

Análisis del comportamiento de diferentes especies piscícolas en una escala de peces de hendidura vertical

María Bermúdez, Jerónimo Puertas, Luis Cea, Luis Pena*

Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente (GEAMA), Universidad de A Coruña

**Autor responsable, correo electrónico: mbermudez@udc.es*

Álvaro Rodríguez, Juan Rabuñal

Departamento de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, Universidad de A Coruña

Luis Balairón, Ángel Lara, Enrique Aramburu, Felipe Morcillo, Miriam Castillo

Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX (CEH-CEDEX)

1 Introducción

La libre circulación de las poblaciones piscícolas a través de obras de ingeniería como presas o azudes es una necesidad imperiosa para la conservación de las especies migradoras. Los dispositivos de remonte como las escalas de peces de hendidura vertical permiten a los peces superar estos obstáculos, restaurando la conectividad longitudinal del cauce. A diferencia de otros tipos de escalas de peces, estas estructuras hidráulicas presentan una serie de características ventajosas de cara al remonte de los migradores: pueden soportar grandes variaciones de caudal, proporcionan un camino de ascenso no tortuoso y zonas de descanso a los migradores y permiten que éstos elijan la profundidad de natación (Clay, 1995). Sin embargo, estas estructuras también pueden constituir una barrera para los peces migradores, especialmente para especies con baja capacidad natatoria. Para evitar que esto suceda, las escalas de peces de hendidura vertical deben diseñarse de acuerdo con las necesidades de las especies objetivo.

No obstante, los peces se enfrentan a un entorno hidrodinámico complejo cuando remontan una escala de hendidura vertical, y poco se sabe acerca de su comportamiento en estas condiciones. Características hidráulicas tales como las distribuciones de velocidad y de turbulencia parecen tener influencia en la eficacia de los dispositivos, pero la respuesta de los peces a variaciones de estos parámetros no está bien documentada. Además, esta falta de conocimiento es especialmente notable para ciertas familias de peces como los ciprínidos, y son necesarios más estudios que tengan en cuenta los movimientos y el comportamiento de estas especies de cara a desarrollar criterios de diseño de escalas de peces.

El objetivo del presente estudio es analizar el comportamiento de distintas especies piscícolas en estos ambientes artificiales y explorar sus implicaciones en el desarrollo de nuevos diseños de escalas de peces. Como varios autores han señalado (Kemp et al., 2006; Silva et al., 2009), los estudios de laboratorio en condiciones controladas constituyen excelentes oportunidades para conocer mejor el comportamiento de los peces. En este caso, se han realizado una serie de ensayos en un modelo a escala real (1:1) de una escala de hendidura vertical, con diferentes especies de ciprínidos y salmónidos. Uno de los retos principales del estudio es realizar un seguimiento completo de la trayectoria de los ejemplares durante el ascenso con una técnica no intrusiva. Para ello, se ha utilizado una nueva técnica basada en el empleo de una red de neuronas artificial y técnicas de visión artificial. De esta forma, se ha reconstruido la trayectoria de los ejemplares en la escala para su posterior análisis.

2 Materiales y métodos

2.1 Dispositivo experimental

Los ensayos se han llevado a cabo en un modelo experimental de una escala de peces de hendidura vertical a escala real (1:1) situado en el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX (CEH-CEDEX) (Figura 1). La

estructura de la escala de peces está formada por un canal rectangular de 20 m de largo, 1.5 m de ancho y 1 m de profundidad, y contiene 11 piscinas, con las dimensiones geométricas que se detallan en la Figura 2. En la parte inferior del canal, el modelo incorpora un recinto de aclimatación en el que se introducen los peces previamente a la experimentación. La pendiente de la escala durante los ensayos es del 7.5 % y el caudal se fija en 250 l/s.



Figura 1 Modelo experimental de la escala de peces (izquierda) y detalle de la red de cámaras instalada en el modelo (derecha).

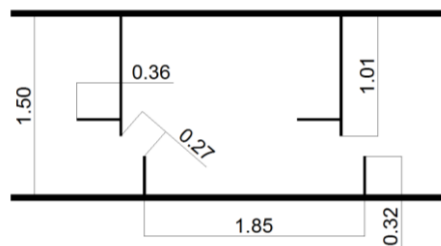


Figura 2 Dimensiones geométricas de las piscinas (m) y configuración de los deflectores.

Para poder seguir a los peces durante el ascenso, se utiliza un sistema de cámaras de circuito cerrado. En total se emplean 29 cámaras con una óptica de 180°, que cubren las 7 piscinas situadas más aguas arriba (4 cámaras por piscina y una adicional en la salida) y que se fijan al canal mediante una serie de estructuras de aluminio. Las cámaras se protegen mediante carcasas herméticas de metacrilato, ya que se utilizan parcialmente sumergidas en el agua (para el caudal de 250 l/s). La disposición de las cámaras con sus correspondientes estructuras de fijación se muestra en la Figura 1.

