



Departamento de Métodos Matemáticos y de Representación

Programa de doctorado en Ingeniería Civil

TESIS DOCTORAL

Evaluación hidráulica y biológica de diseños de
escalas de peces de hendidura vertical para
especies de baja capacidad natatoria

AUTORA: María Bermúdez Pita

DIRECTORES: Jerónimo Puertas Agudo

Luis Cea Gómez

A Coruña, abril de 2013

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría mostrar en estas líneas mi agradecimiento a todas las personas e instituciones que han contribuido al desarrollo de este trabajo.

En primer lugar, doy las gracias a mis directores de tesis, Jerónimo Puertas y Luis Cea, por su inestimable orientación y apoyo durante estos años. A ambos agradezco la oportunidad que me han brindado al incluirme en su equipo de trabajo y la confianza que siempre han depositado en mí.

Su ayuda me ha permitido ser beneficiaria desde 2010 de una beca del Programa de Formación del Profesorado Universitario (FPU-AP2009-2070) concedida por el Ministerio de Educación, Cultura y Deporte para la realización de esta tesis. Este programa también ha financiado mi estancia de investigación en la Universidad de Delft (Países Bajos).

Quiero agradecer al Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX y a su personal su colaboración en el estudio biológico. Asimismo, al grupo RNASA de la Universidad de A Coruña, y en especial a Juan Rabuñal, Álvaro Rodríguez y Ángel Rico, su colaboración en esta parte del trabajo.

También me gustaría mencionar al profesor Luis Pena, cuya tesis he consultado en muchas ocasiones, por su siempre buena disposición a ayudarme.

Deseo expresar mi gratitud a todos los compañeros y amigos del GEAMA y de la escuela, particularmente a Inés, Marta, Bruño y Nacho, con los que además de haber trabajado y aprendido mucho, he pasado muy buenos momentos.

Mi agradecimiento a Iván, por su ayuda con la portada y la maquetación, y por los agradables ratos que me han permitido desconectar de la tesis.

Muchas gracias a mis amigos de siempre, con los que he podido contar en todo momento.

Y por último, mi agradecimiento más profundo para mi familia, por su cariño y apoyo.

Gracias a todos

RESUMEN CORTO

CASTELLANO

En la presente tesis se evalúan distintos diseños de escalas de peces de hendidura vertical desde un punto de vista tanto hidráulico como biológico. La caracterización hidráulica está basada en cuatro parámetros: el patrón de flujo, la velocidad media en la hendidura, el calado en las piscinas y la potencia disipada por unidad de volumen. Mediante el uso complementario de la modelización numérica y física, se estudian estos parámetros en 33 diseños y se analiza su variación con las dimensiones geométricas de la escala.

La evaluación biológica analiza si estas propiedades hidrodinámicas se ajustan a los requisitos de las especies objetivo. Por una parte, se desarrolla una metodología para estudiar el comportamiento de distintas especies en un modelo físico de una escala de hendidura vertical a tamaño real. La metodología se aplica a cinco ensayos diferentes en los que, a partir de grabaciones en vídeo de los movimientos de los peces, se reconstruyen sus trayectorias. Finalmente, se define una metodología para evaluar la bondad de un diseño desde un punto de vista biológico, aplicando restricciones de velocidad, turbulencia y calado. Para facilitar su utilización, se diseña una aplicación informática que incorpora los resultados obtenidos.

ENGLISH

In the present PhD dissertation, different designs of vertical slot fishways are evaluated considering both hydraulic and biological criteria. The hydraulic characterization is based on four parameters: the flow pattern, the average velocity in the slot, the water depth and the power dissipation per unit volume. By complementary use of numerical and physical modeling, these parameters are studied in 33 vertical slot fishway designs, and their dependence on the geometric dimensions of the fishway is analyzed.

The biological evaluation analyzes the agreement between these hydraulic properties and the requirements of the target species. On the one hand, this study develops a methodology to analyze fish behavior in an experimental full-scale vertical slot fishway model. The methodology is applied to five different experiments in which, starting from video recordings of the fish movements, the fish trajectories are reconstructed. Finally, this work defines a methodology to analyze the biological efficiency of different designs of vertical slot fishways, applying velocity, turbulence and depth restrictions. In order to facilitate the application of this methodology, a computer application which brings together all the results obtained is presented.

GALEGO

Na presente tese avalíanse distintos deseños de escalas de peixes de fenda vertical desde un punto de vista tanto hidráulico como biolóxico. A caracterización hidráulica está baseada en catro parámetros: o patrón de fluxo, a velocidade media na fenda, o calado nas piscinas e a potencia disipada por unidade de volume. Mediante o uso complementario da modelización numérica e física, estúdanse estes parámetros en 33 deseños e analízase a súa variación coas dimensións xeométricas da escala.

A avaliación biolóxica analiza se estas propiedades hidrodinámicas se axustan aos requisitos das especies obxectivo. Por unha banda, desenvólvese unha metodoloxía para estudar o comportamento de distintas especies nun modelo físico dunha escala de fenda vertical a tamaño real. A metodoloxía aplícase a cinco ensaios diferentes nos que, a partir de gravacións en vídeo dos movementos dos peixes, reconstrúense as súas traxectorias. Finalmente, defínese unha metodoloxía para avaliar a bondade dun deseño desde un punto de vista biolóxico, aplicando restricións de velocidade, turbulencia e calado. Para facilitar a súa utilización, deseñase unha aplicación informática que incorpora os resultados obtidos.

ÍNDICE
CAPÍTULO 1. RESUMEN Y CONCLUSIONES (TRILINGÜE)1

CASTELLANO

1.1	INTRODUCCIÓN	1
1.2	RESUMEN	2
1.3	CONCLUSIONES	4
1.3.1	<i>Estudio hidrodinámico</i>	4
1.3.2	<i>Estudio biológico</i>	5
1.3.3	<i>Evaluación general de los diseños</i>	6

ENGLISH

1.1	INTRODUCTION.....	9
1.2	SUMMARY	10
1.3	CONCLUSIONS	12
1.3.1	<i>Hydrodynamic study</i>	12
1.3.2	<i>Biological study</i>	13
1.3.3	<i>General evaluation of the designs</i>	14

GALEGO

1.1	INTRODUCCIÓN	15
1.2	RESUMO.....	16
1.3	CONCLUSIÓNS	18
1.3.1	<i>Estudo hidrodinámico</i>	18
1.3.2	<i>Estudo biolóxico</i>	19
1.3.3	<i>Avaliación xeral dos deseños</i>	20

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL CONOCIMIENTO.....23

2.1	INTRODUCCIÓN	23
2.2	BASES BIOLÓGICAS	24
2.2.1	<i>Movimientos migratorios</i>	24
2.2.2	<i>Efecto barrera</i>	24
2.2.3	<i>Capacidad de natación</i>	31
2.3	DISPOSITIVOS DE FRANQUEO DE OBSTÁCULOS	38
2.3.1	<i>Consideraciones generales de diseño</i>	38
2.3.2	<i>Tipología</i>	43

2.4	ESTUDIOS HIDRÁULICOS EN ESCALAS DE HENDIDURA VERTICAL.....	49
2.4.1	<i>Estudios en modelo físico</i>	50
2.4.2	<i>Estudios en modelo numérico</i>	65
2.5	ESTUDIOS BIOLÓGICOS EN ESCALAS DE PECES.....	71
2.5.1	<i>Técnicas de seguimiento</i>	72
2.5.2	<i>Estudios experimentales en modelo físico</i>	74
CAPÍTULO 3. MODELIZACIÓN NUMÉRICA.....		83
3.1	INTRODUCCIÓN.....	83
3.2	DISEÑOS DE ESCALAS DE HENDIDURA VERTICAL.....	84
3.3	ECUACIONES.....	86
3.3.1	<i>Ecuaciones hidrodinámicas</i>	86
3.3.2	<i>Modelo de turbulencia</i>	89
3.3.3	<i>Fricción de fondo</i>	92
3.3.4	<i>Contorno pared</i>	93
3.3.5	<i>Esquemas numéricos</i>	93
3.4	CALIBRACIÓN DEL MODELO.....	94
3.4.1	<i>Convergencia en malla</i>	94
3.4.2	<i>Condiciones de contorno</i>	96
3.4.3	<i>Modelo de turbulencia</i>	97
3.4.4	<i>Fricción de fondo</i>	101
3.4.5	<i>Esquema numérico</i>	101
3.5	OBSERVACIONES FINALES.....	103
CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....		105
4.1	INTRODUCCIÓN.....	105
4.2	ESTUDIO HIDRODINÁMICO.....	106
4.2.1	<i>Dispositivo experimental</i>	106
4.2.2	<i>Ensayos</i>	108
4.3	ESTUDIO BIOLÓGICO.....	111
4.3.1	<i>Dispositivo experimental</i>	111
4.3.2	<i>Ensayos</i>	115
4.3.3	<i>Técnica de visión artificial desarrollada</i>	117

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	123
5.1 INTRODUCCIÓN	123
5.2 ESTUDIO HIDRODINÁMICO.....	123
5.2.1 <i>Patrones de flujo</i>	124
5.2.2 <i>Velocidad media en la hendidura</i>	129
5.2.3 <i>Curvas de descarga</i>	137
5.2.4 <i>Turbulencia</i>	146
5.2.5 <i>Observaciones finales</i>	152
5.3 ESTUDIO BIOLÓGICO	153
5.3.1 <i>Comportamiento general</i>	154
5.3.2 <i>Zonas de recirculación</i>	156
5.3.3 <i>Pasos de hendidura</i>	159
5.3.4 <i>Observaciones finales</i>	164
5.4 EVALUACIÓN GENERAL DE LOS DISEÑOS.....	165
5.4.1 <i>Metodología</i>	165
5.4.2 <i>Aplicación de la metodología</i>	171
5.4.3 <i>Aplicación informática</i>	177
5.4.4 <i>Observaciones finales</i>	183
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	185
APÉNDICE 1.....	197
1.1 TRUCHA COMÚN.....	198
1.1.1 <i>Ensayo del 3 de febrero de 2010</i>	198
1.2 BOGA DEL TAJO	216
1.2.1 <i>Ensayo del 6 de mayo de 2010</i>	216
1.2.2 <i>Ensayo del 14 de abril de 2011</i>	222
1.3 BARBO COMÚN.....	226
1.3.1 <i>Ensayo del 20 de mayo de 2010</i>	226
1.3.2 <i>Ensayo del 19 de mayo de 2011</i>	239
APÉNDICE 2.....	263

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Evolución del número de capturas en ríos salmoneros gallegos entre 1975 y 2010.....	30
Figura 2 Influencia de la temperatura del agua en la velocidad máxima de natación (izquierda) y en el tiempo de permanencia a dicha velocidad máxima (derecha). Redibujado de Larinier et al. (1998) a partir de Beach (1984).	33
Figura 3 Distancia máxima (en longitudes corporales) basada en la Ecuación 2.1, en agua quieta (A) y en presencia de flujo (B; los contornos indican la velocidad del flujo). Los datos se corresponden con la trucha arco iris <i>Oncorhynchus mykiss</i> (Bainbridge, 1960). Fuente: Castro-Santos, 2005.....	34
Figura 4 Curvas de fatiga para salmónidos y ciprínidos según el modelo propuesto por Elvira et al. (2008).....	35
Figura 5 Escala de la turbulencia comparada con el tamaño de un pez. (Odeh et al., 2002).	37
Figura 6 Principales tipos de dispositivos de remonte de obstáculos para peces migratorios.....	44
Figura 7 Río artificial en el río Gave de Pau en los Pirineos Atlánticos (Larinier et al., 1998)...	45
Figura 8 Diferentes tipos de rampas para peces, vista en perspectiva (Cowx y Welcomme, 1998).....	45
Figura 9 Escala de ralentizadores planos tipo Denil (izquierda) y tipo Alaska (derecha) (Odeh, 1999).....	46
Figura 10 Escala de depósitos sucesivos y diferentes configuraciones de los tabiques que conforman las piscinas (Odeh, 1999).....	47
Figura 11 Escalas de hendidura vertical. Diferentes configuraciones de los tabiques que conforman las piscinas: de simple o de doble hendidura (Odeh, 1999).....	48
Figura 12 Diseños experimentales y patrones de circulación (Rajaratnam et al., 1986).....	50
Figura 13 Detalle de los 18 diseños de escalas de hendidura vertical y patrones de circulación (Rajaratnam et al., 1992) [continúa]	52
Figura 14 [continuación] Detalle de los 18 diseños de escalas de hendidura vertical y patrones de circulación (Rajaratnam et al., 1992).....	53
Figura 15 Dimensiones de la configuración experimental del diseño 18, vista en planta (Wu et al., 1999).....	54
Figura 16 Patrones de circulación observados en el diseño 18: patrón 1 (izquierda) y patrón 2 (derecha). Línea continua para la circulación en las cercanías de la superficie, línea a trazos en las proximidades de la solera (Wu et al., 1999).	55
Figura 17 Campo de velocidades en las cercanías de la superficie del agua en el diseño 18, para	

