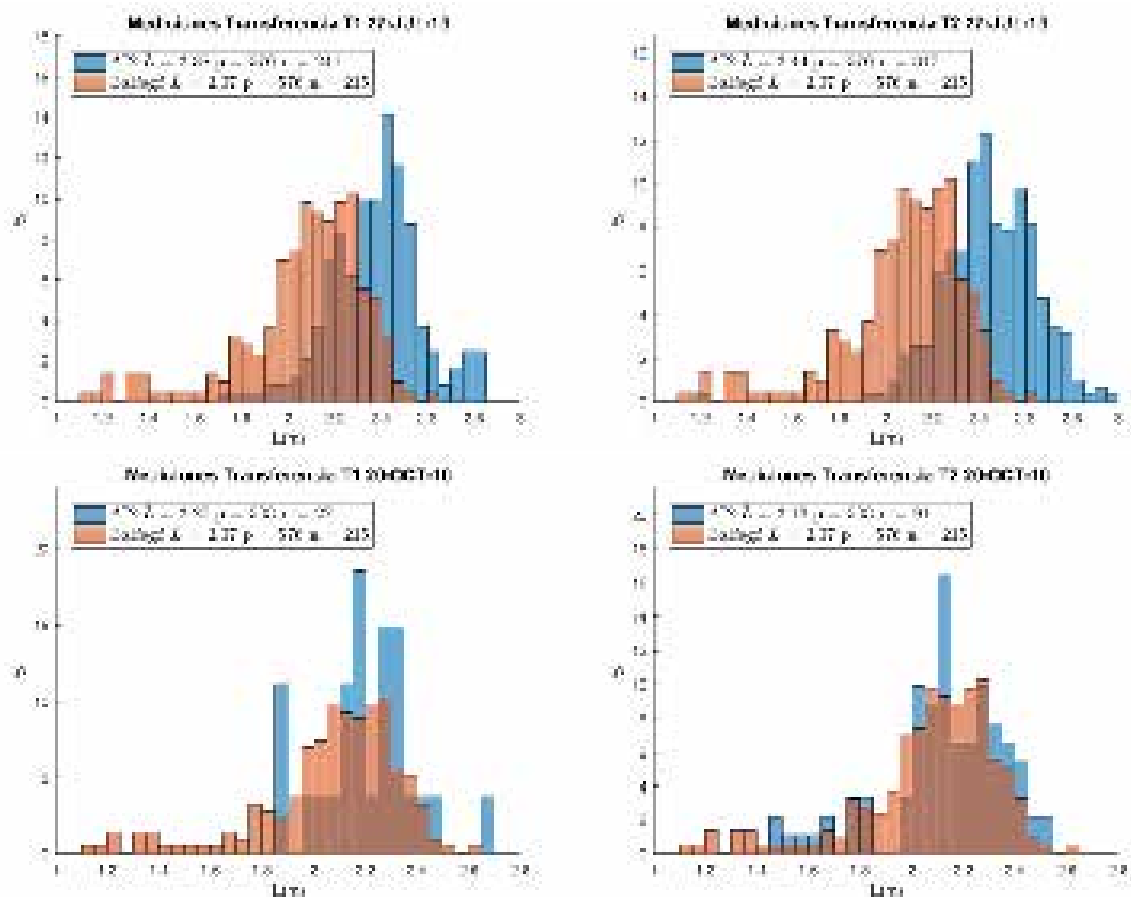


Figura 81. Comparativa de distribuciones de longitud L con grabaciones AI2 vs mediciones Grup Balfegó en las transferencias de julio y octubre de 2016.

### 7.2.3. Conclusiones

La regulación actual de captura de atún rojo establece el uso del sistema de visión estereoscópico AQ1 para estimar las cuotas de captura cuando los peces son transferidos de las jaulas de transporte a las jaulas de engorde. El software que opera el sistema AQ1 necesita intervención humana para contar y muestrear tallas de la población, y poder estimar así la biomasa trasferida. El proceso manual es lento y laborioso e introduce la variabilidad asociada a las mediciones manuales en la estimación de la biomasa. Así pues, el procedimiento automático basado en visión estereoscópica supone una contribución necesaria y valiosa que, además, puede utilizarse en otras aplicaciones, como se ha demostrado en el apartado anterior con la medición automática en jaulas de engorde.

Durante este proyecto se han realizado y testado múltiples diseños de la estructura para transferencias, tal y como se ha descrito en el apartado 4.2. Las dimensiones de las jaulas de engorde y transporte, y por consiguiente de la estructura, incrementan enormemente la complejidad de las operaciones a realizar en el mar. Se realizaron cuatro transferencias dobles (ida y vuelta) con las diferentes estructuras, tal y como muestra la Tabla 43, de las cuales se pudieron aprovechar dos para el análisis óptico: la de julio y la de octubre.

En la transferencia de julio se ha obtenido un gran número de muestras analizadas por el diseño de la estructura para transferencias, pero se observa una desviación de la distribución de las

mediciones automáticas, respecto de los sacrificios. Se realizó una comprobación manual utilizando la herramienta semiautomática para analizar las posibles causas de dicha desviación. Se descarta que el error sea causado por la presencia de falsos positivos, pues se obtuvieron resultados muy similares. Teniendo en cuenta que el procedimiento de ajuste del modelo y medición 3D es el mismo que el utilizado en las jaulas y las transferencias de octubre, la desviación podría ser atribuible a un problema en la adquisición de los vídeos.

En cambio, según se desprende de las distribuciones de la transferencia de octubre, las mediciones se ajustan muy bien a los sacrificios, aunque la estructura utilizada limita el campo de visión y hace que el número de detecciones disminuya considerablemente. Además, el número de detecciones también se ve afectado por las malas condiciones ambientales. Tal y como muestra la Figura 82, hay suciedad en suspensión y la imagen está quemada por el Sol.



Figura 82. Imagen quemada de grabaciones AI2 en la transferencia T1 de 26 de octubre de 2016 en las jaulas del Grup Balfegó.

Al igual que ocurría con las mediciones en jaulas, las distribuciones de longitud obtenidas con mediciones del Grup Balfegó están desplazadas hacia longitudes menores respecto a las distribuciones de longitud obtenidas con el procedimiento automático Biacop.

Los resultados obtenidos hasta el momento son prometedores, pero se necesitarían más experimentos en transferencias para ultimar la estructura y realizar otras mejoras, tanto en la adquisición del sistema de visión estereoscópico como en el software de medición automática. En este sentido, como en las transferencias las oportunidades de medición son muy limitadas, porque los individuos solo pasan una vez por el campo de visión, debería considerarse un aumento considerable del *framerate* de adquisición y una mejora del software que permitiera medir peces incluso cuando estén curvados.

Aprovechando la experiencia, estas mejoras deberían ser testeadas en monitorización de jaulas, pues se ha revelado como un buen banco de pruebas ya que permite obtener muchas más mediciones.

### 7.3. Resultados de medidas sólo acústicas en transferencias

#### 7.3.1. Resultados de las medidas acústicas: conteo automático.

En esta sección se muestran los resultados del conteo de los peces durante los procesos de transferencia realizados en los meses de enero y julio de 2016 en las instalaciones del Grup Balfegó.

En la Tabla 44 se resume las transferencias que fueron medidas, las condiciones en que fueron medidas y las incidencias encontradas durante las mismas.

