

La hidroacústica horizontal utilizada en la gestión de las comunidades de peces: en busca de la firma acústica de barbos y carpas.

Rodríguez-Sánchez, V.¹; Encina, L.¹; Rodríguez-Ruiz, A.¹; Sánchez-Carmona, R.¹; Monteoliva Herreras, A.²; Alonso de Santocildes, G.² y Monná Cano, A.²

¹Dpto. Biología Vegetal y Ecología. Facultad de Biología Vegetal y Ecología. Universidad de Sevilla. Apdo. 1095. 41080 Sevilla.

²Ecohydros S.L. Polígono Industrial de Cros, Edificio 5- Nave 8. 39600- Maliaño (Cantabria).

RESUMEN

La hidroacústica es una de las metodologías más recomendadas en el estudio de la densidad, biomasa y comportamiento de los peces en los ecosistemas de agua dulce. La aplicación horizontal en aguas poco profundas presenta algunas incertidumbres relacionadas con la señal acústica recibida (TSc) en relación al aspecto del pez (orientación del eje del cuerpo del pez con respecto al haz acústico). En este sentido, es necesario continuar trabajando para resolver algunas de las dificultades encontradas en las estimas horizontales mediante experimentos en medios controlados. Se presentan en este estudio los primeros resultados de las grabaciones hidroacústicas con peces en libertad, realizados sobre individuos pertenecientes a las especies carpa y barbo. Para las grabaciones se ha utilizado una ecosonda de 200 kHz SIMRAD EK60. Se ha estudiado el efecto de la orientación sobre el TSc (máximo, mínimo y medio) y por tanto, sobre las estimas de longitud total del pez y peso total. El objetivo de este proyecto es desarrollar ecuaciones que mejoren las conversiones de la señal acústica recibida (TSc), en longitud y peso real para la hidroacústica horizontal utilizada en aguas someras.

Palabras clave: señal acústica (TS), hidroacústica horizontal, peces, agua dulce.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, ictiólogos de toda Europa trabajan para la normalización de los métodos de muestreo utilizados para el estudio, gestión y conservación de las comunidades de peces, tanto en sistemas de agua dulce como en sistemas marinos. Según las últimas publicaciones, la combinación de dos o más métodos de muestreo favorece la obtención de una imagen más real de la situación del ecosistema estudiado en un momento determinado (Editorial, 2009). Entre las metodologías más utilizadas para el estudio de la densidad, biomasa y comportamiento de los peces se encuentra la hidroacústica, de hecho el valor de la hidroacústica para la investigación de peces continentales ha sido reconocido por el Comité Europeo de Normalización (CEN) como un método formalmente aprobado para el muestreo de peces, presentando una gran idoneidad en la proporción de estimas de abundancia de peces en las aguas medias de grandes ríos, en aguas de transición, y en las zonas pelágicas y profundas de los lagos (CEN, 2006). Aunque por ahora, esta técnica debe combinarse con el uso de redes agalleras (CEN, 2005) para la identificación de especies.

Artículos

La hidroacústica es una técnica que aplica el sonido y sus propiedades en el estudio de las masas de agua. Para conseguir la información utiliza un aparato llamado ecosonda, que funciona como transmisor y receptor de señales sonoras. Este aparato, emite ondas sonoras que viajan en el agua chocando con todos los organismos y partículas que encuentra a su paso (Figura 1). Cada uno de los obstáculos con que tropiezan las ondas sonoras emite a su vez un eco de vuelta. Estos ecos son recibidos por el receptor, y el programa de adquisición de datos, lo traduce en una imagen (ecograma) que representa el ecosistema subacuático.