So=10% y Q=31 l/s (Wu et al., 1999).....	56
Figura 18 Dimensiones en mm de los modelos de piscinas estudiados por Puertas et al. (2004).	57
Figura 19 Campos de velocidades horizontales en planos paralelos a la solera para el diseño T1, para dos situaciones experimentales: So=5.7%, Q=0.085 m ³ /s, h=35 cm (izquierda); So=10.054%, Q=0.105 m ³ /s, h=5 cm (derecha) (Puertas et al., 2004).....	58
Figura 20 Campos de velocidades horizontales en planos paralelos a la solera para el diseño T2, para dos situaciones experimentales: So=5.7%, Q=0.054 m ³ /s, h=25 cm (izquierda); So=10.054%, Q=0.075 m ³ /s, h=25 cm (derecha) (Puertas et al., 2004).....	58
Figura 21 Patrones de flujo en las piscinas, a) diseño T1, So=5.7%; y So=10.054% con Q _A <2.75; b) diseño T1, So=10.054% con Q _A >2.75. c) diseño T2 (Puertas et al., 2004)	59
Figura 22 Planos de velocidad en el diseño 18. a) S=5%, Q= 52 l/s, z=10 mm; b) S=5%, Q= 52 l/s, z=300 mm, c) S=10.5%, Q= 31.2 l/s, z= 10 mm, d) S=10.5%, Q= 31.2 l/s, z= 70 mm (Liu et al., 2006).....	60
Figura 23 Líneas de contorno de la energía cinética turbulenta (adimensionalizada) y filamento de máxima velocidad. a) S=5%, Q= 52 l/s, z=300 mm; b) S=10.5%, Q= 31.2 l/s, z=70 mm (Liu et al., 2006).....	53
Figura 24 Distribución de la velocidad media longitudinal en el chorro. a) S=5%, Q= 31.2 l/s, z=150 mm; b) S=10.5%, Q= 31.2 l/s, z=70 mm, c) perfil de la velocidad adimensional (Liu et al., 2006)	53
Figura 25 Características geométricas de una piscina (Tarrade et al., 2008).	62
Figura 26 Patrones de flujo en la escala para una pendiente del 10% y B=2.7 m y 2 m (Tarrade et al., 2008).	63
Figura 27 Relación entre la energía cinética turbulenta media en la piscina y la potencia disipada por unidad de volumen en Z=0.6 m (Tarrade et al., 2008).....	64
Figura 28 Patrones de flujo en la escala al introducir un cilindro para una pendiente del 10% y B=2.7 m y 2 m (Tarrade et al., 2008).....	64
Figura 29 Mallas numéricas para los diseños T1 y T2 (Cea et al., 2007b)	66
Figura 30 Dimensiones geométricas (m) y malla de cálculo de la escala de peces estudiada por Chorda et al. (2010) en modelo numérico.....	67
Figura 31 Distribución de velocidades en la hendidura: en la dirección del flujo principal (a), en la salida de la hendidura (b) y en la superficie (c) (Heimerl et al., 2008).	69
Figura 32 Patrón de flujo para diferentes posiciones de los elementos de guiado. Geometría original en el centro (Heimerl et al., 2008)	70
Figura 33 Patrón de flujo para diferentes longitudes de los elementos de guiado. Geometría	

original en el centro (Heimerl et al., 2008).....	70
Figura 34 Dimensiones geométricas de las piscinas y configuración de los deflectores (López, 2010).....	71
Figura 35 Detalle del chorro en la hendidura en modelo físico (izquierda) y numérico (derecha) (López, 2010).....	71
Figura 36 Disposición de antenas para la detección de peces con marcaje PIT-tag en la escala de peces de Roza Dam (río Yakima, Washington). Fuente: PTAGIS. The Columbia Basin PIT Tag Information System. Disponible en: www.ptagis.org (consultado en enero de 2013).....	73
Figura 37 Trayectorias esquemáticas seguidas por los juveniles: trayectoria A, 35%; trayectoria B, 33%; y trayectoria C, 11% (Guiny et al., 2005).	75
Figura 38 Malla de referencia utilizada para observar el comportamiento de los peces (Silva et al., 2010).....	77
Figura 39 Distribución del tiempo de tránsito del pez versus la componente horizontal de las tensiones de Reynolds en cada celda en $z=0.25h$, h es el calado medio de piscina. Adultos de pequeño tamaño (izquierda), adultos de mayor tamaño (derecha) (Silva et al., 2010).....	78
Figura 40 Localización de las tres principales zonas preferentes y orientación de los peces (Tarrade, 2007).	79
Figura 41 Eficacias locales de paso (E_L) obtenidas en los ensayos. Adaptado de Tarrade (2007).	79
Figura 42 Imagen de los vídeos grabados durante los ensayos (izquierda), zonas de descanso más frecuentemente utilizadas y modos de ascenso típicos de los ejemplares ensayados (Wang et al., 2010).....	80
Figura 43 Características geométricas de los diferentes diseños de piscina	85
Figura 44 Detalle de los elementos de guiado del flujo en los diferentes diseños.	86
Figura 45 Esquema de la geometría considerada en el modelo numérico. Las dimensiones se corresponden con el diseño D4_5.....	95
Figura 46 Detalle de la malla seleccionada para el diseño D4_5 tipo I (malla M1).	95
Figura 47 Velocidad longitudinal V_x (m/s) en el diseño D4_5 tipo I. Sección transversal $x=2.5$ m (izquierda), $x=3.3$ m (derecha), $Q=100$ l/s, $S=5\%$; origen de coordenadas x - y definido en la Figura 45.....	95
Figura 48 Líneas de corriente en el diseño D4_5 con $S=5\%$ para distintos caudales con el modelo de turbulencia de longitud de mezcla (figuras a y b) y el modelo de turbulencia k - ϵ (figuras	

c y d).	97
Figura 49 Velocidad longitudinal V_x (m/s) en dos secciones transversales con distintos caudales para los dos modelos de turbulencia, $S=5\%$, origen de coordenadas x-y definido en la Figura 45.	98
Figura 50 Velocidad longitudinal V_x (m/s) en dos secciones transversales con los dos modelos de turbulencia para distintos caudales, $S=5\%$, origen de coordenadas x-y definido en la Figura 45.	99
Figura 51 Campo de viscosidad turbulenta ν_t desarrollado en las piscinas en el diseño D4_5 con $S=5\%$ para distintos caudales con el modelo de longitud de mezcla.	100
Figura 52 Campo de viscosidad turbulenta ν_t desarrollado en las piscinas en el diseño D4_5 tipo I para $Q=100$ l/s y $S=5\%$ con el modelo de longitud de mezcla (arriba) y el modelo k- ϵ (abajo).	100
Figura 53 Campo de viscosidad turbulenta (m^2/s) en el diseño D4_10 tipo I con $S=5\%$	101
Figura 54 Influencia del esquema numérico en los campos de velocidades y calados. Diseño D4_5, $Q=100$ l/s, modelo de turbulencia k- ϵ	102
Figura 55 Canal de flujo en lámina libre del laboratorio de hidráulica de la E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de A Coruña.	107
Figura 56 Configuración de los deflectores en los tres diseños tipo estudiados.	107
Figura 57 Vista en planta de uno de los diseños ensayados y de los deflectores tipo II y III.	108
Figura 58 Esquema general de los ensayos. El número de piscinas N está indicado en la Tabla 9.	110
Figura 59 Sensor de calados (Wave Gauge Type 202)	110
Figura 60 Vista en planta del diseño D4_5 tipo I con los trazadores utilizados para definir el patrón de flujo mediante observación visual (izquierda) y vista en planta del diseño D2_2.5 tipo I (derecha).	111
Figura 61 Vista en planta del diseño D8_15 tipo II con los trazadores utilizados para definir el patrón de flujo mediante observación visual (izquierda) y vista en planta del diseño D8_10 tipo III (derecha).	111
Figura 62 Instalación experimental en el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX (CEH-CEDEX).	112
Figura 63 Dimensiones geométricas de las piscinas (m) y configuración de los deflectores.	112
Figura 64 Disposición de la red de cámaras instalada en el modelo con las correspondientes estructuras de soporte.	113
Figura 65 Imágenes tomadas durante los ensayos de las condiciones de grabación (a y b) y	

esquema de operación de cada cámara (c).....	113
Figura 66 Ubicación de una de las antenas en la hendidura de la escala y colocación de un microchip en un pez.....	114
Figura 67 Esquema global de la infraestructura de adquisición de datos	115
Figura 68 Especies de peces objeto del estudio	116
Figura 69 Integración las imágenes proyectadas de las 4 cámaras que forman una piscina. Cada polígono representa el campo de una cámara diferente.	118
Figura 70 Representación esquemática de la combinación de varias cámaras.	118
Figura 71 Diferentes imágenes reales obtenidas durante los ensayos (arriba) y el resultado de su análisis con la red de neuronas artificiales (abajo). El color blanco indica la detección de un pez.....	119
Figura 72 Imágenes segmentadas por la red de neuronas artificiales (columna izquierda), detección del pez (columna intermedia) y determinación del centroide (columna derecha).	119
Figura 73 Campo de velocidad del agua y líneas de corriente utilizadas para evaluar la velocidad de natación.	120
Figura 74 Posibles áreas de descanso A, B y C consideradas en este trabajo, delimitadas a partir del campo de velocidades y de energía cinética turbulenta en las piscinas. En línea discontinua la sección de la hendidura.....	121
Figura 75 Representación esquemática del patrón de flujo 1 (FP1) a partir de observación visual y líneas de corriente numéricas en dos de los diseños estudiados.	124
Figura 76 Representación esquemática del patrón de flujo 2 (FP2) a partir de observación visual y líneas de corriente numéricas en dos de los diseños estudiados.	125
Figura 77 Líneas de corriente numéricas en dos diseños tipo IV con igual cociente L/B.....	127
Figura 78 Definición de la dimensión geométrica B' en los diferentes diseños tipo de piscina.	127
Figura 79 Representación esquemática del patrón de flujo a partir de observación visual y líneas de corriente numéricas en un diseño con unas relaciones L/B y L/B' muy bajas (arriba) y en un diseño con unas relaciones L/B y L/B' muy elevadas (abajo).	128
Figura 80 Definición de la dimensión geométrica b' (izquierda) y del punto C de medida del calado en el centro de piscina en los ensayos experimentales (derecha).	129
Figura 81 Relación entre el calado en el centro de la piscina (h_C) y el calado medio en la siguiente hendidura aguas abajo (h_s) para los cuatro tipos de diseño. Resultados numéricos para S=5%.	122
Figura 82 Altura de la lámina de agua (wse) siguiendo una línea de corriente (arriba) y campo de	

altura de lámina (abajo) en el diseño D8_15 (tipo I) con pendiente S=5%, x= dirección longitudinal de la escala.....	131
Figura 83 Distribución sobre la recta 1:1 de la velocidad media en la hendidura calculada con el modelo numérico v_s (m/s) frente a la velocidad escalada experimental en la hendidura v_s^* (m/s).....	132
Figura 84 Variación del coeficiente C_{vs} en los diseños tipo I con B/b.....	133
Figura 85 Variación del coeficiente C_{vs} en los diseños tipo I con L/b.....	133
Figura 86 Variación del coeficiente C_{vs} en los diseños tipo I con L/b. Línea de tendencia numérica y experimental. RMSE: error cuadrático medio (Root Mean Squared Error)..	133
Figura 87 Variación del coeficiente C_{vs} en los diseños tipo I con L/b. Las líneas discontinuas delimitan el rango habitual del parámetro L/b.....	135
Figura 88 Variación de la velocidad media en la hendidura v_s con $\sqrt{2 \cdot g \cdot S \cdot L}$ para los 6 diseños tipo II, los 6 diseños tipo III y los 5 diseños tipo IV.....	136
Figura 89 Variación del caudal circulante Q con $\sqrt{g \cdot S \cdot L} \cdot b \cdot h_c$ para los 6 diseños tipo II, los 6 diseños tipo III y los 5 diseños tipo IV.....	143
Figura 90 Variación del coeficiente de descarga C_d en los distintos diseños tipo con L/b.....	144
Figura 91 Curvas de descarga para los distintos diseños en función de la ratio L/b.....	145
Figura 92 Distribución espacial de la tasa de disipación ϵ (m^2/s^3) y de la energía cinética turbulenta k (m^2/s^2) en el diseño D8_5, S=5%. Modelo numérico.....	150
Figura 93 Distribución espacial de la tasa de disipación ϵ (m^2/s^3) y de la energía cinética turbulenta k (m^2/s^2) en el diseño D4_10, S=5%. Modelo numérico.....	151
Figura 94 Distribución espacial de la tasa de disipación ϵ (m^2/s^3) y de la energía cinética turbulenta k (m^2/s^2) en el diseño D8_5 tipo I, S=10%. Modelo numérico.....	151
Figura 95 Distribución espacial de la tasa de disipación ϵ (m^2/s^3) y de la energía cinética turbulenta k (m^2/s^2) en el diseño D4_10 tipo I, S=10%. Modelo numérico.....	152
Figura 96 Líneas de corriente en las piscinas calculadas con el modelo numérico.....	154
Figura 97 Campo de velocidades y campo de energía cinética turbulenta en las piscinas calculado con el modelo numérico.....	154
Figura 98 Tasa de remonte obtenida en los ensayos en función de la especie y talla.....	156
Figura 99 Definición de las zonas de descanso, en función de su situación dentro de la piscina: áreas de descanso situadas aguas arriba (gris oscuro) y aguas abajo (gris claro).....	157
Figura 100 Ejemplo de dos trayectorias seguidas por los ejemplares de trucha común, proyectadas sobre el mapa de velocidad del agua.....	160