Para la adquisición de los datos, se utiliza un sistema robusto con gran capacidad de almacenaje y con capacidad para sincronizar la grabación en todas las cámaras con una precisión de 1/25 segundos. Con este propósito, cada cámara está conectada a un videograbador de gran capacidad (500Gb) y se dispone de un sistema de sincronización para el manejo remoto simultáneo de todos los grabadores.

También se dispone de infraestructura para visualizar la grabación de las diferentes cámaras. De esta forma, un único observador puede supervisar todo un experimento y controlar el proceso de adquisición de datos. El sistema de visionado de las imágenes está formado por 4 interconectores (quads), un multiplexor (mux) y un monitor de televisión de 27 pulgadas. Los quads recogen todas las señales de vídeo de las cámaras y el mux permite seleccionar dichas señales de vídeo para visualizarlas en el monitor. Cada quad dispone de 8 entradas para video grabadores y el mux consta de 4 entradas para quads.

Además, para poder acceder a los datos de los discos duros, se ha diseñado una infraestructura de red mediante la que todos los discos están conectados a un ordenador central, que está también conectado al monitor. Se utilizan 2 concentradores (switches) para conseguir las 29 conexiones para los videograbadores. El esquema global de la infraestructura se muestra en la Figura 3.

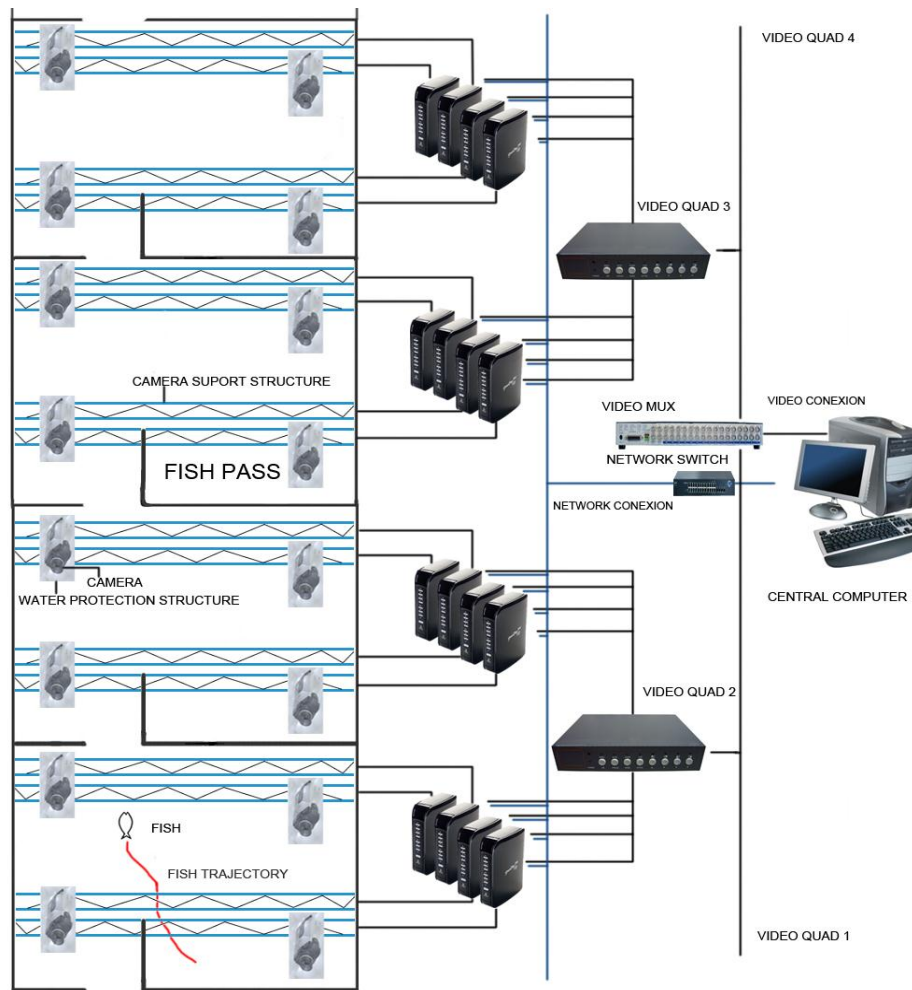


Figura 3 Esquema global de la infraestructura de adquisición de datos.

2.2 Ensayos

Se han realizado ensayos con tres especies diferentes de peces: trucha común (*Salmo trutta*), boga del Tajo (*Pseudochondrostoma polylepis*) y barbo común (*Luciobarbus bocagei*). Los ejemplares de trucha y boga utilizados en los ensayos proceden de la piscifactoría de Uña (Cuenca) y de la piscifactoría de la Escuela de Ingenieros de Montes de la Universidad Politécnica de Madrid, respectivamente. Por su parte, los ejemplares de barbo fueron capturados en el río Cofio, afluente del río Alberche, en las proximidades de San Martín de Valdeiglesias (Madrid).