<i>Transferencia</i>	<i>Datos acústicos</i>	<i>Datos ópticos</i>	<i>Análisis acústico</i>	<i>Análisis óptico</i>
27-01-2016 (T1)	si	si	Complejo, ruido	Imposible
27-01-2016 (T2)	si	si	Complejo, ruido	Imposible
13-07-2016 (T1)	si	si	Imposible (*)	Imposible
13-07-2016 (T2)	si	si	Imposible (*)	Imposible
20-07-2016 (T1)	si	Solo una cámara	si	Imposible
20-07-2016 (T2)	si	Solo una cámara	si	Imposible
27-07-2016 (T1)	si	si	si	si
27-07-2016 (T2)	si	si	si	si
26-10-2016 (T1)	si	si	si	si
26-10-2016 (T2)	si	si	si	si

Tabla 44. Resumen de los datos grabados durante las transferencias. T1 hace referencia a la transferencia de ida y T2 hace referencia a la transferencia de vuelta

Como se puede apreciar en la Tabla 44 se pudieron realizar grabaciones acústicas en todos los casos y solo no pudieron ser analizadas con el método automático propuesto las llevadas a cabo el día 13 de julio de 2016. La imposibilidad del análisis automático se debió al estado de la mar de fuerte marejada durante el proceso de transferencias. Aunque las condiciones ambientales no eran las idóneas para estos trabajos, se optó por la realización de las medidas para poder testar el grado de adaptabilidad del algoritmo de conteo a las malas condiciones ambientales. Además, del análisis de estos datos se desprende la posibilidad del tratamiento de los mismos con un menor grado de automatización que permitiría el conteo. En la aplicación explicada (sección 5.1.2) la intervención del operador se restringe a señalar las zonas del ecograma donde se encuentran los peces, y una inspección visual para señalar falsos positivos antes del conteo final. Al no poder hacer uso de esta aplicación en este caso, se señaló las transferencias como “imposibles de contar”. En la Figura 84 se muestra una imagen de uno de los ecogramas conseguidos durante las transferencias realizadas ese día. En dicha imagen puede apreciarse como el ruido de las burbujas debidas a la agitación del mar enmascaran de manera parcial los atunes.

Como se indica en la Tabla 44 se realizaron medidas en enero, julio y octubre de 2016 que si permitieron la aplicación del mecanismo de conteo mediante técnicas acústicas explicado en la

sección 5.1.2. Durante las medidas del 27 de enero de 2016 se registraron dos transferencias, debido a la turbiedad del agua fue imposible disponer de imágenes del sistema estereoscópico propio, del sistema estereoscópico AQ1 usado por la inspección de pesca ni de las cámaras submarinas con las que se controla las transferencias habitualmente. En este proceso de transferencia se traspasaron entre las dos jaulas 608 atunes según nos indicó la empresa a posteriori. En la Tabla 45 se muestran los resultados obtenidos con el conteo acústico. En la Tabla se aprecia que el error de conteo es más elevado durante la transferencia de vuelta (T2) que durante la de ida. Aunque en ningún caso dicho error supera el 10% fijado como desviación máxima por las directivas de ICCAT (ICCAT REC 14-04, 2014). Este hecho es debido, principalmente, a la posición de unos tubos colocados para reforzar la estructura en la parte baja de la puerta. Como se puede observar en la Figura 83; aparece en el ecograma una línea continua en el centro de los grupos de peces que dificulta el tratamiento automático de los datos. En el caso de la transferencia de ida (T1), los peces nadaron más hacia la superficie por lo que la segmentación y el conteo pueda realizarse de una manera más efectiva. En este caso ante la imposibilidad de disponer de registros ópticos, queda demostrada la eficacia de un sistema de conteo acústico inmune a la turbidez del agua. Esta transferencia se realizó con la configuración de equipos representada en la Figura 9.

<i>Transferencia</i>	<i>Atunes transferidos</i>	<i>Conteo acústico</i>	<i>Error cometido (%)</i>
27-01-2016 (T1)	608	574	5.59
27-01-2016 (T2)	608	549	9.70

Tabla 45. Resultado del conteo de las transferencias del día 27-01-2016. T1 hace referencia a la transferencia de ida y T2 hace referencia a la transferencia de vuelta

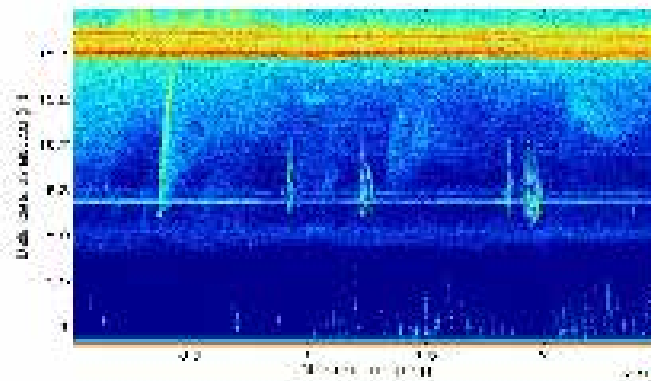


Figura 83. En esta figura se aprecia el efecto de la posición del tubo de refuerzo de la estructura durante la transferencia del día 27-01-2016.

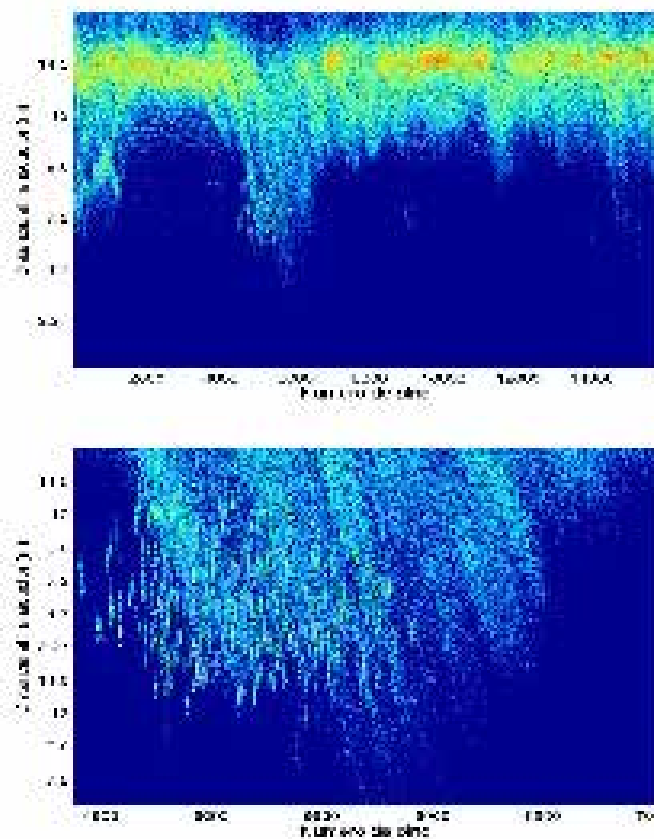


Figura 84. En la parte superior ecograma captado durante el día 13-07-2016 en el que no se aprecian trazas de atunes al quedar enmascaradas por el ruido. En la parte de abajo detalle del mismo ecograma en el que se ven las trazas enmascaradas.

En la Tabla 46 se resumen los resultados del conteo de las transferencias realizadas el día 20-07-2016. En este caso se transfirieron 577 peces según nos indicó la empresa. Tras el análisis de los datos y el conteo se obtienen de nuevo error en la estimación del número por debajo del 10 %. En este caso los equipos no se encuentran dentro de la estructura sino en un brazo extensible, anclado a dicha estructura y colocado dentro de la jaula receptora (Figura 10). Hay que señalar que durante la transferencia de vuelta (T2) un grupo de atunes cambia de dirección al llegar a la jaula receptora con la intención de volver a la jaula emisora, pero tras nadar en dicha dirección y encontrarse con un nuevo grupo de peces cambian de nuevo de sentido y vuelven a la jaula receptora. Dichos peces han tenido que ser identificados y eliminados del ecograma para poder realizar el conteo automático.