Figura 101 Imágenes captadas por las cámaras de vídeo durante los ensayos con trucha común, en las que se observa la orientación que generalmente adoptan los ejemplares en las zonas de descanso A y B. En línea discontinua el límite aproximado del área de descanso (Figura 99).....	161
Figura 102 Orientación habitual de los ejemplares ensayados en las zonas de descanso.	161
Figura 103 Velocidades y aceleraciones calculadas para el pez que sigue la trayectoria del modo de ascenso 1 en la Figura 100. 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.	162
Figura 104 Velocidades y aceleraciones calculadas para el pez que sigue la trayectoria del modo de ascenso 2 en la Figura 100. 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.	163
Figura 105 Campo de velocidades (m/s) (izquierda) y perfil de velocidades (derecha) a lo largo de una de las trayectorias más restrictivas en el diseño D4_10 tipo I.....	166
Figura 106 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 el dispositivo del estudio biológico experimental.	166
Figura 107 Curvas de fatiga para distintas tallas (200, 300 y 600 mm) de salmónidos y ciprínidos. Resultados de Elvira et al. (2008).....	168
Figura 108 Altura de la lámina de agua siguiendo una línea de corriente en el diseño D8_15 (tipo I) con una pendiente del 10%, x= dirección longitudinal de la escala.	170
Figura 109 Variación de la velocidad máxima adimensional U_{max}^* con la ratio entre la longitud de piscina L y la anchura de piscina B.....	174
Figura 110 Campo de velocidades (m/s) para los diseños D8_10 con la misma anchura de hendidura.	174
Figura 111 Captura de pantalla de la pestaña de diseño de la aplicación.	178
Figura 112 Esquema de funcionamiento de la aplicación.....	179
Figura 113 Ejemplo de salida de la aplicación en el modo de diseño. Las líneas continuas representan las restricciones de velocidad (a y b), la variación de la potencia disipada por unidad de volumen con la pendiente para el diseño seleccionado (c) y la relación entre el caudal y el calado en el centro de piscina (d). Los puntos representan las condiciones del flujo y las características de la escala.	180
Figura 114 Ejemplo de salida de la aplicación en el modo de verificación. Las líneas continuas	

representan las restricciones de velocidad (a y b), la variación de la potencia disipada por unidad de volumen con la pendiente para el diseño seleccionado (c) y la relación entre el caudal y el calado en el centro de piscina (d). Los puntos representan las condiciones del flujo y las características de la escala..... 181

Figura 115 Salida gráfica de la aplicación considerando el diseño del estudio biológico y las tres especies ensayadas. 182

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Peces españoles diádromos (anádromos y catádromos) y principales potamódromos. Se indica la categoría de peligro en España para las especies amenazadas (Blanco y González, 1992; Doadrio, 2002). Adaptado de Elvira et al. (1995).....	26
Tabla 2 Ecuaciones adimensionales de descarga para los modelos estudiados por Rajaratnam et al. (1986).....	51
Tabla 3 Ecuaciones adimensionales de descarga (Rajaratnam et al., 1992) para los modelos diferentes a los previamente estudiados en Rajaratnam et al., 1986.	54
Tabla 4 Velocidades máximas en las cercanías de la hendidura para diferentes escenarios experimentales (Wu et al., 1999).	56
Tabla 5. Ecuaciones de descarga para los dos diseños de escalas de hendidura vertical; entre paréntesis, coeficiente de correlación r^2 (Puertas et al., 2004).....	58
Tabla 6 Dimensiones geométricas de las piscinas en los 33 diseños estudiados en el modelo numérico.	85
Tabla 7 Características de las mallas M0, M1 y M2 y V_x max (m/s) (Figura 47) para el diseño D4_5 tipo I con caudal de 100 l/s y pendiente del 5%; origen de coordenadas x-y definido en la Figura 45.	96
Tabla 8 Comparación entre el calado en el centro de la segunda piscina (h_C) y el calado en el contorno de salida (h_{BC}) para el diseño D4_2.5, $Q=50$ l/s y $S=5\%$, variando la condición de contorno de salida. Nota: $D=h_{BC}-h_C$	96
Tabla 9 Dimensiones geométricas de los 28 diseños estudiados experimentalmente y rango de caudales ensayado. Las dimensiones de las piscinas están dadas en función de la anchura de hendidura, b. Nota: N=número de piscinas, Q_{min} =caudal mínimo ensayado, Q_{max} = caudal máximo ensayado.	109
Tabla 10 Patrones de flujo (FP) en los 33 diseños estudiados. L/B y L/B' son los cocientes entre la longitud y la anchura de las piscinas, siendo B la anchura total y B' la anchura desde el extremo del deflector lateral pequeño.....	126
Tabla 11 Velocidad media en la hendidura calculada con el modelo numérico v_s (m/s), velocidad escalada experimental en la hendidura v_s^* (m/s) y coeficiente C_{vs} para los distintos diseños con pendiente $S=5\%$. Nota: los valores de velocidades indicados son la media de los resultados para los 3 caudales ensayados o simulados.....	134
Tabla 12 Valores del coeficiente C_{vs} para los diseños tipo I considerando únicamente 4 valores para los 16 diseños.....	135

Tabla 13 Valores del coeficiente C_{vs} sugeridos en una primera aproximación para diseños cuyas dimensiones se encuentran dentro de los rangos habituales.....	137
Tabla 14 Coeficientes de descarga numéricos y experimentales C_d y C_q para los distintos diseños. Nota: los resultados numéricos para los diseños tipo I incluyen la pendiente tanto del 5% como del 10%, d_r =diferencia relativa.....	139
Tabla 15 Caudal de entrada Q (l/s) y calado en el centro de las piscinas h_C (m) en cada simulación numérica para los diseños tipo I, pendiente $S=5\%$	140
Tabla 16 Caudal de entrada Q (l/s) y calado en el centro de las piscinas h_C (m) en cada simulación numérica para los diseños tipo I, pendiente $S=10\%$	140
Tabla 17 Caudal de entrada Q (l/s) y calado en el centro de las piscinas h_C (m) en cada simulación numérica para los diseños tipo II, tipo III y tipo IV, pendiente $S=5\%$	141
Tabla 18 Caudal de entrada Q (l/s) y calado en el centro de las piscinas h_C (m) en cada ensayo experimental para los diseños tipo I.....	141
Tabla 19 Caudal de entrada Q (l/s) y calado en el centro de las piscinas h_C (m) en cada ensayo experimental para los diseños tipo II y tipo III.	142
Tabla 20 Valores numéricos y experimentales del coeficiente de descarga C_d obtenidos en este trabajo para siete diseños tipo I y valores experimentales de Rajaratnam et al. (1992). Nota: d_r =diferencia relativa entre los resultados numéricos y los valores obtenidos por Rajaratnam et al. (1992) (%).	142
Tabla 21 Valores del coeficiente de descarga C_q para los diseños tipo I considerando únicamente 4 valores para los 16 diseños.....	144
Tabla 22 Tabla resumen con los valores de los dos coeficientes de descarga considerados en función de la ratio L/b	146
Tabla 23 Potencia disipada por unidad de volumen E (W/m^3) en los distintos diseños estudiados para una anchura de piscina de 1 m y pendientes del 5% y del 10%.	148
Tabla 24 Utilización de las zonas de descanso por los ejemplares de las tres especies durante los ensayos. Nota: σ es la desviación estándar.	158
Tabla 25 Velocidad de natación y aceleración máximas promedio para las distintas especies..	163
Tabla 26 Resumen de las restricciones consideradas en la metodología. Se indican las variables empleadas para evaluar la adecuación de las propiedades hidrodinámicas de la escala a los requisitos del pez objetivo.....	171
Tabla 27 Velocidades del agua adimensionales U_{max}^* , U_{eq}^* y ratio L_{12}/L (longitud de la trayectoria/longitud de piscina) para las dos restricciones de velocidad analizadas para cada diseño.	175

Tabla 28 Coeficiente de descarga C_q para los 29 diseños considerados. 176

Capítulo 1. Resumen y conclusiones (trilingüe)

Castellano

1.1 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).

Una de las soluciones para restaurar la conectividad longitudinal de los cursos fluviales es la construcción de escalas de peces. Estos dispositivos de remonte consisten, de forma general, en un canal en pendiente dividido por tabiques transversales de diferentes diseños que conforman una serie de depósitos o piscinas sucesivas. Este trabajo está centrado en las escalas de peces de hendidura vertical, en las que los tabiques poseen una hendidura vertical a lo largo de toda su altura. Su funcionamiento hidráulico está regido por las características geométricas de los estanques y de los tabiques transversales (Larinier et al., 1998), e históricamente ha sido estudiado mediante modelización física a escala reducida.

Estos estudios han puesto de manifiesto la complejidad del entorno hidrodinámico al que se enfrentan los peces al remontar una escala de hendidura vertical. En este momento, poco se sabe acerca del comportamiento de los peces en estas condiciones artificiales, lo que dificulta el establecimiento de criterios de diseño que garanticen la eficacia de los dispositivos. Además, esta falta de conocimiento es especialmente notable para ciertas familias de peces que han sido tradicionalmente menos estudiadas.

En base a lo expuesto anteriormente, se establecen tres objetivos principales en esta tesis. El primer objetivo es analizar la influencia de las variaciones geométricas en las características hidrodinámicas de las escalas de peces de hendidura vertical. Para ello, se utiliza tanto la modelización numérica como la física en modelo reducido, en lo que se denomina en esta tesis como estudio hidrodinámico. De esta forma, se establece también un objetivo secundario, analizar si los resultados obtenidos mediante modelización numérica reflejan adecuadamente lo

observado en modelo físico.

El segundo objetivo consiste en desarrollar y probar una metodología para estudiar el comportamiento de distintas especies en una escala de peces de hendidura vertical. Para ello, se plantean una serie de ensayos con ejemplares vivos en un modelo físico a escala real, que se equipa con un sistema de adquisición de imágenes para grabar en vídeo los movimientos de los peces. Dentro de las especies se incluyen ciprínidos autóctonos de la Península Ibérica, con el objetivo de incrementar el conocimiento sobre su comportamiento. Estos ensayos constituyen lo que se denomina en este trabajo como estudio biológico. Para la realización de los mismos se ha contado con la colaboración del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX, donde se ubica el modelo físico, y del grupo RNASA (Redes de Neuronas Artificiales y Sistemas Adaptativos) de la Universidad de A Coruña, con los que se ha colaborado para desarrollar una técnica para procesar las imágenes del sistema de grabación. El análisis de los resultados experimentales obtenidos en los ensayos es un resultado original de esta tesis.

El tercer objetivo estriba en definir una metodología que permita evaluar la bondad de un diseño de escala de peces de hendidura vertical desde un punto de vista biológico. Trata por tanto de aglutinar los resultados de los dos primeros objetivos, ya que el diseño apropiado depende de la interacción entre las variables hidráulicas y biológicas. Más concretamente, la metodología analiza si las propiedades hidrodinámicas de la escala se ajustan a los requisitos de las especies objetivo. Para facilitar su utilización, se ha diseñado una aplicación informática que incorpora los resultados obtenidos.

Los tres objetivos expuestos se enmarcan dentro del objetivo último de comprender mejor la interacción entre los procesos biológicos y físicos involucrados en el remonte de una escala de hendidura vertical. Aunque es necesaria más investigación, la aproximación que se realiza en esta tesis 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. Las líneas futuras de trabajo pasan por desarrollar criterios de diseño que garanticen el correcto funcionamiento de este tipo de estructuras.

1.2 Resumen

Esta tesis doctoral se divide en cinco capítulos. En el capítulo 1 se realiza una síntesis del documento que incluye un resumen del trabajo desarrollado y la recopilación de las conclusiones más importantes. Este capítulo es trilingüe, castellano-inglés-gallego.

En el capítulo 2 se presenta una revisión del estado del conocimiento sobre el diseño de escalas de peces y sobre los estudios hidráulicos y biológicos en estos dispositivos. En primer lugar, se hace un repaso de los condicionantes biológicos que influyen en su eficacia, centrándose especialmente en los ciclos biológicos y en la capacidad de natación de las distintas especies. Por otra parte, se realiza una descripción de los principales tipos de dispositivos de remonte continuos para peces, dentro de los que se encuentran las escalas de peces de hendidura vertical. Asimismo, se incluyen recomendaciones generales para su implantación.

Dentro de la revisión de estudios hidráulicos, se recogen tanto estudios en modelo físico como en modelo numérico. En el caso de los estudios experimentales, se resumen los más importantes, subrayando especialmente los trabajos de Rajaratnam et al. (1986, 1992) y los trabajos previos del grupo de investigación (el Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente de la Universidad de A Coruña), reflejados, por ejemplo, en Puertas et al. (2004) y Pena (2004). En el caso de la modelización numérica, se comentan también varios estudios destacados, entre los que se encuentran los trabajos previos del grupo de investigación en esta línea (Cea et al., 2007b). En todos estos estudios se destaca que el flujo en estas estructuras es marcadamente bidimensional, lo que tiene importantes implicaciones de cara a la elección del modelo numérico empleado en esta tesis. Este hecho ya había sido puesto de manifiesto en trabajos previos de otros grupos (Wu et al., 1999).

En el capítulo 3 se describe el modelo numérico con el que se calcula el campo de flujo en distintos diseños de escalas de peces de hendidura vertical. Se trata de un modelo numérico en volúmenes finitos basado en las ecuaciones de aguas someras bidimensionales. En este apartado se realiza además una calibración del modelo que permite fijar las características del mallado y los parámetros de cálculo que regirán las simulaciones.

Por otra parte, en el capítulo 4 se explica la metodología experimental seguida tanto en el estudio hidrodinámico como en el estudio biológico. En ambos casos se presenta la infraestructura y la instrumentación utilizadas y, en el caso del estudio biológico, se describe la técnica empleada para extraer la trayectoria seguida por el pez a partir de las imágenes del sistema de grabación. Asimismo, se detallan las características de los ejemplares ensayados (especies, procedencia y talla) y otros aspectos relevantes desde un punto de vista biológico, como la temperatura del agua o las fechas de realización de los ensayos.

Los resultados obtenidos y su análisis se presentan en el capítulo 5, que se estructura en tres grandes bloques. En el primer bloque se caracterizan hidráulicamente 33 diseños de escalas de

hendidura vertical, utilizando tanto el modelo numérico descrito en el capítulo 3 como la metodología experimental descrita en el capítulo 4. Esta caracterización se basa en el análisis de cuatro parámetros: la velocidad en la hendidura, el calado en las piscinas, el patrón de flujo y la potencia disipada por unidad de volumen. A partir de estos resultados, se examina la influencia del tipo de diseño y de las dimensiones geométricas de las piscinas en las características del flujo.

