

MASTER INVESTIGACIÓN
EN INGENIERÍA PARA EL
DESARROLLO
AGROFORESTAL

TRABAJO FIN DE MASTER

Evaluación de la capacidad de nado de dos especies de ciprínidos ibéricos: barbo común (*Luciobarbus bocagei*) y boga del Duero (*Pseudochondrostoma duriense*)



Universidad de Valladolid

JORGE RUIZ LEGAZPI



Máster en Investigación para el Desarrollo Agroforestal

Evaluación de la capacidad de nado de dos especies de ciprínidos ibéricos: barbo común (*Luciobarbus bocagei*) y boga del Duero (*Pseudochondrostoma duriense*)



ÍNDICE

RESUMEN	3
ANTECEDENTES	5
OBJETIVOS	9
MATERIAL Y MÉTODOS	10
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	22
CONCLUSIONES	29
BIBLIOGRAFÍA	30



RESUMEN

Cuantificar la capacidad de nado de los peces es importante porque ayuda a identificar las barreras para el movimiento. Esto tiene significativas implicaciones para la conservación: presas, caños, puentes y otras estructuras pueden crear zonas de alta velocidad del flujo que dificultan los movimientos, y los datos sobre el rendimiento en la natación son necesarios para desarrollar criterios de diseño que sean compatibles con la conservación de la pesca. Hemos analizado esta cuestión mediante el estudio de la capacidad de nado del barbo ibérico (*Luciobarbus bocagei* Steindachner, 1864) y de la boga del Duero (*Pseudochondrostoma duriense* Coelho, 1985). Los estudios se llevaron a cabo utilizando un canal abierto de 25 m de longitud. Barbos y bogas de varios tamaños se introdujeron en una zona de descanso, aguas abajo del canal, caracterizada por una baja velocidad desde donde eran capaces de realizar ascensos voluntarios contra velocidades de flujo nominales de 1.5, 2.5 y 3.0 m/s. Los progresos por el canal se controlaron mediante un sistema de identificación por radiofrecuencia denominado *Passive Integrated Transponder* (PIT), y cámaras cenitales en el canal se emplearon para registrar la posición de los peces nadando. Los resultados muestran fuertes similitudes en la capacidad de natación, pero las diferencias en el comportamiento entre las dos especies.

ABSTRACT

Quantifying swimming ability of fish is important because it helps to identify barriers to movement. This has important conservation implications: dams, culverts, bridges and other structures can create zones of high velocity flow that obstruct movements, and data on swimming performance are necessary to develop design criteria that are consistent with fisheries conservation. We explored this question by studying swimming performance of iberian barbel (*Luciobarbus bocagei* Steindachner, 1864) and northern straight-mouth nase (*Pseudochondrostoma duriense* Coelho, 1985). Studies were conducted using a large open-channel flume (25 m). Fish of various size classes were introduced into a low-velocity staging area downstream of the flume, from which they were able to stage volitional ascents against nominally flows of 1.5, 2.5 and 3.0 m/s. Progress up the flume was monitored using an automated passive integrated transponder (PIT) system, and cameras above the flume were used to record the position of fish swimming up. The results show strong similarities in swimming capacity, but differences in behavior between the two species.





ANTECEDENTES

La gran mayoría de los cursos fluviales presentan zonas caracterizadas por la alta velocidad de la corriente. Estos lugares suponen a menudo un obstáculo que imposibilita o restringe el movimiento de los peces a lo largo del cauce. Pero incluso estas circunstancias de velocidades elevadas caracterizan los pasos para peces, las escalas, los ríos artificiales, etc. Estas zonas, sean naturales o artificiales, son denominadas como barreras de velocidad ya que suelen suponer un límite insuperable para las características fisiológicas o de comportamiento de los peces (Clay, 1995 y Haro *et al.*, 1998, Haro *et al.*, 2004), pues impiden el libre tránsito de la ictiofauna. De manera que las poblaciones de los peces que no son capaces de superar dichas barreras pueden sufrir graves consecuencias, desde pérdida de diversidad genética hasta, el caso más extremo, la extinción de la especie. Por lo tanto, el rendimiento en la natación de los peces y su capacidad para atravesar las barreras de velocidad, resultará fundamental para las interacciones depredador/presa, la reproducción, la migración, la distribución de poblaciones, la búsqueda de refugio y alimento, etc. (Tudorache *et al.*, 2007) y en definitiva para su supervivencia (Haro *et al.* 2004). Es decir, es un limitante para la evolución de los individuos y de las especies (Videler *et al.*, 1991).

Numerosos autores como Brett *et al.* (1958), Bainbridge (1958), Beamish (1978), Haro *et al.* 2004 y Castro-Santos, 2006, reconocen la importancia de la obtención de este tipo de información para mejorar los pasos ya existentes y el diseño de las futuras escalas de peces. Pese a la reconocida importancia de obtener estos valores, no abunda la bibliografía en la que se recojan datos relativos a la capacidad de natación de los peces. La situación del barbo ibérico y de la boga del Duero no es una excepción.

La capacidad de nado queda definida mediante tres aspectos:

- Velocidad de natación que puede desarrollar un individuo.
- Tiempo de fatiga en términos de resistencia.
- Distancia máxima que puede recorrer un individuo en dicho tiempo.

Para poder caracterizar la capacidad de nado de una especie, habrá que poder determinar los valores que toman estas tres variables que la definen, para lo cual existen diferentes métodos en función del objetivo perseguido. Así encontraremos tanto métodos que se basan en el nado voluntario como metodologías que fuerzan la natación.

Beamish (1978), Videler *et al.*, (1991) y Turnpenny *et al.*, (2001) en sus trabajos, realizaron una recopilación de los principales métodos existentes para la determinación de la capacidad de nado. Históricamente, existen cuatro grandes grupos, sobre los que se han ido adaptando e implementando las nuevas técnicas del avance tecnológico:



• **Respirómetro** (Túnel de agua): El prototipo está constituido por una tubería de sección circular, con una cámara de nado transparente que permite observar el experimento, por la que transitará agua recirculada a presión de un circuito cerrado (mediante bombas). La cámara, tanto aguas arriba como aguas abajo, presenta unas rejillas metálicas que evitan la fuga de los individuos y que generalmente están electrificadas para forzar el nado de los peces (Brett, 1964; Bernatchez *et al.*, 1985; Ojanguren *et al.*, 2003). Se basan en el consumo de oxígeno de los peces durante el ensayo siendo adecuadas para velocidades sprint. Estos sistemas son manejables gracias a su tamaño compacto y permiten un importante ahorro de agua (Turnpenny *et al.*, 2001), sin embargo sus dimensiones limitan el tamaño y el número de individuos a ensayar, presentan dificultad para crear regímenes de velocidades uniformes en toda la cámara de nado (Turnpenny *et al.*, 2001) y al ser un lugar cerrado, ruidoso y con régimen no laminar, los peces probablemente sufren estrés, lo que afecta a su capacidad de nado (Videler & Wardle, 1991). Además, numerosos autores han destacado las limitaciones a la hora de extrapolar las medidas en un túnel de nado a la realidad (Myrick & Cech, 2000; Standen, 2004; Peake, 2008). A estos inconvenientes hay que añadir que las medidas obtenidas no son bajo condiciones voluntarias.

• **Canal de nado**: un canal de nado está constituido por tres módulos comunicados, el primero un área de descanso aguas abajo en la que se ubicarán los individuos a la espera de realizar el ensayo, el segundo el propio canal de sección cuadrada o rectangular con la parte superior abierta (es decir, existe lámina de agua libre) y el tercero una cámara de carga, aguas arriba, que permitirá estabilizar y regular los flujos que circulen por el sistema. El agua fluirá recorriendo estos tres sectores impulsada por bombas, si la pendiente del canal es nula (Clough *et al.*, 2004; Haro *et al.*, 2004), mediante gravedad cuando el canal presenta una determinada inclinación (Colavecchia *et al.*, 1998), o por una diferencia de nivel de la lámina de agua aguas arriba y aguas abajo del canal. Se basan en monitorizar el movimiento voluntario de los individuos a lo largo del canal mediante cámaras o sistemas de localización. Los canales permiten obtener velocidades sostenidas y sprint. Los canales permiten la natación voluntaria de los individuos (Videler & Wardle, 1991), acercándose más a las condiciones naturales, el tamaño de los peces y de la muestra no es limitante, así como el acceso a la misma es más cómodo (Turnpenny *et al.*, 2001). Estos sistemas permiten experimentar con láminas de agua que no cubran por completo al pez (Turnpenny *et al.*, 2001). Frente a estas ventajas, presentan inconvenientes como la necesidad de unas instalaciones amplias dado su gran tamaño, que hace complicado conseguir una distribución uniforme de las velocidades (Haro *et al.*, 2004) así como velocidades elevadas en el flujo (Turnpenny *et al.*, 2001). Finalmente, Videler & Wardle, 1991, apuntan que al existir libertad en el pez para elegir la velocidad, es complicado obtener velocidades punta de nado.

• **Sistemas circulares y anulares** (*fish wheel*): consisten en un tanque anular lleno de agua, al que se le proporciona una velocidad de giro mediante un eje motriz unido al tanque. El funcionamiento de estos sistemas consiste en introducir a los individuos dentro del tanque y hacerlo girar mientras el pez, aunque permanece estacionario en relación al observador, está nadando a la velocidad impuesta. (Bainbridge, 1962; Turnpenny *et al.*, 2001). Es decir, se basan en el reflejo optomotor de los peces, que hace que tiendan a mantener su posición fija. Están recomendados para medir velocidades sostenidas. Las ruedas son sistemas de fácil construcción que permiten un fácil manejo de la muestra y tienen un carácter más natural que los



respirómetros pero menor que los canales (Turnpenny *et al.*, 2001). Además las fuerzas de rozamiento son menores que en los túneles y canales (Videler & Wardle, 1991). Sin embargo, en estos sistemas se generan distintas velocidades del agua en el interior y en el exterior de la rueda (Beamish, 1978; en Turnpenny *et al.*, 2001; Hammer, 1995), los peces están sujetos a la fuerza centrípeta (Weihs, 1981; en Turnpenny *et al.*, 2001) y sus dimensiones limitan el tamaño de la muestra.

- **Descargas musculares:** las descargas musculares se basan en la transferencia de impulsos eléctricos a un músculo, que los convertirá en impulsos mecánicos. Para su ejecución, es necesario sacrificar a los ejemplares objeto de estudio. Una vez muertos, se les extraen fibras de los músculos y se conectan a dos electrodos. El procedimiento de las descargas musculares consiste en aplicar impulsos eléctricos al músculo, de intensidad similar a los neuronales, para que éste responda moviéndose. En función de la celeridad con la que se produzca el movimiento de respuesta, el músculo se contraerá o se estirará un mayor o menor número de veces, y por lo tanto, la velocidad que podría alcanzar el individuo será más alta o más baja respectivamente. Se podrán interpretar los movimientos como segundos que ha durado dicha contracción. El sistema ha sido empleado y descrito con detalle por Wardle en 1975, Johnston en 1990 y Clough *et al.* en 2001, entre otros autores. Las ecuaciones de cálculo son muy sencillas, pero los resultados obtenidos son estrictamente teóricos y supone el sacrificio de los peces.