Los experimentos se llevan a cabo el 3 de febrero de 2010 (trucha), el 6 de mayo de 2010 (boga) y el 20 de mayo de 2010 (barbo), entre las 11:00 y las 15:00 horas. La temperatura del agua durante los experimentos es de 14.4°C, 18.4°C y 18.9°C, respectivamente; y el caudal se mantiene constante a 250 l/s. En cada ensayo, se introducen grupos de 20-30 ejemplares en el recinto situado en la parte inferior de la escala y se les permite remontar por su propia voluntad, sin forzar su ascenso. Los ensayos se limitan únicamente al canal de la escala, no contemplándose la entrada y salida del dispositivo.

2.3 Análisis del comportamiento de los ejemplares

Para extraer la trayectoria seguida por el pez a partir de las imágenes del sistema de grabación se utiliza una técnica basada en el uso de redes neuronales y técnicas de visión artificial. En esta sección se analiza brevemente dicha técnica, cuya descripción completa puede encontrarse en Rodríguez et al. (2011). Posteriormente, se describe el procesado de los datos así obtenidos, para calcular otras variables de interés para el análisis del comportamiento del pez, como las velocidades y aceleraciones desarrolladas por los individuos.

El primer paso de la técnica es calibrar las cámaras y crear un modelo proyectivo para la integración de las mediciones en un espacio de coordenadas común con una escala real. Para obtener una medición real de la posición del pez a partir de las imágenes grabadas por las diferentes cámaras debe calcularse la transformación necesaria entre las coordenadas en píxeles de cada imagen y las coordenadas globales en una escala real. En una primera fase, se calculan los parámetros necesarios para corregir y escalar la imagen de forma separada para cada cámara y, posteriormente, la transformación proyectiva de cada cámara en un sistema de coordenadas común.

Una vez se ha definido esta transformación, se procede a segmentar las imágenes, es decir, a separar el área ocupada por el pez del resto de la imagen o fondo. Para ello, se utiliza una red de neuronas artificiales de tipo SOM (Self-Organizing Map). En la Figura 4 se muestra un ejemplo de la salida de la red neuronal SOM a partir de imágenes reales de los ensayos.



Figura 4 Diferentes imágenes reales obtenidas durante los ensayos y el resultado de su análisis con la red de neuronas artificial. El color blanco indica la detección de un pez.

Finalmente, se define el centroide del pez mediante técnicas de visión artificial, utilizando la clasificación de imagen generada previamente por la red de neuronas artificiales. Debido a las características de la imagen, donde el pez está muchas veces parcialmente ocluido y donde es previsible cierto nivel de ruido debido a la presencia de sombras, burbujas y reflejos, un aspecto fundamental es la respuesta del algoritmo ante detecciones parciales o anómalas.

Como resultado de este proceso, se obtiene la posición del pez en la escala a lo largo del tiempo, lo que conduce a la definición de un vector de posición de la forma:

$$\left[(X_{t_0}, Y_{t_0}), (X_{t_1}, Y_{t_1}), \dots, (X_{t_i}, Y_{t_i}), \dots, (X_{t_N}, Y_{t_N}) \right]_{\min(\Delta t)=0.04s} \quad (1)$$

donde X_{t_N} es la coordenada x del pez en el sistema de coordenadas global en el tiempo t_N e Y_{t_N} es la coordenada y del pez en el sistema de coordenadas global en el tiempo t_N . El incremento de tiempo mínimo entre dos posiciones consecutivas del pez se establece en 0.04 s, debido a la frecuencia de grabación seleccionada (25 Hz).

A partir del vector de posición, se obtienen las velocidades instantáneas observadas, considerando el vector de dirección entre dos posiciones consecutivas del pez y calculando su módulo de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$V_{obs} = \frac{\sqrt{(X_{t_i} - X_{t_{i-1}})^2 + (Y_{t_i} - Y_{t_{i-1}})^2}}{t_i - t_{i-1}} \quad (2)$$

Donde V_{obs} es el módulo de la velocidad observada del pez.

No obstante, estas velocidades observadas no son las velocidades de natación necesarias para cuantificar el esfuerzo real de ascenso del pez. Para calcular dichas velocidades es necesario relacionar las velocidades observadas con la velocidad del agua de la siguiente forma:

$$\bar{V}_{nat} = \bar{V}_{obs} - \bar{V}_a \quad (3)$$

Donde \overline{V}_{nat} es el vector velocidad de natación del pez, \overline{V}_{obs} es el vector velocidad observada del pez y \overline{V}_a es el vector velocidad del agua. Cabe señalar que la velocidad del agua en las piscinas se obtiene con un modelo numérico basado en las ecuaciones de aguas someras promediadas en profundidad bidimensionales. La validación experimental de este modelo en 16 diseños diferentes de escalas de peces se puede encontrar en Bermúdez et al. (2010).