En el segundo bloque se presentan los resultados del estudio biológico a nivel piloto (con un reducido número de especies), que incluye cinco ensayos con ejemplares de tres especies diferentes: trucha común, boga del Tajo y barbo común. Los resultados comprenden la reconstrucción de la trayectoria seguida por los peces en el remonte, el cálculo de las velocidades y aceleraciones desarrolladas en los pasos de hendidura y la determinación de las zonas de la escala con mayores tiempos de permanencia. De esta forma se pone a punto una metodología, que será aplicada de forma sistemática en futuras campañas, y se obtienen unos primeros resultados de utilidad.

Finalmente, en el tercer bloque se desarrolla el procedimiento para identificar los diseños apropiados de escalas de hendidura vertical en vista de los requisitos de las especies objetivo. El modelo propuesto aplica restricciones relativas 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. Para facilitar la aplicación de esta metodología, se presenta una aplicación informática que trata de aglutinar los resultados obtenidos.

A continuación se recogen, alfabéticamente ordenadas, las referencias bibliográficas utilizadas como base documental para el presente trabajo. Por último, se incluyen dos apéndices, el primero con los resultados detallados del estudio biológico y el segundo con publicaciones asociadas a la tesis.

1.3 Conclusiones

1.3.1 Estudio hidrodinámico

Los parámetros hidráulicos que generalmente se consideran para evaluar el funcionamiento de un diseño de escala de peces de hendidura vertical son el patrón de flujo, la velocidad media en la hendidura, el calado en las piscinas y la potencia disipada por unidad de volumen. En este trabajo se estudian estos parámetros en un total de 33 diseños de escalas de hendidura vertical, divididos en 4 diseños tipo. Para ello se utiliza de forma complementaria la modelización física a escala

reducida y la modelización numérica.

Los resultados muestran como el patrón de flujo depende principalmente de la geometría de la piscina y como es posible describir todos los diseños considerando solamente dos patrones de flujo distintos en función de la ratio entre la longitud de piscina y la anchura de piscina desde el extremo del deflector lateral pequeño (L/B'). En relación con los campos de calados, es posible definir coeficientes de descarga C_d en función del cociente entre la longitud de piscina y la anchura de hendidura (L/b) dentro de cada tipo de diseño. Los diseños en los que este cociente es mayor presentan mayores coeficientes de descarga y, por tanto, requieren un mayor caudal circulante para mantener el calado. En consecuencia, presentan también mayores velocidades medias en la hendidura. Por último, la potencia disipada por unidad de volumen aumenta con menores valores de anchura de piscina y con mayores valores de longitud de las piscinas.

En líneas generales, el análisis de los resultados sugiere que la longitud de la piscina y la pendiente son las principales dimensiones geométricas que afectan al flujo en la escala. Una mayor longitud de piscina o una mayor pendiente de la escala implica mayores velocidades, debido al mayor salto entre piscinas. Por otra parte, un incremento en la anchura de hendidura conlleva una disminución del calado en las piscinas, y permite aumentar el caudal circulante por la escala sin generar un incremento significativo de la velocidad media en la hendidura.

Por otro lado, los resultados numéricos y experimentales muestran que las ecuaciones de aguas someras promediadas en profundidad, con un modelo de turbulencia apropiado (como por ejemplo el modelo $k-\epsilon$), reproducen adecuadamente el campo de flujo en las escalas de peces de hendidura vertical dentro del rango usual de pendientes y sin ningún parámetro de calibración del modelo. Aunque en ciertas regiones del flujo no se cumplen estrictamente las hipótesis del modelo, especialmente en la zona de la hendidura, los resultados numéricos muestran un acuerdo global satisfactorio con los experimentales. En los diseños que presentan mayores velocidades y a medida que se aumenta la pendiente de la escala, se podría plantear usar un modelo tridimensional para intentar mejorar las predicciones numéricas.

1.3.2 Estudio biológico

En este estudio se propone una metodología para analizar el comportamiento de los peces en un modelo físico a tamaño real de una escala de peces de hendidura vertical. La metodología se aplica a cinco ensayos diferentes con dos especies de ciprínidos y una especie de salmónidos.

En los ensayos, ha sido posible reconstruir las trayectorias e identificar las zonas realmente

empleadas por los peces. En todas las grabaciones realizadas, los ejemplares de las tres especies ascienden por la escala realizando numerosos descansos en las zonas de recirculación que se producen a cada lado del flujo principal. Dentro de estas regiones, utilizan mayoritariamente las áreas situadas en la parte de aguas arriba de las piscinas, con unos tiempos de permanencia muy variables. Los ejemplares se desplazan también por estas áreas de recirculación para pasar de un estanque al siguiente, evitando en la medida de lo posible el flujo principal, salvo en la zona estricta de la hendidura. Así, las velocidades de natación máximas se observan en la región de la hendidura y las aceleraciones máximas en la aproximación a ésta. Dado el limitado número de observaciones, los valores obtenidos en los ensayos deben ser tomados con cautela, aunque son acordes con los rangos encontrados en la literatura.

En consecuencia, se considera que la metodología proporciona una información valiosa y que tiene un gran potencial para explorar el comportamiento de los peces en estos entornos. Aunque es necesaria más investigación (mayor número de ejemplares y de especies, variaciones en los caudales circulantes, etc.) los resultados proporcionados por esta metodología pueden contribuir al desarrollo de criterios de diseño de escalas de peces más adecuados. Por ello, se ha estimado interesante continuar con la experimentación en nuevas campañas, y se continúa trabajando en la actualidad de un modo sistemático, con otras especies.

1.3.3 Evaluación general de los diseños

La eficiencia biológica de un diseño de escala de peces está determinada por el acuerdo entre sus características hidráulicas y los requisitos y capacidad natatoria de las especies objetivo. En este apartado se propone una metodología para analizar la eficiencia biológica de diferentes diseños de escalas de hendidura vertical aplicando restricciones de velocidad, turbulencia y calado. Se presenta también una aplicación informática que facilita su uso.

En primer lugar, el modelo impone dos 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 de fatiga 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. Para ello, se ha considerado una de las trayectorias del pez más restrictivas, lo que deja del lado de la seguridad en vista de las trayectorias reales observadas en el estudio biológico. Por último, la metodología limita la potencia disipada por unidad de volumen teniendo en cuenta los valores recomendados en la literatura para las distintas especies.

Estos valores se aceptan como un criterio general, sin una base conceptual sólida, pero cuyo uso está muy extendido.

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 caudal mínimo 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 pez que es capaz de remontar la 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 concreto 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 metodología.

English

1.1 Introduction

The construction of water resources management works, such as dams, weirs, water diversions and other barriers leads to significant changes in the river ecosystem. These structures constitute a physical barrier to fish natural movements, which negatively impacts their populations. In fact, this interruption of free passage has been identified as the main reason for the extinction or the depletion of numerous species in many rivers (Marmulla, 2001).

One of the solutions to restore longitudinal connectivity of rivers is the construction of fishways. These devices basically consist of a channel with a sloping floor that is divided by baffles into a series of pools. This thesis is focused on vertical slot fishways, in which water travels from one pool to the next through a vertical slot in the baffle that extends from the top to the bottom of the flume. Their hydraulic characteristics vary according to the geometric dimensions and configuration of the pools and the baffles (Larinier et al., 1998), and have been historically studied by reduced-scale physical modeling.

These studies have shown that fish are confronted to a challenging hydrodynamic environment when they swim upstream vertical slot fishways. At present time, little is known about fish behavior in these conditions, which hinders the development of more effective fishway design criteria. Besides, this lack of knowledge is particularly noticeable for certain fish families which have traditionally been less studied.

Based on the above, three main goals are established in this thesis. The first aim is to analyze the influence of geometric variations on the hydrodynamic characteristics of vertical slot fishways. In order to do so, both numerical and reduced-scale physical modeling is used, in what is named in this work as hydrodynamic study. Thus, a secondary objective is also set, to analyze whether the numerical model correctly reproduces the observations made in the physical model.

The second goal of the present study is to develop and test a methodology to analyze fish swimming behavior in a vertical slot fishway. To this end, a set of experiments has been designed in a full-scale vertical slot fishway model, equipped with an image acquisition system to video record fish movements. Among the studied fish species, Iberian cyprinids are considered, in order to increase knowledge about their behavior. These experiments constitute what is called as biological study in this work. In order to perform this study, there has been collaboration with the

Center for Studies and Experimentation of Public Works (CEDEX), where the physical model is located, and the research group RNASA (Artificial Neural Networks and Adaptive Systems) from the University of A Coruña, which has contributed to the development of a technique to process the images obtained from the recording system. The analysis of the experimental results obtained in the tests is an original result from this thesis.

The third objective consists of defining a methodology to evaluate vertical slot fishway designs from a biological point of view. Thus, it tries to bring together the results of the two first objectives, since the appropriate design of a vertical slot fishway depends on an interplay between hydraulic and biological variables. More precisely, the methodology analyzes if the hydrodynamic properties of the fishway meet the requirements of the fish species for which it is intended. For ease of use, a computer application that incorporates the obtained results has been designed.

The three presented objectives are part of the ultimate goal of achieving a deeper understanding of the interaction between the biological and physical processes that are involved in swimming upstream a vertical slot fishway. Although further research is needed, this approach can contribute to the evaluation of fish response to different hydraulic characteristics, the definition of key factors on fish movements, and the improvement of the existing models used to predict passage success. Future research lines could lead to the development of design criteria that ensure the effective operation of this type of devices.

1.2 Summary

This PhD thesis is divided in five chapters. Chapter 1 provides a synthesis of the document, which includes a summary of the work performed and a review of the main conclusions. This chapter is trilingual, Spanish-English-Galician.

Chapter 2 comprises a revision of the state of the art in fishway design and of the main hydraulic and biological studies in these devices. First of all, the biological factors that affect their efficiency are reviewed, focusing especially on the biological cycles and the swimming performance of the different species. On the other hand, the main fishway types, including vertical slot fishways, are described. Besides, general recommendations for fishway construction are presented.

Within the review of hydraulic studies, both physical and numerical model studies are analyzed.

In the case of experimental studies, the most relevant are summarized, emphasizing the work of Rajaratnam et al. (1986, 1992) and the previous work of the research group (the Water and Environmental Engineering Group of the University of A Coruña), which is reflected, for instance, in Puertas et al. (2004) and Pena (2004). In the case of numerical modeling, several prominent studies are discussed, among which the previous work of the research group in this line can be found (Cea et al., 2007b). These studies highlight that the flow in these structures is mainly two-dimensional, which has important implications for the selection of the numerical model to be used in this work. This fact had already been revealed in previous works from other groups (Wu et al., 1999).

Chapter 3 describes the numerical model used to calculate the flow field in different designs of vertical slot fishways. It consists of a finite volume numerical model based on the two-dimensional shallow water equations. In this section, a calibration of the numerical model is also performed, in order to define the mesh characteristics and the numerical parameters that will govern the simulations.

On the other hand, chapter 4 explains the experimental methodology followed in both the hydrodynamic study and the biological study. In both cases, the setup and instrumentation are presented and, in the case of the biological study, the technique used to extract the fish trajectory from the images of the recording system is described. Additionally, the characteristics of the fish used in the experiments are detailed (species, origin and size), as well as other aspects relevant from a biological perspective, such as the water temperature or the dates of the experiments.

The results obtained and their analysis are presented in chapter 5, which is divided in three blocks. In the first block, the hydraulic characteristics of 33 vertical slot fishway designs are evaluated, by means of both the numerical model described in chapter 3 and the experimental methodology explained in chapter 4. This evaluation is based on the analysis of four parameters: the velocity in the slot, the depth in the pools, the flow pattern and the power dissipation per unit volume. From these results, the influence of the type of design and the geometric dimensions of the pools on the flow characteristics is examined.

The second block presents the results of the biological study at pilot scale (with a reduced number of species), which includes five experiments with three different species: brown trout, Iberian straight-mouth nase and Iberian barbel. The results comprise the reconstruction of the fish trajectory during the ascent, the calculation of fish velocities and accelerations when moving from one pool to the next one and the identification of the areas with higher transit times. Thus,

the methodology, which will be applied systematically in future campaigns, is tested and preliminary useful results are obtained.

Finally, the third block develops the procedure to identify the appropriate design of a vertical slot fishway in view of the requirements of the target species. The proposed model applies restrictions relative to the swimming capacity of fish, their depth requirements and their needs regarding turbulent energy dissipation. In order to facilitate the application of this methodology, a computer application which brings together all the results is presented.

The following section contains, alphabetically arranged, the references used as data sources for this study. Lastly, two appendices are included. The first one presents the detailed results of the biological study, while the second one is a compilation of publications associated with this thesis.

1.3 Conclusions

1.3.1 Hydrodynamic study

The hydraulic parameters that are usually considered in order to evaluate the performance of a vertical slot fishway design are the flow pattern, the average velocity in the slot, the water depth and the power dissipation per unit volume. In this work, these parameters are studied in a total of 33 vertical slot fishway designs, divided in 4 design types. To this end, reduced-scale physical modeling and numerical modeling are used in a complementary way.

The results show that the flow pattern depends mainly on the geometry of the pool and that it is possible to group all the designs considering only two different flow patterns, depending on the ratio between the pool length and the pool width from the end of the small lateral baffle (L/B'). Regarding the depth field, it is possible to define discharge coefficients C_d depending on the ratio between the pool length and the slot width (L/b) within each design type. The designs in which this ratio is higher present higher discharge coefficients and, therefore, require higher discharges to maintain the depth. Consequently, they also present higher average velocities in the slot. Lastly, the power dissipation per unit volume increases with lower values of pool width and with higher values of pool length.

Overall, the analysis of the results suggests that the length of the pool and the slope are the main geometric dimensions that affect the flow in the fishway. A higher length or a higher slope involve increased circulating velocities, because of the higher drop between pools. On the other

hand, a higher width of the slot implies a reduction in the depth of the pools, allowing an increase in the discharge without a significant increase in the average velocity in the slot.

