

# FishPath: aplicación informática de diseño de escalas de peces de hendidura vertical

## *FishPath: computer application for design of vertical slot fishways*

Bermúdez, M.<sup>a1</sup>, Rico, A.<sup>b</sup>, Rodríguez, A.<sup>b</sup>, Pena, L.<sup>a</sup>, Rabuñal, J. R.<sup>b3</sup>, Puertas, J.<sup>a</sup>, Balairón, L.<sup>c</sup>, Lara, A.<sup>c</sup>, Aramburu, E.<sup>c3</sup>, Morcillo, F.<sup>d</sup> y Castillo, M.<sup>e</sup>

<sup>a</sup>E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad de A Coruña, Campus de Elviña, s/n 15071, A Coruña. E-mail: <sup>a1</sup>mbermudez@udc.es

<sup>b</sup>Facultad de Informática, Universidad de A Coruña, Campus de Elviña, s/n 15071, A Coruña. E-mail: <sup>b3</sup>juanra@udc.es

<sup>c</sup>Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX, Paseo Bajo de la Virgen del Puerto, 3, 28005 Madrid. E-mail: <sup>c3</sup>enrique.aramburu@cedex.es

<sup>d</sup>Personal contratado I+D+i CEDEX (entre marzo de 2007 a febrero de 2015) en los Proyectos 18-06-2006-C4 y 23-09-2010-C4

<sup>e</sup>Becaria de Formación de Personal Investigador CEDEX (entre noviembre de 2010 y noviembre de 2014).

Recibido: 24/03/2015

Aceptado: 29/04/2015

Publicado: 27/07/2015

---

## RESUMEN

Las escalas de peces de hendidura vertical son estructuras hidráulicas diseñadas para permitir la migración de las especies piscícolas a través de obstáculos en ríos. El diseño adecuado de estos dispositivos depende de la interacción entre variables hidráulicas y biológicas, dado que las propiedades hidrodinámicas de la escala deben ajustarse a los requisitos de las especies objetivo. En este artículo se presenta una aplicación informática que analiza la eficiencia de un modelo de escala de acuerdo con criterios biológicos. El modelo propuesto aplica restricciones referidas a la capacidad de natación de los peces, a sus necesidades de calado y a sus requisitos en relación con la energía disipada en forma de turbulencias. Permite así comparar diseños de forma objetiva y determinar cuál será previsiblemente más eficiente. Con esta herramienta se busca facilitar a los técnicos involucrados en el diseño de escalas de peces de hendidura vertical la aplicación sistemática de criterios hidrobiológicos, que incorporen además los resultados de las investigaciones más recientes en este ámbito.

**Palabras clave** | Escalas de peces; Capacidad de natación de los peces; Diseño hidráulico.

---

## ABSTRACT

*Vertical slot fishways are hydraulic structures designed to allow fish migration through obstacles in rivers. The appropriate design of these devices depends on an interplay between hydraulic and biological variables, since the hydrodynamic properties of the fishway must meet the requirements of the fish species for which it is intended. This paper presents a computer application to analyze the efficiency of a fishway model according to biological criteria. The proposed model applies restrictions relative to the swimming capacity of fish, their depth requirements and their needs regarding turbulent energy dissipation. It allows the objective comparison of designs and the determination of which is to be more efficient. It is expected that the application can provide guidance to the technicians involved in fishway design regarding the systematic application of hydrobiological criteria, which also incorporate the latest research findings in this field.*

**Key words** | Fishways; Fish swimming performance; Hydraulic design.

## INTRODUCCIÓN

La construcción de obras hidráulicas transversales como presas, diques, azudes y otros obstáculos produce importantes cambios en el ecosistema fluvial. Estas estructuras constituyen una barrera física para los movimientos naturales de los peces, lo que repercute negativamente sobre sus poblaciones. Así, esta interrupción de la libre circulación ha sido identificada en muchos ríos como la causa principal de la extinción o el descenso poblacional de numerosas especies (Marmulla, 2001).

Entre las soluciones para restaurar la conectividad longitudinal de los cursos fluviales se encuentra la construcción de escalas de peces, siendo las de hendidura vertical una tipología que presenta ciertas ventajas. A grandes rasgos, se trata de canales en pendiente divididos en una serie de depósitos sucesivos por tabiques transversales que poseen una hendidura vertical a lo largo de toda su altura. Sus características hidráulicas varían de acuerdo con la pendiente, el caudal y la configuración y dimensiones de las piscinas, la hendidura y los tabiques, habiéndose desarrollado numerosos diseños desde la implantación de las primeras escalas de este tipo en los años cuarenta. Entre sus características ventajosas destacan su adaptabilidad a las variaciones de nivel (su funcionamiento hidráulico permanece estable), el camino de ascenso no tortuoso y las zonas de descanso que proporcionan a los peces en su remonte, así como la posibilidad de que elijan la profundidad de natación.

Un diseño adecuado de escala de peces de hendidura vertical debe permitir a las poblaciones objetivo franquear el obstáculo sin retraso, estrés o daños perjudiciales en su desplazamiento río arriba. En este contexto, se define la eficiencia como la proporción entre los individuos que pueden continuar su migración después de atravesar exitosamente el dispositivo en un tiempo razonable y aquéllos que estaban presentes a pie de obstáculo. La revisión llevada a cabo por Bunt *et al.* (2012) muestra eficiencias entre el 0 y el 100% en escalas de hendidura vertical, y sitúa la media en el 45%. En particular, en cursos fluviales donde no están presentes de forma natural los salmónidos, la instalación de este tipo de dispositivos ha mostrado una muy baja eficiencia con la ictiofauna nativa (Stuart y Mallen-Cooper, 1999). Estos resultados muestran la necesidad de mejorar las metodologías de diseño comúnmente empleadas, incorporando nuevos criterios que garanticen una mayor eficiencia de los dispositivos, en especial para familias de peces distintas de los salmónidos.

En esta línea, diversas características hidráulicas y factores biológicos se consideran importantes para un paso de peces efectivo. Uno de los principales factores biológicos a tener en cuenta es la capacidad de natación de los peces migratorios. Las velocidades de natación de los peces varían ampliamente, en relación con factores biológicos como la longitud corporal (Beamish, 1978; Hammer, 1995) y con factores físicos como la temperatura del agua (Booth *et al.*, 1997; Myrick y Cech, 2000; Tudorache *et al.*, 2008). Además, se observan importantes diferencias en la capacidad de natación entre distintas especies (Wolter y Arlinghaus, 2003) debido a la diferente morfología corporal, y son necesarios unos calados mínimos para que los peces alcancen su potencial de natación (Dane, 1978). Igualmente, altos niveles de turbulencia y aireación pueden aumentar el coste de natación y provocar pérdidas de equilibrio y desorientación del pez (Hinch y Rand, 1998; Webb, 1998; Pavlov *et al.*, 2000; Odeh *et al.* 2002; Enders *et al.*, 2003). En general, las condiciones hidráulicas en la escala deben ser tales que los nadadores más débiles sean capaces de atravesarlas, y existe un cierto consenso sobre la influencia de las variables señaladas anteriormente en la eficiencia de un diseño (Pavlov *et al.*, 2000; Hotchkiss, 2002; Odeh *et al.*, 2002; Katopodis, 2005).

