

**Capacidad de nado de ciprínidos  
potamódromos ibéricos.  
Experimentación en el canal de nado de Vadocondes**

**Swimming capacity of iberian potamodromous cyprinids.  
Experimentation in Vadocondes flume**

Ruiz-Legazpi, J.<sup>1\*</sup>; Sanz-Ronda, F.J.<sup>1</sup>; Bravo-Córdoba, F.J.<sup>1</sup>; Fuentes-Pérez, J.F.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ETSIIA, Universidad de Valladolid, UD de Hidráulica e Hidrología, Avda. de Madrid, 57, 34004 Palencia, España.

<sup>2</sup>Centre for Biorobotics, Tallinn University of Technology, Akadeemia tee 15A-111, 12618 Tallinn, Estonia.

Autor para correspondencia: [jorge.ruiz.legazpi@iaf.uva.es](mailto:jorge.ruiz.legazpi@iaf.uva.es)

---

## Resumen

El grado de alteración antropogénica en los ecosistemas fluviales es elevado, debido, fundamentalmente, a la creación de barreras transversales (presas, azudes, estaciones de aforo, caños de drenaje, etc.), que alteran su conectividad longitudinal, causando, entre otros impactos, la fragmentación del hábitat. Esta problemática afecta a los peces migradores, pues puede suponer un bloqueo o retraso en sus movimientos, reduciendo sus hábitats, amenazando la viabilidad y abundancia de sus poblaciones, llegando incluso a su extinción. La capacidad de nado de los peces (velocidad de nado, tiempo de fatiga y distancia recorrida) es uno de los factores que determina su supervivencia. Un sistema que permite establecerla en condiciones naturales son los canales de nado voluntario. En el canal de nado de Vadocondes (Burgos) se ha determinado la capacidad de nado y cómo influyen en ella factores ambientales y biométricos, de dos de las principales especies de ciprínidos potamódromos de la Península Ibérica (barbo ibérico *Luciobarbus bocagei*– y boga del Duero *Pseudochondrostoma duriense*–, con el objetivo de poder desarrollar unas directrices técnicas y científicas adecuadas, que garanticen un diseño óptimo y eficaz de los pasos para peces, que repercuta positivamente en la conservación de sus poblaciones.

**Palabras clave:** Capacidad natación, ciprínidos ibéricos, velocidad de nado, pasos para peces.

## Abstract

The anthropogenic alteration in fluvial ecosystems is high, mainly due to the creation of transverse barriers (dams, weirs, gauging stations, drainage pipes, etc.), which modify their longitudinal connectivity, causing, among other impacts, the fragmentation of the habitat. This problem affects the migrating fish, because it can suppose a blockade or delay in their movements, reducing their habitats, threatening the viability and abundance of their populations, even reaching their extinction. The swimming capacity of the fish (swimming speed, fatigue time and distance traveled) is one of the factors that determine their survival. A system that allows to establish it, in natural conditions, are the voluntary open channel flume. In the flume of Vadocondes (Burgos) the swimming capacity has been determined, and how environmental and biometric factors influence in the swimming capacity, of two of the main species of cyprinids potamodromous of the Iberian Peninsula (Iberian barbel *Luciobarbus bocagei*– and northern straight-mouth nase *Pseudochondrostoma duriense*–, with the aim of being able to develop adequate technical and scientific guidelines, which guarantee an optimal and effective design of the fishways, which has a positive impact on the conservation of their populations.

**Keywords:** Swimming capacity, Iberian cyprinids, Swimming speed, Fishways.

---

## 1. Introducción

Para el aprovechamiento de los cursos de agua, el hombre, ha creado estructuras que afectan a su continuidad longitudinal al fragmentar el hábitat (Cooke *et al.*, 2012b). Muchas de estas estructuras son barreras infranqueables (e.g. grandes presas) y otras, a pesar de ser franqueables, exigen un esfuerzo de natación (e.g. azudes, estaciones de aforo, caños de drenaje, algunos pasos piscícolas) que puede llevar a los peces al límite de sus capacidades fisiológicas (Haro *et al.*, 2004). Esta circunstancia puede bloquear o retrasar los movimientos migratorios de la ictiofauna y, en consecuencia, reducir sus hábitats y amenazar la viabilidad de sus poblaciones, llegando incluso a su extinción (Morita & Yamamoto, 2002).