Besides, the numerical and experimental results show that the 2D shallow water equations, coupled with a suitable turbulence model (as for example the $k-\epsilon$ model), reproduce properly the flow field in vertical slot fishways within the usual range of slopes and without any model calibration parameter. Although the model approximations are not strictly fulfilled in some regions of the pools, especially near the vertical slot, the global agreement between the numerical and experimental results is satisfactory. In the designs with higher velocities and as the slope increases, the use of a three-dimensional model could be contemplated to improve the numerical predictions.

1.3.2 Biological study

This study proposes a methodology to analyze fish behavior in an experimental full-scale vertical slot fishway model. The methodology is applied to five different experiments with two cyprinid species and a salmonid species.

In the tests, it was possible to reconstruct the trajectory and to identify the zones actually exploited by the fish. In all recordings, the specimens of the three species rest frequently, while ascending the fishway, in the recirculation zones which are formed on both sides of the main flow. Within these regions, they use mostly the areas located in the upper part of the pools, with highly variable residence times. The specimens use also these regions to move upstream, avoiding as far as possible high-velocity areas, except in the slot region. Thus, maximum swimming velocities are observed when fish are traversing the slot and maximum accelerations when they are approaching it. Given the limited number of observations, the values obtained should be taken with caution, although they are consistent with the ranges that can be found in the literature.

Consequently, the methodology is considered to provide valuable information and to have a great potential to explore fish behavior in these environments. Although further research is needed (larger number of fish and species, variations in flow discharges, etc.), the results provided by this methodology can contribute to the development of more suitable fishway design criteria. Thereby, it is considered interesting to continue the experimentation with new campaigns, and work continues at present systematically, with other species.

1.3.3 General evaluation of the designs

The biological efficiency of a vertical slot fishway design is determined by the agreement between its hydraulic characteristics and the requirements and swimming capacity of the target species. This section proposes a methodology to analyze the biological efficiency of different designs of vertical slot fishways applying velocity, turbulence and depth restrictions. A computer application for ease of use is also presented.

First of all, the model imposes two velocity criteria in order to ensure that flow velocities are low enough for fish to swim upstream. On the one hand, maximum flow velocities are compared to the fish burst speed. On the other hand, the velocity field in the pools is linked to the swimming distance curves for fish, considering an equivalent velocity along the fish trajectory and their travelled length. To this end, one of the most demanding fish trajectories has been considered, which is on the safe side in view of the real trajectories observed in the biological study. Lastly, the methodology limits the power dissipation per unit volume taking into account the values recommended in the literature for the different species. These values are accepted as a general rule, without a solid conceptual basis, but with a widespread use.

Following this procedure, pool dimensions that ensure acceptable flow velocities and turbulence and aeration levels for fish are obtained. Once the geometric characteristics have been defined, the discharge curves for each design are evaluated in order to determine the minimum discharge giving fish-acceptable depths.

Considering the complexity of the hydraulic and biological phenomena involved in the process of swimming through a fishway, it is obvious that the proposed methodology does not intend to establish an accurate value for the minimum fish size which is able to pass the fishway. Other complex biological factors which are not considered in the present work, and which are difficult to quantify, contribute to the success or the failure of a specific fish along its path through the fishway. Nevertheless, the methodology proposed here is an objective way to compare different fishway designs, and to determine, given a series of designs, which of them is the most efficient. In any case, further application of hydrobiological criteria and systematic methodologies in order to evaluate the performance and efficiency of fishway designs is needed. And it is in this context that the present methodology is proposed.

Galego

1.1 Introducción

A construción de obras hidráulicas transversais como presas, diques, azudes e outros obstáculos produce importantes cambios no ecosistema fluvial. Estas estruturas constitúen unha barreira física para os movementos naturais dos peixes, o que repercute negativamente sobre as súas poboacións. Así, esta interrupción da libre circulación foi identificada en moitos ríos como a causa principal da extinción ou o descenso poboacional de numerosas especies (Marmulla, 2001).

Unha das solucións para restaurar a conectividade lonxitudinal dos cursos fluviaais é a construción de escalas de peixes. Estes dispositivos de remonte consisten, de forma xeral, nun canal en pendente dividido por tabiques transversais de diferentes deseños que conforman unha serie de depósitos ou piscinas sucesivas. Este traballo está centrado nas escalas de peixes de fenda vertical, nas que os tabiques posúen unha fenda vertical ao longo de toda a súa altura. O seu funcionamento hidráulico está rexido polas características xeométricas dos estanques e dos tabiques transversais (Larinier et al., 1998), e historicamente foi estudado mediante modelización física a escala reducida.

Estes estudos puxeron de manifesto a complexidade do ambiente hidrodinámico ao que se enfrontan os peixes remontando unha escala de fenda vertical. Neste momento, pouco se sabe sobre o comportamento dos peixes nestas condicións artificiais, o que dificulta o establecemento de criterios de deseño que garantan a eficacia dos dispositivos. Ademais, esta falta de coñecemento é especialmente notable para certas familias de peixes que foron tradicionalmente menos estudiadas.

En base ao exposto anteriormente, establécense tres obxectivos principais nesta tese. O primeiro obxectivo é analizar a influencia das variacións xeométricas nas características hidrodinámicas das escalas de peixes de fenda vertical. Para iso, utilízase tanto a modelización numérica como a física en modelo reducido, no que se denomina nesta tese como estudo hidrodinámico. Desta forma, establécese tamén un obxectivo secundario, analizar se os resultados obtidos mediante modelización numérica reflicten axeitadamente o observado en modelo físico.

O segundo obxectivo consiste en desenvolver e probar unha metodoloxía para estudar o comportamento de distintas especies nunha escala de peixes de fenda vertical. Para iso, planéanse unha serie de ensaios con exemplares vivos nun modelo físico a escala real, que se equipa cun

sistema de adquisición de imaxes para gravar en vídeo os movementos dos peixes. Dentro das especies inclúense ciprínidos autóctonos da Península Ibérica, co obxectivo de incrementar o coñecemento sobre o seu comportamento. Estes ensaios constitúen o que se denomina neste traballo como estudo biolóxico. Para a realización dos mesmos contouse coa colaboración do Centro de Estudos Hidrográficos do CEDEX, onde se sitúa o modelo físico, e do grupo RNASA (Redes de Neuronas Artificiais e Sistemas Adaptativos) da Universidade da Coruña, cos que se colaborou para desenvolver una técnica para procesar as imaxes do sistema de gravación. A análise dos resultados experimentais obtidos nos ensaios é un resultado orixinal desta tese.

O terceiro obxectivo radica en definir unha metodoloxía que permita avaliar a bondade dun deseño de escala de peces de fenda vertical desde un punto de vista biolóxico. Trata polo tanto de aglutinar os resultados dos dous primeiros obxectivos, xa que o deseño apropiado depende da interacción entre as variables hidráulicas e biolóxicas. Máis concretamente, a metodoloxía analiza se as propiedades hidrodinámicas da escala se axustan aos requisitos das especies obxectivo. Para facilitar a súa utilización, deseñouse unha aplicación informática que incorpora os resultados obtidos.

Os tres obxectivos expostos enmárcanse dentro do obxectivo último de comprender mellor a interacción entre os procesos biolóxicos e físicos involucrados no remonte dunha escala de fenda vertical. Aínda que é necesaria máis investigación, a aproximación que se realiza nesta tese pretende contribuír a avaliar a resposta dos peixes a diferentes características hidráulicas, a definir os posibles factores clave no remonte e a mellorar os modelos existentes para predicir a eficiencia dos dispositivos. As liñas futuras de traballo pasan por desenvolver criterios de deseño que garantan o correcto funcionamento deste tipo de estruturas.

1.2 Resumo

Esta tese de doutoramento divídese en cinco capítulos. No capítulo 1 realízase unha síntese do documento que inclúe un resumo do traballo desenvolvido e a recompilación das conclusións máis importantes. Este capítulo é trilingüe, castelán-inglés-galego.

No capítulo 2 preséntase unha revisión do estado do coñecemento sobre o deseño de escalas de peixes e sobre os estudos hidráulicos e biolóxicos nestes dispositivos. En primeiro lugar, faise un repaso dos condicionantes biolóxicos que inflúen na súa eficacia, centrándose especialmente nos ciclos biolóxicos e na capacidade de natación das distintas especies. Por outra banda, realízase unha descrición dos principais tipos de dispositivos de remonte continuos para peces, dentro dos

que se atopan as escalas de peixes de fenda vertical. Así mesmo, inclúense recomendacións xerais para a súa implantación.

Dentro da revisión de estudos hidráulicos, recóllense tanto estudos en modelo físico como en modelo numérico. No caso dos estudos experimentais, resúmense os máis importantes, subliñando especialmente os traballos de Rajaratnam et al. (1986, 1992) e os traballos previos do grupo de investigación (o Grupo de Enxeñería da Auga e do Medio Ambiente da Universidade da Coruña), reflectidos, por exemplo, en Puertas et al. (2004) e Pena (2004). No caso da modelización numérica, coméntanse tamén varios estudos destacados, entre os que se atopan os traballos previos do grupo de investigación nesta liña (Cea et al., 2007b). En todos estes estudos destácase que o fluxo nestas estruturas é marcadamente bidimensional, o que ten importantes implicacións de cara á elección do modelo numérico empregado nesta tese. Este feito xa fora posto de manifesto en traballos previos doutros grupos (Wu et al., 1999).

No capítulo 3 descríbese o modelo numérico co que se calcula o campo de fluxo en distintos deseños de escalas de peixes de fenda vertical. Trátase dun modelo numérico en volumes finitos baseado nas ecuacións de augas someras bidimensionais. Neste apartado realízase ademais unha calibración do modelo que permite fixar as características do mallado e os parámetros de cálculo que rexerán as simulacións.

Por outra banda, no capítulo 4 explícase a metodoloxía experimental seguida tanto no estudo hidrodinámico como no estudo biolóxico. En ambos casos preséntase a infraestrutura e a instrumentación utilizadas e, no caso do estudo biolóxico, descríbese a técnica empregada para extraer a traxectoria seguida polo peixe a partir das imaxes do sistema de gravación. Así mesmo, detállanse as características dos exemplares ensaiados (especies, procedencia e talla) e outros aspectos relevantes desde un punto de vista biolóxico, como a temperatura da auga ou as datas de realización dos ensaios.

Os resultados obtidos e a súa análise preséntanse no capítulo 5, que se estrutura en tres grandes bloques. No primeiro bloque caracterízanse hidráulicamente 33 deseños de escalas de fenda vertical, utilizando tanto o modelo numérico descrito no capítulo 3 como a metodoloxía experimental descrita no capítulo 4. Esta caracterización baséase na análise de catro parámetros: a velocidade na fenda, o calado nas piscinas, o patrón de fluxo e a potencia disipada por unidade de volume. A partir destes resultados, examínase a influencia do tipo de deseño e das dimensións xeométricas das piscinas nas características do fluxo.

No segundo bloque preséntanse os resultados do estudo biolóxico a nivel piloto (cun reducido

número de especies), que inclúe cinco ensaios con exemplares de tres especies diferentes: troita común, boga do Tajo e barbo común. Os resultados comprenden a reconstrución da traxectoria seguida polos peixes no remonte, o cálculo das velocidades e aceleracións desenvolvidas nos pasos de fenda e a determinación das zonas da escala con maiores tempos de permanencia. Desta forma ponse a punto unha metodoloxía, que será aplicada de forma sistemática en futuras campañas, e obtéñense uns primeiros resultados de utilidade.

Finalmente, no terceiro bloque desenvólvese o procedemento para identificar os deseños apropiados de escalas de fenda vertical en vista dos requisitos das especies obxectivo. O modelo proposto aplica restricións relativas á capacidade de natación dos peixes, ás súas necesidades de calado e aos seus requisitos en relación coa enerxía disipada en forma de turbulencias. Para facilitar a aplicación desta metodoloxía, preséntase unha aplicación informática que trata de aglutinar os resultados obtidos.

A continuación recóllense, alfabeticamente ordenadas, as referencias bibliográficas utilizadas como base documental para o presente traballo. Para rematar, inclúense dous apéndice, o primeiro cos resultados detallados do estudo biolóxico e o segundo con publicacións asociadas á tese.

1.3 Conclusións

1.3.1 Estudo hidrodinámico

Os parámetros hidráulicos que xeralmente se consideran para avaliar o funcionamento dun deseño de escala de peixes de fenda vertical son o patrón de fluxo, a velocidade media na fenda, o calado nas piscinas e a potencia disipada por unidade de volume. Neste traballo estúdanse estes parámetros nun total de 33 deseños de escalas de fenda vertical, divididos en 4 deseños tipo. Para iso utilízase de forma complementaria a modelización física a escala reducida e a modelización numérica.

Os resultados mostran como o patrón de fluxo depende principalmente da xeometría da piscina e como é posible describir todos os deseños considerando soamente dous patróns de fluxo distintos en función da ratio entre a lonxitude de piscina e a anchura de piscina desde o extremo do deflector lateral pequeno (L/B'). En relación cos campos de calados, é posible definir coeficientes de descarga C_d en función do cociente entre a lonxitude de piscina e a anchura de fenda (L/b) dentro de cada tipo de deseño. Os deseños nos que este cociente é maior presentan

maiores coeficientes de descarga e, polo tanto, requiren un maior caudal circulante para manter o calado. En consecuencia, presentan tamén maiores velocidades medias na fenda. Por último, a potencia disipada por unidade de volume aumenta con menores valores de anchura de piscina e con maiores valores de lonxitude de las piscinas.