Para facilitar el acceso a este conocimiento multidisciplinar, es posible desarrollar herramientas computacionales que incorporen los resultados de los principales estudios hidráulicos y biológicos en este campo. En este trabajo se presenta una herramienta de este tipo que permite evaluar la bondad de un diseño de escala de peces de hendidura vertical desde un punto de vista biológico. Se trata de una aplicación informática que analiza si las propiedades hidrodinámicas de un diseño de escala se ajustan a los requisitos de las especies objetivo. Teniendo en cuenta la complejidad de los fenómenos hidráulicos y biológicos involucrados en el remonte de una escala de peces, esta herramienta no pretende determinar un diseño óptimo, sino establecer una forma objetiva para comparar distintos diseños y determinar, dada una serie de diseños, cual será previsiblemente más eficiente.

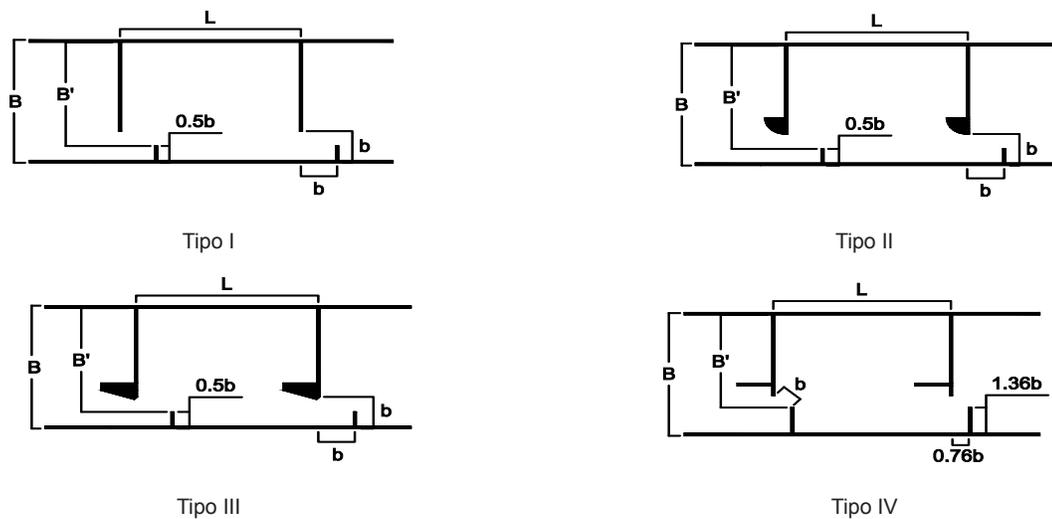
La aplicación es el resultado de varios estudios llevados a cabo en el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX (CEH-CEDEX) y en la Universidad de A Coruña, que se resumen a continuación, así como de una profunda revisión del estado del arte. Se busca con ella facilitar a los técnicos involucrados en el diseño de escalas de peces de hendidura vertical la aplicación sistemática de criterios hidrobiológicos, que incorporen además los resultados de las investigaciones más recientes en este ámbito.

## ANTECEDENTES

La eficiencia biológica de un diseño de escala de peces de hendidura vertical está determinada por el acuerdo entre sus características hidráulicas y los requisitos y capacidad natatoria de las especies objetivo. En esta sección se expone la base teórica de los criterios que incorpora la aplicación informática, tanto a nivel hidráulico como a nivel biológico.

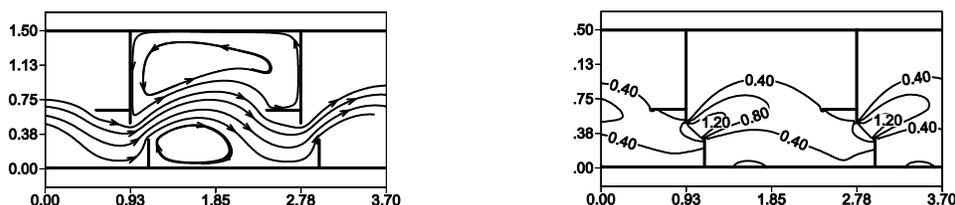
### Base hidráulica

La caracterización hidráulica de los diseños de escala de la aplicación está basada en los trabajos llevados a cabo por Bermúdez (2013), Puertas *et al.* (2004, 2012), Bermúdez *et al.* (2010) y Pena (2004). En estos estudios se analiza mediante modelización física y numérica el campo de flujo en 4 diseños genéricos de piscina (Figura 1) y, para cada uno de ellos, se prueban distintas dimensiones geométricas de piscina. Los diseños tipo I son de simple hendidura (con una única hendidura entre piscinas) que incorporan deflectores laterales transversales principales y secundarios. Los diseños tipo II y III están basados en este primer diseño, pero disponen además de elementos de guiado del flujo, posicionados en el extremo del deflector transversal principal. Por último, los diseños tipo IV incorporan deflectores longitudinales cortos asociados a los tabiques transversales principales, que también funcionan como elementos de guiado del flujo. El rango de dimensiones estudiado es  $5 < L/b < 15$ ,  $2 < B/b < 8$ , siendo  $L$  la longitud de piscina,  $B$  la anchura de piscina y  $b$  la anchura de hendidura. Este rango cubre ampliamente los diseños más comunes y recomendados en la literatura (Rajaratnam *et al.*, 1992 o Wu *et al.*, 1999).



**Figura 1** | Configuración geométrica de los diseños tipo incluidos en la aplicación.

Los resultados de estos trabajos comprenden la definición del campo de velocidades, las relaciones caudal-calado (también conocidas como curvas de descarga) y la potencia disipada por unidad de volumen. La velocidad media en este tipo de estructuras es prácticamente bidimensional, siendo la velocidad vertical mucho menor que la horizontal, e independiente del caudal circulante (Wu *et al.*, 1999; Liu *et al.*, 2006). Por ello, se considera que el campo de velocidades queda completamente definido mediante la caracterización de un único plano paralelo a la solera (Figura 2). Los campos de velocidades muestran en todos los diseños una región de flujo principal definida por un chorro de gran velocidad y dos zonas de recirculación con velocidades bajas a ambos lados del mismo. La metodología seguida para la obtención de los campos de velocidades se describe en detalle en Bermúdez *et al.* (2010).