A continuación se muestra un resumen bibliográfico en el que se recogen los datos de relativos a la capacidad de nado de las dos especies objeto de estudio. Se recopilan fundamentalmente datos de velocidad de nado (tanto sostenida como sprint) en función del tamaño de los individuos y de la temperatura del agua ya que la información relativa a los tiempos de fatiga es escasa, mientras que en relación con la distancia máxima recorrida, no existe información alguna. En los casos en los que los autores especifican la metodología empleada para la obtención de los resultados, también se recoge.

Para la boga del Duero no existen estudios previos. En la tabla 1 se recoge un estudio con *Pseudochondrostoma polyleps*, la boga del tajo, a modo orientativo por ser una especie de características similares.

Tabla 1.- Capacidad de nado de la boga del Tajo según Romão (2012).

Boga (<i>Pseudochondrostoma polyleps</i>)							
Tamaño (cm)	Tª Agua (°C)	Velocidad (m/s)	Tipo Velocidad	Método	Tiempo fatiga (s)	Autor	Referencia
11,7-31,2	17,7	0,45-1,06	sprint	respirómetro	–	Romão, 2012	

En cuanto a la capacidad de nado del barbo, las referencias al *Luciobarbus bocagei* son escasas (ver tabla 2), si bien, existen estudios referentes a la especie centroeuropea *Barbus barbus* que se muestran (ver tabla 3) con el fin de poder establecer un rango orientativo.



Tabla 2.- Capacidad de nado del barbo del Duero según Mateus *et al.*(2008) y Alexander *et al.*(2013).

Barbos (<i>Luciobarbus bocagei</i>)							
Tamaño (cm)	Tª Agua (°C)	Velocidad (m/s)	Tipo Velocidad	Método	Tiempo fatiga (s)	Autor	Referencia
15,6-50,9	16-21	0,70-0,92	sprint	respirómetro	–	Mateus <i>et al.</i> , 2008	
22,03±0,17	16	0,75±0,05	sprint	respirómetro	–	Alexander <i>et al.</i> , 2013	
21,98±0,2	16	0,59±0,06					

Tabla 3.- Capacidad de nado del barbo centroeuropeo según diversos autores.

Barbos (<i>Barbus barbus</i>)							
Tamaño (cm)	Tª Agua (°C)	Velocidad (m/s)	Tipo Velocidad	Método	Tiempo fatiga (s)	Autor	Referencia
19-30	15-16	2,2-3,5	sprint	–	180	Wolter <i>et al.</i> , 2003	
<10	<10	1,75					
<10	10-15	1,80					
<10	>15	2,00					
10-15	<10	1,80					
10-15	10-15	2,40	sprint	respirómetro	–	Clough & Turnpenney, 2004	
10-15	>15	2,00					
>15	<10	2,10					
>15	10-15	2,20					
>15	>15	2,60					
5	<10	0,43	sostenida				
5	<10	1,41	sprint				
5	10-15	0,53	sostenida				
5	10-15	1,61	sprint				
5	>15	0,63	sostenida				
5	>15	1,75	sprint				
10	<10	0,49	sostenida				
10	<10	1,82	sprint				
10	10-15	0,59	sostenida	respirómetro	–	Turnpenney <i>et al.</i> , 2005	
10	10-15	2,02	sprint				
10	>15	0,69	sostenida				
10	>15	2,16	sprint				
20	<10	0,60	sostenida				
20	<10	2,23	sprint				
20	10-15	0,70	sostenida				
20	10-15	2,44	sprint				
20	>15	0,80	sostenida				
20	>15	2,57	sprint				
10	10	1,90					
15	10	2,10					
20	10	2,30	sprint	respirómetro	–	Servais, 2006	
10	15	2,10					
15	15	2,30					
20	15	2,50					



OBJETIVOS

Históricamente, el estudio de la capacidad de nado de los peces como herramienta para dar solución a los problemas provocados por la existencia de barreras de velocidad, no ha sido abordado con la dedicación y la importancia que merece, si bien, existen destacados trabajos pioneros como los de Denil en 1937, Bainbridge y Brett en 1964. Tras una época en la que apenas existieron estudios y publicaciones, en 1975 Wardle retomó la investigación, que posteriormente serviría de apoyo a Beach en 1984 para determinar sus conocidas curvas de nado, de amplio uso en la actualidad.

Los últimos quince años han sido más prolíficos en términos de publicaciones específicas, tales como Videler & Wardle en 1991, Peake *et al.* en 1997, Hinch *et al.* en 2000 Haro *et al.* en 2004, Castro-Santos en 2004, Romão en 2009, Silva *et al.* y Tudorache *et al.* en 2010, Puertas *et al.* en 2011 y Alexander *et al.* en 2013.

Pese a la existencia de estos trabajos y autores dedicados al estudio y conocimiento de la capacidad natatoria de los peces, ésta sigue siendo hoy en día, un aspecto poco estudiado, aunque en el ámbito científico se reconozca que su análisis resulta primordial para la supervivencia de muchas especies.

En este sentido, el presente estudio pretende continuar la línea de investigadora abierta centrándose en dos especies de ciprínidos ibéricos poco estudiados, el barbo común y la boga del Duero, para lo cual se han fijado como objetivos principales:

- Determinar la **distancia máxima** recorrida.
- Determinar el **tiempo de fatiga** en términos de resistencia.
- Determinar la **velocidad máxima** de natación.
- Analizar la **influencia de distintas variables** en la capacidad de nado: velocidad de flujo, longitud, peso y factor de forma de los individuos.

MATERIAL Y MÉTODOS

Canal de nado

Para la medición de la capacidad de natación voluntaria de los peces se ha construido un canal abierto en las instalaciones de la central hidroeléctrica de Vadocondes (Burgos, España) en el río Duero. El canal forma parte de la estructura de paso de la central junto con una escala de peces de hendiduras verticales. Está construido en obra con hormigón armado. El canal consta de tres módulos diferentes: cámara de carga, canal de nado y estanque de estabulación de los peces o también llamado de descanso (Figura 1).

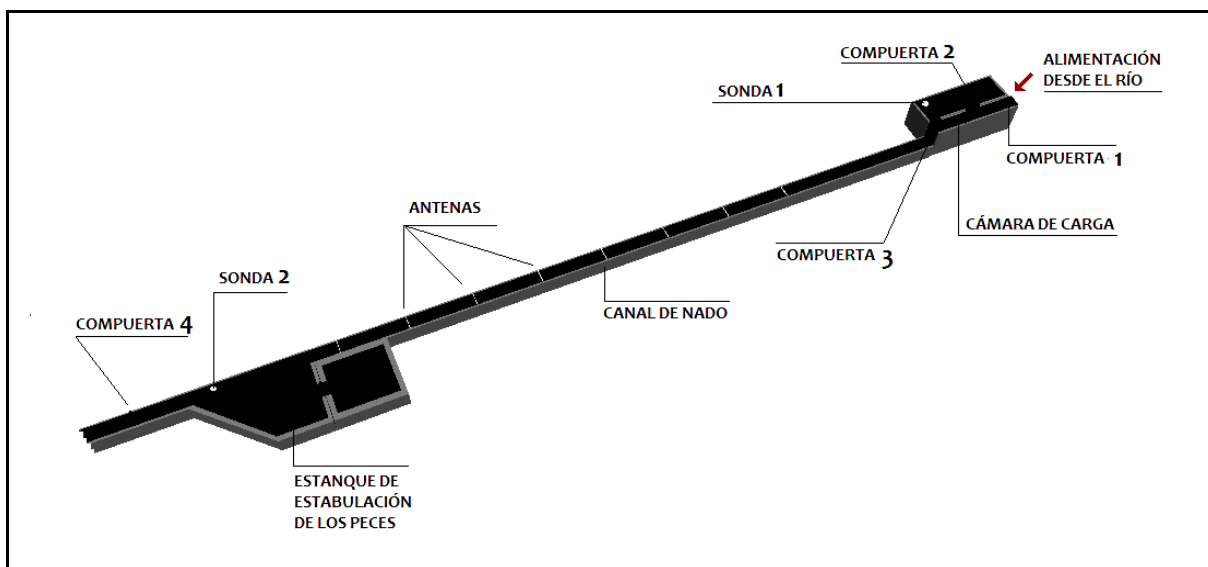


Figura 1.- Canal de natación en las instalaciones de Vadocondes formado por la cámara de carga, el canal de nado y el estanque de estabulación. Se muestra además la disposición de las compuertas y las sondas que permiten la calibración del mismo y la localización de las antenas PIT.

Por encima de la cámara de carga, se encuentra el área de captación - equipada con una barrera anti-flotantes - que recoge el agua directamente del río Duero y la almacena, pudiendo ser distribuida tanto a la escala como al canal.

La cámara de carga toma el agua del área de captación a través de dos compuertas regulables, una frontal (0,5 m de ancho x 0,6 m de alto) y otra lateral (0,4 m de ancho x 2,5 m de alto) que permiten estabilizar y regular el flujo que vaya a circular por el sistema.

El canal de nado propiamente dicho tiene una sección cuadrada de 0,5 m de ancho x 0,5 m de alto, una longitud de 25 m y pendiente nula. Las paredes y la solera que se ejecutaron lisas y rectas, están recubiertas con una pintura plástica blanca de alta resistencia que le permite mantener una distribución uniforme de las velocidades y evitar la formación de microturbulencias y remolinos. Para estabilizar el flujo y disipar energía, se han instalado dos rejillas de paso homogéneo en la parte alta del canal, cerca de la compuerta de alimentación.



El estanque de estabulación, también llamado área de descanso, está localizado aguas abajo del canal y tiene forma triangular en planta (2,0 m de ancho x 3,4 – 4,0 m de largo x 1,7 m de profundidad). Se encuentra descentrado con respecto al canal para permitir zonas de velocidades casi nulas que posibiliten descanso a los peces. Además, el lecho está naturalizado, con materiales propios del río (limos, arenas, gravas y elementos gruesos) y se añadieron algunas estructuras a modo de refugio. La descarga del agua, que regresa al río, se produce a través de una compuerta regulable en altura (0,5 m de ancho x 0,5 m de alto) que funciona como un vertedero de pared delgada y permite fijar la cota de la lámina de agua y establecer la profundidad necesaria para los experimentos. Por encima de la compuerta se colocó una malla que evitaba que los peces pudiesen escapar.

La profundidad y velocidad del flujo en el canal es regulada usando la combinación de la apertura de la compuerta que alimenta al canal (compuerta 3 en la figura 1), la profundidad del agua en la cámara de carga a través de las compuertas que la suministran (compuertas 1 y 2 en la figura 1) y la profundidad del agua en el estanque de estabulación regulada por la compuerta de descarga (compuerta 4 en figura 1).

En un canal abierto, el flujo se caracteriza como supercrítico o subcrítico a través del número de Froude (Fr):

$$(1) \quad Fr = \frac{U_f}{\sqrt{gL}}$$

donde U_f es la velocidad del flujo, g es la aceleración gravitacional ($9,81 \text{ m/s}^2$) y L es la longitud característica - en el caso que nos ocupa, la profundidad del flujo en un canal de sección transversal rectangular (Chow 1959) -. El número de Froude es la relación existente entre las fuerzas de inercia y las gravitacionales, de modo que valores de $Fr > 1$ indican que el flujo es impulsado principalmente por fuerzas inerciales y por lo tanto se considera como régimen supercrítico, mientras que valores de $Fr < 1$ señalan que son las fuerzas de la gravedad las que impulsan al flujo, considerándose régimen subcrítico.