Una vez conocidas las velocidades de natación, se calculan las aceleraciones instantáneas A_i de acuerdo con la siguiente expresión:

$$A_i = \frac{(\overline{V}_{nat})_{t_i} - (\overline{V}_{nat})_{t_{i-1}}}{t_i - t_{i-1}} \quad (4)$$

Por último, se comenta el uso que realizan los ejemplares de las distintas zonas en las piscinas, centrándose en las zonas de recirculación, caracterizadas por bajos niveles de turbulencia y velocidades. Este análisis relaciona el vector de posición de cada ejemplar (definido por la Ecuación (1)) con las características cinemáticas de las piscinas, y determina las zonas de flujo con mayor tiempo de tránsito y las zonas de descanso preferentes.

3 Resultados

3.1 Comportamiento general

En este apartado se realiza una descripción general del comportamiento de los distintos ejemplares en la escala durante los ensayos. En líneas generales, tanto las truchas como los barbos muestran una gran capacidad para negociar la escala. Los ejemplares evitan, en la medida de lo posible, los desplazamientos por la zona de flujo principal con altas velocidades y permanecen la mayor parte del tiempo en las zonas de recirculación, en las que las velocidades y los niveles de turbulencia son menores. A pesar de permanecer en estas zonas por largos períodos de tiempo en algunos casos, no se detectan signos de desorientación, y prácticamente no se observan descensos de piscinas.

No obstante, las bogas parecen experimentar mayores dificultades para remontar la escala. Al igual que las truchas y los barbos, permanecen la mayor parte del tiempo en las zonas de recirculación. Sin embargo, en este caso sí se observan descensos entre piscinas, que bien pueden atribuirse a problemas de orientación o al alcance de una situación de fatiga debido a la superación de sus capacidades natatorias.

Como se ha comentado anteriormente, la metodología se centra en identificar la trayectoria seguida por los peces para moverse de una piscina a la siguiente, y en el uso de las diferentes zonas dentro de las piscinas. En los experimentos con trucha común se analizan un total de 24 pasos entre piscinas y 54 períodos de descanso, correspondientes a ejemplares de tallas entre 190 y 264 mm. Por otra parte, se estudian 8 pasos de piscinas y 38 períodos de descanso para las bogas, con tallas en el rango 139-158 mm. Finalmente, se examinan 16 pasos de piscinas y 19 períodos de descanso en el caso de los barbos, con tallas variando entre 314 y 349 mm.

3.2 Zonas de recirculación

En esta sección se analiza el uso que realizan los ejemplares de las zonas de recirculación de las piscinas, caracterizadas por bajas velocidades y niveles de turbulencia. El gasto energético que realiza un pez para mantener la posición en estas zonas es menor (Pavlov et al. 2000), por lo que cuanto más limitada sea su capacidad natatoria, es esperable un mayor tiempo de permanencia en estas áreas. No obstante, la turbulencia de escala mayor que la talla del pez puede causar giros, desorientación y pérdida de equilibrio, afectando a sus desplazamientos (Odeh et al., 2002). En esta línea, observaciones visuales realizadas en grandes zonas de recirculación han mostrado que estas áreas, que en principio están diseñadas para ser zonas de descanso, pueden convertirse en trampas para los peces de pequeño tamaño, al incrementar drásticamente el tiempo de tránsito en cada piscina y comprometer así el remonte de la estructura (Tarrade et al., 2008).

Para llevar a cabo este análisis, es necesario definir exactamente el área ocupada por las zonas de recirculación en cada piscina. Se ha considerado que la separación entre el flujo principal y las regiones de recirculación coincide con el contorno de velocidad 0.4 m/s, y se ha verificado que en las áreas así definidas los niveles de

turbulencia son asimismo muy bajos (Figura 5). En base a las áreas delimitadas, se han definido 3 posibles zonas de descanso, denominadas A, B y C (Figura 6). Las áreas A y B están situadas en la zona de aguas arriba de la piscina, mientras que la C está situada aguas abajo. Cabe señalar que en este análisis se considera que un ejemplar utiliza un área de descanso cuando permanece prácticamente inmóvil en dicha área durante más de 5 s. Por tanto, no se tiene en cuenta el desplazamiento de los ejemplares por estas zonas para avanzar dentro de una piscina, evitando así la zona de flujo principal.