**Figura 2** | Líneas de corriente (izquierda) y campo de velocidades (derecha, en m/s) obtenidos mediante modelización numérica en uno de los diseños estudiados.

Por su parte, las curvas de descarga permiten una estimación, para cada diseño de piscina y anchura de hendidura, de los caudales necesarios para mantener un determinado calado en la escala. Se definen de la siguiente forma:

$$Q = C_q \cdot \sqrt{g \cdot S} \cdot L \cdot b \cdot h_c \quad (1)$$

donde  $C_q$  es un coeficiente que depende de la geometría de la piscina,  $h_c$  es el calado en el centro de piscina,  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $S$  es la pendiente de la escala,  $L$  es la longitud de piscina y  $b$  es la anchura de hendidura. El coeficiente  $C_q$  se sitúa entre 0.73 y 1.09 en los diseños estudiados, y su valor para cada diseño concreto puede ser consultado en Puertas *et al.* (2012).

Por último, para evaluar los niveles de aireación y turbulencia en las escalas se utiliza como indicador la potencia disipada por unidad de volumen  $E$ , definida de la siguiente forma:

$$E = C_q \cdot \rho \cdot \sqrt{S^3 \cdot g^3} \cdot L \cdot b / B \quad (2)$$

donde  $\rho$  es la densidad del agua y  $B$  la anchura de piscina. Esta expresión permite estimar el valor de potencia disipada por unidad de volumen dado un diseño, ya que es independiente del caudal circulante.

## Base biológica

Las bases biológicas de este trabajo comprenden, en primer lugar, la cuantificación de la capacidad de natación de los peces, entendida como la combinación de las velocidades que pueden alcanzar y la resistencia para mantener dichas velocidades durante un período de tiempo. Generalmente, se distinguen tres niveles de velocidades natatorias: (1) velocidad de crucero, que permite largos desplazamientos a bajas velocidades; (2) velocidad punta, con la que se consiguen velocidades máximas de corta duración y (3) velocidad sostenida, que cubre el espectro entre los otros dos niveles.

Diversos autores han llevado a cabo estudios para conocer las velocidades punta de distintas especies, y han definido rangos de valores, generalmente expresados en función de la longitud corporal del pez. En este trabajo se emplea por una parte la velocidad máxima de  $10LC/s$ , siendo  $LC$  la longitud corporal del pez, como simple aproximación e independientemente de la especie (Bainbridge, 1960; Videler, 1993; Hammer, 1995; Cowx y Welcomme, 1998). Por otra parte, para la caracterización de las velocidades punta y sostenida, se utilizan en este trabajo las curvas “velocidad del agua-autonomía del pez” desarrolladas por Elvira *et al.* (2008), basadas en la revisión de estudios experimentales de otros autores. Estas curvas relacionan la velocidad de natación y la resistencia de distintas especies, agrupadas en familias de salmónidos y ciprínidos, y para temperaturas del agua templadas (se prescinde del efecto de la temperatura). Permiten calcular así la distancia máxima  $D_{max}$  (cm) que el pez puede recorrer frente a la velocidad del agua  $U$  (cm/s), de acuerdo con la siguiente expresión:

$$D_{max} = -c \cdot \exp\left(\frac{U}{c} - \frac{a}{c}(LC)^b - 1\right) \quad (3)$$

donde  $LC$  es la longitud corporal del pez (mm) y  $a$ ,  $b$  y  $c$  son coeficientes para los que los autores sugieren los siguientes valores:  $a=17.31$ ,  $b=0.47$  y  $c=-16.02$  para salmónidos y  $a=30.34$ ,  $b=0.34$  y  $c=-14.29$  para ciprínidos. Estos han sido los valores adoptados en la aplicación, aunque se podrían aplicar, en su caso, coeficientes específicos para cada especie usando esta misma herramienta.

Además del campo de velocidades, otro de los factores que parece tener gran influencia en el comportamiento de los peces es el nivel de turbulencia desarrollado en las piscinas. Como referencia de los valores máximos recomendados para la potencia disipada por unidad de volumen (Ecuación 2), Larinier *et al.* (2002) y Bates (2000) consideran  $200 \text{ W/m}^3$  para pasos de peces especialmente destinados para salmónidos, aunque este valor umbral se puede aumentar hasta los  $400 \text{ W/m}^3$  en caso de escalas con un pequeño número de piscinas. En escalas destinadas a otras especies fluviales se recomiendan valores menores de aproximadamente  $150 \text{ W/m}^3$  (Larinier *et al.*, 2002), aunque en proyectos como los de la cuenca de Murray-Darling en Australia se han reducido hasta alrededor de  $40\text{-}50 \text{ W/m}^3$  (Barret y Mallen-Cooper, 2006; Stuart *et al.*, 2008). En este trabajo, se adopta un valor máximo de  $200 \text{ W/m}^3$  para pasos cuya especie objetivo sean salmónidos y  $150 \text{ W/m}^3$  para no salmónidos. Estos valores se aceptan como un criterio general, sin base conceptual sólida y sin validación en los ensayos biológicos realizados en el CEDEX, pero cuyo uso está muy extendido.

Otro de los factores a evaluar es el calado desarrollado en la escala, ya que los peces necesitan un calado mínimo para poder desarrollar su potencial de natación (Dane, 1978). Los requisitos específicos de calado varían con las especies y la etapa del ciclo vital. En dispositivos como los caños de drenaje se recomiendan calados mínimos del orden de 2.5 veces la altura de la aleta caudal (aleta de la cola), siendo ésta del orden del 32% de la longitud de horquilla para juveniles de salmón (ADF&G y ADOT&PF, 2001). En otras recomendaciones para estos dispositivos, el límite inferior del calado se sitúa entre 0.24 m y 0.30 m para salmónidos adultos (Bates *et al.*, 2003 ó Hotchkiss y Frei, 2007). Como parte de este trabajo, se ha realizado un análisis morfológico de cuatro especies presentes en los ríos españoles: la trucha común, el barbo común, el barbo del Mediterráneo y la boga del Tajo. Se han estudiado las relaciones entre la longitud de la aleta caudal extendida y la longitud furcal del pez (Aramburu *et al.*, 2015). En base a los resultados obtenidos y teniendo en cuenta las recomendaciones anteriores, se establece en la aplicación un calado mínimo de 25 cm, independientemente de la especie y talla.