<i>Transferencia</i>	<i>Atunes transferidos</i>	<i>Conteo acústico</i>	<i>Error cometido (%)</i>
<i>20-07-2016 (T1)</i>	577	554	3.98
<i>20-07-2016 (T2)</i>	577	535	7.28

Tabla 46. Resultado del conteo de las transferencias del día 20-07-2016. T1 hace referencia a la transferencia de ida y T2 hace referencia a la transferencia de vuelta.

En la Tabla 47 se muestran los resultados obtenidos en las transferencias del día 27-07-2016. En este caso se realizaron las pruebas con los mismos atunes que en el caso de las transferencias del día 20 de julio. Por este hecho, y tras constatar con la empresa que no se había realizado ningún sacrificio en el periodo entre medidas, se traspasan 577 atunes como en el caso anterior. En ambas transferencias, tanto de ida como de vuelta los equipos se hallaban colocados en la jaula receptora (Figura 10). La posición elegida por el buzo, y la inclinación de los equipos introducen ruido que ha sido eliminado durante el proceso de análisis. Este proceso de detección de falsos positivos ya fue contemplado en la herramienta propuesta para que fuese utilizado cuando las grabaciones lo requiriesen. En la Tabla 47 se muestran los resultados para estas transferencias. En este caso se consiguieron errores de estimación del número de peces cercanos al 1%.

<i>Transferencia</i>	<i>Atunes transferidos</i>	<i>Conteo acústico</i>	<i>Error cometido (%)</i>
27-07-2016 (T1)	577	575	1
27-07-2016 (T2)	577	570	1.2

Tabla 47. Resultado del conteo de las transferencias del día 27-07-2016. T1 hace referencia a la transferencia de ida y T2 hace referencia a la transferencia de vuelta

Finalmente en la Tabla 48 se muestran los resultados de las dos últimas transferencias realizadas. En este caso se realizan con la configuración de medida mostradas en las Figura 11 y Figura 12. En la transferencia T1 el sensor acústico se orienta hacia la jaula receptora con una inclinación de 15°. Se pretendía probar una nueva configuración que permitiese a las cámaras y la ecosonda estar orientadas hacia el mismo punto sin colocarlas dentro de la jaula receptora. Los resultados muestran que esta configuración aumenta el error de conteo automático debido a la aparición de ruido debido posiblemente a la reflexión que los bordes de la puerta introducen en las medidas acústicas. El error está en el límite de lo especificado por ICCAT por lo que esta configuración queda descartada. En la T2, el sensor acústico se orienta hacia la superficie mientras que el sistema óptico sigue inclinado hacia una de las jaulas. En este caso con los sensores en la posición óptima los errores del conteo automático vuelven a colocarse por debajo del 2%.

<i>Transferencia</i>	<i>Atunes transferidos</i>	<i>Conteo acústico</i>	<i>Error cometido (%)</i>
26-10-2016 (T1)	503	449	10.7
26-10-2016 (T2)	503	493	1.9

Tabla 48. Resultado del conteo de las transferencias del día 26-10-2016. T1 hace referencia a la transferencia de ida y T2 hace referencia a la transferencia de vuelta

Como se puede apreciar en los resultados del conteo de atunes mostrados en esta sección, se ha podido disminuir el error en el conteo hasta valores cercanos al 1% gracias a la introducción de pequeñas modificaciones durante las diferentes transferencias realizadas. El equipo acústico ofrece mejores resultados cuando su haz es perpendicular a la superficie del mar, ya que; la energía devuelta por los peces que lo atraviesan es mayor. Este hecho permite aislar los peces del ambiente ruidoso que se genera durante el proceso. Del mismo modo, se han ido eliminando las diferentes

fuentes de ruido, provenientes de elementos estructurales proponiéndose dos configuraciones idóneas para el conteo automático desde el punto de vista acústico. Paralelamente han sido detectadas fuentes de ruido provenientes del procedimiento asociado a las transferencias, es decir, la posición de los buzos (que generan burbujas que interfieren con los equipos). La posición de los buzos debe regularse para poder asegurar un alto grado de automatización sin menoscabar el control del proceso y el registro del mismo para garantizar el cumplimiento de la normativa vigente.

### **7.3.2. Conclusiones**

En esta sección se ha planteado un mecanismo para el conteo de atunes durante las transferencias basado en técnicas acústicas, frente a los que hacen uso de las imágenes utilizados actualmente. Los resultados obtenidos, permiten afirmar que la técnica presentada posibilita el conteo de los atunes con errores de estimación por debajo de los exigidos por ICCAT en sus directivas sobre las transferencias.

El uso de estas técnicas no está exento de la influencia de las condiciones ambientales en su precisión. Se ha comprobado que en situaciones de mala mar se pierde la capacidad de automatización del conteo (como ocurre con los datos del día 13-07-2016). No obstante, si es independiente de la turbidez del agua, de la posición del sol y la cantidad de luz. Al no estar afectadas por estos factores, que si afecta la grabación de imágenes bajo el agua; es posible el conteo efectivo en mayor cantidad de casos que cuando se usa un sistema óptico.

Queda patente, por otra parte, que la posición de los equipos y de los buzos durante el procedimiento debe reglamentarse para obtener grabaciones de datos de alta calidad que permitan la automatización del conteo. Por lo tanto, se debe trabajar en la definición de un protocolo de medida que permita obtener datos con la calidad necesaria; para ello, deberá determinarse forma de la estructura y posición de los equipos, posición de los buzos durante la transferencia, y procedimiento para la apertura y cierre de las puertas, de tal modo que las redes desprendidas de la jaula no afecten a las medidas.

Además, se propone el uso de una cámara de control fija en la estructura, con visión total de la puerta y de los trabajos que en ella se realizan (incluso de dos cámaras enfocando a cada una de las puertas), de tal manera que se ejerza el control del proceso requerido por ICCAT y las autoridades sin operador que interfiera en la recogida de datos para el conteo y el tallaje automático.



## 8. Conclusiones

### 8.1. Tareas realizadas

Para la consecución de los objetivos se han llevado a cabo las siguientes tareas:

1. Obtención de relaciones biométricas en sacrificios: Se han obtenido relaciones entre la longitud, altura y anchura máxima de los peces con su peso con la ayuda de las biometrías de los peces sacrificados. Sección 3 Informe BIACOP.
2. Diseño de equipos de adquisición de datos: En jaulas flotantes (objetivo 1) se trabajó con dos ecosondas split beam (120 kHz y 200 kHz) y sistema estereoscópico de cámaras. Para adquisición en transferencias, se utilizó ecosonda junto a un transductor de barrido lateral (a 200 kHz) y cámaras estereoscópica. Sección 4 Informe BIACOP.
3. Diseño de sistema de estructura flotante o puerta de transferencia: Se diseñó una estructura flotante que debe colocarse, durante las transferencias entre la jaula emisora y receptora para conteo y tallado de atunes. Dicha estructura estabiliza los equipos de medida y asegura la repetitividad del proceso. Sección 4.3 Informe BIACOP.
4. Desarrollo de algoritmos para obtención automática de tallas en jaula de engorde: Se ha desarrollado un sistema para procesamiento de los videos adquiridos bajo el agua que obtiene las tallas de los atunes de manera totalmente automática. También se han desarrollado algoritmos para el análisis de los datos acústicos y para la correlación de datos acústicos y ópticos obtenidos en jaulas de engrase. Sección 5 Informe BIACOP.
5. Desarrollo de algoritmos para estimar número de individuos en transferencias: Finalmente se han desarrollado algoritmos para el conteo automático de ejemplares durante las transferencias a partir de datos acústicos. Las particularidades de todas las herramientas informáticas desarrolladas se presenta en Sección 5 Informe BIACOP.
6. Adquisición de datos en condiciones reales durante una campaña: Se ha realizado una adquisición de datos periódica a lo largo de una campaña, durante 5 meses en tres jaulas de engrase. La cantidad de datos colectados así como la diversidad de condiciones naturales y medio ambientales que representan garantizan la confianza de los resultados obtenidos en el objetivo 1. Sección 6 Informe BIACOP, Tablas 15 y 16.
7. Pruebas y testeo de los sistemas desarrollados (estructura, equipos, algoritmos implementados, modelos desarrollados, sistemas software): Se han realizado ensayos del sistema de tallado y conteo mediante sistemas ópticos y acústicos en dos periodos; En 2014 con el objetivo de establecer parámetros de adquisición y análisis y sujeción de equipos durante los procesos de transferencia; En 2016 se ha testeado el sistema de adquisición y las herramientas de procesamiento automático, así como la estructura flotante diseñada. Sección 7 Informe BIACOP, Tabla 43.
8. Estudio estadístico de las medidas biométricas obtenidas: longitud, ancho, engrase y biomasa: En la sección 6 y 7 del informe BIACOP se presentan estudios estadísticos y comparativas con datos reales y de inspectores y el grupo Balfegó, tanto de medidas biométricas obtenidas automáticamente como de conteo de individuos.