En liñas xerais, a análise dos resultados suxire que a lonxitude da piscina e a pendente son as principais dimensións xeométricas que afectan ao fluxo na escala. Unha maior lonxitude de piscina ou unha maior pendente da escala implica maiores velocidades, debido ao maior salto entre piscinas. Por outra banda, un incremento na anchura de fenda leva consigo unha diminución do calado nas piscinas, e permite aumentar o caudal circulante pola escala sen xerar un incremento significativo da velocidade media na fenda.

Doutra banda, os resultados numéricos e experimentais mostran que as ecuacións de augas someras promediadas en profundidade, cun modelo de turbulencia apropiado (como por exemplo o modelo $k-\epsilon$), reproducen axeitadamente o campo de fluxo nas escalas de peixes de fenda vertical dentro do rango usual de pendentes e sen ningún parámetro de calibración do modelo. Aínda que en certas rexións do fluxo non se cumpren estrictamente as hipótesis do modelo, especialmente na zona da fenda, os resultados numéricos mostran un acordo global satisfactorio cos experimentais. Nos deseños que presentan maiores velocidades e a medida que se aumenta a pendente da escala, poderíase planear usar un modelo tridimensional para intentar mellorar as predicións numéricas.

1.3.2 Estudo biolóxico

Neste estudo propónse unha metodoloxía para analizar o comportamento dos peixes nun modelo físico a tamaño real dunha escala de peixes de fenda vertical. A metodoloxía aplícase a cinco ensaios diferentes con dúas especies de ciprínidos e unha especie de salmónidos.

Nos ensaios, foi posible reconstruír as traxectorias e identificar as zonas realmente empregadas polos peces. En todas as gravacións realizadas os exemplares das tres especies ascenden pola escala realizando numerosos descansos nas zonas de recirculación que se producen a cada lado do fluxo principal. Dentro destas rexións, utilizan maioritariamente as áreas situadas na parte de augas arriba das piscinas, cuns tempos de permanencia moi variables. Os exemplares desprázanse tamén por estas áreas de recirculación para pasar dun estanque ao seguinte, evitando na medida do posible o fluxo principal, salvo na zona estreta da fenda. Así, as velocidades de natación máximas obsérvanse na rexión da fenda e as aceleracións máximas na aproximación a esta. Dado

o limitado número de observacións, os valores obtidos nos ensaios deben ser tomados con cautela, aínda que son acordes cos rangos atopados na literatura.

En consecuencia, considérase que a metodoloxía proporciona unha información valiosa e que ten un gran potencial para explorar o comportamento dos peixes nestes ambientes. Aínda que é necesaria máis investigación (maior número de exemplares e de especies, variacións nos caudais circulantes, etc.) os resultados proporcionados por esta metodoloxía poden contribuír ao desenvolvemento de criterios de deseño de escalas de peixes máis axeitados. Por isto, estimouse interesante continuar coa experimentación en novas campañas, e continúaase traballando na actualidade dun modo sistemático, con outras especies.

1.3.3 Avaliación xeral dos deseños

A eficiencia biolóxica dun deseño de escala de peixes está determinada polo acordo entre as súas características hidráulicas e os requisitos e capacidade natatoria das especies obxectivo. Neste apartado propónse unha metodoloxía para analizar a eficiencia biolóxica de diferentes deseños de escalas de fenda vertical aplicando restricións de velocidade, turbulencia e calado. Preséntase tamén unha aplicación informática que facilita o seu uso.

En primeiro lugar, o modelo impón dous criterios de velocidade para verificar que a velocidade do fluxo é o suficientemente baixa como para que os peixes poidan remontar. Por unha banda, compáranse as máximas velocidades do fluxo coas velocidades punta dos peixes. Por outra banda, o campo de velocidades nas piscinas relaciónase coas curvas de fatiga dos peixes a partir dunha velocidade equivalente ao longo da traxectoria do peixe, e considerando a distancia percorrida polo mesmo. Para iso considerouse unha das traxectorias do peixe máis restritivas, o que deixa do lado da seguridade en vista das traxectorias reais observadas no estudo biolóxico. Por último, a metodoloxía limita a potencia disipada por unidade de volume tendo en conta os valores recomendados na literatura para as distintas especies. Estes valores acéptanse como un criterio xeral, sen unha base conceptual sólida, pero cun uso moi estendido.

Seguindo este procedemento, obtéñense unhas dimensións de piscina que aseguran que as velocidades do fluxo e os niveis de turbulencia e aireación sexan admisibles para os peixes. Unha vez fixadas as características xeométricas, avalíanse as curvas de descarga para cada deseño e determínanse o caudal mínimo que proporciona calados aceptables para o peixe.

Tendo en conta a complexidade dos fenómenos hidráulicos e biolóxicos implicados no proceso de remonte dunha escala de peixes, resulta obvio que a metodoloxía proposta non trata de

establecer de forma exacta a menor talla de peixe que é capaz de remontar a escala. Outros factores biolóxicos complexos que non se incluíron no presente traballo, e que son difíciles de cuantificar, contribúen ao éxito ou ao fracaso dun exemplar concreto ao longo do seu percorrido pola escala. Non obstante, a metodoloxía proposta aquí é unha forma obxectiva de comparar diferentes deseños e de determinar, dada unha serie de deseños, cal deles é o máis eficiente. En calquera caso, é necesaria unha maior aplicación de criterios hidrobiolóxicos e metodoloxías sistemáticas para avaliar o funcionamento e a eficiencia dos deseños de escalas de peixes. E é neste contexto no que se enmarca a presente metodoloxía.

Capítulo 2. Estado del conocimiento

2.1 Introducción

Los ríos y cursos fluviales son el hábitat de un amplio número de especies animales, muchas de las cuales realizan grandes desplazamientos a lo largo del ecosistema para completar sus ciclos vitales. Las obras hidráulicas transversales como presas, diques, azudes y otros obstáculos constituyen una barrera física para estos movimientos naturales de los peces, provocando lo que se conoce como efecto barrera.

El efecto barrera producido por una obra hidráulica transversal puede corregirse de diversas maneras. Muchos de los pequeños obstáculos que pueblan los cauces pertenecen a actuaciones caducadas, y es factible demoler el obstáculo y devolver al cauce su morfología anterior. Para el resto de obras transversales, que siguen cumpliendo un cometido, es posible paliar sus efectos negativos con estructuras que sean fáciles de remontar por los peces y que garanticen la conectividad longitudinal.

Los dispositivos de remonte se pueden definir, de una forma sencilla, como aquellas infraestructuras hidráulicas cuya finalidad es facilitar el ascenso de los peces migratorios a través de un obstáculo existente en el curso fluvial. Las escalas de peces de hendidura vertical son un tipo particular de dispositivo de remonte. A grandes rasgos, consisten en un canal rectangular dividido en un cierto número de depósitos mediante tabiques transversales que poseen una hendidura vertical a lo largo de toda su altura.

Para permitir el ascenso de los migradores, el funcionamiento hidráulico de la escala de peces debe adaptarse a las capacidades y necesidades de las especies objetivo. Es por ello necesario conocer tanto las características del flujo en el dispositivo como los requisitos de las especies. Estudios mayoritariamente de tipo experimental, que se comentan en el apartado 2.4.1 del presente capítulo, han analizado las características hidráulicas básicas (principalmente calados, caudales y velocidades) en un gran número de estos dispositivos. Sin embargo, muchas otras variables como la distribución de velocidades y de la turbulencia, la vorticidad, la escala de la turbulencia o la energía cinética turbulenta parecen tener influencia en la eficiencia de estos dispositivos (Hotchkiss, 2002; Katopodis, 2005; Odeh et al., 2002; Pavlov et al., 2000). A día de hoy, sus efectos sobre el comportamiento de las especies están mal documentados, por lo que dichas variables no están incorporadas en criterios de dimensionamiento (Silva et al., 2012).

El presente capítulo de Estado de Conocimiento se estructura en 5 apartados. Tras una introducción en el primer apartado, se describen los condicionantes biológicos principales que se deben tener en cuenta al diseñar este tipo de estructuras (apartado 2.2). A continuación se comentan los distintos dispositivos de franqueo de obstáculos y las consideraciones generales de implantación (apartado 2.3). Por último, en los apartados 2.4 y 2.5, se repasa la bibliografía sobre estudios hidráulicos y biológicos en escalas de peces.

2.2 Bases biológicas

El diseño efectivo de dispositivos de franqueo de obstáculos para peces es una tecnología multidisciplinar (Odeh, 2000). Además de determinar el funcionamiento hidráulico de los mismos, es esencial conocer los comportamientos migratorios y los requisitos de hábitat de las especies implicadas.

En este apartado se presenta una breve descripción de los condicionantes biológicos que afectan al diseño de estas estructuras. Existen numerosos condicionantes de este tipo que influyen directamente en su eficacia: las especies migratorias, los ciclos biológicos, la estacionalidad de los movimientos migratorios, las capacidades de natación y salto, las preferencias de luminosidad y temperatura, etc. No obstante, la influencia de la mayor parte de estos parámetros sobre el comportamiento de las especies migratorias necesita ser investigada más en profundidad, de cara a su traducción a criterios de dimensionamiento (Pena, 2004).

2.2.1 Movimientos migratorios

El fenómeno de la migración comporta movimientos periódicos de cierto rango en los ciclos biológicos de los animales, que pueden ser debidos a aspectos tales como la reproducción, la búsqueda de alimento o refugio, o en general estar relacionados con la utilización de cualquier tipo de recurso. En este concepto de migración se establece una estrecha relación entre la migración y el desarrollo del ciclo biológico, de forma que queda patente la distinción con los movimientos de dispersión o colonización que de forma natural experimentan todas las especies (Elvira et al., 1995).

Se puede hacer una primera categorización desde este punto de vista entre especies o poblaciones animales migratorias, y especies sedentarias o residentes, que no experimentan los mencionados movimientos migratorios. En el caso de los peces, estos movimientos pueden estar localizados en el mar, en las aguas dulces, o entre el río y el mar. Así, se puede clasificar a los peces migratorios

en tres grandes grupos: oceanódromos, diádromos y potamódromos.

Los migradores oceanódromos son peces migratorios cuyos movimientos tienen lugar exclusivamente en el mar. Los peces de este grupo quedan fuera del propósito de este estudio.

Los migradores diádromos (también denominados anfibióticos) deben obligatoriamente cambiar de medio durante el transcurso de su vida, ya que parte de su ciclo biológico se desarrolla en agua dulce y parte en el mar. Pueden ser de dos tipos: anádromos y catádromos. Los anádromos son peces diádromos que pasan la mayor parte de su vida en el mar, pero entran en las aguas dulces para reproducirse. Un ejemplo de ellos es el salmón o la lamprea. Por su parte, los catádromos son peces diádromos que pasan la mayor parte de su vida en las aguas dulces, pero van al mar a reproducirse. El esquema de migración es, por tanto, inverso al de los migradores anádromos. Un ejemplo de ellos es la anguila.

Dentro de los peces diádromos, es posible considerar un tercer tipo de peces migratorios, los anfídromos, que se mueven entre el mar y las aguas dulces o viceversa, pero por causas no reproductivas. Un ejemplo de ellos son los mújoles o lisas. Algunos autores no consideran a los anfídromos como verdaderos migradores, pues su ciclo biológico no implica necesariamente los movimientos entre las aguas marinas y fluviales.

Por último, los potamódromos (también llamados holobióticos) son peces migratorios cuyos movimientos tienen lugar exclusivamente en las aguas dulces. Un ejemplo de ellos es la trucha común.

Los migradores anádromos y potamódromos realizan migraciones prerreproductivas remontando los ríos en busca de los lugares de freza, mientras que los catádromos tienen migraciones posreproductivas en las que colonizan las aguas dulces en busca de alimento y refugio. Durante las migraciones contracorriente (río arriba) los peces deben realizar una natación activa, con el consecuente gasto energético. En cambio, la migración de bajada, posreproductiva en anádromos y potamódromos, y prerreproductiva en catádromos, puede hacerse por natación activa o por deriva, dejándose arrastrar por la corriente.

Además de los casos de peces migratorios antes mencionados, muchas de las especies fluviales sedentarias o residentes también efectúan movimientos prerreproductivos ascendentes en los ríos. Este hecho está relacionado con la búsqueda de aguas más claras y oxigenadas, pero siempre tiene un inequívoco carácter físico, ya que se trata de paliar o contrarrestar la deriva que sufren los huevos, larvas, alevines y adultos de los peces fluviales por acción continua de la corriente.

Los peces españoles diádromos (catádromos y anádromos) y los principales potamódromos se listan en la Tabla 1. Se indica también la categoría de peligro en las especies amenazadas, según el Libro Rojo de los Vertebrados Españoles (Blanco y González, 1992) y el Atlas y Libro Rojo de los Peces Continentales de España (Doadrio, 2002).

Tabla 1 Peces españoles diádromos (anádromos y catádromos) y principales potamódromos. Se indica la categoría de peligro en España para las especies amenazadas (Blanco y González, 1992; Doadrio, 2002). Adaptado de Elvira et al. (1995).