Además de todos los trabajos anteriores, el estudio biológico clave en el desarrollo de esta herramienta informática ha sido llevado a cabo en la escala de peces del Laboratorio de Hidráulica del CEH- CEDEX. Este estudio comprende la ejecución de tres campañas de ensayos con cuatro especies autóctonas (las mismas que en el estudio morfológico) en un modelo físico de una escala de peces a tamaño real. El diseño de escala es de tipo IV, con  $B=1.5 \text{ m}$  y  $L=1.85 \text{ m}$ , siguiendo la nomenclatura de la Figura 1. El protocolo de ensayos y la metodología experimental, que utiliza técnicas de visión e inteligencia artificial para analizar el comportamiento de los peces, se describe en detalle en Aramburu *et al.*, 2014; Lara *et al.*, 2011 y Rodríguez *et al.*, 2011.

En estos ensayos ha sido posible reconstruir las trayectorias e identificar las zonas realmente empleadas por los peces. Las principales conclusiones, a efectos de desarrollar criterios de diseño de escalas, se resumen a continuación. Por una parte, se ha comprobado que los peces de todas las especies ensayadas no remontan la escala de forma continua, sino que van ascendiendo de un estanque al siguiente realizando descansos de duración variable en las zonas de recirculación existentes a cada lado del flujo principal. Además, minimizan en la medida de lo posible sus desplazamientos por la zona de flujo principal, que solo atraviesan para intentar remontar o para moverse de una zona de recirculación a otra. Entre las variables que afectan a la eficiencia de la escala se encuentra también el caudal, habiéndose observado mayores porcentajes de ascenso con el caudal más bajo ensayado ( $100 \text{ L/s}$ , que proporciona calados de aproximadamente 0.30 m) que con el caudal mayor ( $250 \text{ L/s}$ , con calados del orden de 0.75 m). Los porcentajes de eficiencia observados en cada uno de los ensayos realizados están recogidos en Aramburu *et al.* (2014).

## DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE

Las condiciones hidráulicas en la escala deben ser tales que los nadadores más débiles sean capaces de atravesarlas. En este apartado se explican los criterios de diseño que aplica la herramienta informática para garantizar que así sea. Estos criterios consideran la capacidad de natación de los peces (restricciones I a IV), sus requisitos en relación con la energía disipada en forma

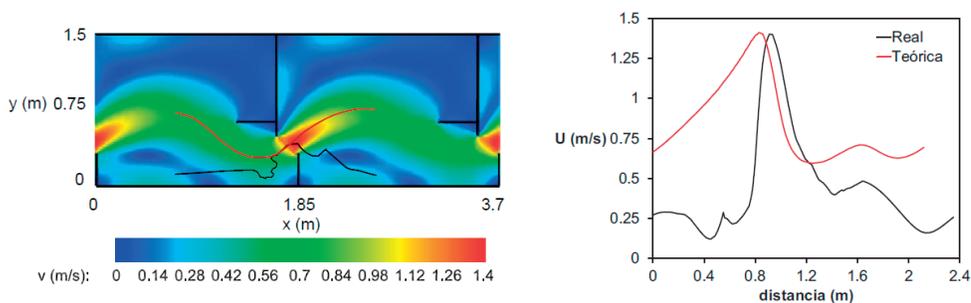
de turbulencias (restricción V) y sus necesidades de calado (restricción VI) (Tabla 1). Algunos de los criterios pueden ser usados alternativamente, no siendo necesaria la evaluación de todos ellos para que el análisis de un diseño se considere completo.

**Tabla 1** | Resumen de las restricciones consideradas en la aplicación. Se indican las variables empleadas para evaluar la adecuación de las propiedades hidrodinámicas de la escala a los requisitos del pez objetivo. Finalmente se destacan las restricciones contempladas en los ensayos biológicos realizados en el CEDEX.

Restricción	Caracterización hidráulica	Caracterización biológica	Ensayos CEDEX
I	Velocidad máxima del agua en la trayectoria ( $U_{max}$ )	Velocidad punta del pez objetivo, aproximada como $10 LC/s$	
II	Velocidad máxima del agua en la trayectoria ( $U_{max}$ )	Velocidad punta del pez objetivo, a partir de las curvas “velocidad del agua-autonomía del pez”	Sí
III	Velocidad equivalente del agua en la trayectoria ( $U_{eq}$ ) Longitud de la trayectoria en una piscina ( $L_{i2}$ )	Curvas “velocidad del agua-autonomía del pez” de la especie objetivo	
IV	Velocidad equivalente del agua en la trayectoria ( $U_{eq}$ ) Longitud total de la trayectoria en la escala ( $L_{i2} \times$ número de piscinas)	Curvas “velocidad del agua-autonomía del pez” de la especie objetivo, corregidas con el coeficiente $C$ (Tabla 2)	Sí
V	Potencia disipada por unidad de volumen en las piscinas ( $E$ )	Recomendaciones de potencia disipada por unidad de volumen máxima	
VI	Calado en las piscinas ( $h_c$ )	Recomendaciones de calado mínimo	Sí

## Campo de velocidades y capacidad de natación

Para evaluar si el pez puede remontar la escala, su capacidad de natación debe ser comparada con el campo de velocidades. Dada una trayectoria de ascenso del pez, la velocidad de la corriente en cada punto puede obtenerse a partir del campo de velocidades. Una de las trayectorias más restrictivas que el pez puede seguir durante el remonte se corresponde con la línea de corriente que atraviesa las hendiduras verticales (Figura 3). Dicha trayectoria se considera del lado de la seguridad en vista de lo observado en el estudio biológico llevado a cabo en el CEH-CEDEX. A partir de esta trayectoria teórica se definen las restricciones I a IV.



**Figura 3** | Campo de velocidades (izquierda) y perfil de velocidades (derecha) a lo largo de una de las trayectorias más restrictivas y de una trayectoria real seguida por un ejemplar de trucha común en la escala de peces del CEH-CEDEX.

La primera restricción analiza el esfuerzo que el pez debe hacer para atravesar la hendidura vertical (restricción I en la Tabla 1). Esta restricción se evalúa comparando la velocidad máxima del agua en toda la trayectoria ( $U_{max}$ ) con la velocidad punta del pez objetivo. De esta forma, se limita el valor de  $S \times L$  (pendiente  $\times$  longitud de piscina) para cada diseño de forma que se verifique que  $U_{max} < 10LC/s$ , siendo  $LC$  la longitud corporal del pez. Por ejemplo, en un diseño D4\_5 tipo I ( $B=4b$  y  $L=5b$ ) para ciprínidos con una longitud corporal de 150 mm, la primera restricción limita el producto  $S \times L$  (pendiente  $\times$  longitud de piscina) a 0.2 m. Si la pendiente de la escala  $S$  es del 7%, la longitud de piscina  $L$  debe ser inferior a 2.86 m para que se cumpla esta primera condición.