### 8.2. Conclusiones

Los objetivos del proyecto han sido cumplidos en su totalidad y se han alcanzado **resultados altamente prometedores, combinando tecnología de sensores acústicos y ópticos**, que muestran que las técnicas desarrolladas posibilitan el conteo de los atunes en transferencias y su tallaje tanto en jaulas como en transferencias. Nuestros desarrollos permiten el **tallaje y conteo con resultados independientes de fatigas y condiciones humanas**.

*Los equipos propuestos junto con los procedimientos software desarrollados en el proyecto proporcionan de forma totalmente automática, sin intervención humana, tallaje de atunes (largo, ancho) y número de individuos en transferencias, en datos adquiridos en condiciones reales. La tasa media de aciertos en el conteo de individuos en transferencias con los desarrollos de BIACOP es del 94.9%, siendo superior al mínimo exigido por ICCAT en sus directivas sobre las transferencias.*

Mientras que las *distribuciones estadísticas de longitudes en jaulas de engrase obtenidas con datos ópticos comparada con datos reales de sacrificios presenta una tasa de coincidencia del 93.6% con los desarrollos BIACOP*, siendo esta tasa superior a los datos obtenidos por inspección de pesca y el grupo Balfegó (71.3% de coincidencia).

El *estudio biométrico realizado*, sección 3 de este Informe, *muestra que la anchura máxima de los atunes puede utilizarse como parámetro junto con la longitud para determinar el peso y mejora su estimación cuando han sido alimentados durante varios meses en cautividad. También se mejora la bondad del ajuste* disminuyendo el error absoluto por debajo de los 9 Kg y obteniéndose errores relativos menores del 5% con **las tres dimensiones: longitud, altura y anchura máxima del pez**. Estos resultados, indican la necesidad de realizar medidas de las tres dimensiones en los animales recién capturados para mejorar la estimación del estado de los mismos según el lugar geográfico y época del año.

**Se ha desarrollado un modelo del atún** que, usando técnicas de visión por computador, **ajusta en largo y ancho a los peces y que proporciona el grado de flexión de su cuerpo**. Esto permite a la aplicación seleccionar aquellos *frames* donde se visualizan los peces prácticamente rectos estimando sus valores de longitud y anchura con una mayor precisión. **Trabajando con técnicas acústicas se ha demostrado que el uso del TScmax a 200 kHz es válido para estimar el peso medio de los atunes.**

Los resultados obtenidos con los datos ópticos y acústicos adquiridos en jaulas de engrase **a lo largo de 5 meses** evidencian que **la longitud de los peces no varía significativamente** durante este periodo **mientras que la anchura entre la aleta pectoral y la quilla del pedúnculo caudal muestra un claro crecimiento durante los dos primeros meses de cautividad.**

**Se ha realizado el diseño y testeo de una estructura que permite mantener estables los equipos** y garantizar la adquisición de los individuos **durante las transferencias**. Permite, además, la colocación de una cámara de control, fija y sin operador cubriendo la puerta de salida de los peces para el control de las autoridades. **Basado en técnicas acústicas, se propone un mecanismo para el conteo automático de atunes durante las transferencias.** Al no estar afectadas estos sensores por factores de visibilidad bajo el agua, es posible el conteo efectivo en mayor cantidad de casos que cuando se usa un sistema óptico.

#### **8.2.1. Conclusiones detalladas sobre los desarrollos del Objetivo 1**

- **Las longitudes (L) de los peces no varían significativamente durante los 5 meses de engrase evaluados:** Los valores estimados automáticamente a partir de datos ópticos y acústicos así lo indican.

- **La estimación de anchuras en diferentes secciones del cuerpo del atún muestran crecimiento o engrase entre la aleta pectoral y la quilla del pedúnculo:** Los valores estimados automáticamente a partir de los datos ópticos muestran evoluciones diferentes dependiendo de la sección del cuerpo del pez medida: mientras que los puntos en la cabeza y en la zona de la cola no muestran variación, los puntos entre la aleta pectoral y la quilla del pedúnculo caudal muestran un claro incremento en ancho. Además, ese incremento se produce básicamente durante los dos primeros meses.
- **Se aprecia una fuerte relación lineal entre longitud y anchura en el cuerpo del atún:** Según los datos procesados, existe una fuerte relación lineal entre la anchura y la longitud de los atunes, ya que; se han obtenido coeficientes de determinación  $R^2$  ( $>0.988$ ) muy altos para todos los anchos  $A_i$  y todos los meses.
- **Definición de un factor de engrase  $F_i$ :** Se ha definido un factor de engrase  $F_i$  para cada ancho  $A_i$ , como el incremento relativo al ancho del primer mes. La evolución del factor de engrase es similar, como cabe esperar, a la evolución de los anchos. Así, los puntos entre la aleta pectoral y la quilla del pedúnculo caudal muestran el mayor engrase con un crecimiento linealmente durante los dos primeros meses y poco en el tercero. La proporción de engrase es similar para peces con  $L \in [2,2.50]$ , donde se acumulan la mayoría de muestras, y presenta un comportamiento diferente fuera de ese intervalo, quizás por haber menor número de muestras.
- **Las distribuciones de longitudes (L) obtenidas automáticamente con el procedimiento BIACOP se asemejan a las medidas reales en el momento de los sacrificios:** Las longitudes (L) obtenidas con el procedimiento automático desarrollado en este proyecto se han comparado con los sacrificios realizados por el Grup Balfegó. Las distribuciones y medias de las mediciones automáticas se asemejan en un 93.6% a las distribuciones de los sacrificios. Los buenos resultados que se desprenden de esta comparativa validan el procedimiento utilizado para la obtención de distribuciones estadísticas de longitud y ancho en jaulas de engrase.
- **Las distribuciones de longitudes (L) obtenidas automáticamente con el procedimiento BIACOP discrepan de las mediciones estimadas de forma manual sobre el vídeo por inspección de pesca y el Grupo Balfegó:** Al comparar mediciones de inspección de pesca y del Grup Balfegó en el momento de enjaulamiento, con las L obtenidas automáticamente en julio se observan discrepancias en el incremento de L de los peces: 27 cm con los datos de la inspección de pesca, 19 cm con los datos del Grup Balfegó y 2 cm con los datos automáticos de Biacop.
- Discrepancias entre mediciones con grabaciones AQ1 y AI2 debido a diferente rango de distancias (coordenada Z): En el mes de octubre se incorpora el sensor de visión estereoscópico AI2 a las grabaciones. Las distribuciones de longitud obtenidas difieren un poco respecto a las obtenidas por el AQ1. Dicha diferencia viene motivada por la distancia focal de la óptica, que hace que el rango de distancias a la que se concentran la mayoría de las mediciones sea diferente: [5,9] m con AQ1 y [8,14] m con AI2. Fruto de este análisis y, motivado además por las necesidades concretas de la estructura para transferencias, se decidió cambiar la óptica de 10 mm a 6 mm de distancia focal.
- Se introduce una técnica nueva para determinar el peso del atún combinando tecnología acústica y óptica: Se ha presentado una técnica novedosa que para la determinación del peso del atún rojo en jaulas de engrase. Combinando los datos acústicos y ópticos se han podido encontrar relaciones entre el TS (Target Strength) máximo medido de forma ventral y la longitud del atún rojo a las frecuencias de 120 y 200 kHz. El análisis de los datos acústicos y ópticos de manera combinada nos ofrece la oportunidad de encontrar relaciones no sólo entre