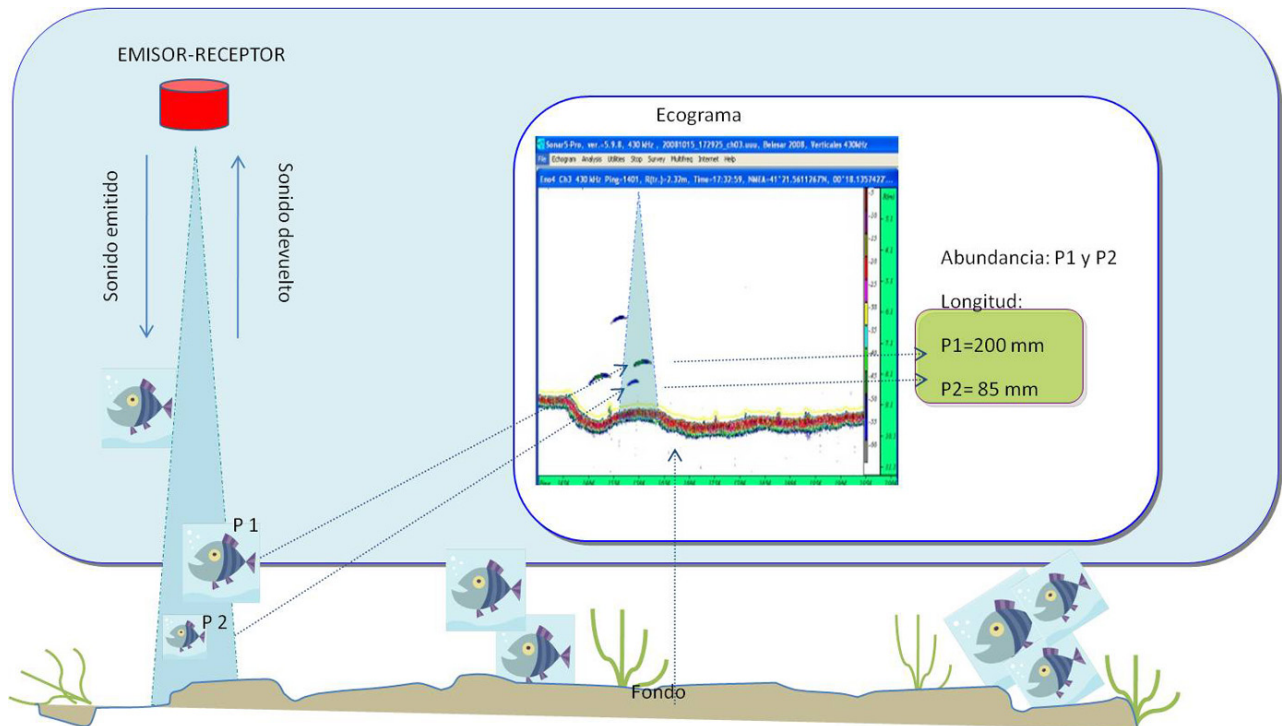


Figura 1. Representación esquemática del mecanismo aplicado en hidroacústica: A la izquierda en rojo aparece la ecosonda que emite y recibe el sonido. A la derecha aparece un gráfico que representa el sonido recibido y se llama Ecograma.

Al proporcionar información de los distintos compartimentos del ecosistema acuático, no es de extrañar que sus aplicaciones se estén extendiendo rápidamente hacia muchos campos de estudio. Concretamente, cada vez es más utilizada en los estudios biológicos de los sistemas acuáticos, pudiendo aplicarse tanto en estudios de pequeños organismos (zooplancton y fitoplancton) como en estudios de organismos de mayor tamaño (plantas sumergidas o macrófitas y peces).

Por ser poco agresiva con el medio, obtener una gran cantidad de información en poco tiempo y por la fiabilidad de los resultados, la hidroacústica es una de las técnicas más aplicadas y estudiadas de los últimos años. No obstante, en el caso concreto de los peces de agua dulce, las conversiones de los parámetros acústicos a parámetros biológicos reales presentan ciertas desviaciones sólo salvables mediante la realización de experimentos controlados donde sean conocidas tanto las especies como sus longitudes y pesos (Kubecka, 1994; Kubecka y Duncan, 1998; Lilja *et al.*, 2000; Frouzova y Kubecka, 2004).

El sonido de los peces tratados individualmente depende en general de parámetros morfológicos tales como la longitud, el peso, el desarrollo gonadal, el contenido graso, tipo y tamaño de la vejiga natatoria, etc. Pero además, en la aplicación horizontal, parámetros no biológicos como la orientación y dirección de natación del pez con respecto a la fuente sonora es crucial en la respuesta emitida por el individuo frente al sonido. Variaciones

Artículos

en la orientación de los peces, provocan variaciones en el sonido devuelto, por lo que un mismo individuo puede producir diferentes sonidos dependiendo de la orientación que presente respecto al haz acústico. Por este hecho, se hace necesario realizar estudios que focalicen sus esfuerzos en la determinación de esta variabilidad acústica a fin de construir ecuaciones que estimen fiablemente la longitud y peso de los individuos presentes en las prospecciones acústicas.