El número de Froude es muy importante en este tipo de experimentación, ya que el canal está construido con pendiente cero, lo cual significa que en supercrítico, el flujo se fue convirtiendo progresivamente en menos profundo y en consecuencia más rápido y en subcrítico se fue haciendo más profundo y por lo tanto más lento. El paso de supercrítico a subcrítico se produce cuando $Fr = 1$ y lleva asociado la aparición del denominado resalto hidráulico, disminuyendo la velocidad y generándose turbulencias. Esta situación no es favorable para el desarrollo de los experimentos, por lo que es necesario seleccionar las condiciones para que el régimen sea supercrítico o subcrítico, evitando condiciones intermedias (Castro-Santos *et al.* 2013).

Para caracterizar el movimiento del flujo como laminar o turbulento se emplea el número adimensional de Reynolds (Re), que relaciona las fuerzas viscosas y las de inercia a través de la expresión:

$$(2) \quad Re = \frac{U_f \cdot d}{\nu}$$

donde U_f es la velocidad del flujo, d es una longitud característica - en canales abiertos es el cociente entre el área y el perímetro mojado de la sección transversal del mismo - y ν es la viscosidad cinemática del fluido. Según Chow (1959) en un canal abierto cuando $Re > 2500$ el flujo es turbulento y por debajo de ese valor, laminar.

La velocidad del flujo no es homogénea en una sección transversal del canal, produciéndose velocidades más bajas a medida que nos acercamos a las paredes y el suelo, siendo las mínimas en las esquinas (Chow 1959; Haro et al 2004; Castro-Santos, 2005) debido al rozamiento con el contorno.

Debido a esta circunstancia, las velocidades reales en cada experimento se midieron con un velocímetro de hélice (*Model 2100, Swoffer Instruments Inc., Seattle, Washington, EE.UU.*) dividiendo la sección en una cuadrícula de tres por seis (figura 2) a lo largo de las ocho antenas colocadas en el canal. Para controlar la velocidad del agua durante los experimentos, éstas se medían cada hora con el velocímetro y además se realizó un seguimiento continuo de la profundidad del flujo dentro del canal con un limnómetro (que era grabado con una cámara de video y visualizado a tiempo real en una pantalla) y con una sonda de profundidad (*Orpheus Mini, OTT Hydromet GmbH, Kempten, Germany*).

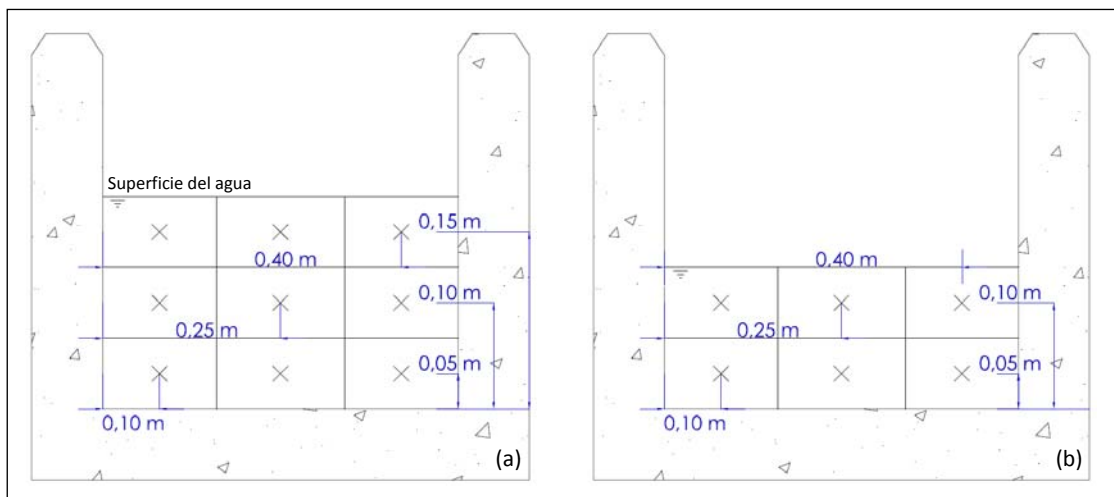


Figura 2.- Croquis de una sección transversal del canal con la cuadrícula teórica para la medición de las velocidades de 1,5 m/s y 2,5 m/s (a) y de 3,0 m/s (b).

Para comprobar la precisión de las velocidades medidas con el velocímetro de hélice, se realizan una serie de cálculos teóricos considerando como generadora del caudal la compuerta 3 (ver figura 1). Así, la diferencia de cota entre la lámina de agua en la cámara de carga y en el canal determinará la velocidad del flujo, que se estima usando la fórmula:



$$(3) \quad \bar{U}_f = \frac{Q}{b \cdot z}$$

donde \bar{U}_f es la velocidad media (m/s) que es igual al caudal de descarga Q (m³/s) dividido entre la sección tangencial al flujo, de ancho b (m) y profundidad z (m) en el punto medio del canal.

A su vez, el caudal Q depende de la diferencia de cargas y de la geometría del canal, y se estima a través de la fórmula de gasto de una compuerta propuesta por Chow en 1959¹:

$$(4) \quad Q = \frac{2}{3} \cdot C_c \cdot b \cdot L \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot y}$$

donde C_c es el coeficiente adimensional dependiente de la geometría de la estructura y de las propiedades aguas arriba y aguas abajo, b es el ancho de la compuerta (m), L es la apertura de la compuerta (m), g la aceleración de la gravedad (9,81 m/s²) e y se corresponde con la carga de vertido en la compuerta (m).

El coeficiente de gasto C_c describe la morfología del canal y la pérdida de carga asociada a cada estado del flujo según Froude, responde a la siguiente ecuación:

$$(5) \quad C_c = a + b \cdot c \cdot y^{-1}$$

donde a y b son los coeficientes estimados, c se refiere a la altura de la apertura de la compuerta (m) e y es la carga de vertido en la compuerta (m).

Cuando el régimen es supercrítico ($Fr > 1$) $a = 4,169$, $b = -28,762$ y $c = 0,25$ m. Para el régimen subcrítico ($Fr < 1$) $a = 1,0841$, $b = -2,6152$ y $c = 0,30$ m.

Entre las velocidades de las secciones transversales medidas directamente con el velocímetro de hélice y las obtenidas al aplicar las fórmulas 2, 3 y 4 no existen diferencias superiores al 5%, verificándose la precisión de las mismas y su aplicabilidad.

Muestra de peces

Los peces que componen la muestra fueron capturados durante los días 25 y 26 de junio de 2012. Mediante butrones y sacaderas, se capturaron individuos de las escalas de Guma y Vadocondes situadas en el río Duero en la Provincia de Burgos (España). Además se realizó pesca eléctrica en el propio río Duero en los tramos vadeables cercanos a dichas localidades.

Los peces fueron transportados en tanques de 100 l de capacidad equipados con un oxigenador a las instalaciones del canal de Vadocondes. La distancia máxima de la zona de captura a las instalaciones de canal no superó en ningún momento los 2 km, reduciéndose considerablemente el estrés de los peces.

¹ La fórmula de gasto de una compuerta (3) establecida por Chow en 1959 es una simplificación de la establecida ese mismo año por Chow $Q = \frac{2}{3} \cdot C_c \cdot b \cdot L \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot y + a \cdot \frac{V^2}{2g}}$, en la que el efecto del término altura de velocidad del flujo $a \cdot \frac{V^2}{2g}$ se puede incluir en el coeficiente de gasto.



Inmediatamente después del transporte, los peces fueron medidos (longitud furcal), pesados, sexados y equipados con los PIT-Tag (*half-duplex* de 23 mm de longitud, 3,65 mm de diámetro y 0,60 g de peso) en la cavidad intraperitoneal, previamente anestesiados con metanosulfonato de triclaína (MS-222).

Los individuos tuvieron más de 24 h para la recuperación de la cirugía, ya que los peces capturados el día 25 de mayo comenzaron los experimentos el día 27 y los capturados el día 26 los iniciaron el día 28 de mayo.

Una vez concluidos los experimentos, los peces fueron sacrificados tal y como marca la legislación vigente² mediante el procedimiento de concusión.

Ensayos

Se configuraron tres ensayos con velocidades nominales de 1,5 m/s, 2,5 m/s y 3 m/s. Cada ensayo se dividió en dos experimentos, el primero para el lote 1 y el segundo para el lote 2, con una duración aproximada de 22 h (salvo los experimentos 4 y 6 que tuvieron una duración menor debido a que las condiciones hidráulicas del río Duero se vieron modificadas y no fue posible mantener constantes las variables). Los experimentos se llevaron a cabo durante un periodo de 6 días y la secuencia de los experimentos se estableció con el objetivo de permitir una correcta aclimatación de los individuos y asegurar periodos de descanso de al menos 24 h entre dos consecutivos. En la tabla 4 se muestra una caracterización de los ensayos. Las velocidades en cada experimento se regularon para aproximarlas a las velocidades objetivo. Las velocidades reales se muestran en la tabla 6.

Tabla 3. Caracterización de los ensayos realizados los días 27, 28, 29, 30, 31 de mayo y el 1 de junio de 2012.

Caracterización Ensayos								
Ensayo	Experimento	Fecha	Lote	Duración (h)	Velocidad Nominal (m/s)	Profundidad (m)	Nº Froude	Régimen
1	1	27/05/2012	1	22	3,0	0,12	2,79	supercrítico
	2	28/05/2012	2	22	3,0	0,13	2,66	supercrítico
2	3	29/05/2012	1	22	1,5	0,38	0,78	subcrítico
	4	30/05/2012	2	9	1,5	0,38	0,77	subcrítico
3	5	31/05/2012	1	22	2,5	0,26	1,57	supercrítico
	6	01/06/2012	2	8	2,5	0,27	1,54	supercrítico

² DIRECTIVA 2010/63/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 22 de septiembre de 2010 relativa a la protección de los animales utilizados para fines científicos.

LEY 32/2007, de 7 de noviembre, para el cuidado de los animales, en su explotación, transporte, experimentación y sacrificio.

Real Decreto 53/2013, de 1 de febrero, por el que se establecen las normas básicas aplicables para la protección de los animales utilizados en experimentación y otros fines científicos, incluyendo la docencia.



Equipos

El movimiento de los peces en el canal fue controlado mediante un equipo de identificación por radiofrecuencia (*Radio Frequency IDentification – RFID –*) que es un sistema de almacenamiento y recuperación de datos remoto que se basa en el uso de etiquetas o *tags*. En nuestro caso el dispositivo automático es un *Passive Integrated Transponder (PIT – Low Frequency Half-Duplex Reader, Oregon RFID, Portland, Oregon, EE.UU.)* cuyas etiquetas (*Half-Duplex PIT-Tag, Oregon RFID, Portland, Oregon, EE.UU.*) de 23 mm de longitud y 3,65 mm de diámetro) son detectadas por 8 antenas colocadas cada 2 m comenzando a los 0,5 m del canal y acabando a los 14,5 m del mismo.