la energía retrodispersada por los atunes (TS) y su longitud, si no, en el caso de la frecuencia de 200 kHz, además estas relaciones se pueden establecer también con la anchura máxima de los peces. Este hecho nos ha permitido, como se ha demostrado, calcular el peso medio de los atunes engrasados a partir del valor medio de la energía acústica evaluado en una capa entre 5 y 10 metros desde el transductor. Esta limitación, impuesta por el sistema de visión, limita el tamaño máximo de los peces que se pueden medir a 3 metros, partiendo de la hipótesis de la capacidad de insonificar la vejiga natatoria al completo de un atún de dicho tamaño a 5 metros de distancia.

- El TScmax a 200 kHz permite estimar el peso medio de los atunes: Se ha demostrado que el uso del TScmax a 200 kHz es válido para estimar el peso medio de los atunes. El valor del peso medio calculado a partir del TScmax a 200 kHz, ha podido predecirse haciendo uso de las diferentes expresiones mostradas en la sección 3 del Informe Final y que se han desarrollado para peces engrasados en jaulas marinas. Los resultados muestran desviaciones del 5% en la determinación de la masa media cuando se hace uso de más de una de las dimensiones del atún (largo, alto y ancho máximo).

### **8.2.2. Conclusiones detalladas sobre los desarrollos del Objetivo 2**

- Diseño y testeo de una estructura para transferencias: Durante este proyecto se han realizado y testado múltiples diseños de la estructura para transferencias, tal y como indica en la sección 4 de este Informe. Esta estructura tiene el objetivo de mantener estables los equipos y garantizar la adquisición de todos los individuos transferidos. Las dimensiones de las jaulas de engrase y transporte, y por consiguiente de la estructura, incrementan enormemente la complejidad de las operaciones a realizar en el mar. Permite, además, la colocación de una cámara de control, fija y sin operador que cubra toda la puerta de salida de los peces y sirva como herramienta a las autoridades para realizar el control “a posteriori” de las operaciones de transferencia evitando infracciones.
- Existe una variabilidad en las estimaciones asociada al proceso de mediciones por operarios: El proceso actual de conteo y tallaje de los peces basado en sistemas estereoscópicos realizado de manera manual es lento y laborioso e introduce la variabilidad asociada a las mediciones manuales en la estimación de la biomasa. Así pues, el procedimiento automático basado en visión estereoscópica supone una contribución necesaria y valiosa que, además, puede utilizarse en otras aplicaciones, como se ha demostrado con la medición automática en jaulas de engrase.
- Las distribuciones de L obtenidas automáticamente en transferencia se ajustan a la de los sacrificios: Según se desprende de las distribuciones de la transferencia de octubre, las mediciones se ajustan muy bien a los sacrificios. Sin embargo, se observa que el número de detecciones se ve afectado por las malas condiciones ambientales (partículas en suspensión y la imagen está quemada por el Sol) y porque la estructura utilizada limita el campo de visión. Sería necesaria más experimentación para corroborar los resultados obtenidos.
- Las distribuciones de L obtenidas a partir de las mediciones estimadas de forma manual sobre vídeos de enjaulamiento por el Grupo Balfegó discrepan de los sacrificios: Al igual que ocurría con las mediciones en jaulas, las distribuciones de longitud obtenidas con mediciones del Grup

Balfegó están desplazadas hacia longitudes menores respecto a las distribuciones de longitud obtenidas con el procedimiento automático Biacop y respecto a los sacrificios.

- Posibilidad de conteo automático en transferencias con sensores acústicos: Se ha planteado un mecanismo para el conteo de atunes durante las transferencias basado en técnicas acústicas, frente a los que hacen uso de las imágenes utilizados actualmente. Los resultados obtenidos, permiten afirmar que la técnica presentada posibilita el conteo de los atunes con errores de estimación por debajo de los exigidos por ICCAT en sus directivas sobre las transferencias. El uso de estas técnicas acústicas no está exento de la influencia de las condiciones ambientales en su precisión, pues se ha comprobado que en situaciones de mala mar se pierde la capacidad de automatización del conteo (como ocurre con los datos del día 13-07-2016). No obstante, sí es independiente de la turbidez del agua, de la posición del sol y la cantidad de luz. Al no estar afectadas por estos factores, que sí afecta a la grabación de imágenes bajo el agua, es posible el conteo efectivo en mayor cantidad de casos que cuando se usa un sistema óptico.
- Propuesta de una cámara de control que visiona el área completa de la puerta durante las transferencias: Además, se propone el uso de una cámara de control fija en la estructura, con visión total de la puerta y de los trabajos que en ella se realizan (incluso de dos cámaras enfocando a cada una de las puertas), de tal manera que se ejerza el control del proceso requerido por ICCAT y las autoridades sin operador que interfiera en la recogida de datos para el conteo y el tallaje automático.
- Se ha tramitado la solicitud de una patente nacional. La Oficina Española de Patentes y Marcas (OEPM) ha notificado, en relación con dicha tramitación de solicitud de patente 201631379, que ha superado el examen previsto en los artículos 31 de la Ley 11/1986, de Patentes y 17 de su Reglamento de Ejecución (RD 2245/1986).

Se ha realizado un **video divulgativo** del proyecto que puede visualizarse en:

[https://www.youtube.com/watch?v=X\\_fd8-K1Xf8&t=13s](https://www.youtube.com/watch?v=X_fd8-K1Xf8&t=13s)

## 9. Continuidad del proyecto

Los buenos resultados que se desprenden de las mediciones BIACOP frente a datos reales validan el procedimiento totalmente automático utilizado para la obtención de distribuciones estadísticas de longitud y ancho y para el conteo en transferencias. Sin embargo es importante la continuidad del proyecto si se quiere alcanzar un producto comercializable y que cumpla la normativa de ICCAT.

Tareas destinadas a las transferencias:

- Necesidad de una mayor experimentación en transferencias: Los resultados obtenidos hasta el momento son prometedores, pero son necesarios más experimentos en transferencias para ultimar la estructura y mejorar las prestaciones de los equipos de adquisición tanto acústico como de visión estereoscópica. Es importante realizar nuevos estudios de transferencia incorporando datos donde se sacrifiquen todos los peces y se obtengan medidas reales de todos ellos y de todas sus biometrías, altura, longitud, anchuras en diferentes secciones del cuerpo y peso.
- Necesidad de un procedimiento reglado para la toma de medidas: Queda patente, que la posición de los equipos y de los buzos durante el procedimiento debe reglamentarse para obtener grabaciones de datos de alta calidad que permitan la automatización del conteo. Por lo tanto, se debe trabajar en la definición de un protocolo que determine la forma de la estructura y posición de los equipos, posición de los buzos durante la transferencia, y procedimiento para la apertura y cierre de las puertas, de tal modo que las redes desprendidas de la jaula no afecten a las medidas.