Igualmente, en los últimos años se está trabajando en la determinación de las especies por análisis de espectro de frecuencia (Ed. aFondo, 2009). Cada especie tiene una determinada reflectividad para cada frecuencia y con esto puede confeccionarse una curva de la respuesta de cada especie a diferentes frecuencias. Si bien, aunque se espera poder obtener resultados a corto plazo, los resultados del experimento no se han expuesto en este trabajo.

Se presentan así los resultados preliminares del estudio experimental hidroacústico realizado en las instalaciones de la Estación de Ecología Acuática Príncipe Alberto I de Mónaco, Sevilla, por parte del grupo de peces de la Universidad de Sevilla y la empresa Ecohydros SL. El objetivo principal del estudio, ha sido la obtención de ecuaciones para convertir los valores de respuesta acústica (TSc) a parámetros biológicos reales, tales como la longitud total de los individuos en dos de las especies más abundantes en nuestros sistemas epicontinentales.

MATERIAL Y MÉTODOS

LOS EJEMPLARES ÍCTICOS

Se han analizado los registros sonoros de 10 individuos de diferente talla, pertenecientes a dos especies distintas. La selección de las especies se hizo en base a su representatividad en los sistemas epicontinentales ibéricos. De esta forma, las especies seleccionadas fueron el barbo sp. (*Luciobarbus sp*) y la carpa común (*Cyprinus carpio*).

Los ejemplares fueron capturados mediante pesca eléctrica y trasladados a los acuarios de cuarentena, donde siguieron un estricto protocolo para asegurar su buen estado de salud y evitar infecciones generalizadas en el acuario experimental.

Cada uno de los ejemplares seleccionados fue medido en longitud (mm) y peso (g) antes de ser introducido en el acuario. Las referencias de dichas medidas se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Resumen de los ejemplares utilizados para el análisis hidroacústico. Longitud total (mm), longitud estándar (mm) peso total (g), y número de trayectorias analizadas.

EJEMPLARES	LONGITUD TOTAL (mm)	LONGITUD ESTÁNDAR (mm)	PESO (g)	NÚM. TRAYECTORIAS
Barbo sp.	135	112	27	53
	174	142	75	48
	256	213	155	99
	335	284	350	124
	403	343	600	268
Carpa sp.	140	111	36	265
	233	185	181	115
	380	310	960	124
	420	345	740	53
	470	395	1500	251

Artículos

DISEÑO EXPERIMENTAL

La estructura para albergar a los peces durante las grabaciones consistió en una jaula de dimensiones 1.5mx1.5mx1.5m realizada en PVC, malla mosquitera y malla de nylon monofilamento de luz de malla 5mm (Figura 2).

En el interior de la jaula se introdujeron aisladamente los peces seleccionados durante 48 horas. Los registros acústicos presentados en este estudio pertenecen a una Ecosonda Simrad EK60 de 200kHz y haz partido circular (7°), colocada a una distancia de 4 metros de la jaula, aunque en el experimento se ha utilizado simultáneamente una ecosonda Biosonics DTX de 430 kHz y haz partido y elíptico (4° x 8°). Las grabaciones hidroacústicas se realizaron utilizando dos longitudes de pulso diferentes (128µs y 256 µs) y dos iluminaciones diferentes (luz y oscuridad), para simular los ciclos diarios de día y noche (Axenrot *et al.*, 2004; Tuser *et al.*, 2009). No obstante, en el presente estudio se presentan los resultados obtenidos de las grabaciones realizadas sobre las especies señaladas con la ecosonda de 200 kHz de frecuencia, iluminación diurna y utilizando una longitud de pulso de 128µs.