Cada antena se sintoniza para que detecte las etiquetas en un rango de 0,5 m aguas arriba y aguas abajo y se conectan, mediante un módulo de ajuste individual, a un lector configurado para leer dichas etiquetas. Los lectores registran el número de identificación del PIT, el número de antena y la hora de detección (se reconoce la hora de la primera detección y el tiempo de exposición del pez dentro del campo) con una precisión de 0,25 s y están equipados para permitir la descarga de estos datos a un ordenador personal a través de puertos USB.

Para la medición y comprobación de velocidades del agua dentro del canal de nado se utilizó un velocímetro de hélice (*Model 2100, Swoffer Instruments Inc., Seattle, Washington, EE.UU.*), cuyo funcionamiento se basa en que la hélice gira al reaccionar con el movimiento del agua, proporcionándonos la velocidad media de las máximas del flujo cada 6 segundos.

Para la comprobación de las profundidades de agua durante los experimentos en el canal y para la calibración del mismo se utilizaron dos sondas de nivel, la primera sonda (*Orpheus Thalimedes, OTT Hydromet GmbH, Kempten, Germany*) colocada de modo que proporciona el nivel del río antes de la compuerta 2 y la segunda sonda (*Orpheus Mini, OTT Hydromet GmbH, Kempten, Germany*) en el estanque de estabulación de los peces que proporciona el nivel del agua antes de la compuerta 4 (ver figura 1). El modelo Mini está basado en una sonda manométrica, mientras que el modelo Thalimedes funciona mediante un flotador, transformando el movimiento de éste en una rueda a una señal electrónica.

Procedimiento

Distancia máxima

Las antenas se encuentran localizadas a lo largo del canal con una equidistancia de 2 m, de manera que podemos ser capaces de estimar la distancia máxima de ascenso ($D_{m\acute{a}x}$) fijándonos en la antena más lejana en la que haya sido detectado cada pez durante el intento. Como el lector puede detectar la presencia de un pez tanto 0,5 m aguas arriba y aguas abajo de la localización física de la antena, dicho pez podría encontrarse hasta 1,5 m por encima de esa antena sin necesidad de entrar en el campo de detección de la siguiente. De manera que si determinamos escoger como $D_{m\acute{a}x}$ la distancia física a la que se encuentra la antena, estaremos obteniendo una medida incremental con un sesgo conservador de la estimación de la $D_{m\acute{a}x}$ (Haro *et al.*, 2004).

Para evitar este sesgo, proponemos aplicar un cálculo no conservador a la $D_{m\acute{a}x}$ de manera que se obtenga teniendo en consideraci3n el n3mero de lecturas existentes en la 3ltima antena. En este sentido nos enfrentamos a dos casos: el primero, en el que 3nicamente existe una lectura, donde la $D_{m\acute{a}x}$ coincidir3 con el m3todo conservador y ser3 la distancia f3sica a la antena y el segundo, en el que haya dos o m3s lecturas, en cuyo caso se considerar3 la $D_{m\acute{a}x}$ como resultado de aplicar el siguiente algoritmo:

$$(5) \quad D_{m\acute{a}x} = D_j + \left(\frac{[t_{2j} - (t_{1j} + t_j)] \cdot v_{ij}}{2} \right)$$

donde $D_{m\acute{a}x}$ es la distancia m3xima recorrida, D_j es la distancia a la antena j , t_{2j} es el tiempo de la segunda lectura en la antena j , t_{1j} es el tiempo de la primera lectura en la antena j , t_j es el tiempo de exposici3n del pez dentro del campo de la antena j y v_{ij} es la velocidad del pez entre las antenas consecutivas i y j .

En la figura 3 se muestra mediante esquemas la metodolog3a para calcular la $D_{m\acute{a}x}$ en ambos casos aplicando el m3todo no conservador.

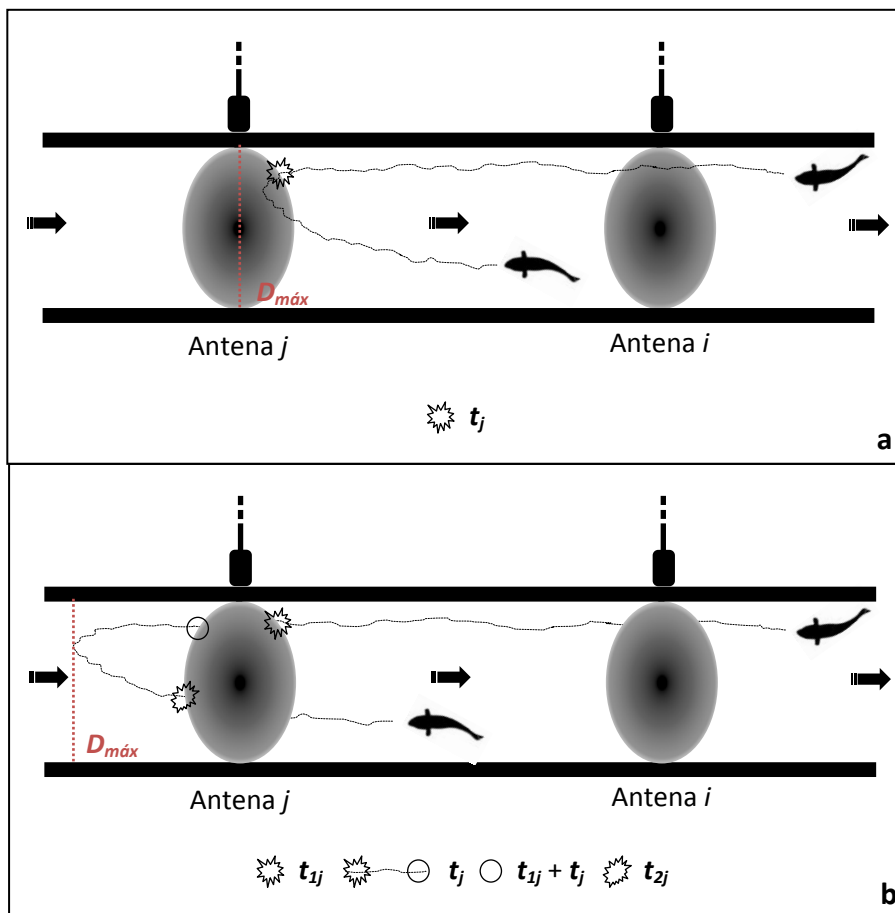


Figura 3.- Esquemas de determinaci3n de la distancia m3xima ($D_{m\acute{a}x}$) en los casos propuestos en la metodolog3a no conservadora. Cuando solo existe una lectura en la antena (a) y para el caso en el que hay dos o m3s lecturas (b). Se muestran los valores de los tiempos empleados en el algoritmo de c3lculo.

Además del sistema *PIT*, se emplearon cámaras de grabación (Sony 420TVL CCD 36 IR Leds Day & Night CCTV) colocadas cenitalmente sobre el canal, entre la antena 2 y la antena 4, con el objetivo de poder observar el comportamiento de los peces dentro del mismo. Así, se podrá establecer las zonas de nado y si aprovechan los lugares de menor velocidad como son los laterales del canal (Haro *et al* 2004; Castro-Santos 2005).

El campo de visión de las cámaras abarca un área de 0,8 m de largo x 0,5 m de ancho (la totalidad de la anchura del canal). Esta región fue dividida longitudinalmente en tres columnas principales de 16,7 cm de anchura denominadas derecha, centro e izquierda. A su vez, las columnas derecha e izquierda se subdividieron en dos columnas cada una de una anchura de 8 cm que permitiese discernir si el pez nadaba completamente pegado a la pared del canal o ligeramente separado pero evitando la zona central (figura 4).

En función de la columna por la que pasase el pez se le asigna un valor (0 para la columna central, 1 para las columnas derecha e izquierda colindantes con la central y 2 para las columnas derecha e izquierda contiguas a la pared) que permite fácilmente zonificar las preferencias de nado de los peces.

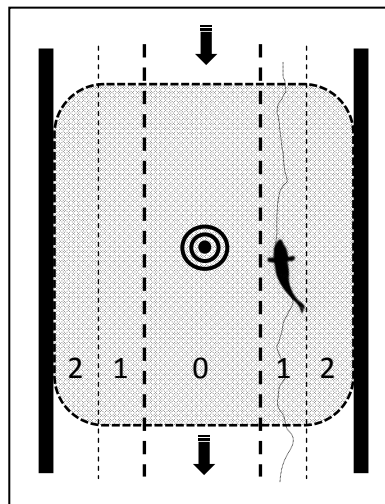


Figura 4.- Esquema del sistema de grabación en el que se muestra en sombreado el área de grabación de la cámara cenital (0,80 m x 0,5 m) y las columnas numeradas (0,1 y 2) en las que se divide para poder zonificar la natación de los peces dentro del canal.

Tiempo de fatiga

El tiempo de fatiga (T_f) es aquel que transcurre desde que el pez comienza el intento hasta el instante en el que decide abandonar la ascensión y comienza, por tanto, el descenso. Está relacionado con la distancia recorrida, siendo el tiempo empleado en recorrer la distancia máxima. Así, para su determinación se contempla la misma casuística que en el caso de la distancia, en función del número de lecturas que existiesen en la última antena. Al aplicar el método de cálculo no conservador, cuando existe una única lectura en la antena, se considerará ese tiempo como T_f mientras que cuando haya dos o más lecturas, para calcular el T_f se aplicará el algoritmo que se recoge a continuación:

$$(6) T_f = t_{1j} + t_j \left(\frac{t_{2j} - (t_{1j} + t_j)}{2} \right)$$

donde T_f es el tiempo de fatiga, t_{1j} es el tiempo de la primera lectura en la antena j , t_j es el tiempo de dentro del campo de la antena j y t_{2j} es el tiempo de la segunda lectura en la antena j .

En la figura 5 se muestra mediante esquemas la metodología para calcular el T_f en ambos casos aplicando el método no conservador.