Tareas destinadas a las jaulas de engrase:

- Es importante realizar nuevos estudios incorporando datos de nuevas campañas con tomas de medidas en jaulas donde se sacrifiquen todos los peces que las contienen y se obtengan medidas reales de todos ellos.
- Es importante realizar nuevos estudios que permitan discernir como varia el TS dentro de una jaula marina para el engrase de atunes, así como estudiar como se ve afectado el valor de este parámetro cuando se miden peces grandes a cortas distancias.

Tareas para la comercialización del sistema: Mejora de equipos y software

- Diseñar un sistema estereoscópico compacto y barato que permita una adquisición continuada de datos siendo necesario para ello, bajo consumo, potencia de cálculo, cámaras y ópticas económicas, dispositivos que soporten presión y calor y encapsulados ligeros y robustos.
- Ampliar la capacidad del software de procesamiento óptico: dotar al modelo de la posibilidad de estimar medidas fiables para peces con un grado alto de curvatura, adaptar el modelo para poder realizar mediciones desde diferentes perspectivas (no sólo vistas ventrales), dotar al sistema de una interfaz amigable para usuarios no expertos.
- Mejorar la potencia del software acústico con el uso de redes neuronales que permitan aislar de manera más efectiva las trazas del ruido.

## 10. Bibliografía

- Aguado, F. García, B., 2006. 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. Informe Junta Nac. Asesor. Cultiv. Mar. y Minist. Agric. Pesca y Aliment. 70pp.
- AQ1 Systems [WWW Document], 2013. URL <http://www.aq1systems.com/products> (accessed 9.1.14).
- Heikkila, J., Silven, O., 1997. A Four-step Camera Calibration Procedure with Implicit Image Correction, in: Proceedings of the 1997 Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR '97), CVPR '97. IEEE Computer Society, Washington, DC, USA, p. 1106--.
- Atienza-Vanacloig, V., Andreu-García, G., López-García, F., Valiente-González, J.M., Puig-Pons, V., 2016. Vision-based discrimination of tuna individuals in grow-out cages through a fish bending model. *Comput. Electron. Agric.* 130, 142–150. doi:10.1016/j.compag.2016.10.009
- Balk, H., Lindem, T., 2011. Sonar4 and Sonar5-Pro POst Processing Systems. Operator Manual Version 6.0.2. Oslo, Norway.
- Bertrand, A., Josse, E., 2000. Tuna target-strength related to fish length and swimbladder volume. *ICES J. Mar. Sci.* 57, 1143–1146. doi:10.1006/jmsc.2000.0881
- Cort, J. L., S. Deguara, T. Galaz, B. Mèlich, I. Artetxe, I. Arregi, J. Neilson, I. Andrushchenko, A. Hanke, M. N. Santos, V. Estruch, M. Lutcavage, J. Knapp, G. Compeán-Jiménez, R. Solana-Sansores, A. Belmonte, D. Martínez, C. Piccinetti, A. Kimoto, P. A. and M.I., 2013. Determination of L max for Atlantic Bluefin Tuna , *Thunnus thynnus* ( L .), from Meta-Analysis of Published and Available Biometric Data Reviews in Fisheries Science Determination of L max for Atlantic Bluefin Tuna ., *Rev. Fish. Sci.* 181–212. doi:10.1080/10641262.2013.793284
- Dawson, J.J., Wiggins, D., Degan, D., Geiger, H., Hart, D., Adams, B., 2000. Point-source violations: Split-beam tracking of fish at close range. *Aquat. Living Resour.* 13, 291–295. doi:10.1016/S0990-7440(00)01077-9
- Deguara, S., Gordo, A., Cort, J.L., Zarrad, R., Abid, N., Lino, P.G., Karakulak, S., Katavic, I., Grubisic, L., Gatt, M., Ortiz, M., Palma, C., Navarro Cid, J.J., and Lombardo, F., 2016. Determination of a length-weight equation applicable to Atlantic bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) during the purse seine fishing in the Mediterranean. *ICCAT, SCRS/2016/189* 10.
- Golay, A.S.; J.E., 1964. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Anal. Chemistry* 36, 1627–1639.
- Gonzalez, R.C., Woods, R.E. (Richard E., 2008. *Digital image processing*. Prentice Hall.
- Heikkila, J., Silven, O., 1997. A Four-step Camera Calibration Procedure with Implicit Image Correction, in: Proceedings of the 1997 Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR '97), CVPR '97. IEEE Computer Society, Washington, DC, USA, p. 1106--.
- Hsueh-Jung, L., Myounghee, K., Hsing-Han, H., Chi-Chang, L., Long-Jin, W., 2011. Ex situ and in situ measurements of juvenile yellowfin tuna *Thunnus albacares* target strength. *Fish. Sci.* 77, 903–913. doi:10.1007/s12562-011-0401-4
- ICCAT, 2014. RECOMENDACIÓN DE ICCAT PARA ENMENDAR LA RECOMENDACIÓN 13-07 DE ICCAT SOBRE EL ESTABLECIMIENTO DE UN PLAN DE RECUPERACIÓN PLURIANUAL PARA EL ATÚN ROJO EN EL ATLÁNTICO ESTE Y MEDITERRÁNEO.
- Knudsen, F.R., Fosseidengen, J.E., Oppedal, F., Karlsen, Ona, E., 2004. Hydroacoustic monitoring of fish in sea cages: Target strength (TS) measurements on Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Fish. Res.* 69, 205–209. doi:10.1016/j.fishres.2004.05.008
- Manik, H.M., 2009. Measurement of Acoustic Reflection of Tuna Fish Using Echosounder Instrument 14, 84–88.
- Marques, O., 2011. *Practical image and video processing using MATLAB*. Wiley-IEEE Press.
- Ona, E.; Zhao, X.; Svelling, I.; and Foote, K.G., 1996. SOME PITFALLS OF SHORT-RANGE STANDARD-TARGET CALIBRATION. *ICES J. Mar. Sci.* 18. doi:10.1017/CBO9781107415324.004
- Puig, V., Espinosa, V., Soliveres, E., Ortega, A., Belmonte, A., de la Gándara, F., 2012. Biomass Estimation of Bluefin Tuna in Sea Cages By the Combined Use of Acoustic and Optical Techniques. *Collect. Vol. Sci. Pap. ICCAT* 68, 284–290.
- Schaefer, Kurt M., Oliver, C.W., 1998. SHAPE, VOLUME, AND RESONANCE FREQUENCY OF THE SWIMBLADDER OF YELLOWFIN TUNA (*THUNNUS ALBACARES*). *Natl. Mar. Fish. Serv. Southeast Fish. Sci. Center. P.O. BOX 271. LA JOLLA, CA 92038*.
- Simrad, 2008. *Simrad ER60, Scientific Echo Sounder. Reference Manual*.
- StatPoint Technologies, I., 2013. *Statgraphics Centurion XVI*.
- The MathWorks Inc., 2014. *MATLAB User's Guide*.
- Zhang, Z., 1998. A Flexible New Technique for Camera Calibration a typo in Section 2.4) A Flexible New Technique for Camera Calibration. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 10, 1330–1334.

## 11. Resumen

Se ha realizado un **video divulgativo** del proyecto que puede visualizarse en:

[https://www.youtube.com/watch?v=X\\_fd8-K1Xf8&t=13s](https://www.youtube.com/watch?v=X_fd8-K1Xf8&t=13s)

### Objetivos del proyecto BIACOP

Mediante la utilización de sistemas de ecosondas y visión estereoscópica, el proyecto BIACOP propone dos objetivos principales:

**Objetivo 1:** Desarrollo de un sistema totalmente automático para estimar la distribución de tallas de los atunes en jaulas flotante

**Objetivo 2:** Desarrollo de una herramienta con ecosondas y sistemas estereoscópico para la estimación de número de individuos y biomasa total de atún rojo durante el proceso de transferencia entre jaulas de transporte y de engrase, desde una perspectiva ventral.