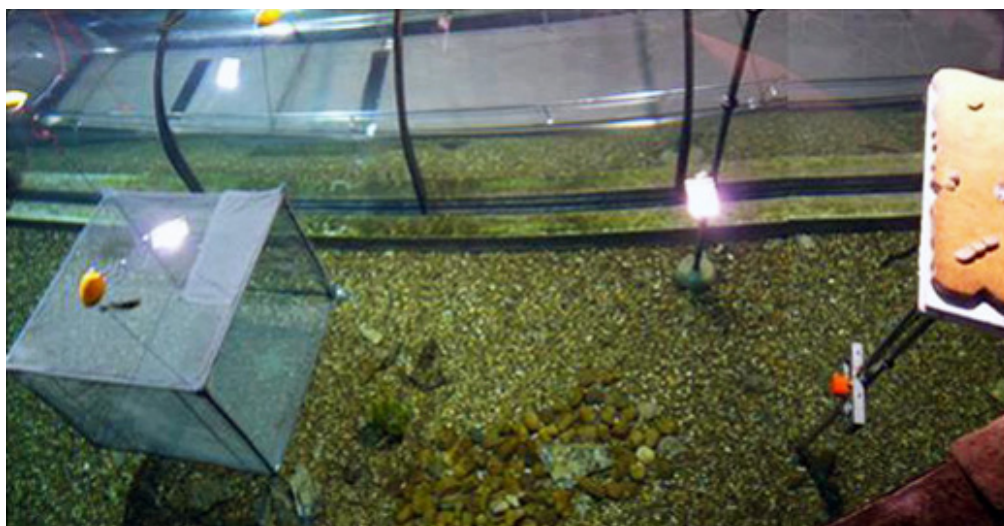


Figura 2. Imagen de la jaula diseñada para albergar a los ejemplares seleccionados durante las grabaciones de insonificación.
Fotografía: vrodríguez.

DISEÑO DE GRABACIÓN

Los parámetros seleccionados para la adquisición de los datos acústicos fueron: longitud de pulso: 128 µs; tasa de pulso: 10 ping/segundo y umbral de detección (Threshold): -130dB.

Previas a las grabaciones se realizaron pruebas de calibración con esfera de cobre de 13mm a 19°C. La esfera se colocó delante de la jaula, en el interior de la misma y detrás de ella, comprobando en cada caso que la desviación del sonido esperado no superaba los ± 3 dB.

PROCESADO DE DATOS

Los datos acústicos procedentes de cada uno de los individuos insonificados se procesaron con Sonar 5-Pro (Balk y Lindem, 2009). Los archivos brutos (.raw/.dt4), se convirtieron con 40logR. Los parámetros seleccionados para la conversión fueron: min. Echo Length: 0.8; Max. Echo Length: 1.6; min. Threshold: -70dB. Max. Phase Deviation: 8;

Artículos

Gain: 5, similares a los parámetros utilizados en un estudio anterior (Frouzova *et al.* 2005).

Una vez obtenidos los ecogramas se procedió a la clasificación y registro de trayectorias (conjunto de ecos que dibujan la línea que el pez describe con su movimiento) de los peces insonificados, incluyendo en el registro sólo aquellos ecos que distaran como máximo 3 grados del centro acústico definido en las coordenadas (0,0) (Figura 3).