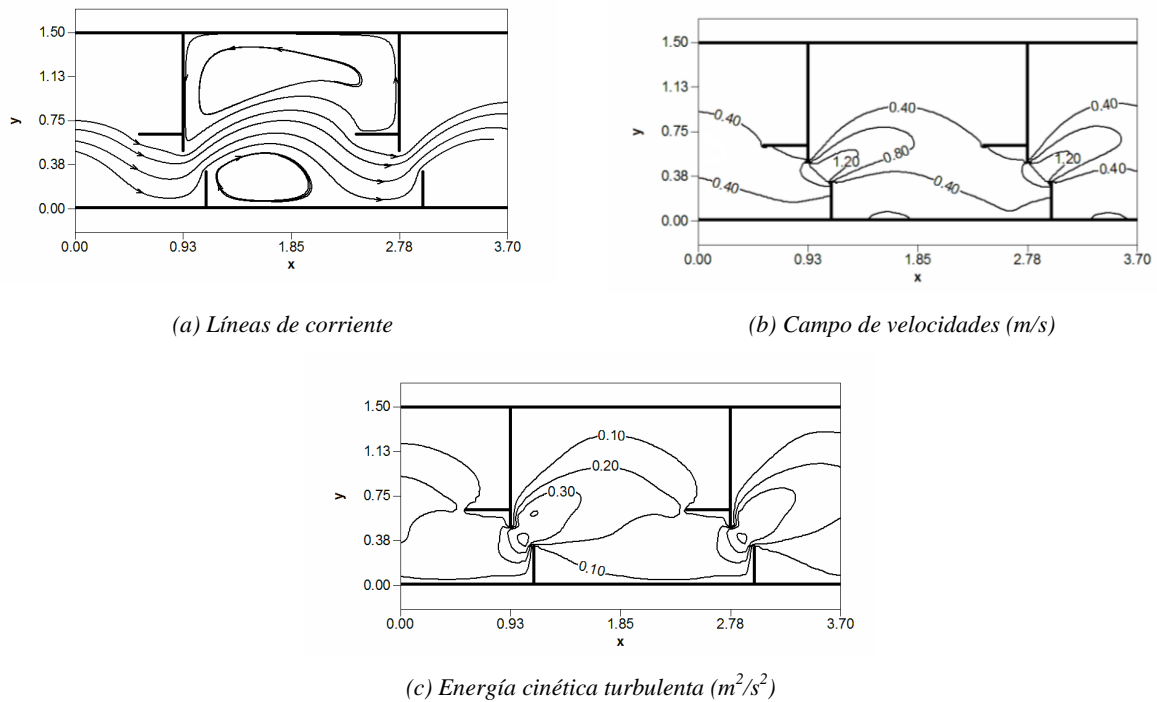


Figura 5 Patrón de flujo, campo de velocidades y campo de energía cinética turbulenta en las piscinas calculado con el modelo numérico bidimensional.

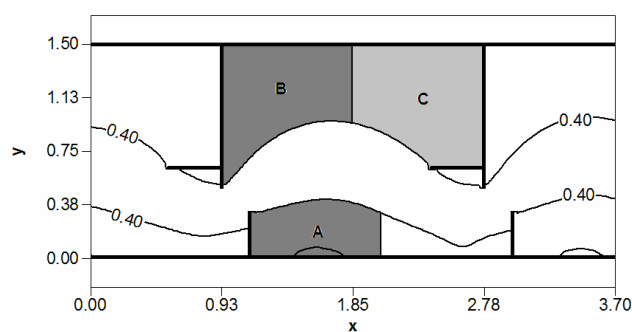


Figura 6 Definición de las regiones de recirculación. En gris oscuro las áreas situadas aguas arriba A y B, mientras que en gris claro el área C situada aguas abajo.

En el análisis de las trayectorias seguidas por los peces se observa como éstos no frecuentan de manera uniforme estas zonas de baja velocidad, sino que utilizan más frecuentemente la zona situada justo aguas abajo de la hendidura y detrás de deflector lateral pequeño (zona A). En el caso de la trucha común, la frecuencia de utilización de la zona A es de 57.4 %, frente a un 42.6 % de la zona B, con valores medios de permanencia de 411 y 413 s, respectivamente. Los ejemplares no permanecen en la zona C más de 5 s de manera continua, por lo

que se considera que no utilizan esta zona de descanso. En el caso de las bogas, únicamente se observan descansos en la zona A con un tiempo medio de permanencia de 340 s, y los ejemplares apenas utilizan las zonas B y C. Por último, la frecuencia de utilización de los barbos de las zonas A y B es de 57.9 % y 42.1 %, respectivamente, con valores medios de permanencia de 246 s y 450 s. Al igual que en el caso de la trucha común y la boga, los ejemplares no permanecen en la zona C más de 5 s de manera continua, por lo que se considera que no utilizan esta zona de descanso.

Como se muestra en la Tabla 1, los valores de desviación típica para los tiempos de descanso son muy elevados, para todas las especies consideradas. En el caso de las truchas, se han analizado descansos de tan sólo 23 s frente a descansos que alcanzan los 2053 s. De igual forma, se observan descansos en el rango 14 - 1795 s y 7 s - 1668 s en las bogas y los barbos, respectivamente. A pesar de los altos tiempos de permanencia alcanzados en algunos casos, no se observan signos de desorientación en los ejemplares de trucha y barbo, que continúan su ascenso sin problemas apreciables al abandonar estas áreas. En el caso de las bogas, sí se observan descensos de piscinas, que podrían ser atribuibles a esta causa.