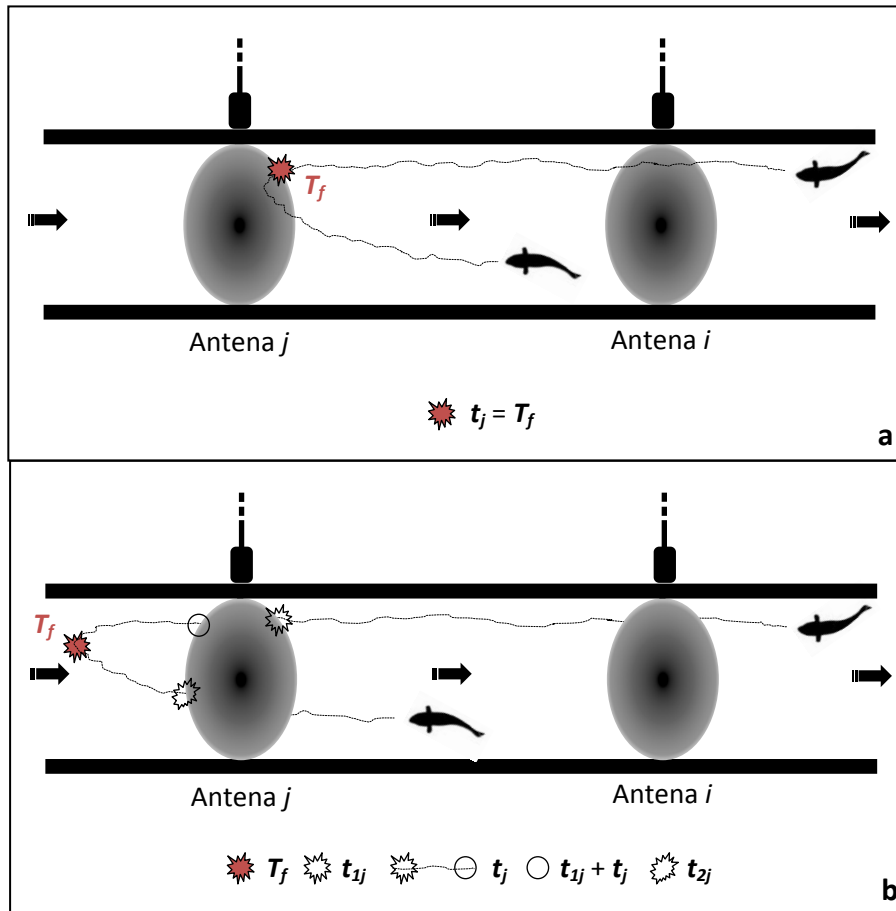


Figura 5.- Esquemas de determinación del tiempo de fatiga(T_f) en los casos propuestos en la metodología no conservadora. Cuando solo existe una lectura en la antena (a) y para el caso en el que hay dos o más lecturas (b). Se muestran los valores de los tiempos empleados en el algoritmo de cálculo.

Velocidad de nado

La velocidad absoluta de nado se calcula en base a la velocidad relativa, el tiempo de fatiga y la velocidad del flujo al que se enfrentan los individuos mediante la expresión:

$$(7) U_{abs} = \left(\frac{D_{m\acute{a}x}}{T_f} \right) + U_f$$

donde U_{abs} es la velocidad de nado absoluta, $D_{m\acute{a}x}$ es la distancia máxima recorrida, T_f es el tiempo de fatiga y U_f es la velocidad del flujo que circula por el canal.



Análisis estadístico

Distancia máxima

Algunos valores de $D_{m\acute{a}x}$ pueden no reflejar la verdadera capacidad máxima de nado de los peces, sino el máximo que el sistema de detección puede medir – de manera que el rendimiento en la $D_{m\acute{a}x}$ puede haber sido mayor – teniendo que considerar estos datos como censurados (este caso se producirá cuando un pez alcance la distancia de 14,5 m, pues aguas arriba no hay más antenas de detección y no tenemos garantías de que el individuo haya podido seguir ascendiendo por el canal – con una longitud total de 25 m –).

Por lo tanto, para adaptarse a la censura se aplican métodos de regresión basados en la estimación de la máxima verosimilitud (Lee, 1992) que son utilizados en el análisis de supervivencia, y permiten desarrollar modelos predictivos. (Allison, 1995; Hosmer y Lemeshow, 1999; Castro-Santos y Haro, 2003).

Se va a analizar la $D_{m\acute{a}x}$ mediante el análisis de supervivencia aplicando la metodología no paramétrica en la que los efectos de las covariables pueden ser expresados como un modelo lineal, por ejemplo mediante el *Accelerated Failure Time model* (AFT), que asume que estos efectos son el resultado de multiplicar el evento predicho por una constante. Así, el modelo AFT usado aquí sigue la forma:

$$(7) \quad (\ln D_{m\acute{a}x})_p = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon_p$$

donde la distancia ($D_{m\acute{a}x}$) es una variable aleatoria dependiente de las variables X_1, \dots, X_k y $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ son los coeficientes. ε_p determina la forma de la distribución del error y por lo tanto generaliza las estimaciones de los cuantiles (p) de la distancia. Una ventaja de este enfoque de regresión es que no requiere que el término de error se distribuya normalmente. Por esta razón, se puede adoptar una estructura más compleja que la de la regresión ordinaria de mínimos cuadrados, con escala (σ) y forma (δ) como parámetros que influyen en el valor de ε_p (Haro *et al.*, 2004).

De manera que los efectos multiplicativos de la variable, a los que hacíamos mención con anterioridad, pueden expresarse para un cuantil dado de la distancia como el incremento del $100(1 - e^{\delta})$ por ciento por unidad de incremento de la variable, o lo que es lo mismo, que varía con un factor de (e^{δ}) .

En nuestro caso se determinó qué distribución describía mejor los datos incluyendo en el primer ajuste las variables: longitud furcal, peso, factor de forma y velocidad de flujo. Posteriormente se generaron diferentes modelos aislados: exponencial, logístico, log-logístico, normal, log-normal y Weibull. A continuación se clasificaron usando el criterio de información de Akaike (AIC) y se seleccionó aquel con el mejor ajuste - aquél con mayor verosimilitud - (Allison, 1995). Finalmente se refina el modelo seleccionado quitando las covariables en un proceso escalonado, manteniendo exclusivamente aquellas que son significativas, es decir que presentan p-valores menores de 0,05.



Una advertencia a considerar en la aplicación de estos datos es que no se incluyeron todos los peces en los análisis, sólo aquellos que realizaron intentos en las primeras 8 h para homogeneizar la duración de los experimentos. Además sólo se consideraron los cinco primeros intentos en el caso de los barbos y los tres primeros en las bogas (los límites se establecieron en base a que el número de observaciones para cada número de intento permitiese unos grados de libertad asumibles a la hora de ejecutar los análisis comparativos mediante la diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher) con un doble objetivo, eliminar posibles efectos positivos sobre la distancia causados por el aprendizaje, o al contrario, evitar efectos negativos sobre los resultados de la distancia por motivos de fatiga fisiológica.

Tiempo de fatiga

Para el estudio del T_f se va a llevar a cabo un análisis de supervivencia análogo al efectuado en la distancia máxima. En este caso el modelo AFT empleado toma la forma:

$$(8) \quad (\ln T_f)_{\rho} = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon_{\rho}$$

donde el tiempo (T_f) es una variable aleatoria dependiente de las variables X_1, \dots, X_k y $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ son los coeficientes. ε_{ρ} determina la forma de la distribución del error y por lo tanto generaliza las estimaciones de los cuantiles (ρ) de la distancia.

Con el modelo paramétrico, los efectos multiplicativos de las variables, pueden expresarse para un cuantil dado del tiempo de fatiga como el incremento del $100(1 - e^{\beta})$ por ciento por unidad de incremento de la variable, o lo que es lo mismo, que varía con un factor de (e^{β}) .

Se tomaron como variables de estudio la longitud furcal, el peso, el factor de forma y la velocidad de flujo. Posteriormente se generaron diferentes modelos aislados: exponencial, logístico, log-logístico, normal, log-normal y Weibull. De todos ellos se seleccionó aquel mejor ajuste en base al criterio de Akaike (AIC) de mayor verosimilitud y finalmente se refina el modelo seleccionado quitando las covariables en un proceso escalonado, manteniendo exclusivamente aquellas que son significativas, es decir que presentan p-valores menores de 0,05.

La advertencia realizada en el análisis de la distancia relativa a la muestra de peces y al número de intentos es aplicable al estudio del tiempo de fatiga.

Velocidad de nado

La velocidad de nado, al ser el resultado directo de las dos variables anteriores, no requiere de un análisis estadístico tan profundo.

De manera que sobre la velocidad se va a llevar a cabo una estadística descriptiva sencilla a través de diagramas *box-plot* basados en los cuartiles y que suministran información sobre los valores mínimo y máximo, los cuartiles Q_1 , Q_2 o mediana y Q_3 , y sobre la existencia de valores atípicos y la simetría de la distribución (figura 6).

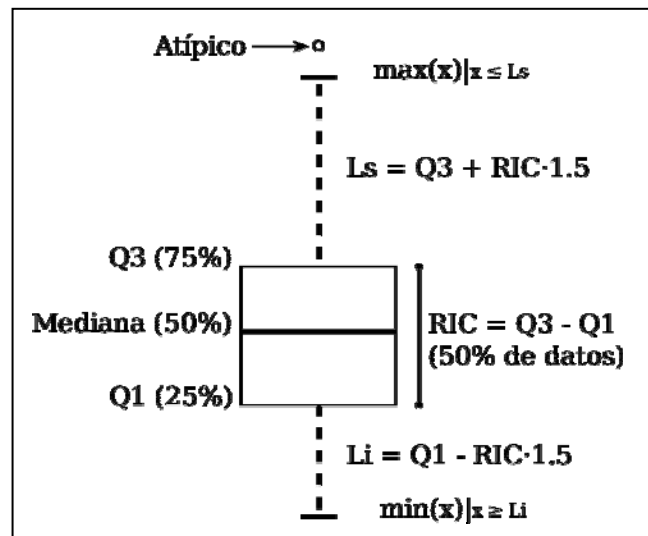


Figura 6.- Diagrama de cajas (*Box-Plot*) con los valores representativos para su interpretación.

En un *Box-Plot* el Q_1 es el primer cuartil y supone el 25% de los datos, el Q_2 es el segundo cuartil o mediana y supone el 50% de los datos y el Q_3 es el tercer cuartil y representa el 75% de los datos. El RIC es el rango intercuantílico ($Q_3 - Q_1$).

Los bigotes y las líneas que se extienden desde la caja se calculan los límites inferior y superior (L_i y L_s respectivamente) e identifican los valores atípicos. Todos los valores que se encuentren fuera del intervalo (L_i y L_s) se marcan como atípicos.



RESULTADOS Y DISCUSIÓN

RESULTADOS

Muestra de peces

Se obtuvieron un total de 52 individuos de barbo - *Luciobarbus bocagei* - y 28 de boga - *Pseudochondrostoma duriense* - para los experimentos. Ambas especies comparten hábitat y su periodo reproductor se prolonga a lo largo de la primavera. Mientras que el barbo tiende a realizar la puesta entre mayo y junio, la boga suele ser el primer ciprínido en reproducirse en los ríos donde vive (Doadrio *et al.*, 2011). Esta circunstancia justifica la escasa presencia de individuos de boga en la zona y por lo tanto la dificultad de capturar ejemplares para la experimentación.

Mientras que los tamaños se encontraban en rangos entre 110 y 540 mm para los barbos y entre 140 y 218 mm en las bogas, los pesos entre 21 y 2450 g en el caso de los barbos y entre 32 y 146 g en las bogas. La Media \pm SD en las longitudes furcales y en el peso son 177 ± 66 mm y $135,6 \pm 341,5$ g en los barbos y en las bogas 173 ± 22 mm y $61,9 \pm 26,9$ g. En la tabla 4 se recoge una descripción de las variables biométricas por especie y por ensayo de los individuos que realizaron intentos de la muestra. En ambas especies hay una mezcla de individuos maduros e inmaduros, que en los barbos supone un 42% y un 58% y en las bogas un 25% y un 75% respectivamente.

Tabla 4. Características biométricas de las especies y las condiciones hidráulicas de los distintos ensayos realizados en el canal de natación.