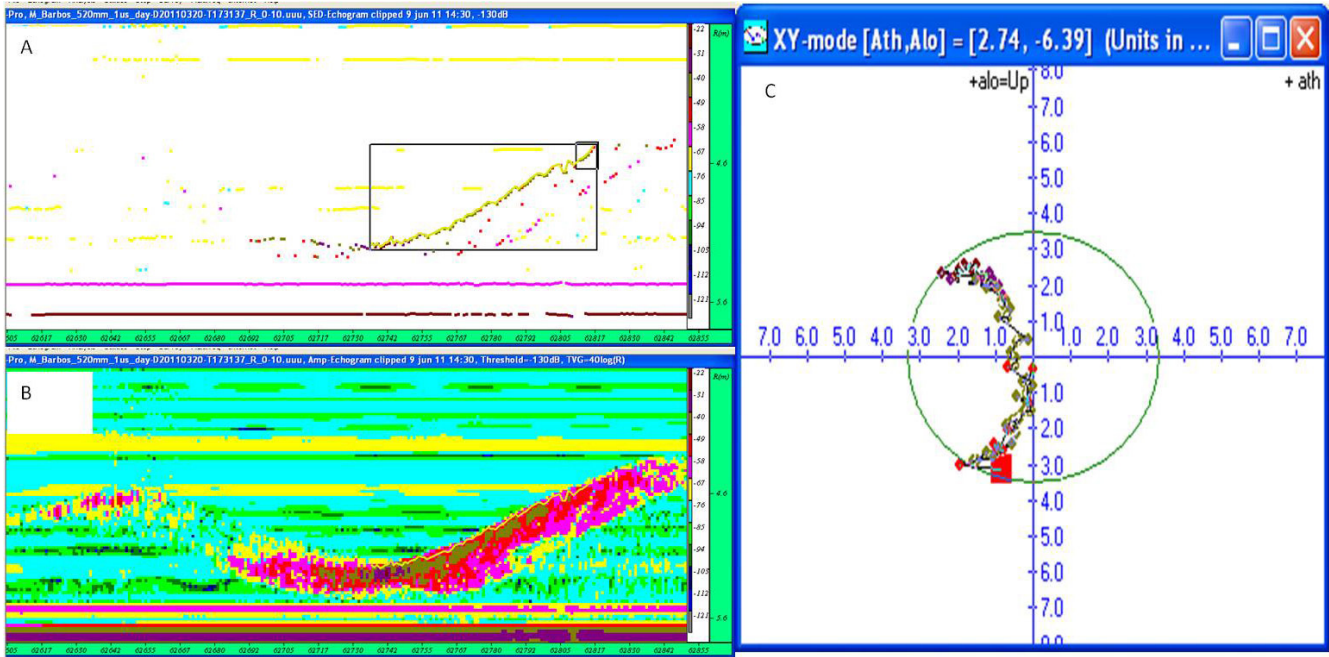
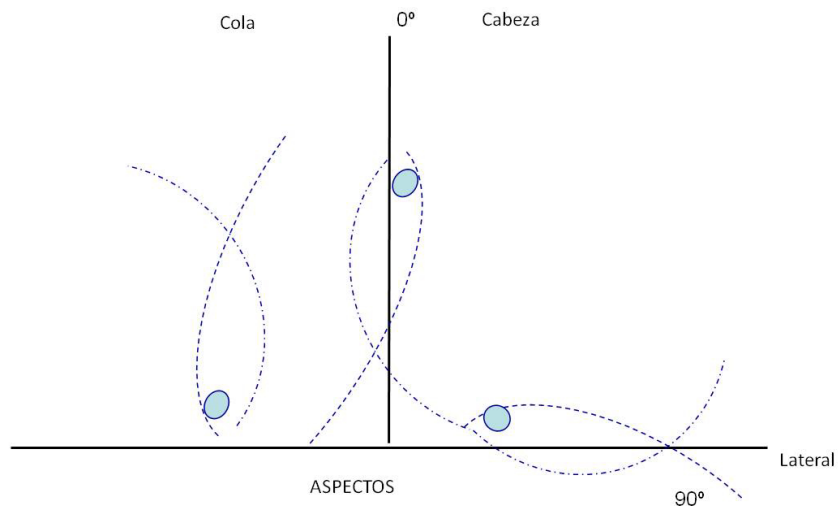


Figura 3. Trayectoria acústica registrada para un barbo de 403mm grabado con la ecosonda de 200 kHz. A.- Ecograma de ecos simples (SED-Echogram). B.- Ecograma de ecos amplificados (Amp-Echogram). C.- Representación gráfica de la trayectoria seleccionada en los ejes cartesianos del axis acústico (°).

Posteriormente, las trayectorias fueron clasificadas según su orientación con respecto al haz acústico, quedando renombradas como “aspecto cabeza-cola”, ángulos de 0° a 20°, “aspectos laterales” con ángulos de 70° a 90° y “aspectos intermedios”, el resto de las orientaciones.

Figura 4. Posibles orientaciones del pez con respecto al haz acústico (0-90°). Aspectos de valor acústico mínimo esperado: Cabeza y Cola (0-20°). Aspectos de valor acústico máximo esperado: Lateral (70-90°).



Artículos

ESTADÍSTICA APLICADA

Los análisis estadísticos de los datos se realizaron utilizando el software PASW Statistics.18. Se estimaron las regresiones de la señal acústica compensada (TSc, en adelante) con respecto a la longitud total de los individuos: $TSc = a \text{Log}x + b$ (Love, 1977), donde a y b son constantes para cada una de las especies y x , es la longitud total del pez.

Para estudiar la influencia de los factores especie, talla y aspecto, se realizaron análisis de la varianza al 95%. En todos los casos una probabilidad del 0.01 fue utilizada para contrastar la significación de la hipótesis nula.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como se ha comprobado en estudios anteriores (Frouzova *et al.*, 2005; Kubecka *et al.*, 2009) el TSc resultante de un pez en el plano horizontal es menos predecible que el encontrado en el plano vertical, ya que la variabilidad de las orientaciones es mayor y el cambio en el TSc depende principalmente del comportamiento del pez (Torgersen y Kaartvedt, 2001).