El factor crucial que permite a los peces superar las barreras es la capacidad de natación, que está condicionada por parámetros ambientales (temperatura del agua –afecta al metabolismo– y la velocidad del flujo –determina el modo de nado–) y biológicos (tamaño y masa de los peces –influyen en la potencia y en la resistencia al movimiento–) (Wardle, 1975).

El método más común utilizado para cuantificar la capacidad de natación es el propuesto por Brett (1964). Consiste en establecer, mediante el uso de respirómetros en condiciones forzadas de nado (Peake, 2008a), la velocidad crítica de nado (Ucrit), que es una estimación de la velocidad máxima que un pez puede mantener durante un intervalo de tiempo dado (Beamish, 1978). Este método ha recibido críticas, pues subestima la capacidad de natación real de los peces en libertad (Castro-Santos *et al.*, 2013).

Frente a esta metodología, un sistema que permite determinar la capacidad de natación de los peces en condiciones más naturales son los canales de nado. Se basan en la natación voluntaria, principalmente contra velocidades de flujo elevadas, que facilitan a los peces desarrollar sus capacidades máximas, al permitir la natación en modo sprint (Castro-Santos, 2005).

En la Península Ibérica, los ciprínidos potamódromos endémicos dominan la ictiofauna nativa. Entre ellos, las especies más comunes son las de los géneros *Luciobarbus* (barbos ibéricos) y *Pseudochondrostoma* (bogas), que ocupan hábitats similares y sus movimientos migratorios reproductores se solapan en el tiempo (Dodrío *et al.*, 2011). Si bien, actualmente la información sobre el rendimiento de nado de las especies de estos géneros está en aumento (Mateus *et al.*, 2008; Romão *et al.*, 2012; Alexandre *et al.*, 2014, etc.), es necesario determinar una capacidad de natación que se aproxime más a la que realmente son capaces de desarrollar los individuos. Esta nueva información puede ser útil para establecer directrices técnicas y científicas adecuadas en el diseño de pasos para peces, que apoyen los esfuerzos de conservación de sus poblaciones.

Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es determinar la capacidad de natación voluntaria del barbo ibérico (*Luciobarbus bocagei* Steindachner 1864) y de la boga del Duero (*Pseudochondrostoma duriense* Coelho 1985) y cómo influyen en ella factores ambientales (temperatura del agua y velocidad del flujo) y biométricos (longitud y masa).

## 2. Material y métodos

### 2.1. Canal de nado

El estudio se llevó a cabo en un canal de nado ubicado en las instalaciones de la central hidroeléctrica de Vadocondes (Burgos), en el río Duero. Está construido en obra con hormigón armado, tiene pendiente cero y consta de tres módulos (Figura 1): cámara de carga, canal de nado y área de descanso. Un sistema de compuertas regula el caudal circulante, fijando la velocidad y profundidad del flujo.

### 2.2. Instrumentación

El canal posibilita cuantificar la capacidad de natación definiéndola en base a tres métricas:

1. Distancia máxima que es capaz de recorrer un individuo.
2. Tiempo de fatiga que tarda en recorrer dicha distancia.
3. Velocidad de nado (absoluta-relativa) que puede desarrollar al recorrerla. Para determinarlas se empleó un doble sistema: telemetría y videocámaras.

El sistema de telemetría está basado en transmisores electromagnéticos conocidos como *PIT* (*Passive Integrated Transponder*) y consta de un conjunto de ocho antenas equidistantes 2 m y 2 lectores sincronizados. El sistema de videocámaras consiste en cuatro cámaras cenitales entre las antenas 2 y 4, con un área de grabación individual de 0,8 x 0,2 m.

La distancia máxima recorrida ( $D_{\max}$ ) se estima como:

1. Donde 0,5 es la distancia (m) entre el inicio del canal y la antena 1;  $D_j$  es la distancia (m) entre la última antena donde se detectó el pez (antena  $j$ ) y la antena 1; y  $D_{j+}$  es la distancia (m) recorrida más allá de la última antena observada (antena  $j$ ). El tiempo de fatiga ( $T_f$ ) puede estimarse mediante la expresión:
2.  $T_f = T_{0,5} + T_j + T_{j+}$  donde  $T_{0,5}$  se refiere al tiempo (s) empleado en ascender los primeros 0,5 m del canal,  $T_j$  es el tiempo (s) necesario para recorrer la distancia  $D_j$ , y  $T_{j+}$  es el tiempo (s) de ascenso por encima de la última antena (antena  $j$ ). A partir de las ecuaciones 1 y 2 se define la velocidad de nado relativa ( $U_g$ ) y absoluta ( $U_s$ ) como:

3.  $U_g = \frac{D_{\max}}{T_f}$  ;  $U_s = U_g + U_f$  donde  $U_f$  es la velocidad de flujo (m/s), definida

como la velocidad media contra la cual nada cada pez (Sanz-Ronda *et al.*, 2015).