	Familia	Nombre vulgar	Nombre científico	Categoría de amenaza	
				Blanco y González, 1992	Doadrio, 2002
Diádromos anádromos	Petromyzontidae	Lamprea de río	<i>Lampetra fluviatilis</i>	¿Extinta?	-
		Lamprea marina	<i>Petromyzon marinus</i>	Vulnerable	Vulnerable
	Acipenseridae	Esturión	<i>Acipenser sturio</i>	En Peligro	En peligro crítico
	Clupeidae	Sábalo	<i>Alosa alosa</i>	Vulnerable	Vulnerable
		Saboga	<i>Alosa fallax</i>	Vulnerable	Vulnerable
	Salmonidae	Salmón	<i>Salmo salar</i>	Vulnerable	En Peligro
		Reo	<i>Salmo trutta</i>	Vulnerable	Vulnerable
Diádromos catádromos	Anguillidae	Anguila	<i>Anguilla anguilla</i>	Vulnerable	Vulnerable
Potamódromos	Salmonidae	Trucha común	<i>Salmo trutta</i>	Vulnerable	Vulnerable
	Ciprinidae	Barbos	<i>Barbus spp.</i>	No amenazada	Vulnerable/ Casi amenazada
		Bogas y madrillas	<i>Chondrostoma spp.</i>	No amenazada	Vulnerable/ Casi amenazada

Históricamente, los proyectos de restauración de paso para peces se han centrado en especies anádromas con alto valor comercial, con poco énfasis en otras familias potamódromas como pueden ser los ciprínidos. En general, se ha prestado menor atención a los patrones de movimiento de estas especies, pues ha existido una percepción generalizada de que son prácticamente sedentarias (Lucas y Baras, 2001). Sin embargo, estudios telemétricos recientes han demostrado que estas especies también pueden migrar largas distancias para alcanzar las áreas de desove o en busca de refugio y alimento (Ovidio y Philippart, 2002).

2.2.1.1 Migradores diádromos

En este apartado se describen las características principales de las especies migratorias diádromas a las que se hace referencia en esta tesis, en base al trabajo de Elvira et al. (1995).

Salmón (*Salmo salar*)

Es una especie migratoria anádroma que penetra en ríos con aguas relativamente frías. Se reproduce en tramos altos, de corriente rápida, con fondos de piedra y grava. En España se encuentra en los ríos de la vertiente cantábrica y en Galicia, siendo su límite meridional el río Miño.

Los salmones adultos que remontan los ríos tienen tallas mínimas entre 50 y 60 cm, con pesos de 1.5 a 3.5 kg. Son nadadores muy eficaces y pueden remontar fuertes corrientes y saltar obstáculos de hasta 4-5 m. La migración de bajada la realizan sólo una parte de los adultos, pues muchos mueren tras la puesta, y los juveniles en vías de transformación entre pinto y esguín, que es la forma que migra al mar.

Reo o trucha marina (*Salmo trutta morfo trutta*)

No se trata de una especie ni subespecie distinta de la trucha común, sino de individuos de las poblaciones de truchas septentrionales que migran al mar y vuelven al río para reproducirse. Estos ejemplares se comportan como migradores anádromos. Se reproducen junto a las truchas no migratorias en las partes altas de los ríos, en zonas con fondos de arena y grava. Los reos tienen una distribución similar a la del salmón, pero son más frecuentes en los ríos de Galicia y más raros en los ríos de la vertiente cantábrica.

Los adultos que suben desde el mar tienen longitudes mínimas de 15 a 25 cm, y máximas próximas a los 40 cm. Los reos son nadadores muy eficaces y pueden superar obstáculos de alrededor de 1 m. Se reproducen varias veces a lo largo de su vida, por lo que el viaje de bajada lo realizan juveniles y adultos.

2.2.1.2 Migradores potamódromos

En este apartado se describen las especies migradoras potamódromas a las que se hace referencia a lo largo de esta tesis, en base al trabajo de Elvira et al. (1995).

Trucha común (*Salmo trutta morfo fario*)

La trucha común es la forma exclusivamente fluvial de la trucha, *Salmo trutta*. Se trata de un pez migratorio potamódromo que vive en los tramos altos de los ríos y lleva a cabo una migración

prerreproductiva hasta las zonas más altas, donde efectúa la puesta en arroyos de elevada corriente con fondos de arena y grava. La trucha común se distribuye por la cabecera de numerosos ríos peninsulares. Falta en algunos ríos de levante, en el sur de España y en la cuenca del Guadiana.

La talla mínima de los adultos oscila entre 15 y 20 cm, pero su tamaño puede ser muy superior, alcanzando 40 cm o más. La trucha común es un gran nadador y su capacidad de salto es notable, superando sin dificultad obstáculos de 0.5 a 1 m. Se reproduce durante varios años, por lo que el viaje de bajada lo llevan a cabo tanto adultos como juveniles.

Barbos (*Barbus spp.*) y bogas y madrillas (*Chondrostoma spp.*)

Los peces ciprínidos son exclusivamente fluviales y mayormente sedentarios, pero muchos de ellos efectúan migraciones prerreproductivas a los cursos altos, por lo que deben considerarse como migradores potamódromos.

Entre los que realizan movimientos de mayor rango destacan los barbos y las bogas y madrillas, que están presentes en prácticamente todos los cursos bajos, medios y altos de los ríos peninsulares. Todas las especies ibéricas de estos géneros remontan los ríos hasta los tramos altos para la freza. En época prerreproductiva se mueven en cardúmenes de numerosos individuos. Son buenos nadadores y tienen cierta capacidad de salto, estando ambas cualidades relacionadas con su tamaño. Las distintas especies de barbos tienen tallas de adultos variables entre 25 cm y más de 1 m, mientras que las bogas y madrillas son menores, con tallas de adultos que oscilan entre 15 y 30 cm según las especies.

Muchas otras especies de ciprínidos también realizan migraciones prerreproductivas potamódromas, pero debido a su pequeña talla y limitadas capacidades natatorias sus movimientos son de pequeño rango, y la mayoría son incapaces de superar obstáculos.

2.2.2 Efecto barrera

Las obras hidráulicas transversales como las presas, azudes o diques producen importantes cambios en las características físicas de los ríos, lo que conlleva consecuencias graves sobre el ecosistema fluvial. Entre dichas consecuencias cabe destacar las siguientes: pérdida de la diversidad de hábitats, modificación de los patrones estacionales del flujo, cambios en la temperatura y calidad del agua, desaparición de refugios ante los depredadores y ruptura de la conectividad longitudinal (Clay, 1995; Cowx y Welcomme, 1998; Elvira et al., 1995).

Uno de los ejemplos más claros de pérdida de hábitat es la inundación de las zonas naturales de freza aguas arriba de los embalses. Como consecuencia, se pueden producir cambios en la composición de la fauna piscícola al desaparecer especies que desovan en tramos con velocidades de la corriente relativamente altas.

Por otra parte, aguas abajo del obstáculo, la regulación de caudales también puede provocar, además de la pérdida de hábitat, una gran variedad de efectos negativos sobre las especies: pérdida de estímulos a la migración, pérdida de rutas migratorias, disminución de la supervivencia de huevos y alevines o disminución de la producción de alimento. Se ha sugerido que una de las causas de la desorientación y los retrasos en la migración es la reducción de la turbulencia provocada por estos obstáculos, ya que una reacción adecuada a la turbulencia puede promover el movimiento de los peces migratorios o evitar el desplazamiento de las especies sedentarias (Odeh et al., 2002). En general, cualquier reducción en los caudales desaguados durante el período de migración puede disminuir el potencial de atracción del río, reduciéndose en consecuencia el número de ejemplares que entran al río.

A pesar de la importancia de todas estas alteraciones, a nivel global el efecto más dramático parece ser lo que se conoce como efecto barrera. Se trata del efecto que ocasiona la construcción de presas u otros obstáculos por constituir una barrera física infranqueable para los movimientos naturales de los peces a lo largo del curso fluvial (Larinier et al., 1998).

Los efectos negativos de estas obstrucciones en los migradores anádromos (particularmente el salmón atlántico y el sábalo) han sido mucho más significativos que la contaminación de las aguas, la sobrepesca o la destrucción de hábitats en los principales ríos de Francia (Marmulla, 2001). Larinier et al. (1998) consideran esta interrupción de la libre circulación como la principal responsable de la desaparición de reservas enteras de salmón en los ríos Rhin, Sena y Garona y del confinamiento de ciertas especies en una parte muy reducida de la red hidrográfica (salmón del Loira, lucio del Garona). Asimismo, señalan como su impacto eclipsó ampliamente el producido por la polución química de las aguas. Otro ejemplo de especie amenazada por la construcción de presas hidroeléctricas es la población de esturión en los ríos Volga, Don y los ríos del Cáucaso (Petts, 1984); del mismo modo en la costa este de los Estados Unidos la construcción de presas fue identificada como la principal razón para la extinción o el descenso de las poblaciones de especies como el salmón y el sábalo americano (*Alosa sapidissima*) en los ríos Connecticut, Merrimack y Penobscott (Baum, 1994; Meyers, 1994; Stolte, 1994). Resultados similares aparecen en todas las partes del mundo desde Australia (Barry, 1990; Mallen-Cooper y Harris, 1990) hasta Latinoamérica (Quirós, 1989), pasando por China donde Zhong y Power

(1996) informan del descenso de 107 a 83 del número de especies debido a la interrupción de las migraciones por la presa de Xinanjiang. En el caso de Galicia, la abundancia de obstáculos a la migración está directamente relacionada con el descenso poblacional de las especies migratorias. En la Figura 1 se muestra la evolución del número de capturas en ríos típicamente salmoneros, desde alrededor de 1200 ejemplares en el año 1975 hasta una desaparición casi completa a finales de los años 90. A partir del año 2000 se observa un pequeño repunte en las capturas asociado con las repoblaciones llevadas a cabo desde el año 1995.

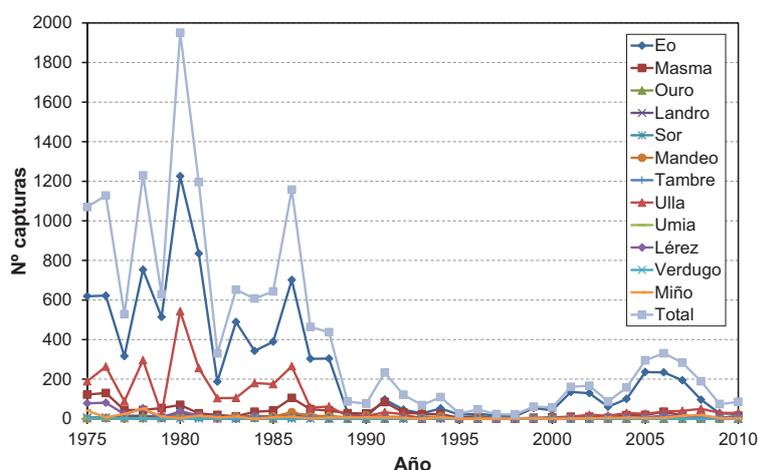


Figura 1 Evolución del número de capturas en ríos salmoneros gallegos entre 1975 y 2010.

En general, los impactos producidos por este efecto barrera se pueden resumir en los siguientes: desaparición de especies, aislamiento de poblaciones de peces que cambian su comportamiento reproductivo, proliferación de especies invasoras y plagas, degeneración genética de las poblaciones de peces y disminución de la oferta recreativa (especialmente pesca deportiva).

Los efectos del aislamiento de poblaciones de peces son más peligrosos en pequeñas poblaciones, aunque una gran variedad de parámetros están implicados en el análisis de la vulnerabilidad poblacional. Con un pequeño grupo aislado aumentará el riesgo de extinción debido al incremento de la homogeneidad genética, así como una mayor susceptibilidad a eventos catastróficos (Mace y Lande, 1991).

Las consecuencias también dependerán de la situación longitudinal del obstáculo. En los tramos altos de los ríos, incluso las barreras que impidan totalmente el paso de los peces, solamente aislarán una pequeña proporción del hábitat disponible; aunque el efecto acumulativo de cierto número de obstáculos puede ser significativo (Thorncraft y Harris, 2000). Los obstáculos a la migración en las zonas bajas de los ríos causan, generalmente, los daños más importantes sobre

las poblaciones migratorias (McDowall, 1988, Harris y Gehrke, 1997), pudiendo incluso los más bajos obstáculos impedir totalmente el paso de los juveniles (con escasa capacidad natatoria) de los migradores catádromos (Mallen-Cooper, 1992, 1994).

En consecuencia, las estrategias de recuperación deben tener en cuenta la situación del obstáculo en la cuenca y las especies presentes. En los tramos situados aguas abajo de las zonas de reproducción es necesario mantener una circulación libre, permanente y total cuando los migradores llegan al pie del obstáculo. En cambio, cuando los obstáculos están situados en zonas de engorde o de reproducción los objetivos pueden ser menos ambiciosos (Larinier et al., 1998).

2.2.3 Capacidad de natación

Uno de los principales factores biológicos que deben ser considerados en el diseño de cualquier tipo de infraestructura de franqueo de obstáculos a la migración es la capacidad de natación de las especies usuarias. La capacidad de los migradores se expresa en términos de velocidad de natación, distancia recorrida y resistencia, entendida esta última como el tiempo durante el cual los peces pueden mantener una cierta velocidad de natación (Larinier et al., 1998).

Generalmente, se distinguen tres niveles de velocidades natatorias directamente relacionadas con los músculos utilizados: velocidad de crucero (“cruising speed” o “sustained speed”), velocidad sostenida (“prolonged speed”) y velocidad punta (“burst speed”) (Bell, 1986).

Los peces a velocidad de crucero utilizan exclusivamente la musculatura roja (aeróbica), lo que permite largos desplazamientos a bajas velocidades (más de 200 minutos). En cambio, la velocidad punta permite al pez alcanzar velocidades máximas durante pocos segundos (menos de 20 segundos) mediante la utilización exclusiva de la musculatura blanca (anaeróbica). El uso prolongado de la musculatura blanca causa fatiga extrema y requiere largos períodos de descanso. Por su parte, la velocidad sostenida conlleva el uso de ambos sistemas de musculatura (rojo y blanco), y permite al pez alcanzar velocidades mayores durante varios minutos (entre 20 s y 200 minutos), pero al final produce la fatiga del pez. Una categoría especial de velocidad sostenida es la velocidad crítica, que designa la velocidad máxima que un pez puede mantener durante un período concreto de tiempo. El límite entre la velocidad de crucero y la velocidad sostenida se define como la velocidad de crucero máxima. Representa un importante umbral en el comportamiento fisiológico del pez, marcando el límite superior de la natación aeróbica (Breen et al., 2004).