Características Biométricas					Características Hidráulicas				
Especie	N	%	Longitud Furcal (mm)	Peso (g)	Factor Forma	Velocidad Nominal (m/s)	Velocidad medida (m/s)	Profundidad (m)	Temperatura (°C)
Barbo	27	52	176 ± 25	$85,9 \pm 40,5$	$1,49 \pm 0,18$	3,0	$2,95 \pm 0,25$	0,13	18,0
			(142 - 240)	(47,0 - 221,0)	(1,23 - 2,08)				
	26	62	181 ± 27	$96,1 \pm 45,5$	$1,53 \pm 0,20$	2,5	$2,53 \pm 0,22$	0,26	19,5
(142 - 240)			(47,0 - 221,0)	(1,27 - 2,08)	(18,0 - 21,0)				
34	67		178 ± 26	$90,5 \pm 42,2$		$1,53 \pm 0,19$	1,5	$1,51 \pm 0,20$	0,38
			(140 - 240)	(47,0 - 221,0)	(1,23 - 2,08)	(17,0 - 20,0)			
Boga	11	39	176 ± 22	$61,5 \pm 22,1$	$1,09 \pm 0,06$		3,0	$2,95 \pm 0,25$	0,13
			(142 - 228)	(32,0 - 108,0)	(0,99 - 1,20)	(17,0 - 19,0)			
	13	52		180 ± 20	$67,4 \pm 23,3$		$1,12 \pm 0,09$	1,5	$1,51 \pm 0,20$
(140 - 213)				(33,0 - 108,0)	(0,99 - 1,34)	(17,0 - 20,0)			

Nota: El tamaño de la muestra (N) se presenta como número total de peces que entran en el canal de flujo, seguido por el porcentaje que representa sobre el número total de peces introducidos en el área de descanso. Las longitudes furcales, los pesos, el factor forma y las velocidades medidas se dan como Media \pm SD.

La figura 7 muestra las relaciones biométricas calculadas con DIMP 1.0[®] (GEA-Ecohidráulica).

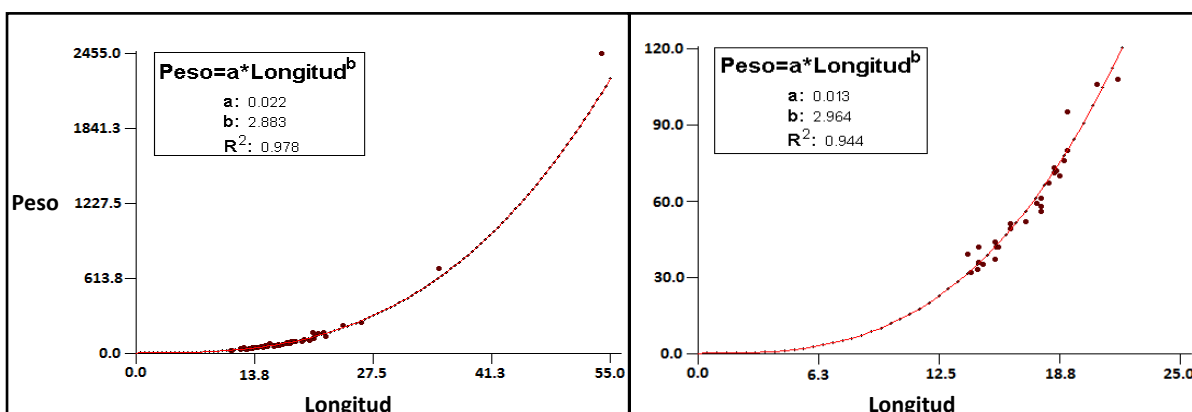


Figura 7.- Distribuciones de longitud (cm) y peso (g) para el barbo (a) y la boga (b) calculadas mediante el software para el cálculo de parámetros poblacionales de ictiofauna continental DIMP 1.0[®] GEA-Ecohidráulica.

Capacidad de nado

Distancia máxima

Debido a la pérdida de individuos de boga, el experimento con la velocidad de flujo de 2,5 m/s no se tiene en cuenta en el análisis, ya que el porcentaje de bogas que pudieron realizarlo no se considera que sea significativo. Para las otras dos condiciones de flujo (1,5 y 3,0 m/s) en la boga, así como para las tres (1,5, 2,5 y 3,0 m/s) en el barbo, los porcentajes de individuos que realizaron intentos quedan recogidos en la tabla 4.

El incremento de la velocidad del flujo en el canal reduce la $D_{máx}$ para ambas especies (β negativo, tabla 5). Los coeficientes nos están indicando el efecto relativo de la variable sobre la distancia de ascenso, es decir, por cada unidad de aumento de la velocidad de flujo, la distancia variará en un $100 \times [1 - \exp^{(\beta)}]$ por ciento. Así, aunque las dos especies mostraron el efecto negativo esperado para la velocidad de flujo en la $D_{máx}$ el grado de este efecto es mayor en las bogas con un 61% frente a un 27% de los barbos.

Los valores de la longitud furcal para ambas especies se muestran en la tabla 4. Para los barbos se ha experimentado con un rango de tamaños de 100 mm (la muestra no incluyó los individuos más grandes – mayores de 250 mm – presentes en la población adulta reproductora, pues el número de individuos no era representativo), mientras que en las bogas el rango de tamaños fue de 88 mm. El efecto relativo de la longitud furcal sobre $D_{máx}$ es positivo, de manera que a mayor longitud mayor distancia de ascenso presentarán los individuos. El grado del efecto de la longitud es mayor en las bogas, alcanzando un 42%, sin embargo en los barbos es bastante más reducido, tomando un valor del 12%.

Los coeficientes indican que el efecto de la variable peso sobre la $D_{máx}$ es negativo, pero con una influencia relativamente pequeña. Así, los barbos, con un rango de pesos en la muestra de 174 g, verán reducida su distancia en un 1% por cada unidad de peso, mientras que en las bogas, con un rango de 76 g, la distancia será un 3% menor. Los valores de los pesos se recogen en la tabla 5.



En cuanto a la inclusión del factor de forma en los modelos de regresión (tabla 5) los resultados indicaron que no tuvo ningún efecto significativo sobre la $D_{máx}$ para ninguna de las dos especies ($P > 0,58$ en los barbos y $P > 0,42$ en las bogas).

Las distribuciones que mejor describen los datos de la capacidad de nado relativos a la distancia de ascenso difieren entre ambas especies (tabla 5). La distribución Log-Normal proporciona el mejor ajuste para los datos de los barbos y la distribución Weibull describe mejor a las bogas. La evaluación de las gráficas de probabilidad (STATGRAPHICS Centurion XV StatPoint, Inc. 2007) sugieren que estos modelos proporcionan un ajuste razonable a los datos.

Al emplear los modelos de regresión (tabla 5) identificamos los factores que influyen en la distancia de ascenso cuantificando sus efectos, pero esta técnica de análisis permite predecir las proporciones de una población capaces de superar una distancia determinada. Para ello, se ajustan los valores de las variables que han resultado significativas a unos niveles representativos de la muestra (en nuestro caso la media) y se estima la función de supervivencia en función del modelo ajustado (figura 7).

Para Weibull: (9) $S(D) = e^{-\omega \left(\frac{D-\mu}{\sigma}\right)^\alpha}$ y para Log-Normal: (10) $S(D) = 1 - \Phi\left(\frac{\omega - \mu}{\sigma}\right)$

donde la función de supervivencia $S(D)$ es la proporción de peces que alcanzan con éxito una distancia determinada D , $\omega = \ln(D)$, $\mu = X\beta$ el producto vectorial de las variables por sus coeficientes, σ es el parámetro escala y $\Phi(a)$ es la función Fi de Euler:

(11) $\Phi(a) = \int_{-\infty}^a \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-D^2} dD$

Tabla 5. Modelos de regresión de los efectos de las variables en la distancia máxima recorrida ($\ln(D_{máx})$).

Modelos de regresión paramétrica							
Especie	*	Variables					
		Constante	Velocidad medida (m/s)	Longitud Furcal (mm)	Peso (g)	Factor Forma	Escala (σ)
Barbo	(316, 21, -670, Lognormal)						
	β	0,686	-0,316	0,114	-0,006	—	0,539
	SE	0,462	0,053	0,035	0,002	—	0,023
	$P > \chi^2$		0,000	0,001	0,005	> 0,05	
Boga	(55, 7, -97, Weibull)						
	β	-0,480	-0,947	0,352	-0,030	—	0,338
	SE	1,457	0,078	0,124	0,013	—	0,041
	$P > \chi^2$		0,000	0,004	0,017	> 0,05	

*Los números entre paréntesis representan el total N , los censurados de N , verosimilitud y distribución respectivamente.

La figura 8 muestra la representación gráfica de los modelos predictivos de la distancia máxima para el barbo y la boga.

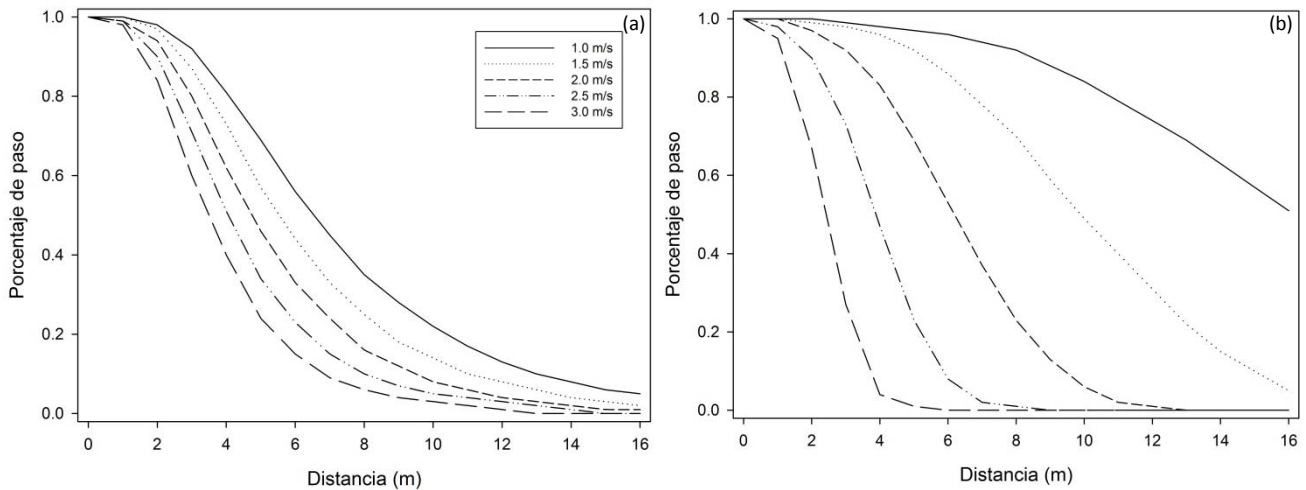


Figura 8.- Predicciones de los modelos para el porcentaje de paso de la distancia de ascenso del barbo (a) y la boga (b). Las diferentes curvas muestran la función de supervivencia ($S(D)$) para velocidades del flujo de 1,0 m/s, 1,5 m/s, 2,0 m/s, 2,5 m/s y 3,0 m/s manteniendo el resto de variables en sus valores medios. Los datos de 1,0 m/s están extrapolados, mientras que los de 2,0 m/s interpolados.

Tiempo de fatiga

El experimento con la velocidad de flujo de 2,5 m/s no se tiene en cuenta en el análisis, ya que el porcentaje de bogas que pudieron realizarlo no se considera que sea significativo. El resto de condiciones sí que se analizaron para ambas especies.