En la práctica esto significa que para individuos de una especie determinada, insonificados con una frecuencia específica, por ejemplo en nuestro experimento: para un barbo de 256mm de longitud, el TSc varía en el plano horizontal desde -53 a -33 dB, es decir, 20 dB de diferencia entre el mínimo y el máximo encontrados.

En este estudio, hemos avanzado en complejidad con respecto a investigaciones anteriores al introducir una nueva variable, el movimiento natural del pez. Esta nueva variable se relaciona directamente con los cambios en la respuesta acústica del pez, ya que las variaciones en la orientación durante la natación provocan cambios en el TSc. En un principio podíamos pensar que el rango de variación entre el TSc máximo y mínimo sería mayor que en experiencias previas como la de Frouzova *et al.* (2005) con peces inmovilizados, pero los resultados de nuestro experimento con peces nadando en libertad, mostraron grandes coincidencias en la variación del TSc, lo cuál nos alienta para proseguir con la investigación en estos mismos términos.

Por otro lado, si utilizamos los TSc medios resultantes del cálculo de los aspectos y comparamos los valores obtenidos para el aspecto cabeza-cola (mínimo TSc esperado) y el aspecto lateral (Máximo TSc esperado), las diferencias se reducen a menos de 10 dB de diferencia entre los TSc medios de los aspectos máximo y mínimo. Esto es debido a que la media encontrada para el TSc en cada aspecto suaviza los picos de señal acústica producidos en determinadas orientaciones. Por lo que, cuanto mayor sea el número de individuos insonificados, más ajustadas resultarán las ecuaciones perseguidas, si bien, resultados preliminares como este, nos ayudan a plantear el estudio de los datos.

Para cada talla se han calculado las regresiones TSc-Longitud estándar resumidas en la Tabla 2. Todas las regresiones son significativas ($p < 0,001$) y relacionan positivamente el aumento de la señal acústica con la longitud. El ajuste de la regresión es mayor para la especie carpa, aunque probablemente la relación del barbo mejorará con la inclusión de nuevas tallas. La distribución del TSc medio registrado para cada especie difiere significativamente ($F_{1,32} = 217,31$; $p < 0,001$), aunque las diferencias para la media acústica de cada especie apenas superaron los dos decibelios, lo que hace por ahora imposible diferenciar los ecos recibidos por estas dos especies de ciprínidos en los estudios hidroacústicos. Como se ha comentado anteriormente, deberemos estudiar más adelante las respuestas de estos mismos individuos a diferentes frecuencias y observar las

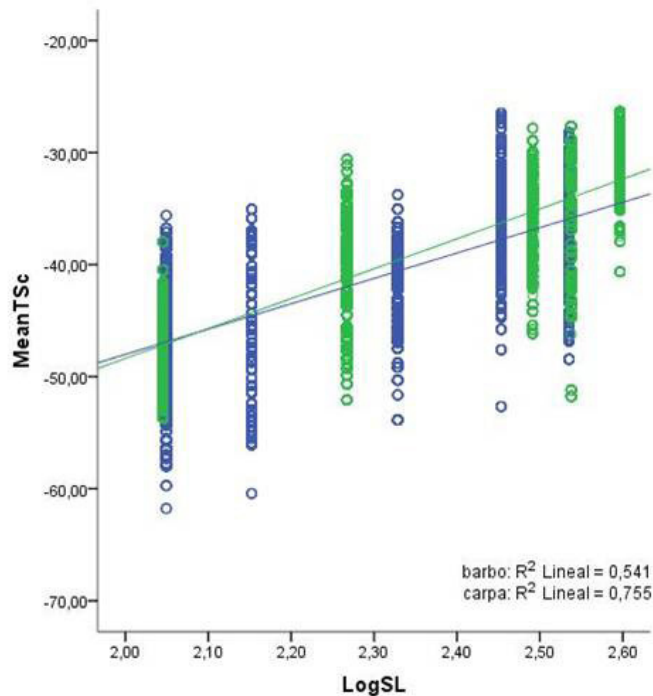
Artículos

variaciones que puedan producirse, ya que cuando las especies son muy parecidas, como en nuestro caso con dos especies de ciprínidos, la combinación de frecuencias parece ser la clave para la diferenciación por especies.