### 2.3. Muestra de peces

Se capturaron en el río Duero, mediante pesca eléctrica, en dos momentos (25-26 de mayo de 2012 y 5-6 de mayo de 2013 -ambos dentro del periodo habitual de freza en esta región (Doadrio *et al.*, 2011)-), un total de 63 ejemplares de barbo ibérico y 102 de boga del Duero, cuyas características biométricas medias son: longitud furcal ( $L_F$ )  $16,8 \pm 2,9$  cm y  $18,7 \pm 2,2$  cm, masa (M)  $77,0 \pm 41,6$  g y  $78,7 \pm 26,8$  g respectivamente.

Los ejemplares fueron transportados en tanques oxigenados de 100 L. Para obtener sus dimensiones e implantarles quirúrgicamente en la cavidad intraperitoneal la marca de telemetría *PIT*, fueron anestesiados con una solución de 25 mg/L de MS-222. Tras la toma de medidas y el marcaje, se recuperaron y aclimataron durante más de 48 h, sin que se produjese mortalidad ni se detectasen comportamientos erráticos.

### 2.4. Ensayos

El estudio está constituido por 2 ensayos (del 27/05/2012 al 01/06/2012 –época central de migración con una temperatura del agua de  $18,5^\circ\text{C}$ – y del 07/05/2013 al 09/05/2013 –época inicial de la migración con una temperatura del agua de  $13,5^\circ\text{C}$ –), cada uno dividido en 3 experimentos (velocidades de flujo de 1,5 m/s, 2,5 m/s y 3,0 m/s), en los que la muestra se dividió en 2 lotes de peces. Cada experimento duraba 4 h con un descanso de 12 h entre ellos.

### 2.5. Análisis de datos

La metodología empleada para analizar los datos se denomina análisis de supervivencia. Incluye técnicas que permiten trabajar con datos que no presentan una distribución normal, con datos incompletos mediante la herramienta censura y con variables dependientes del tiempo. El análisis de supervivencia permite desarrollar modelos predictivos para la distancia máxima recorrida ( $D_{\max}$ ), el tiempo de fatiga ( $T_f$ ) y la velocidad de nado ( $U_s$ ) (Haro *et al.*, 2004; Castro-Santos, 2005). Se incluyeron como covariables ambientales la temperatura del agua ( $T_a$ ;  $^\circ\text{C}$ ) y la velocidad de flujo ( $U_f$ ; m/s) y como covariables biométricas, la longitud furcal ( $L_F$ ; cm) y la masa (M; g). Así, los modelos siguen la forma:

$$4. \ln(Y) = \beta_0 + \beta_k \cdot X_k \text{ donde } Y \text{ son las variables dependientes } (D_{\max}, T_f \text{ y } U_s), \beta \text{ son coeficientes de regresión y } X \text{ son las } k\text{-covariables } (L_F, M, U_f \text{ y } T_a).$$

Los modelos se ajustaron utilizando PROC LIFEREG (SAS® University-Edition), caracterizados porque los efectos de las covariables son multiplicativos, de manera que, para un aumento de la covariable como factor aislado en 1 unidad (o el paso de un nivel a otro en el caso de covariables binarias), la variable de estudio se verá modificada en una cantidad igual a  $\exp(\beta)$ . Mediante el criterio de infor-

mación de Akaike (AIC) se comprueba que el mejor modelo obtenido tiene el menor valor de AIC, entre todos los modelos generados (Akaike, 1998).

Información más detallada de la aplicación de los métodos de análisis de supervivencia para la determinación de la capacidad de natación de los peces puede encontrarse en Sanz-Ronda *et al.* (2015) y Ruiz-Legazpi *et al.* (2018).