El T_f se ve reducido al incrementar de la velocidad del flujo en el canal para ambas especies (β negativo, tabla 6). Los coeficientes indican el efecto relativo de la variable sobre el tiempo de fatiga, es decir, por cada unidad de aumento de la velocidad de flujo, el tiempo de fatiga variará en un $100 \times [1 - \exp^{(\beta)}]$ por ciento. Ambas especies mostraron el efecto negativo esperado para la velocidad de flujo en el T_f el grado de este efecto es mayor en los barbos con un 61% frente a un 47% de las bogas.

No existe efecto relativo de la longitud furcal sobre T_f en los modelos de regresión para ninguna de las dos especies ($P > 0,05$).

El factor peso no es significativo sobre el T_f en el caso de las bogas ($P > 0,05$). Para los barbos sí que aparece como significativo, de manera que al incrementar el peso de los individuos el T_f es menor, pero el efecto es prácticamente inapreciable ya que no alcanza ni el 1%.

El efecto relativo del factor de forma sobre T_f es negativo, de manera que a mayor forma menor tiempo de fatiga presentarán los individuos. El grado del efecto de la forma es muy similar en ambas especies, con un 45% en los barbos y un 48% en las bogas.



Para ambas especies la distribución que mejor describe los datos de la capacidad de nado relativos al tiempo de fatiga es la Log-Logística (tabla 6). La evaluación de las gráficas de probabilidad (STATGRAPHICS Centurion XV StatPoint, Inc. 2007) sugieren que estos modelos proporcionan un ajuste razonable a los datos.

En el caso del tiempo de fatiga, con identificar los factores que le influyen es suficiente, no siendo necesario predecir las proporciones de una población capaces de alcanzar un tiempo de fatiga determinado. Esto se debe a que a la hora de diseñar los pasos para peces, emplearemos como condicionante la distancia máxima de ascenso, y el tiempo de fatiga será una consecuencia de ese diseño. Por lo tanto, no se estimarán las funciones de supervivencia $S(T)$ en función del modelo ajustado.

Tabla 6. Modelos de regresión de los efectos de las variables en la distancia máxima recorrida ($\ln(T_i)$).

Modelos de regresión paramétrica							
Especie	*	Variables					
		Constante	Velocidad medida (m/s)	Longitud Furcal (mm)	Peso (g)	Factor Forma	Escala (σ)
Barbo	(316, 0, -899, Log-logística)						
β		4,806	-0,947	—	0,002	-0,597	0,331
SE		0,302	0,061	—	0,001	0,176	0,016
$P > \chi^2$			0,000	> 0,05	0,015	0,008	
Boga	(55, 0, -152, Log-logística)						
β		9,075	-1,254	—	—	-3,980	0,323
SE		1,386	0,122	—	—	1,184	0,037
$P > \chi^2$			0,000	> 0,05	> 0,05	0,002	

*Los números entre paréntesis representan el total N , los censurados de N , verosimilitud y distribución respectivamente.

Velocidad de nado

Al igual que en el caso de la distancia y del tiempo de fatiga para las bogas no se consideró el experimento con la velocidad de flujo de 2,5 m/s ya que el porcentaje de bogas que pudieron realizarlo no se considera que sea significativo. El resto de condiciones sí que se analizaron para ambas especies.

En la figura 9 se muestran los valores de la velocidad absoluta de nado para el barbo y la boga presentadas en función del ensayo al que hacen referencia. Podemos observar que existen diferencias significativas entre la distancia máxima alcanzada por los barbos y la alcanzada por las bogas, siendo ésta mayor para los barbos en régimen supercrítico, y mayor para las bogas en caso de régimen subcrítico.

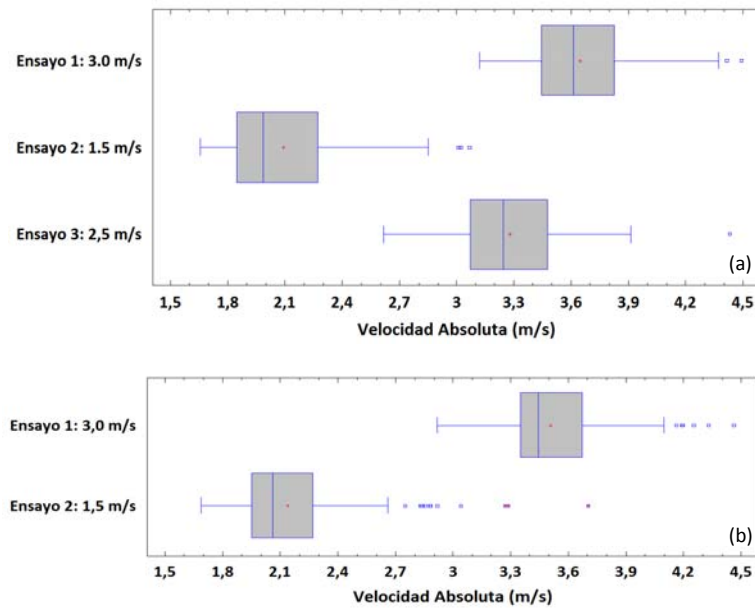


Figura 9.- Diagramas *Box-Plot* de las velocidades absolutas de nado (m/s) para barbos (a) y bogas (b) en función de los ensayos realizados.

DISCUSIÓN

Distancia máxima y tiempo de fatiga

Se ha observado que, tanto para una especie como para otra, existen diferencias significativas entre la distancia máxima alcanzada en función a la velocidad de flujo a la que se enfrenten. Por tanto, la distancia máxima recorrida tanto por la boga como por el barbo depende de la velocidad de flujo a la que se enfrentan, de manera que se alcanzan distancias mayores cuanto menor es la velocidad de flujo. Además, existen diferencias significativas entre la distancia máxima alcanzada por los barbos y la alcanzada por las bogas, siendo ésta mayor para los barbos en régimen supercrítico, y mayor para las bogas en caso de régimen subcrítico.

Estos resultados son idénticos para el análisis del tiempo de fatiga, lo cual tiene sentido, puesto que el tiempo de fatiga es aquél en el que se alcanza la distancia máxima.

Si medimos las velocidades en cuerpos por segundo, en cambio, aparecen velocidades mayores para los ejemplares más pequeños, ya que esta forma de expresar la velocidad favorece a los peces de longitudes menores (Tudorache *et al.*, 2007). En el caso de Mateus *et al.*, 2008, en el que estudia a *Barbus barbus* y *Pseudochondrostoma polylepis*, afirma, al contrario de lo que ocurre en el presente estudio, que el tamaño es la variable que más influencia causa en la capacidad de nado, y que, como ya se ha afirmado, ésta aumenta al aumentar la longitud si la expresan en m/s, pero decrece al hacerlo en BL/s. Y es que, en cuanto al barbo, cabe destacar que la media de la distancia máxima alcanzada y del tiempo de fatiga es mayor para los ejemplares menores, tanto para la velocidad prolongada como sprint. Este hecho no coincide con lo afirmado por autores como Mateus *et al.*, 2008, y también Clough & Turnpenny, 2004, que afirman que la resistencia aumenta con la longitud del pez, especialmente para especies como *Barbus barbus*.



Por otro lado, la baja correlación mostrada entre el tiempo de fatiga y la velocidad de nado relativa puede deberse al amplio rango de tiempos de fatiga mostrados que oscilan desde 1,33 hasta 99,94 s.

Velocidad de nado

Para las velocidades absolutas de nado alcanzadas cabe destacar que existen diferencias significativas entre especies para la velocidad de flujo supercrítica, en la que las bogas desarrollan una mayor velocidad media que los barbos. En cuanto al régimen subcrítico no hay diferencias significativas. Este hecho puede deberse a que las bogas poseen un cuerpo más hidrodinámico que los barbos; si nos atenemos al factor de forma medio por especies para los ejemplares de estudio, vemos que las bogas son más esbeltas, con un factor de forma de $1,14 \text{ g/cm}^3$, mientras que el de los barbos asciende a $1,56 \text{ g/cm}^3$ (P-valor = 0,00).

Además, se observa que cuanto mayor es la velocidad del flujo de agua, mayor es la velocidad desarrollada por el pez para ambas especies, lo que sugiere que pueden adaptar la velocidad de nado que desarrollan en función de la velocidad a la que se enfrenten, como cabía esperar en un primer momento.

Por último se han comparado los valores de velocidad obtenidos con la bibliografía, y se han obtenido velocidades punta mayores para *Luciobarbus bocagei* que las revisadas en la bibliografía para ciprínidos en general y *Barbus barbus* en particular, tanto para ejemplares de gran tamaño (mayores de 20 cm, velocidad punta media 3,22 m/s) como para pequeños (menores de 20 cm, velocidad punta media de 3,20 m/s). Estas velocidades se alejan en casi 1 m/s a las predicciones generales citadas por los algunos autores.

Cabe destacar que la mayor parte de las velocidades de la tabla han sido obtenidas mediante túneles de nado o respirómetros, con condiciones de nado forzadas. Algunos autores como Mateus *et al.*, 2008, creen que la velocidad obtenida mediante respirómetros puede estar subestimada debido a las dimensiones del mismo. Otras razones a las que pueden deberse estas diferencias entre las velocidades obtenidas y las citadas pueden ser las condiciones de estrés que se generan en los peces al utilizar respirómetros (Videler *et al.*, 1991; Turnpenny *et al.*, 2001) y que las condiciones de temperatura del agua durante los ensayos eran superiores a los encontrados en la bibliografía, ya que durante el día se alcanzaron temperaturas de 21°C, aumentando la capacidad de nado de los peces (Clough & Turnpenny, 2004; O'steen *et al.*, 2003).

En el caso de la boga del Duero, *Pseudochondrostoma duriense*, la diferencia con la única referencia encontrada a la capacidad de nado de bogas, en Romão, 2012, para *P. polylepis*, es aún mayor. Aunque cabe destacar que en la tabla se hace referencia a la velocidad crítica (velocidad teórica intermedia entre la velocidad prolongada y de sprint), las velocidades de sprint registradas para *P. duriense* han sido mucho mayores, 3,63 m/s de media para ejemplares de gran tamaño y 3,52 m/s para ejemplares de pequeño tamaño, e incluso las velocidades prolongadas (2,13 m/s y 2,05 m/s de media) también superan el valor obtenido por Romão, 2012. Se ha observado además que las bogas han mostrado unas velocidades de nado, tanto prolongadas como de sprint, mayores que el barbo, al igual que ocurre en el caso de Romão, 2012 con *Luciobarbus bocagei* y *P. polylepis*, aunque en su caso se trata de la velocidad crítica.



CONCLUSIONES

1.- Tanto en los barbos como en las bogas, la distancia máxima recorrida depende de la velocidad del flujo al que se enfrentan, y de la longitud y el peso de los individuos, pero no del factor de forma de los mimos.

En este sentido, a mayor velocidad del flujo, menor distancia recorrerán los peces con un efecto del 61% sobre las bogas y de un 27% en los barbos. Cuanto mayor sea la longitud furcal de los ejemplares, mayores distancias alcanzarán afectando en un 42% a las bogas y en un 12% a los barbos. Finalmente, la distancia recorrida será menor a mayor peso, con una influencia muy baja (1% en bogas y 3% en barbos).