Tabla 2. Resultados de la regresión lineal aplicada sobre los valores de TSc (dB) y longitud estándar (mm) registrados en las trayectorias clasificadas para cada especie. R²: ajuste de la regresión. a y b: constantes; p: significación de la regresión.

Especie	R ²	a	b	p
Barbo sp.	0,541	-93,252	22,621	<0,001
Carpa sp.	0,755	-101,732	26,683	<0,001

Figura 5. Regresiones lineales aplicadas sobre los valores de TSc (dB) y el logaritmo de la longitud estándar (mm) de los individuos estudiados. En verde se representa a la especie carpa y en azul a la especie barbo. Ajustes de la regresión (R²).



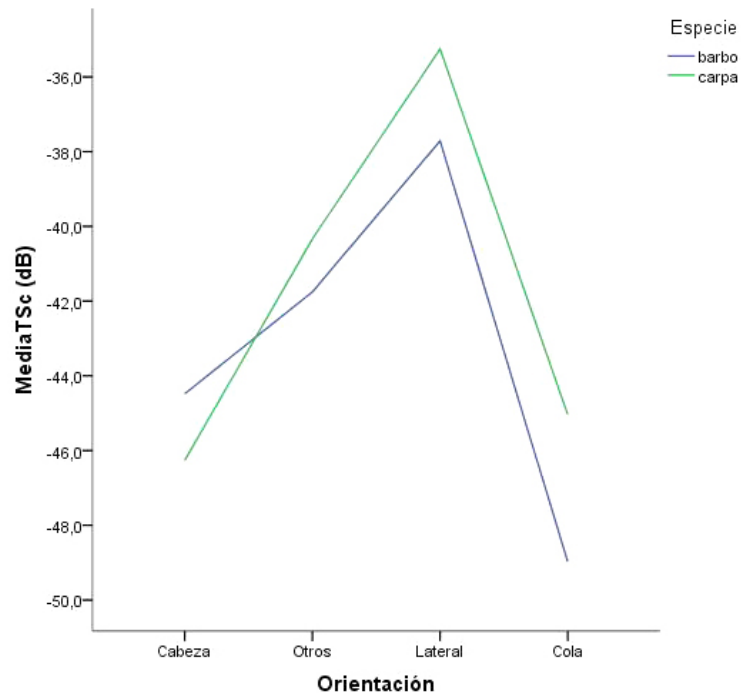
Como se observa en la Figura 5, el sonido devuelto se hace más fuerte cuando los individuos pertenecen a tallas más grandes, es decir, el TSc covaría con la longitud de los individuos muestreados, siendo su relación positiva y significativa para las especies estudiadas. Los valores más bajos de TSc se obtienen en las tallas de menor longitud, reflejando los peces más pequeños sonidos más débiles. Esto coincide con los resultados de Frouzova *et al.*, 2005 y demuestra una vez más, que las estimaciones de longitud en los estudios ícticos con hidroacústica horizontal, reflejan las variaciones reales de longitud. Por todo esto, en estudios de este tipo, se aconseja utilizar la longitud de los individuos como covariable una vez comprobada la relación entre TSc y tamaño.

En el apartado de Material y Métodos se ha definido el aspecto como las diferentes orientaciones de natación de un pez con respecto al plano de emisión sonora, referenciados en el primer cuadrante de los ejes cartesianos del haz acústico (+/+). De tal forma, aspectos de 0°-20° se corresponderían con orientaciones próximas al aspecto de cabezocola y aspectos de 70°-90° se corresponderían con orientaciones próximas al aspecto lateral.

Artículos

Como se observa en la Figura 6, los valores más bajos para TSc se obtuvieron para las orientaciones de natación más perpendiculares al plano dibujado por los transductores, aspecto de cabeza y cola (0-20°). Por lo que podemos decir que a medida que los peces nadan más paralelos al plano del transductor los sonidos devueltos se hacen más fuertes, debido principalmente al aumento en la exposición de la vejiga natatoria al sonido (Blaxter and Batty, 1990). Estos resultados coinciden de nuevo con los presentados por Frouzova *et al.*, 2005 y Kubecka *et al.*, 2009.

Figura 6. Representación gráfica de la variación del TSc (dB) registrado para cada una de las especies insonificadas: barbo sp. (azul) y carpa sp. (verde), a través de las diferentes orientaciones posibles de cada individuo.