Alternativamente, es posible utilizar las curvas “velocidad del agua-autonomía del pez” para analizar el paso por la hendidura. Como ya se ha señalado anteriormente, en ausencia de curvas específicas para especies ibéricas se consideran en este trabajo las curvas definidas por Elvira *et al.* (2008), genéricas para salmónidos y ciprínidos y temperatura media del agua. En este caso, se propone considerar una distancia recorrida de 4 veces la anchura de hendidura (4b) y comparar la velocidad máxima que proporcionan dichas curvas con la velocidad máxima del agua  $U_{max}$  (restricción II en la Tabla 1).

Aun cuando las velocidades del flujo se sitúen por debajo de su rango de velocidad punta, el esfuerzo necesario para atravesar la escala puede fatigar al pez hasta el punto de no poder continuar su avance y provocar su descenso. Por tanto, dos restricciones adicionales relacionan el campo de velocidades en las piscinas con las curvas “velocidad del agua-autonomía del pez”. Por una parte, se impone que el pez tiene que ser capaz de remontar una piscina completa sin descanso (restricción III en la Tabla 1). Por otra parte, no es razonable pensar que el pez pueda remontar un número indefinido de estanques en la escala puesto que, aunque descansa, realiza un esfuerzo progresivo y va fatigándose. Por tanto, un criterio más completo (restricción IV en la Tabla 1) contempla también la longitud total recorrida por el pez en la escala.

Para poder aplicar estas dos restricciones, se considera de nuevo la trayectoria del pez más desfavorable, la trayectoria cuya longitud ( $L_{t2}$ ) es igual a la longitud de la línea de corriente que atraviesa la hendidura vertical en una piscina. La capacidad de natación se cuantifica mediante las curvas “velocidad del agua-autonomía del pez” definidas en la Ecuación 3. Teniendo en cuenta que estas curvas se definen para una velocidad de la corriente constante, mientras que la velocidad del agua a lo largo de la trayectoria es variable, se calcula una velocidad equivalente constante a partir del perfil de velocidades de dicha trayectoria. Para ello, se asume que la energía que el pez necesita para nadar una longitud  $L$  contra una velocidad de la corriente constante  $U$  es proporcional al cuadrado de la velocidad y a la longitud  $L$ , por lo que la energía consumida en una trayectoria con velocidad variable puede evaluarse como:

$$e = K \cdot U_1^2 \cdot L_1 + K \cdot U_2^2 \cdot L_2 + \dots + K \cdot U_n^2 \cdot L_n = K \cdot U_{eq}^2 \cdot L_t \quad (4)$$

donde  $L_i$  es la longitud de la trayectoria donde la velocidad es  $U_i$ ,  $U_{eq}$  es la velocidad equivalente,  $L_t$  es la longitud total de la trayectoria,  $K$  es una constante y  $n$  es el número de tramos en los que se divide la trayectoria.

Si la trayectoria total se divide en  $n$  tramos de igual longitud  $L$ , la Ecuación 4 se reduce a:

$$U_{eq} = \sqrt{\frac{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_n^2}{n}} \quad (5)$$

Los valores de velocidad máxima ( $U_{max}$ ), velocidad equivalente ( $U_{eq}$ ) y longitud de la trayectoria en una piscina ( $L_{t2}$ ) en cada uno de los diseños considerados en la aplicación pueden consultarse en Puertas *et al.* (2012).

En el caso particular del diseño ensayado en el CEH-CEDEX (diseño tipo IV con  $B=5.55b$  y  $L=6.85b$ ), la velocidad equivalente  $U_{eq}$  se pondera con un factor corrector  $C$  para aplicar la restricción IV. Este coeficiente refleja que el desplazamiento a lo largo de la longitud total de la escala no se efectúa de forma estrictamente continuada, así como la influencia del caudal circulante en la eficiencia de paso, según lo observado en los ensayos (Aramburu *et al.*, 2014). De esta forma, se propone un coeficiente  $C$  por caudal y especie (Tabla 2) para su utilización en la evaluación de remonte de los peces en escalas de hendidura vertical.

Continuando con el ejemplo previo del diseño D4\_5 tipo I y considerando el producto  $S \times L = 0.2$  m en base a la restricción I, la velocidad equivalente  $U_{eq}$  obtenida es de 1 m/s. Esta velocidad, introducida en la curva “velocidad del agua-autonomía del pez” (Ecuación 3) para ciprínidos, proporciona un valor de 5.9 m para la distancia máxima recorrida  $D_{max}$ , para una talla de 150 mm. Por tanto, para verificar la restricción III, el valor de la longitud de la trayectoria  $L_{t2}$  debe estar por debajo de 5.9 m. En un diseño D4\_5 tipo I, el cociente  $L_{t2}/L$  es de 1.18, por lo que la longitud de las piscinas  $L$  debe ser inferior a 5 m. Así, el par ( $S=7\%$ ,  $L=2.86$  m) seleccionado anteriormente para cumplir con la primera restricción verifica esta tercera condición.

**Tabla 2** | Valores del factor de corrección *C*.

Especie	Caudal (L/s)	
	100	250
Trucha común	0.9	1
Boga del Tajo	0.8	1
Barbo común	0.5	0.8
Barbo del Mediterráneo	0.8	1

## Potencia disipada por unidad de volumen y requisitos de turbulencia

Además del campo de velocidades, otro de los factores que parece tener gran influencia en el comportamiento de los peces es el nivel de turbulencia desarrollado en las piscinas. Para cuantificar los niveles de turbulencia que se producen en los distintos diseños se utiliza la potencia disipada por unidad de volumen, definida en la Ecuación 2. La restricción V limita los niveles de turbulencia y aireación en las piscinas estableciendo valores máximos dicha potencia disipada por unidad de volumen en función de las especies objetivo. En este caso, debe ser inferior a  $200 \text{ W/m}^3$  para pasos cuya especie objetivo sean salmónidos y a  $150 \text{ W/m}^3$  en el caso de no salmónidos

Continuando con el ejemplo anterior del diseño D4\_5 tipo I para ciprínidos, la quinta restricción limita la longitud de piscina a 1.93 m para obtener una potencia disipada por unidad de volumen inferior a  $150 \text{ W/m}^3$ . Por tanto, en este ejemplo esta última condición sería más limitante que las dos restricciones anteriores de velocidad (restricción I y III).

## Curvas de descarga y necesidades de calado

Por último, la restricción VI busca identificar los caudales que proporcionan calados aceptables para los peces. Para ello se utilizan directamente las curvas de descarga (Ecuación 1) que relacionan caudales y calados. La aplicación impone un calado mínimo de 25 cm, independientemente de la especie y talla, y permite definir un calado máximo en base a criterios constructivos.