El porcentaje de utilización de las zonas A y B es muy similar para la trucha y el barbo. En el caso de la trucha, la distribución de tiempos de permanencia entre las dos áreas es asimismo muy similar. Aunque los ejemplares de barbo ensayados también utilizan más frecuentemente la zona A para descansar, el tiempo de permanencia en esta zona es menor que en la zona B. Por último, los ejemplares de bogas ensayados utilizan exclusivamente la zona A.

Tabla 1 Utilización de las zonas de descanso por los ejemplares de las tres especies durante los ensayos. Nota: σ es la desviación estándar.

Especie	Frecuencia de uso (%)			Tiempo de descanso (s)							
	A	B	C	A		B		C		Global	
				Promedio	σ	Promedio	σ	Promedio	σ	Promedio	σ
Trucha	57.4	42.6	0	411	424	413	406	0	-	412	412
Boga	100	0	0	340	340	0	-	0	-	340	340
Barbo	57.9	42.1	0	246	300	450	579	0	-	332	437

En consecuencia, las regiones de recirculación situadas en la parte de aguas arriba de las piscinas parecen jugar un papel importante en el remonte de los peces. Más específicamente, la zona situada aguas abajo del deflector pequeño presenta una frecuencia de utilización muy elevada por las tres especies estudiadas. Por el contrario, los tiempos de permanencia en las regiones de recirculación situadas aguas abajo son mínimos (prácticamente no son empleadas por los peces).

3.3 Pasos de hendidura

En esta sección se comentan los resultados obtenidos en relación con los pasos entre piscinas grabados durante los ensayos. Cabe señalar que, dado el limitado número de pasos y la complejidad del fenómeno estudiado, los valores y parámetros obtenidos deben ser tomados con cautela, y únicamente se pretende analizar el potencial de la metodología propuesta.

En general, se pueden distinguir dos modos de ascenso, en función de la localización del ejemplar antes de atravesar la hendidura. En un primer modo (Figura 7a), los ejemplares están situados en la zona de recirculación A, y se desplazan desde allí para remontar la hendidura. En algunos casos, permanecen en la zona A un cierto período, mientras que en otros casos atraviesan esta zona sin descanso. En el modo 2 (Figura 7b), el ejemplar está situado en la zona de recirculación B, en la que generalmente ha permanecido un cierto tiempo antes de aproximarse al flujo principal y proceder a atravesar la hendidura.

En el caso de la trucha común, el modo de ascenso 1 es predominante (se observa en un 66.7 % de los pasos de piscinas analizados), generalmente con un período de descanso previo (en el 75% de los casos). Lo mismo ocurre en el caso de las bogas, que únicamente descansan en la zona de recirculación A. Por último, en los ensayos con barbos el modo de ascenso 1 también es predominante (se observa en un 81.2% de los pasos analizados), pero en este caso el pez no realiza generalmente un descanso previo en la zona A (únicamente en un 38.5 % de los casos).

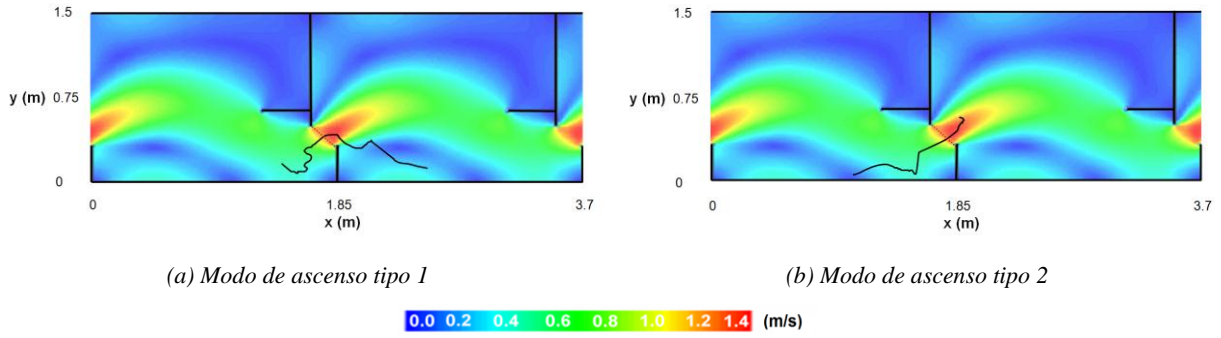


Figura 7 Ejemplo de dos trayectorias seguidas por los ejemplares de trucha común, proyectadas sobre el mapa de velocidad del agua.

Una vez definida la trayectoria seguida por los ejemplares, se ha calculado su velocidad observada, su velocidad de natación y su aceleración, tal y como se describe en el apartado 2.3. En la Figura 8 se muestra un ejemplo de los resultados obtenidos, en los que se representan las velocidades en módulo y las aceleraciones en función de la distancia recorrida y del tiempo empleado.