### 3. Resultados y discusión

#### 3.1. Distancia máxima

De las covariables biométricas, tanto para el barbo ibérico como para la boga del Duero,  $L_F$  afectó significativamente a  $D_{max}$ , con un efecto positivo, es decir, a mayor tamaño del pez, mayor distancia será capaz de recorrer – 11% para el barbo ( $e^{0,104} - 1 = 0,11$ ) y 10% para la boga ( $e^{0,097} - 1 = 0,10$ ) por cada cm –. Sin embargo,  $M$ , solamente tiene influencia para la boga del Duero, con un efecto negativo, esto es, a mayor peso, menor distancia recorrerá un individuo – ( $e^{-0,002} - 1 = -0,2\%$ ) por cada g – (*Figura 2a*). En cuanto a las covariables ambientales, tanto  $U_f$  como  $T_a$  inciden en  $D_{max}$ . Mientras que  $U_f$  tiene un efecto negativo, de manera que según aumenta su valor, los individuos ascenderán menores distancias – un -64% ( $(e^{-1,022} - 1) \cdot 100$ ) para el barbo y un -66% ( $(e^{-1,078} - 1) \cdot 100$ ) para la boga por cada m/s –. Por su parte, la temperatura del agua presenta un efecto positivo, es decir, cuando  $T_a$  baja de 18,5°C a 13,5°C, la distancia ascendida por un ejemplar de barbo se reduce un 33% ( $(e^{-0,393} - 1) \cdot 100$ ) y por uno de boga un 19% ( $(e^{-0,211} - 1) \cdot 100$ ) – (*Figura 2b*).

A partir del modelo de regresión, se puede predecir qué proporción de una población con una  $L_F$  media determinada será capaz de superar una distancia concreta de acuerdo con  $U_f$  a la que se enfrentan y a  $T_a$ . Por ejemplo, para una  $U_f$  de 2,5 m/s, poblaciones de barbo ibérico ( $L_F$  media = 16,8 cm) y de boga del Duero ( $L_F$  media = 18,7 cm), serían capaces de recorrer una distancia de 6 m y 4 m respectivamente con una  $T_a$  de 18,5°C y de 4,5 m y 3,5 m con  $T_a$  de 13,5°C (*Figura 3a* y *Figura 3b*).

#### 3.2. Relación tiempo de fatiga – velocidad de nado

La  $T_a$  influyó de forma positiva tanto en  $T_f$  como en  $U_s$ . Así, un descenso de 5°C, desde 18,5°C a 13,5°C, supone una reducción del 53% ( $(e^{-0,745} - 1) \cdot 100$ ) y del 49% ( $(e^{-0,686} - 1) \cdot 100$ ) del  $T_f$  del barbo y de la boga respectivamente, y una disminución de  $U_s$  del 10% ( $(e^{-0,109} - 1) \cdot 100$ ) en el caso del barbo y del 14% ( $(e^{-0,162} - 1) \cdot 100$ ) en el de la boga.

Se observó, que para ambas  $T_a$ , se produce un cambio evidente en el modo de nado (prolongado –velocidad que puede mantener un pez durante 20 s a 200 min– vs sprint –velocidad que puede desarrollar un pez durante menos de 20 s–) a  $U_s$  cercanas a 15 cuerpos por segundo (BL/s) para el barbo (*Figura 4a*) y a 16 BL/s para la boga (*Figura 4b*).

Dentro del rango de valores estudiado, el barbo ibérico y la boga del Duero pudieron mantener  $U_s$  en sprint ( $>15$  BL/s y  $>16$  BL/s) durante 3-10 s y 2-8 s respectivamente. Mientras que en el modo de natación prolongada (7- 15/16 BL/s), son capaces de desarrollar  $U_s$  de 17-117 s los barbos y de 6-195 s las bogas.

#### 4. Conclusiones

- 1) La longitud furcal de los individuos, la temperatura del agua y la velocidad del flujo al que se enfrentan son los principales factores que afectan a la capacidad de natación del barbo ibérico y de la boga del Duero. Los dos primeros de manera positiva, mientras que el tercero de manera negativa.
- 2) El barbo ibérico y la boga del Duero, dos de las principales especies de ciprínidos potamódromos que cohabitan en la Península Ibérica, presentan una capacidad de natación muy similar.
- 3) Los resultados obtenidos muestran unos valores de capacidad de natación para ambas especies muy superiores a los citados con anterioridad en la bibliografía científica.
- 4) La aplicación directa de la información aportada, sobre la capacidad de nado del barbo ibérico y de la boga del Duero, ayudará a una mejor gestión de sus poblaciones y al desarrollo de programas de mejora o restauración de la conectividad longitudinal, en los hábitats que ocupan estas especies.