Esto permite una estimación, para cada diseño y anchura de hendidura, del caudal mínimo para garantizar un calado aceptable para los peces y del caudal máximo. Continuando con el ejemplo previo del diseño D4\_5 tipo I, al fijar la longitud de piscina  $L$  en 1.93 m ( $L < 2.86$  m en base a las restantes restricciones) se obtiene una anchura de hendidura de 0.39 m ( $L = 5b$  en este diseño). Con estas dimensiones geométricas, los caudales circulantes deben ser mayores a  $0.09 \text{ m}^3/\text{s}$  para conseguir un calado superior a 0.25 m en el centro de piscina. Si se fija un calado máximo de 0.8 m, el caudal debe ser inferior a  $0.27 \text{ m}^3/\text{s}$ . De esta forma queda definido el rango de caudales válido en la escala.

## Interfaz

Para facilitar la aplicación de estos criterios se ha desarrollado una aplicación informática en web, cuya interfaz se describe a continuación. Dispone de dos pestañas diferenciadas, denominadas resultados validados en el CEDEX (Figura 4) y resultados investigación (Figura 5). Se puede acceder a la misma desde: <http://www.citeec.udc.es/peces/Pages/default.aspx>, con el usuario: `ingenieria_agua` y la contraseña: `iwa2015`.

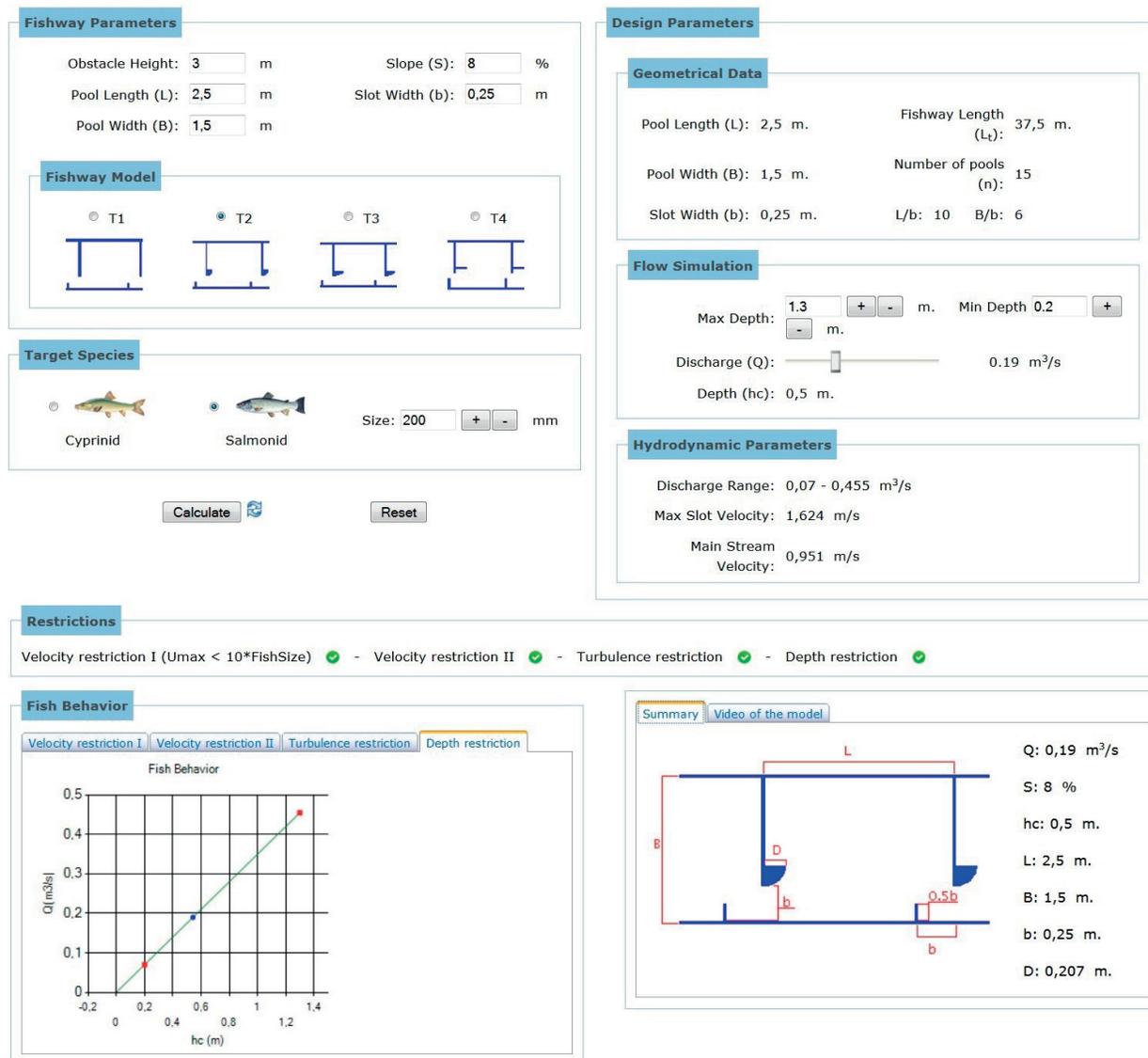


**Figura 4 |** Ejemplo de salida de la aplicación en la primera pestaña. En este caso el diseño no es adecuado para la especie y talla objetivo, se incumple la restricción IV.

La primera pestaña permite trabajar sobre el diseño concreto en el que se han desarrollado los ensayos en el CEH-CEDEX. Se trata por tanto de un diseño tipo IV con  $B=5.55b$  y  $L=6.85b$  (Figura 4). El usuario debe introducir los siguientes datos iniciales: altura del obstáculo, anchura de hendidura, pendiente de la escala y caudal. En relación con la especie objetivo, debe indicar la familia (salmónidos o ciprínidos), la talla y el coeficiente corrector  $C$  (opcionalmente). La aplicación evalúa el cumplimiento de las restricciones II, IV y VI (Tabla 1), que se representan también de forma gráfica (Figura 4).

La segunda pestaña permite evaluar cualquier diseño dentro de los cuatro tipos genéricos mostrados en la Figura 1, para los rangos de dimensiones geométricas habituales. El usuario debe introducir todas las dimensiones geométricas: altura del obstáculo, pendiente de la escala, tipo de diseño, longitud de piscina, anchura de hendidura y anchura de piscina. En primer lugar, el programa comprueba que el diseño se encuentra efectivamente dentro de los rangos de dimensiones geométricas estudiadas y, en su caso, aproxima el valor de  $U_{max}$ ,  $U_{eq}$ ,  $L_{12}$  y  $C_q$  a partir de los datos disponibles en diseños similares.