CONCLUSIONES

El diseño experimental desarrollado para la insonificación de las especies barbo y carpa nadando en libertad, ha producido resultados válidos y de alta calidad para el estudio de la firma acústica de estas dos especies.

La longitud de los ejemplares es el factor más relacionado con las variaciones en la respuesta acústica, presentando un ajuste lineal positivo y significativo para las especies estudiadas.

Los aspectos próximos a la orientación paralela del pez con respecto al plano sonoro, aspectos laterales, provocan los valores más altos de TSc, mientras que los aspectos de cabeza y cola provocan los valores más bajos para el TSc en ambas especies.

Las diferencias entre especies deben ser estudiadas con un mayor número de tamaños para poder realizar afirmaciones concluyentes. El reto futuro de las investigaciones hidroacústicas está en la combinación de frecuencias para la discriminación entre especies.

BIBLIOGRAFÍA

- AXENROT, T., DIDRIKAS, T., DANIELSSON, CH., HANSSON, S., 2004. Diel patterns in pelagic fish behavior and distribution observed from a stationary, bottom-mounted, and upward-facing transducer. *ICES J. Mar. Sci.* 61 (7), 1100–1104.
- BALK AND LINDEM, 2009. Sonar4 and Sonar5 post processing systems, Operator manual version 5.9.9, 438p. Lindem Data Acquisition Humleveien 4b. 0870 Oslo Norway.
- BLAXTER, J.H.S., BATTY, R.S., 1990. *Swimbladder “behaviour” and Target strength. Rapp. P.-v. Reun. Cons. Int. Explor. Mer.* 189, 233–244.
- CEN, 2005. EN 14 757, CEN TC 230, Water Quality-Sampling of Fish with Multi-mesh Gillnets.
- CEN, 2006. EN 14 962, CEN TC 230, Water Quality-Guidance on the Scope and Selection of Fish Sampling Methods.
- Editorial, 2009. ES 60, La ecosonda que da respuesta a la captura de inmaduros en la pesca de cerco. *A Fondo*. N° 2. Simrad Spain SL. 4-9.
- Editorial, 2009. The true picture of a lake or reservoir fish stock: a review of needs and progress. *Fish. Res.* 96, 1-5.
- FROUZOVA, J., KUBECKA, J., 2004. Changes of acoustic target strength during juvenile perch development. *Fish. Res.* 66, 355–361.
- FROUZOVA, J., KUBECKA, J., BALK, H., FROUZ, J. 2005. Target strength of some European fish species and its dependence on fish body parameters. *Fish. Res.*, 75: 86-96.
- KUBECKA, J., FROUZOVA, J., BALK, H., CECH, M., DRASTIK, V., PRCHA-LOVÁ, M., 2009. Regressions for conversion between target strength and fish length in horizontal acoustic surveys. In: Papadakis, J.S., Bjorno, L., (Eds), *Underwater acoustic measurements, Technologies and Results*. Foundation for Research and Technology, Heraklion, Greece, ISBN: 978-960-98883-2-5:1039-1044.
- KUBECKA, J., 1994. Simple model on the relationship between fish acoustical target strength and aspect for high-frequency sonar in shallow water. *J. Appl. Ichthyol.* 10, 75–81.
- KUBECKA, J., DUNCAN, A., 1998. Acoustic size vs. real size relationships for common species of riverine fish. *Fish. Res.* 35, 115–125.
- LILJA, J., MARJOMAKI, T.J., RIIKONEN, R., JURVELIUS, J., 2000. Sideaspect target strength of Atlantic salmon (*Salmo salar*), brown trout (*Salmo trutta*), whitefish (*Coregonus lavaretus*), and pike(*Esox lucius*). *Aquat. Living Resour.* 13, 355–360.
- LOVE, R.H., 1977. Target strength of an individual fish at any aspect. *J. Acoust. Soc., Am* 62 (6), 1397–1403.
- TORGERSEN, T., KAARTVEDT, S., 2001. *in situ* swimming behaviour of individual mesopelagic fish studied by split-beam echo target tracking. *ICES J. Mar. Sci.* 58 (1), 346–354.
- TUSER, M., KUBECKA, J., FROUZOVA, J., JAROLIM, O., 2009. Fish orientation along the longitudinal profile of the Rimov reservoir during daytime: Consequences for horizontal acoustic surveys. *Fish. Res.* 96, 23-29.