### Tareas realizadas

Para la consecución de los objetivos se han llevado a cabo las siguientes tareas:

1. Obtención de relaciones biométricas en sacrificios: Se han obtenido relaciones entre la longitud, altura y anchura máxima de los peces con su peso con la ayuda de las biometrías de los peces sacrificados. Sección 3 Informe BIACOP.
2. Diseño de equipos de adquisición de datos: En jaulas flotantes (objetivo 1) se trabajó con dos ecosondas split beam (120 kHz y 200 kHz) y sistema estereoscópico de cámaras. Para adquisición en transferencias, se utilizó ecosonda junto a un transductor de barrido lateral (a 200 kHz) y cámaras estereoscópica. Sección 4 Informe BIACOP.
3. Diseño de sistema de estructura flotante o puerta de transferencia: Se diseñó una estructura flotante que debe colocarse, durante las transferencias entre la jaula emisora y receptora para conteo y tallado de atunes. Dicha estructura estabiliza los equipos de medida y asegura la repetitividad del proceso. Sección 4.3 Informe BIACOP.
4. Desarrollo de algoritmos para obtención automática de tallas en jaula de engorde: Se ha desarrollado un sistema para procesamiento de los videos adquiridos bajo el agua que obtiene las tallas de los atunes de manera totalmente automática. También se han desarrollado algoritmos para el análisis de los datos acústicos y para la correlación de datos acústicos y ópticos obtenidos en jaulas de engrase. Sección 5 Informe BIACOP.
5. Desarrollo de algoritmos para estimar número de individuos en transferencias: Finalmente se han desarrollado algoritmos para el conteo automático de ejemplares durante las transferencias a partir de datos acústicos. Las particularidades de todas las herramientas informáticas desarrolladas se presenta en Sección 5 Informe BIACOP.
6. Adquisición de datos en condiciones reales durante una campaña: Se ha realizado una adquisición de datos periódica a lo largo de una campaña, durante 5 meses en tres jaulas de engrase. La cantidad de datos colectados así como la diversidad de condiciones naturales y medio ambientales que representan garantizan la confianza de los resultados obtenidos en el objetivo 1. Sección 6 Informe BIACOP, Tablas 15 y 16.
7. Pruebas y testeo de los sistemas desarrollados (estructura, equipos, algoritmos implementados, modelos desarrollados, sistemas software): Se han realizado ensayos del sistema de tallado y conteo mediante sistemas ópticos y acústicos en dos periodos; En 2014 con el objetivo de establecer parámetros de adquisición y análisis y sujeción de equipos



durante los procesos de transferencia; En 2016 se ha testeado el sistema de adquisición y las herramientas de procesamiento automático, así como la estructura flotante diseñada. Sección 7 Informe BIACOP, Tabla 43.

8. Estudio estadístico de las medidas biométricas obtenidas: longitud, ancho, engrase y biomasa: En la sección 6 y 7 del informe BIACOP se presentan estudios estadísticos y comparativas con datos reales y de inspectores y el grupo Balfegó, tanto de medidas biométricas obtenidas automáticamente como de conteo de individuos.

## Conclusiones

Los objetivos del proyecto han sido cumplidos en su totalidad y se han alcanzado **resultados altamente prometedores, combinando tecnología de sensores acústicos y ópticos**, que muestran que las técnicas desarrolladas posibilitan el conteo de los atunes en transferencias y su tallaje tanto en jaulas como en transferencias. Nuestros desarrollos permiten el **tallaje y conteo con resultados independientes de fatigas y condiciones humanas**.

*Los equipos propuestos junto con los procedimientos software desarrollados en el proyecto proporcionan de forma totalmente automática, sin intervención humana, tallaje de atunes (largo, ancho) y número de individuos en transferencias, en datos adquiridos en condiciones reales. La tasa media de aciertos en el conteo de individuos (Tabla 1) en transferencias con los desarrollos de BIACOP es del 94.9%, siendo superior al mínimo exigido por ICCAT en sus directivas sobre las transferencias. Mientras que las distribuciones estadísticas de longitudes en jaulas de engrase obtenidas con datos ópticos (Figura 1) comparada con datos reales de sacrificios presenta una tasa de coincidencia del 93.6% con los desarrollos BIACOP, siendo esta tasa superior a los datos obtenidos por inspección de pesca y el grupo Balfegó (71.3% de coincidencia).*

El **estudio biométrico realizado**, sección 3 Informe BIACOP, **muestra que la anchura máxima de los atunes puede utilizarse como parámetro junto con la longitud para determinar el peso y** mejora su estimación cuando han sido alimentados durante varios meses en cautividad. También **se mejora la bondad del ajuste** disminuyendo el error absoluto por debajo de los 9 Kg y obteniéndose errores relativos menores del 5% con **las tres dimensiones: longitud, altura y anchura máxima del pez**. Estos resultados, indican la necesidad de realizar medidas de las tres dimensiones en los animales recién capturados para mejorar la estimación del estado de los mismos según el lugar geográfico y época del año.

**Se ha desarrollado un modelo del atún** que, usando técnicas de visión por computador, **ajusta en largo y ancho a los peces y que proporciona el grado de flexión de su cuerpo**. Esto permite a la aplicación seleccionar aquellos frames donde se visualizan los peces prácticamente rectos estimando sus valores de longitud y anchura con una mayor precisión. **Trabajando con técnicas acústicas se ha demostrado que el uso del TScmax a 200 kHz es válido para estimar el peso medio de los atunes** (Tabla 2).

Los resultados obtenidos con los datos ópticos y acústicos adquiridos en jaulas de engrase **a lo largo de 5 meses** evidencian que **la longitud de los peces no varía significativamente** (Figura 2(a)) durante

este periodo ***mientras que la anchura entre la aleta pectoral y la quilla del pedúnculo caudal muestra un claro crecimiento durante los dos primeros meses de cautividad*** (Figura 2(b)).

***Se ha realizado el diseño y testeo de una estructura (Figura 3) que permite mantener estables los equipos*** y garantizar la adquisición de los individuos ***durante las transferencias***. Permite, además, la colocación de una cámara de control, fija y sin operador cubriendo la puerta de salida de los peces para el control de las autoridades. ***Basado en técnicas acústicas, se propone un mecanismo para el conteo automático de atunes durante las transferencias*** (Tabla 1). Al no estar afectadas estos sensores por factores de visibilidad bajo el agua, es posible el conteo efectivo en mayor cantidad de casos que cuando se usa un sistema óptico.

Se ha tramitado la solicitud de una patente nacional. La Oficina Española de Patentes y Marcas (OEPM) ha notificado, en relación con dicha tramitación de solicitud de patente 201631379, que ha superado el examen previsto en los artículos 31 de la Ley 11/1986, de Patentes y 17 de su Reglamento de Ejecución (RD 2245/1986).

### **Continuidad del proyecto**

Los buenos resultados que se desprenden de las mediciones BIACOP frente a datos reales validan el procedimiento totalmente automático utilizado para la obtención de distribuciones estadísticas de longitud y ancho y para el conteo en transferencias. Sin embargo es importante la continuidad del proyecto si se quiere alcanzar un producto comercializable y que cumpla la normativa de ICCAT.