Una vez introducidas las especies objetivo y su talla, se comprueban las restricciones de velocidad y de turbulencia (I, III y V en Tabla 1). Los requisitos de calado se analizan de igual forma que en la pestaña anterior (restricción VI en Tabla 1), tras fijar el usuario un caudal circulante y un calado mínimo y máximo. Todas las restricciones se representan gráficamente, como se muestra en la Figura 5, y se muestra un vídeo de un diseño similar en funcionamiento.



**Figura 5 |** Ejemplo de salida de la aplicación en la segunda pestaña. El diseño se considera adecuado, ya que cumple todos los criterios.

## Futuros desarrollos

En este momento, los autores trabajan en varias líneas de investigación relacionadas con la eficiencia de las escalas de peces de hendidura vertical. Entre ellas, cabe destacar el desarrollo de técnicas de visión artificial para el seguimiento de peces dentro de estos dispositivos (Rodríguez *et al.*, 2015). Con estas nuevas aproximaciones se pretende contribuir a evaluar la respuesta de los peces a diferentes características hidráulicas, a definir los posibles factores clave en el remonte y a mejorar los modelos existentes para predecir la eficiencia de los dispositivos. Está previsto que todos los resultados de estas investigaciones se incorporen progresivamente a la aplicación informática.

## CONCLUSIONES

En este artículo se presenta una aplicación informática para analizar la eficiencia biológica de diferentes diseños de escalas de hendidura vertical.

En primer lugar, el modelo impone criterios de velocidad para verificar que la velocidad del flujo es lo suficientemente baja como para que los peces puedan remontar. Por una parte, se comparan las máximas velocidades del flujo con las velocidades punta de los peces. Por otra parte, el campo de velocidades en las piscinas se relaciona con las curvas “velocidad del agua-autonomía del pez” de los peces a partir de una velocidad equivalente a lo largo de la trayectoria del pez, y considerando la distancia recorrida por el mismo. Asimismo, la metodología limita la potencia disipada por unidad de volumen teniendo en cuenta los valores recomendados en la literatura para las distintas especies.

Siguiendo este procedimiento, se obtienen unas dimensiones de piscina que aseguran que las velocidades del flujo y los niveles de turbulencia y aireación sean admisibles para los peces. Una vez fijadas las características geométricas, se evalúan las curvas de descarga para cada diseño y se determina el rango de caudales que proporciona calados aceptables para el pez.

Teniendo en cuenta la complejidad de los fenómenos hidráulicos y biológicos implicados en el proceso de remonte de una escala de peces, resulta obvio que la metodología propuesta no trata de establecer de forma exacta la menor talla de una especie concreta que es capaz de remontar una escala. Otros factores biológicos complejos que no se han incluido en el presente trabajo, y que son difíciles de cuantificar, contribuyen al éxito o al fracaso de un ejemplar determinado a lo largo de su recorrido por la escala. No obstante, la metodología propuesta aquí es una forma objetiva de comparar diferentes diseños y de determinar, dada una serie de diseños, cuál de ellos es el más eficiente. En cualquier caso, es necesaria una mayor aplicación de criterios hidrobiológicos y metodologías sistemáticas para evaluar el funcionamiento y la eficiencia de los diseños de escalas de peces. Y es en este contexto en el que se enmarca la presente aplicación.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por fondos FEDER y el Ministerio de Economía y Competitividad (Ref. CGL2012-34688 y PCT-380000-2007-3). María Bermúdez expresa su agradecimiento al programa postdoctoral del Plan I2C de la Xunta de Galicia (Ref. ED481B 2014/156-0).

## REFERENCIAS

- ADF&G, Alaska Department of Fish and Game, and ADOT&PF, Alaska Department of Transportation and Public Facilities, (2001). *Memorandum of Agreement between Alaska Department of Fish and Game and Alaska Department of Transportation and Public Facilities for the Design, Permitting, and Construction of Culverts for Fish Passage*. Juneau.
- Aramburu, E., Morcillo, F., Castillo, M., Lara, A., Balairón, L. (2015). *Análisis morfológico de las especies ensayadas en la escala de hendidura vertical del CEH-CEDEX para la definición de calados mínimos*. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Informe interno.
- Aramburu, E., Morcillo, F., Castillo, M., Lara, A. (2014). Investigación sobre el comportamiento de los peces en una escala existente en el Laboratorio de Hidráulica del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX. Conclusiones de las campañas de ensayos 2009-2012. *Ingeniería Civil*, 173.
- Bainbridge, R. (1960). Speed and stamina in three fish. *Journal of Experimental Biology*, 37, 129-153.
- Barrett J., Mallen-Cooper M. (2006). The Murray River's 'Sea to Hume Dam' fish passage program: progress to date and lessons learned. *Ecological Management and Restoration*, 7(3), 173-183. doi:10.1111/j.1442-8903.2006.00307.x