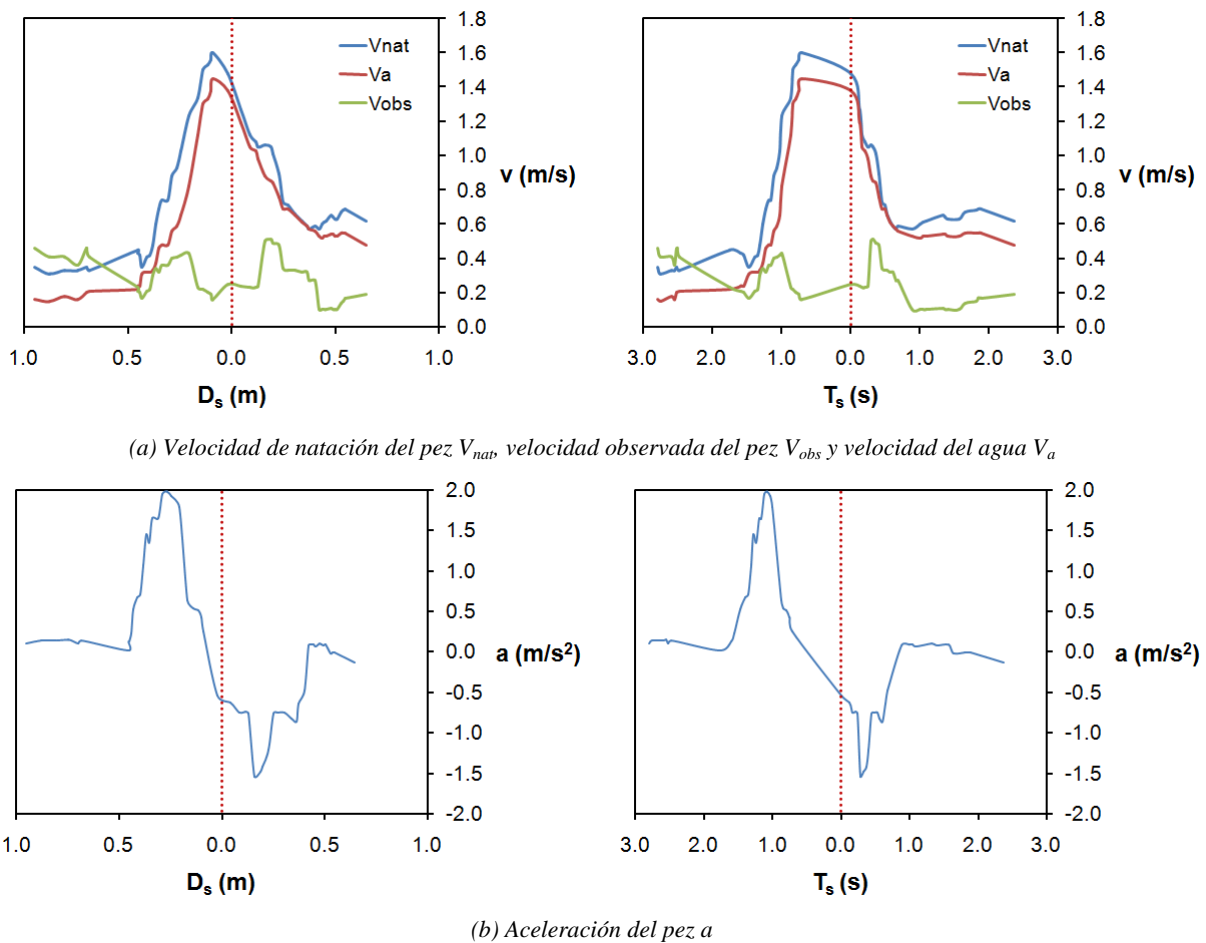


Figura 8 Velocidades y aceleraciones calculadas para el pez que sigue la trayectoria del modo de ascenso I en la Figura 7. Nota: D_s es la distancia recorrida con respecto a la sección de la hendidura y T_s es el tiempo empleado con respecto al paso por la sección de la hendidura.

Los valores promedio para la velocidad de natación y la aceleración máximas, así como su desviación típica, se muestran en la Tabla 1. Las velocidades máximas de natación se alcanzan en la zona de la hendidura, debido a las altas velocidades de agua con las que se enfrenta en pez. En el caso de la trucha común, la velocidad máxima media es de 1.51 m/s, con una desviación típica de 0.21 m/s. Si se expresa la velocidad máxima de natación en función de la longitud corporal (LC) de los distintos ejemplares, se obtiene un rango de velocidades máximas de natación en los pasos de entre 4.7 LC/s y 8.7 LC/s. Para las bogas, la velocidad de natación máxima promedio es de 1.43 m/s con una desviación típica de 0.23 m/s, y las velocidades de natación máximas varían entre 7.7 y 12.5 LC/s. En el caso de los barbos, la velocidad máxima media es de 1.51 m/s, con una desviación típica de 0.27 m/s. En este caso, si se expresan estas velocidades en función de las longitudes corporales, se obtiene un rango de variación de 3.0 - 5.9 LC/s.

Tabla 2 Velocidad de natación y aceleración máximas promedio para las distintas especies.