Tareas destinadas a las transferencias:

- Necesidad de una mayor experimentación en transferencias: Los resultados obtenidos hasta el momento son prometedores, pero son necesarios más experimentos en transferencias para ultimar la estructura y mejorar las prestaciones de los equipos de adquisición tanto acústico como de visión estereoscópica. Es importante realizar nuevos estudios de transferencia incorporando datos donde se sacrifiquen todos los peces y se obtengan medidas reales de todos ellos y de todas sus biometrías, altura, longitud, anchuras en diferentes secciones del cuerpo y peso.
- Necesidad de un procedimiento reglado para la toma de medidas: Se debe trabajar en la definición de un protocolo que determine la forma de la estructura y posición de los equipos, posición de los buzos durante la transferencia, y procedimiento para la apertura y cierre de las puertas, de tal modo que las redes desprendidas de la jaula no afecten a las medidas.

Tareas destinadas a las jaulas de engrase:

- Es importante realizar nuevos estudios incorporando datos de nuevas campañas con tomas de medidas en jaulas donde se sacrifiquen todos los peces que las contienen y se obtengan medidas reales de todos ellos.
- Es importante realizar nuevos estudios que permitan discernir como varia el TS dentro de una jaula marina para el engrase de atunes, así como estudiar como se ve afectado el valor de este parámetro cuando se miden peces grandes a cortas distancias.

Tareas para la comercialización del sistema: Mejora de equipos y software

- Diseñar un sistema estereoscópico compacto y barato que permita una adquisición continuada de datos siendo necesario para ello, bajo consumo, potencia de cálculo, cámaras y ópticas económicas, dispositivos que soporten presión y calor y encapsulados ligeros y robustos.
- Ampliar la capacidad del software de procesamiento óptico: dotar al modelo de la posibilidad de estimar medidas fiables para peces con un grado alto de curvatura, adaptar el modelo para poder realizar mediciones desde diferentes perspectivas (no sólo vistas ventrales), dotar al sistema de una interfaz amigable para usuarios no expertos.
- Mejorar la potencia del software acústico con el uso de redes neuronales que permitan aislar de manera más efectiva las trazas del ruido.

### Figuras y tablas referenciadas

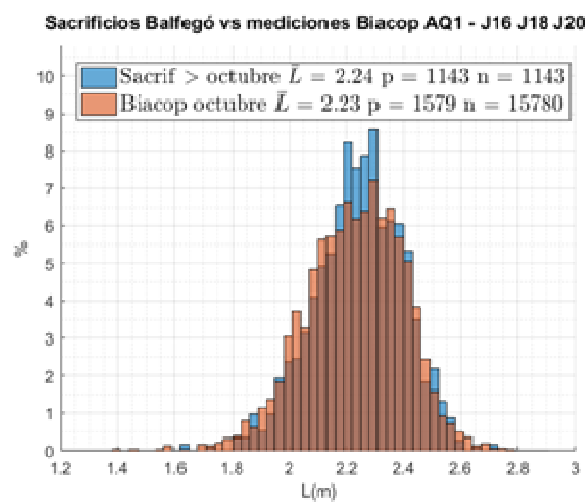


Figura 85. Distribuciones de longitud L por meses en las jaulas del Grup Balfegó comparado con sacrificios.  $\bar{L}$ , media de longitud; n, número de muestras analizadas; p, número de peces en el momento de la grabación.

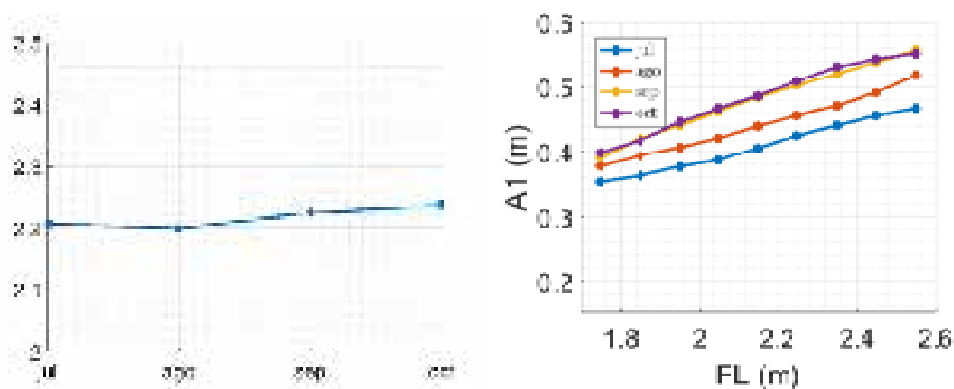


Figura 2. (a) Evolución de media de longitud en jaula durante los meses evaluados. Relación entre la longitud FL y la anchura máxima  $A_1$  por meses.

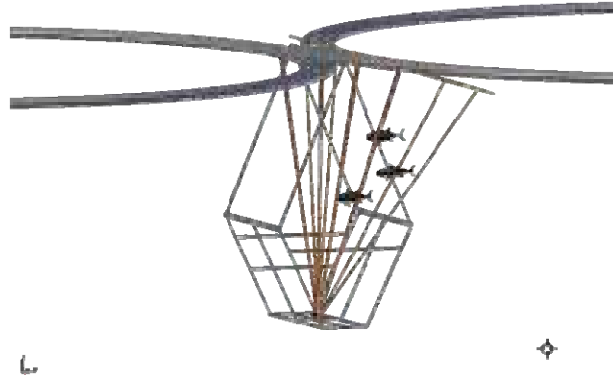


Figura 3. Estructura con forma simétrica y mayor anchura en la parte inferior. Esta estructura permite ubicar los sistemas de adquisición en diferentes orientaciones: con las cámaras orientadas hacia la jaula emisora (o receptora) y el sistema acústico con cero grados y su haz acústico perpendicular a la superficie del mar.

Mes de Adquisición	Transferencias campaña 2016								Total
	Enero 27		Julio 20		Julio 27		Octubre 26		
Transferencias	Ida	Vuelta	Ida	Vuelta	Ida	Vuelta	Ida	Vuelta	8
Atunes transferidos	608	608	577	577	577	577	503	503	4530
Conteo acústico	574	549	554	535	575	570	449	493	4299
Acierto %	94.4	90.3	96.0	92.7	99.0	98.8	89.3	97.1	94.9%
Error %	5.6	9.7	4.0	7.3	1.0	1.2	10.7	1.9	5.1%
Incidencias	-	Si (1)	-	Si(2)	-	-	Si (3)	-	3

Tabla 1. Resultado del conteo de las transferencias realizadas. (1) Tubos refuerzo estructura, (2) Peces cambian de dirección y regresan a la jaula emisora, (3) inclinación del sensor acústico de 15°.

$\bar{P} = 258.57 \text{ kg}$		$f = 200 \text{ kHz}$				
		$TS_{max}$			$TS_{cmax}$	
Modelo	Peso (Kg)	$E_{am}$ (kg)	$\epsilon_{rm}$ (%)	Peso (kg)	$E_{am}$ (kg)	$E_{rm}$ (%)
M1	202,02	56,54	27,98	244,45	14,11	5,77
M2	201,22	57,35	28,50	245,89	12,68	5,16
M3	201,18	57,39	28,53	251,79	6,78	2,69
M4	199,38	59,19	29,69	239,97	18,60	7,75
M5	200,71	57,86	28,83	245,50	13,07	5,33
M6	195,97	62,60	31,94	245,11	13,46	5,49
M7	194,28	64,29	33,09	244,13	14,44	5,91
M8	200,23	58,34	29,13	246,86	11,71	4,75
M9	200,56	58,01	28,92	245,73	12,84	5,23
M10	200,39	58,18	29,03	244,09	14,48	5,93
M11	200,87	57,70	28,72	245,72	12,85	5,23
M12	215,85	42,72	19,79	263,42	4,85	1,84
M13	206,71	51,86	25,09	276,01	17,44	6,32

Tabla 2. Estimación de la masa promedio a partir de la longitud media y la anchura máxima obtenida por métodos acústicos para una frecuencia de 200 kHz.