#### Agradecimientos

Investigación financiada por la Junta de Castilla y León: Proyecto VA299B11-2 "Evaluación de la capacidad de nado en peces ibéricos". Nuria Ramos (GEA-Ecohidráulica) colaboró en los trabajos de campo. José María Rubio-Polo y Arturo Prieto-Blanco (CHD) promovieron las acciones que posibilitaron este proyecto. Agradecemos especialmente a Juan Carlos Romeral (SAVASA) por permitirnos usar sus instalaciones en Vadocondes.

#### 5. Bibliografía

- Akaike, H.; 1998. Likelihood and the Bayes procedure. In *Selected Papers of Hirotugu Akaike* (pp. 309-332). Springer, New York, NY. [https://doi.org/10.1007/978-1-4612-1694-0\\_24](https://doi.org/10.1007/978-1-4612-1694-0_24)
- Alexandre, C.M.; Quintella, B.R.; Ferreira, A.F.; Romao, F.A.; Almeida, P.R.; 2014. Swimming performance and ecomorphology of the Iberian barbel *Luciobarbus bocagei* (Steindachner, 1864) on permanent and temporary rivers. *Ecol. Freshw. Fish.*, 23: 244-

258. <https://doi.org/10.1111/eff.12073>
- Beamish, F.; 1978. Swimming capacity. In 'Fish Physiology. Vol. VII'. (Eds WS Hoar and DJ Randall.) pp. 101–187.
- Brett, J.; 1964. The respiratory metabolism and swimming performance of young sockeye salmon. *J. Fish. Board Can.*, 21: 1183-1226. <https://doi.org/10.1139/f64-103>
- 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. <https://doi.org/10.1242/jeb.01380>
- 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*). *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 70: 280-293. <https://doi.org/10.1139/cjfas-2012-0186>
- Cooke, S.J.; Paukert, C.; Hogan, Z.; 2012b. Endangered river fish: factors hindering conservation and restoration. *Endanger. Species Res.*, 17: 179-191. <https://doi.org/10.3354/esr00426>
- Doadrio, I.; Perea, S.; Garzón-Heydt, S.; González, J.L.; 2011. *Ictiofauna continental española. Bases para su seguimiento*. DG Medio Natural y Política Forestal. MARM. Madrid. España.
- 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. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 61: 1590-1601. <https://doi.org/10.1139/f04-093>
- Mateus, C.; Quintella, B.R.; Almeida, P.R.; 2008. The critical swimming speed of Iberian barbel *Barbus bocagei* in relation to size and sex. *J. Fish. Biol.*, 73: 1783-1789. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2008.02023.x>
- Morita, K.; Yamamoto, S.; 2002. Effects of habitat fragmentation by damming on the persistence of stream dwelling charr populations. *Conserv. Biol.*, 16: 1318-1323. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.2002.01476.x>
- Peake, S.; 2008a. Gait transition speed as an alternate measure of maximum aerobic capacity in fishes. *J. Fish Biol.*, 72: 645-655. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2007.01753.x>
- Romao, F.; Quintella, B.; Pereira, T.; Almeida, P.; 2012. Swimming performance of two Iberian cyprinids: the Tagus nase *Pseudochondrostoma polylepis* (Steindachner, 1864) and the bordallo *Squalius carolitertii* (Doadrio, 1988). *J. Appl. Ichthyol.*, 28: 26-30. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0426.2011.01882.x>
- Ruiz-Legazpi, J.; Sanz-Ronda, F.J.; Bravo-Córdoba, F.J.; Fuentes-Pérez, J.F.; Castro-Santos, T.; 2018. Influencia de factores ambientales y biométricos en la capacidad de nado del barbo ibérico (*Luciobarbus bocagei* Steindachner, 1864), un ciprínido potamódromo endémico de la Península Ibérica. *Limnetica*, 72.
- Sanz-Ronda, F.J.; Ruiz-Legazpi, J.; Bravo-Córdoba, F.J.; Makrakis, S.; Castro-Santos, T.; 2015. Sprinting performance of two Iberian fish: *Luciobarbus bocagei* and *Pseudochondrostoma duriense* in an open channel flume. *Ecol. Eng.*, 83: 61-70. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.05.033>
- Wardle, C.; 1975. Limit of fish swimming speed. *Nature*, 255: 725-727. <https://doi.org/10.1038/255725a0>