2.- El tiempo de fatiga, en ambas especies, depende de la velocidad del flujo y del factor de forma, pero no directamente ni de la longitud furcal ni del peso.

A mayor velocidad del flujo, el tiempo de fatiga será menor con un efecto del 61% sobre los barbos y de un 47% en las bogas. El efecto del factor de forma sobre el tiempo de fatiga es similar en barbos y bogas (45% y 48% respectivamente) de manera que al incrementarse el primero, el segundo se verá disminuido.

3.- Se han obtenido velocidades punta mayores para *Luciobarbus bocagei* que las revisadas en la bibliografía para el género *Barbus sp.* Las condiciones y las metodologías de los ensayos realizados no son las mismas, aunque, la interpretación y el uso de las velocidades máximas sí lo sean.

4.- Este es el primer estudio realizado sobre la capacidad de nado de la boga del Duero, *Pseudochondrostoma duriense*, por lo que no existen datos comparables a los obtenidos y se cree preciso plantear la necesidad de llevar a cabo un mayor número de estudios sobre ambas especies, homogenizando las condiciones de los ensayos.

5.- La medición de la capacidad de nado en peces usando canales de nado con diferentes velocidades y natación voluntaria, es el método que ofrece resultados más fiables para analizar las barreras de velocidad y aplicar los resultados en el diseño de pasos para peces.



BIBLIOGRAFÍA

- ALEXANDER, C.M; QUINTELLA, B.R; FERREIRA, A.F; ROMÃO, F.A; ALMEIDA, P.R. 2013.** Swimming performance and ecomorphology of the Iberian barbel *Luciobarbus bocagei* (Steindachner, 1864) on permanent and temporary rivers. *Ecology of Freshwater Fish*.
- ALLISON, P. D. 1995.** *Survival Analysis Using the SAS System: A Practical Guide*. Cary, NC: SAS Institute.
- BAINBRIDGE, R. AND BROWN, R.H.J. 1958.** An apparatus for the study of the locomotion of fish. *J. exp. Biol* 35, 134-7.
- BAINBRIDGE, R. 1962.** Training, speed and stamina in trout. *The Journal of Experimental Biology*, 39: 537-555.
- BEACH, M.H. 1984.** Fish pass design criteria for the design and approval of fish passes and other structures to facilitate the passage of migratory fish in rivers. MAFF Fisheries Technical Report, 78.
- BERNATCHEZ, L. & DODSON, J.J. 1985.** Influence of temperature and current speed on the swimming capacity of Lake Whitefish (*Coregonus clupeaformis*) and Cisco (*C. artedii*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 42: 1522-1529.
- BEAMISH, F.W.H. 1978.** Swimming capacity. *Fish Physiology*, Vol. 7. Academic Press Inc, New York, pp 101-187.
- BRETT, J. R., M. HOLLANDS, AND D.F. ALDERDICE 1958.** The effect of temperature on the cruising speed of young sockeye and coho salmon. *J. Fish. Res. Bd. Can.* 32: 485-491.
- BRETT, J.R. 1964.** The respiratory metabolism and swimming performance of young sockeye salmon. *Journal of the Fisheries and Aquatic Sciences*, 21: 1183-1226.
- CASTRO SANTOS, T; HARO, A; WALK, S. 1996.** A passive integrated transponder (PIT) tag system for monitoring fishways. *Fisheries Research*, 28: 253-261.
- CASTRO SANTOS, T. 2004.** Optimal swim speeds for traversing velocity barriers: an analysis of volitional high-speed swimming behaviour of migratory fishes. *The Journal of Experimental Biology*, 208: 421-432.
- CASTRO-SANTOS, T. 2005.** Optimal swim speeds for traversing velocity barriers: an analysis of volitional high-speed swimming behavior of migratory fishes. *J. Exp. Biol.* **208**: 421–432. doi: 10.1242/jeb.01380.
- CASTRO-SANTOS, T. 2006.** Modeling the effect of varying swim speeds on fish passage through velocity barriers. *Trans. Am. Fish. Soc.*, **135**: 1230-1237.



CASTRO SANTOS, T; SANZ RONDA, F. J; RUIZ LEGAZPI, J. 2013. Breaking the speed limit: comparative sprinting performance of brook trout (*Salvelinus fontinalis*) and brown trout (*Salmo trutta*). Article in press. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 70: 280-293.

CHOW, V.T. 1959. Open channel hydraulics. Mc Graw Hill. New York. 680 p.

CLAY, C.H. 1995. Design of Fishways and other Fish Facilities. Second Edition. CRC Press, Inc., Boca Raton. 248 p.

CLOUGH, S.C; LEE-ELLIOT, I.E; TURNPENNY, A.W.H; HOLDEN, S.D.J; HINKS, C. 2004. Swimming speeds in fish: phase 2. Technical Report W2-049/TR1. Environment Agency, Bristol

COLAVECCHIA, M; KATOPODIS, C; GOOSNEY, R; SCRUTON, D.A; MCKINLEY, R.S. 1998. Measurement of burst swimming performance in wild Atlantic Salmon (*Salmo salar*, L.) using digital telemetry. Regulated rivers: Research & Management, 14: 41-51.

DENIL, G. 1937. La mécanique du poisson de rivière. Chap. X. Les capacités mécaniques de la truite et du saumon. Ann. Trav. 38(3):411-433, Belgium.

DOADRIO, I. (editor). 2011. Atlas y libro rojo de los peces continentales de España. CSIC, Ministerio de medio ambiente. (Madrid).

DOADRIO, I; ELVIRA, B. & BERNAT, Y. 1991. Ictiofauna continental española. Inventario y clasificación de zonas fluviales. Colección técnica. ICONA.

HAMMER, C. 1995. Fatigue and exercise test with fish. Comparative Biochemistry and Physiology, Vol.112A, 1: 1-20.

HARO, A., ODEH, M., NOREIKA, J., CASTRO-SANTOS, T. 1998. Effect of water acceleration on downstream migratory behaviour and passage of Atlantic salmon smolts and juvenile American shad at surface bypasses. Trans. Am. Fish. Soc., 127: 118-127.

HARO, A; CASTRO-SANTOS, T; NOREIKA, J & ODEH, M. 2004. Swimming performance of upstream migrant fishes in open-channel flow: a new approach to predicting passage through velocity barriers. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 61: 1590-1601.

HOSMER, D.W. Y LEMESHOW, S. 1999. Applied survival analysis. John Wiley and Sons, Inc., N.York.

LEE, E.T. 1992. Statistical methods for survival data analysis. John Wiley & Sons, New York.

LUCAS, M.C. & FREAR, P.A. 1997. Effects of a flow-gauging weir on the migratory behaviour of adult barbel, a riverine cyprinid. Journal of Fish Biology, 50: 382–396.

MATEUS, C. S; QUINTELLA, B. R; ALMEIDA, P. R. 2008. The critical swimming speed of Iberian barbel *Barbus bocagei* in relation to size and sex. Journal of Fish Biology, 73: 1783–1789

MYRICK, C. A. & CECH, J. J. 2000. Swimming performances of four California stream fishes: temperature effects. Environmental Biology of Fishes, 58: 289-295.



- OJANGUREN, A.F. & BRAÑA, F. 2003.** Effects of size and morphology on swimming performance in juvenile brown trout (*Salmo trutta*, L.). *Ecology of Freshwater Fish*, 12: 241-246.
- O'STEEN, S; BENNETT, A. F. 2003.** Thermal acclimation effects differ between voluntary, maximum, and critical swimming velocities in two cyprinid fishes. *Physiological and Biochemical Zoology*, 76(4):484–496.
- PEAKE, S.J. 2008.** Gait transition speed as an alternate measure of maximum aerobic capacity in fishes. *Journal of Fish Biology*, 72: 645-655.
- PEAKE, SJ; MCKINLEY, R. S; SCRUTON, D.A. 1997.** Swimming performance of various freshwater Newfoundland salmonids relative to habitat selection and fishway design. *Journal of Fish Biology*, 51: 710-723.
- PUERTAS, J; CEA, L; BERMÚDEZ, M; PENA, L; RODRÍGUEZ, A; RABUÑAL; J. R; BALAIRÓN, L; LARA, A; ARAMBURU, E. 2011.** Computer application for the analysis and design of vertical slot fishways in accordance with the requirements of the target species. *Ecological Engineering*. Article in press; doi:10.1016/j.ecoleng.2011.05.009
- ROMÃO, F. A. 2009.** Determinação das velocidades críticas de natação da boga-comum (*Pseudochondrostoma polylepis* Steindachner, 1865) e do escalo do Norte (*Squalius carolitertii* Doadrio, 1988). Mestrado em gestão e conservação dos recursos naturais, Universidade de Évora & Instituto Superior de Agronomia. Universidade Técnica de Lisboa.
- ROMÃO, F; QUINTELLA, B. R; PEREIRA, T. J; ALMEIDA, P. R. 2012.** Swimming performance of two Iberian cyprinids: the Tagus nase *Pseudochondrostoma polylepis* (Steindachner, 1864) and the bordallo *Squalius carolitertii* (Doadrio, 1988). *J. Appl. Ichthyology*, 28: 26–30.
- SANTOS, J .M; SILVA, A; KATOPODIS, C; PINHEIRO, P; PINHEIRO, A, BOCHECHAS F; FERREIRA, M. T. 2010.** Ecohydraulics of pool-type fishways: Getting past barriers. *Ecological Engineering*, 48: 38-50.
- SERVAIS, S. 2006.** Physical modeling of low-cost modifications to the Crump weir in order to improve fish passage: Development of favourable swimming conditions and investigation of the hydrometric effect. Engineering Systems Department. PhD Thesis Craneld University, Shrivenham.
- STANDEN, E.M; HINCH, S.G. & RAND, P.S. 2004.** Influence of river speed on path selection by migrating adult sockeye salmon. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* , 61: 905-912.
- TUDORACHE, C; VIAENE, P; BLUST, R; VERECKEN, H. & BOECK, G. 2007.** A comparison of swimming capacity and energy use in seven European freshwater fish species. *Ecology of Freshwater*, 17.
- TUDORACHE, C; O'KEEFE, R. A; BENFEY, T.J. 2010.** The effect of temperature and ammonia exposure on swimming performance of brook charr (*Salvelinus fontinalis*). *Comparative Biochemistry and Physiology, Part A*, 156: 523–528.
- TURNPENNY, A.W.H; BLAY, S.R; CARRON, J.J. & CLOUGH, S.C. 2001.** Literature Review Swimming Speeds in fish. Technical Report W2-026/TR2. Environment Agency, Bristol.



VIDELER, J.J. & WARDLE, C.S. 1991. Fish swimming stride by stride: speed limits and endurance. *Fish Biology and Fisheries*, 1: 23-40.

WARDLE, C. S. 1975. Limit of fish swimming speed. *Nature*, 255: 725 -727.

WEBB, P.W. 1978 a. Temperature effects on acceleration of rainbow trout *Salmo gairdneri*. *J. Fish. Res. Bd Can.*, 35: 1417-1422.

WEBB, P.W. 1978 b. Fast-start performance and body form in seven species of teleost fish. *J. exp. Biol.*, 74: 211-226.

WOLTER, C; ARLINGHAUS, R. 2003. Navigation impacts on freshwater fish assemblages: the ecological relevance of swimming performance. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 13: 63-89.