	Velocidad de natación (m/s)		Aceleración (m/s ²)	
	Máximo promedio	Desviación típica	Máximo promedio	Desviación típica
Trucha común	1.51	0.21	1.11	0.68
Boga	1.43	0.23	1.22	0.87
Barbo	1.51	0.27	1.04	0.60

Estos resultados son coherentes con las observaciones realizadas por otros autores en relación con las velocidades punta de salmónidos y ciprínidos. Tanto en los ensayos con trucha común como en los de barbos, no se supera el valor de 10 LC/s propuesto por Bainbridge (1960) o Cowx (1998) como regla general para la velocidad máxima. En el caso de los barbos los valores son además ligeramente inferiores a los obtenidos para la trucha común, lo cual parece razonable dada la menor capacidad natatoria de los salmónidos en comparación con los ciprínidos. Los valores tan elevados de velocidades en las bogas (hasta 12.5 LC/s), muy superiores al rango de velocidad punta entre 4 y 9 LC/s propuesto por Webb (1975) para ciprínidos, podrían explicar las dificultades mostradas por los ejemplares para negociar la escala.

4 Conclusiones

En este estudio se propone una metodología para analizar el comportamiento de los peces en un modelo de una escala de peces de hendidura vertical. La metodología, que utiliza una red de neuronas artificiales y técnicas de visión artificial, se aplica a tres ensayos diferentes con trucha común, boga del Tajo y barbo común, respectivamente. En los ensayos, la metodología permitió la reconstrucción de sus trayectorias y la identificación de las zonas realmente empleadas por los peces. Además, fue posible calcular sus velocidades y aceleraciones al pasar de una piscina a la siguiente.

En consecuencia, los resultados muestran el potencial de la metodología para explorar las implicaciones del comportamiento de las distintas especies piscícolas en el desarrollo de nuevos diseños de escalas de peces. Aunque es necesaria más investigación, esta aproximación puede contribuir a evaluar la respuesta de los peces a diferentes características hidráulicas, definir los posibles factores clave en el remonte y mejorar los modelos existentes para predecir la eficiencia de los dispositivos. Esencialmente, los resultados proporcionados por esta metodología pueden facilitar el desarrollo de curvas de respuesta que relacionen características hidráulicas como velocidades o tensiones de Reynolds y posibles efectos biológicos como la aparición de fenómenos de desorientación o la disminución de la eficiencia del dispositivo. De esta forma, los resultados obtenidos pueden contribuir al desarrollo de criterios de diseño más adaptados a la realidad de estos dispositivos.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento al Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), al Ministerio de Educación por la concesión de la beca FPU con referencia AP2009-2070 y a la Dirección Xeral de Investigación, Desenvolvemento e Innovación de la Xunta de Galicia por los proyectos con referencia 08TMT005CT y 10MDS014CT.

Referencias

- Bainbridge, R. (1960). Speed and stamina in three fish. *J. Exp. Biol.* 37: 129-153.
- Bermúdez, M., Puertas, J., Cea, L., Pena, L., Balairón, L. (2010). Influence of pool geometry on the biological efficiency of vertical slot fishways. *Ecol. Eng.* 36: 1355-1364.
- Clay, C. H. (1995). *Design of Fishways and Other Fish Facilities*. Lewis Publishers, CRC Press. Boca Raton, Florida
- Cowx, I. G. (1998). Fish passage facilities in the UK: issues and options for future development. Jungwirth, M., Schmutz, S. and Weiss, S. (eds), *Fish migration and fish bypasses: Fishing New Books*, Blackwell Science Ltd. Publisher.
- Kemp, P.S., Gessel, M.H., Sandford, B.P., Williams, J.G. (2006). The behaviour of Pacific salmonid smolts during passage over two experimental weirs under light and dark conditions. *River Res. Appl.* 22(4): 429-440.
- Odeh, M., J. F. Noreika, A. Haro, A. Maynard, T. Castro-Santos, Cada, G. F. (2002). Evaluation of the effects of turbulence on the behavior of migratory fish, Report 2000-057-00 to Bonneville Power Administration. Portland, OR.
- Pavlov, D.S., Lupandin, A.I., and Skorobogatov, M.A. (2000). The effects of flow turbulence on the behavior and distribution of fish. *J. Ichthyol.* 40: S232-S261.
- 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: 291-301.
- Silva, A. T., J. M. Santos, A. C. Franco, M. T. Ferreira, Pinheiro, A. N. (2009). Selection of Iberian barbel *Barbus bocagei* (Steindachner, 1864) for orifices and notches upon different hydraulic configurations in an experimental pool-type fishway. *Journal of Applied Ichthyology* 25:173-177.
- Tarrade, L., A. Texier, L. David, Larinier, M. (2008). Topologies and measurements of turbulent flow in vertical slot fishways. *Hydrobiologia* 609:177-188.
- Webb, P. W. (1975). Hydrodynamics and energetics of fish propulsion. *Bulletins of the Fisheries Research Board of Canada*, 190, 158 pp.