- Bates K. (2000). *Fishway guidelines for Washington State*. Draft report, Washington Department of Fish and Wildlife, 57 p.
- Bates, K., Barnard, B., Heiner, B., Klavas, J.P., Powers, P.D. (2003). *Design of Road Culverts for Fish Passage*. Washington Department of Fish and Wildlife, Olympia, WA.
- Beamish, F.W.H. (1978). Swimming capacity. En: Hoar W.H. y Randall D. J (eds), *Fish Physiology*. Academic Press, New York, p. 101-187.
- Bermúdez, M. (2013). Evaluación hidráulica y biológica de diseños de escalas de peces de hendidura vertical para especies de baja capacidad natatoria. Tesis doctoral, Departamento de Métodos Matemáticos y de Representación, Universidad de A Coruña.
- Bermúdez, M., Puertas, J., Cea, L., Pena, L., Balairón, L. (2010). Influence of pool geometry on the biological efficiency of vertical slot fishways. *Ecological Engineering*, 36(10), 1355-1364. doi:10.1016/j.ecoleng.2010.06.013
- Booth, R.K., McKinley, R.S., Okland, F., Sisak, M.M. (1997). *In situ* measurement of swimming performance of wild Atlantic salmon (*Salmo salar*) using radio transmitted electromyogram signals. *Aquatic Living Resources*, 10(4), 213-219. doi:10.1051/alr:1997023
- Bunt, C.M., Castro-Santos, T., Haro, A. (2012). Performance of fish passage structures at upstream barriers to migration. *River Research Applications* 28(4), 457-478. doi:10.1002/rra.1565
- Cowx, I.G., Welcomme, R.L. (1998). *Rehabilitation of rivers for fish*. FAO, Fishing News Books, Oxford, 260 p.
- Dane, B. G. (1978). *A Review and Resolution of Fish Passage Problems at Culvert Sites in British Columbia*. Fisheries and Marine Service Technical Report N° 810, Department of Fisheries and Environment, Vancouver. 126 p.
- Elvira, B., Almodóvar, A., Nicola, G.G., Ayllón, D., Parra, I., Almeida, D. (2008). *Modelos de velocidades de natación crítica y curvas de velocidad-autonomía en salmónidos*. Convenio de colaboración entre el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas y la Universidad Complutense de Madrid: Investigación experimental sobre diseño hidráulico de pasos para peces. Informe interno.
- Enders, E.C., Boisclair, D., Roy, A.G. (2003). The effect of turbulence on the cost of swimming for juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 60(9), 1149-1160. doi:10.1139/f03-101
- Hammer, C. (1995). Fatigue and exercise tests with fish. *Comparative Biochemistry and Physiology*, A, 112(1), 1-20. doi:10.1016/0300-9629(95)00060-K
- Hinch, S. G., Rand, P. S. (1998). Swim speeds and energy use of up-river migrating sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*): role of the local environment and fish characteristics. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 55(8), 1821-1831. doi:10.1139/f98-067
- Hotchkiss, R. (2002). *Turbulence Investigation and Reproduction for Assisting Downstream Migrating Juvenile Salmonids*, Part I of II. Report to Bonneville Power Administration (BPA Report DOE/BP-00004633-I), Portland, OR, 138 p.
- Hotchkiss, R.H., Frei, C.M. (2007). *Design for fish passage at roadway-stream crossings: synthesis report*. U.S. Department of Transportation. Report N° FHWA-HIF-07-033.
- Katopodis, C. (2005). Developing a toolkit for fish passage, ecological flow management and fish habitat works. *Journal of Hydraulic Research*, 43(5), 451-467. doi:10.1080/00221680509500144
- Lara, A., Aramburu, E., Berges, J.A., Morcillo, F., Castillo, M. (2011). Investigación sobre el comportamiento de escalas de peces en laboratorio. Campaña de ensayos 2009-2010. *Ingeniería Civil*, 164. CEDEX.
- Larinier, M., Travade, F., Porcher, J.P. (2002). Fishways: biological basis, design criteria and monitoring. *Bulletin Français Pêche et Pisciculture*, 364(Suppl.), 208.
- Liu, M., Rajaratnam, N., Zhu, D. Z. (2006). Mean flow and turbulence structure in vertical slot fishways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(8), 765-777. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(2006)132:8(765)

- Marmulla, G. (2001). *Dams, fish and fisheries. Opportunities, challenges and conflict resolution*. FAO Fisheries Technical Paper. N° 419. Rome. 166 p.
- Myrick, C.A., Cech, J.J. (2000). Swimming performances of four California stream fishes: temperature effects. *Environmental Biology of Fishes*, 58(3),289-295. doi:10.1023/A:1007649931414
- Odeh, M., Noreika, J. F., Haro, A., Maynard, A., Castro-Santos, T., Cada, G. F. (2002). *Evaluation of the Effects of Turbulence on the Behavior of Migratory Fish*. U.S. Geological Survey, Glenn F. Report to Bonneville Power Administration (BPA Report DOE/BP-00000022-1), Portland, OR, 55 p.
- Pavlov, D.S., Lupandin, A.I., Skorobogatov, M.A. (2000). The effects of flow turbulence on the behavior and distribution of fish. *Journal of Ichthyology*, 40(S2): S232-S261.
- Pena, L. (2004). Estudio hidráulico en modelo de escalas de peixes de fenda vertical e de fenda profunda aliñadas. Aproximación á avaliación experimental da enerxía cinética turbulenta. Tesis doctoral, Departamento de Métodos Matemáticos y de Representación, Universidad de A Coruña.
- Puertas, J., Pena, L., Teijeiro, T. (2004). Experimental approach to the hydraulics of vertical slot fishways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(1), 10-23. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(2004)130:1(10)
- Puertas, J., Cea, L., Bermúdez, M., Pena, L., Rodríguez, A., Rabuñal, J.R., Balairón, L., Lara, A., Aramburu, E. (2012). Computer application for the analysis and design of vertical slot fishways in accordance with the requirements of the target species. *Ecological Engineering*, 48, 51-60. doi:10.1016/j.ecoleng.2011.05.009
- Rajaratnam, N., Katopodis, C., Solanki, S. (1992). New designs for vertical slot fishways. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 19(3), 402-414. doi:10.1139/192-049
- Rodríguez, A., Bermúdez, M., Rabuñal, J.R., Puertas, J. (2015). Fish tracking in vertical slot fishways using computer vision techniques. *Journal of Hydroinformatics*, 17(2), 275-292. doi:10.2166/hydro.2014.034
- Rodríguez, A., Bermúdez, M., Rabuñal, J.R., Puertas, J., Dorado, J., Pena, L., Balairón, L. (2011). Optical fish trajectory measurement in fishways through computer vision and artificial neural networks. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 25(4), 291-301. doi:10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000092
- Stuart, I.G., Zampatti, B.P., Baumgartner, L.J. (2008). Can a low gradient vertical-slot fishway provide passage for a lowland river fish community? *Marine & Freshwater Research*, 59(4), 332-346. doi:10.1071/MF07141
- Stuart, I. G., Mallen-Cooper, M. (1999). An assessment of the effectiveness of a vertical-slot fishway for non-salmonid fish at a tidal barrier on a large tropical/subtropical river. *Regulated Rivers: Research & Management*, 15, 575-590. doi:10.1002/(SICI)1099-1646(199911/12)15:6<575::AID-RRR562>3.0.CO;2-Q
- Tudorache, C., Viaene, P., Blust, R., Vereecken, H., de Boeck, G. (2008). A comparison of swimming capacity and energy use in seven European freshwater fish species. *Ecology of Freshwater Fishes*, 17(2), 284-291. doi:10.1111/j.1600-0633.2007.00280.x
- Videler, J.J. (1993). *Fish Swimming*. Fish & Fisheries Series 10, Chapman & Hall, London, 260 p.
- Webb, P. W. (1998). Entrainment by river chub *Nocomis micropogon* and smallmouth bass *Micropterus dolomieu* on cylinders. *Journal of Experimental Biology*, 201, 2403-2412.
- Wolter, C., Arlinghaus, R. (2003). Navigation impacts on freshwater fish assemblages: the ecological relevance of swimming performance. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 13(1), 63-89. doi:10.1023/A:1026350223459
- Wu, S., Rajaratman, N., Katopodis, C. (1999). Structure of flow in vertical slot fishways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(4), 351-360. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(1999)125:4(351)