Se han llevado a cabo numerosos estudios para conocer la capacidad de natación de distintas

especies, y en la literatura especializada pueden encontrarse valores y fórmulas. La multiplicidad de métodos y de criterios en la determinación de las velocidades de natación hace muy difícil la comparación de resultados entre diferentes autores (Blaxter, 1969). Sin embargo, todos los estudios parecen coincidir en la existencia de tres factores principales que influyen en las velocidades de natación: la especie considerada, el tamaño del pez y la temperatura del agua (Cowx y Welcomme, 1998). No obstante, Hammer (1995) revisa una serie de estudios y observa un gran número de condicionantes en relación con las velocidades de natación: la especie, la población y el tamaño del grupo; la talla; la estación y la temperatura; el sexo y el estado de madurez; los contaminantes; la luz; el alimento; el entrenamiento y la concentración de oxígeno.

La importancia del tamaño, en particular de la longitud del pez, para determinar su capacidad de natación con respecto a la velocidad y resistencia está bien documentada (Beamish, 1978; Blake, 1983; Videler, 1993). En general, un aumento de tamaño dentro de una misma especie significa un menor número de batidas de la aleta caudal para cubrir una misma distancia (Videler y Wardle, 1991). En consecuencia, a la misma velocidad absoluta, peces más grandes tendrán mayor tiempo de fatiga y mayor velocidad de crucero máxima.

La temperatura del agua tiene una incidencia muy importante en la capacidad de franqueo de obstáculos por parte de un pez, al afectar tanto a su metabolismo como a las características físicas del agua. Como se observa en la Figura 2, mientras que la velocidad máxima aumenta con la temperatura del agua de forma muy notable (por ejemplo, para un ejemplar de 20 cm prácticamente se duplica al pasar la temperatura de 5°C a 15°C), el tiempo de resistencia disminuye (por ejemplo, en el caso anterior disminuye del orden de 5 veces) (Beach, 1984). La consideración conjunta de ambas variables determina la capacidad de tránsito del pez por el obstáculo considerado. En el estudio llevado a cabo por Ovidio y Philippart (2002) en el río Mosa se observa como los peces tratan de atravesar el obstáculo inmediatamente después de alcanzarlo. No obstante, si no son capaces de superarlo, se desplazan hacia aguas abajo hasta varios cientos de metros y esperan, incluso varias semanas, a que mejoren las condiciones ambientales (aumento de los niveles de agua o de la temperatura del agua).

Por otra parte, se ha demostrado que existen diferencias significativas de resistencia a velocidades sostenidas entre peces de una longitud comparable, que se deben a variaciones morfológicas y fisiológicas (Breen et al., 2004). Morfológicamente, la relación entre peso y longitud supone una considerable variación entre individuos. Esta variación también refleja la cantidad relativa de musculatura disponible para proporcionar capacidad de propulsión, que puede afectar directamente a la capacidad natatoria. Estas pequeñas pero significativas

diferencias en la forma corporal entre individuos también producen cambios sutiles en el arrastre experimentado por cada pez. Además, las reservas de energía almacenadas en las células musculares probablemente varían entre individuos.

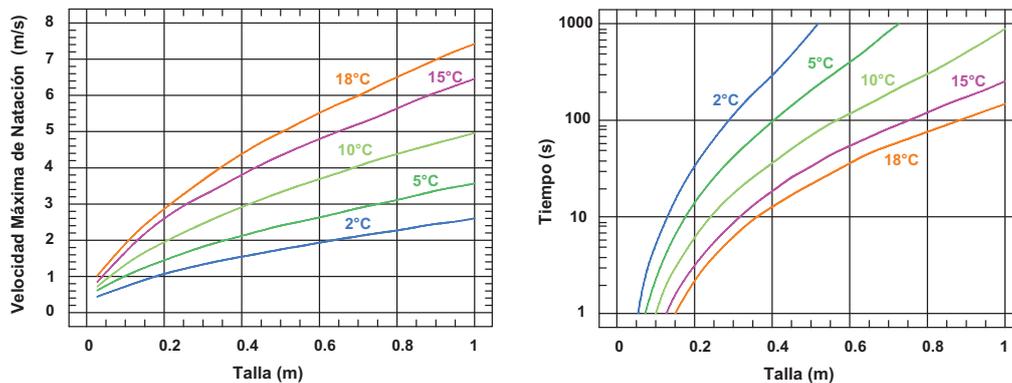


Figura 2 Influencia de la temperatura del agua en la velocidad máxima de natación (izquierda) y en el tiempo de permanencia a dicha velocidad máxima (derecha). Redibujado de Larinier et al. (1998) a partir de Beach (1984).

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. Bainbridge (1960) estudia las velocidades punta de tres especies diferentes y concluye que dichas velocidades son independientes de la especie considerada, y que se sitúan en la región de 10 LC/s, siendo LC la longitud corporal del pez. Aunque es una consideración muy general, este valor se ha tomado desde entonces como regla para la fijar las velocidades máximas alcanzadas por los peces (Hammer, 1995). Tras la revisión bibliográfica realizada por Videler (1993), el autor también considera esta velocidad de 10 LC/s como un buen primer valor para peces de entre 10 y 20 cm de longitud. Y más recientemente, Cowx y Welcomme (1998) proponen asimismo como simple aproximación una velocidad máxima 10 LC/s. Debe tenerse en cuenta que esta velocidad punta depende no sólo de la talla del pez, sino que también de la duración del esfuerzo. La regla de 10 LC/s se refiere únicamente a una duración concreta de aproximadamente 2 segundos, si esta duración se supera los valores de velocidad descienden hasta 4-6 LC/s (Beamish, 1978). Además, observaciones directas como las realizadas Ohlmer y Schwarzkopff (1959) han mostrado diferencias significativas entre especies en campo. Por ello, en familias como los ciprínidos es habitual considerar valores menores, entre 4 y 9 LC/s (Webb, 1975), y en familias como los salmónidos valores superiores de hasta 15 LC/s (Weaver, 1963).

En relación a la velocidad de crucero, Blaxter (1969) sitúa su límite superior en la mayoría de las especies de tamaño medio entre 2 y 3 LC/s, llegando para salmónidos a 3 - 4 LC/s. Cowx y

Welcomme (1998) también fijan un valor de 2 LC/s. Por su parte, Videler (1993) compara 13 estudios diferentes y sitúa en 3 LC/s la media de la velocidad de crucero máxima, para peces de tallas entre 5 y 54 cm.

Si bien la velocidad de crucero puede ser mantenida, conceptualmente, de forma indefinida, las especies migratorias deben remontar habitualmente zonas con velocidades que exceden su velocidad de crucero máxima. En consecuencia, distintos estudios (Beamish, 1978, Castro-Santos, 2005; Videler, 1993 y Webb, 1994) han desarrollado fórmulas de fatiga, es decir, relaciones entre la velocidad de la natación y resistencia, entendiendo como tal el tiempo durante el cual el pez puede mantener cierta velocidad de natación. Para estas velocidades sostenidas, el logaritmo del tiempo de fatiga decrece linealmente al aumentar la velocidad hasta la máxima velocidad sostenida, de la forma:

$$\ln T = a + bV \quad (2.1)$$

donde T es el tiempo de fatiga en minutos, V es la velocidad de natación en LC/s, y a y b son coeficientes; siendo $b < 0$.

Por tanto, la distancia D que puede ser cubierta por un pez en una corriente de agua con una velocidad determinada viene dada por la siguiente expresión:

$$D = (V - U)T \quad (2.2)$$

donde U es la velocidad de la corriente. En la Figura 3 se muestra un ejemplo de estas relaciones para la trucha arco iris.

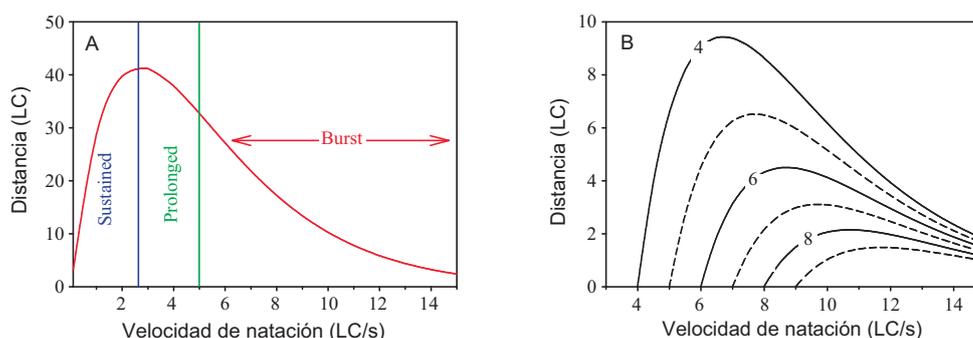


Figura 3 Distancia máxima (en longitudes corporales) basada en la Ecuación 2.1, en agua quieta (A) y en presencia de flujo (B; los contornos indican la velocidad del flujo). Los datos se corresponden con la trucha arco iris *Oncorhynchus mykiss* (Bainbridge, 1960). Fuente: Castro-Santos, 2005.

A partir de distintas fuentes bibliográficas, Elvira et al. (2008) desarrollan un modelo global para distintas especies, agrupándolas en familias de salmónidos y ciprínidos y para temperaturas del

agua templadas (prescindiendo del efecto de la temperatura). El modelo desarrollado es de la siguiente forma:

$$V = a(LC)^b + c \ln T \quad (2.3)$$

donde V es la velocidad máxima (cm/s), LC es la longitud corporal del pez (mm), T (s) es el tiempo durante el cual un pez puede mantener la velocidad V (cm/s) y a , b y c son coeficientes que dependen de la especie considerada y del rango de temperatura. Considerando que la distancia D (cm) que un pez puede nadar contra una velocidad del agua U (cm/s) viene dada por la Ecuación 2.2, la distancia recorrida por el pez se puede expresar de la siguiente forma:

$$D = \left(a(LC)^b + c \ln T - U \right) T \quad (2.4)$$

La distancia D puede maximizarse ($dD/dT=0$), si el pez adopta una velocidad óptima V durante un tiempo óptimo para nadar contra la velocidad del agua U , lo que conduce a la siguiente ecuación:

$$T_{\max} = \exp\left(\frac{U}{c} - \frac{a}{c}(LC)^b - 1\right) \quad (2.5)$$

donde T_{\max} es el tiempo que maximiza la distancia D . Introduciendo esta expresión en la Ecuación 2.4, la máxima distancia D_{\max} (cm) que el pez puede nadar contra la velocidad del agua U se obtiene de la siguiente forma:

$$D_{\max} = -c \cdot \exp\left(\frac{U}{c} - \frac{a}{c}(LC)^b - 1\right) \quad (2.6)$$

Los autores sugieren los siguientes coeficientes para las fórmulas de resistencia: $a=17.31$, $b=0.47$ y $c=-16.02$ para salmónidos y $a=30.34$, $b=0.34$ y $c=-14.29$ para ciprínidos (Figura 4).

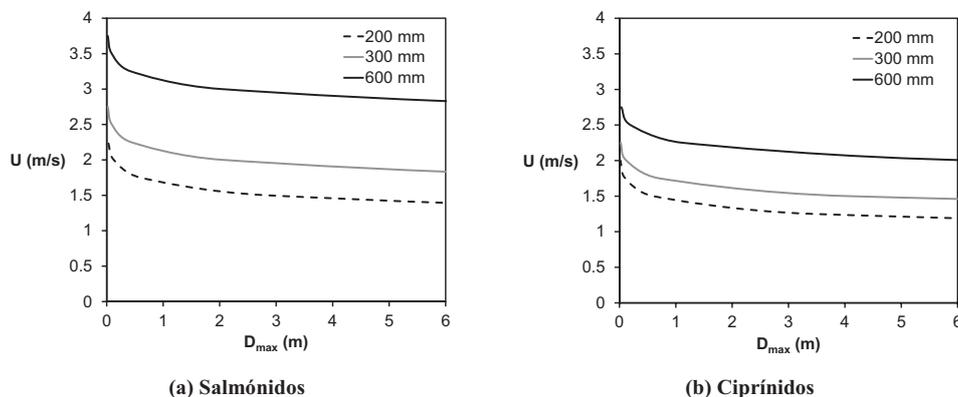


Figura 4 Curvas de fatiga para salmónidos y ciprínidos según el modelo propuesto por Elvira et al. (2008).

Cabe hacer algunas puntualizaciones respecto a este tipo de modelos y a los criterios de diseño derivados de los mismos, relativos a su validez y aplicabilidad en las condiciones que se encuentran en los dispositivos de paso. En primer lugar, los modelos descritos anteriormente asumen que los peces se enfrentan a una velocidad del agua constante, condición que raramente se encuentra en la naturaleza. En condiciones de flujo no uniforme como las que se dan en las escalas de peces de hendidura vertical, los peces se desplazarán a velocidades de natación variables, en función de la velocidad del flujo (Castro-Santos, 2005). Sin embargo, la mayor parte de los criterios de velocidad derivados de estas curvas de fatiga e incorporados a las directrices de diseño de escalas de peces asumen que el pez se desplaza con una velocidad de natación constante (Castro-Santos, 2006). Únicamente algunos modelos recientes, como el propuesto por Castro-Santos (2005, 2006), contemplan la variación tanto de la velocidad de natación como de la velocidad del flujo.

En segundo lugar, los estudios de determinación de velocidades de natación críticas se realizan habitualmente en condiciones experimentales, en canales abiertos o en respirómetros. No obstante, el rendimiento natatorio de los peces en condiciones artificiales varía respecto a condiciones naturales (Castro-Santos, 2005), difiriendo además en gran medida la mecánica de natación en condiciones de flujo alterado (Liao, 2007). Cabe destacar como la estructura turbulenta del flujo en estos dispositivos es, en general, muy diferente a la que se desarrolla en una escala de peces de hendidura vertical. Prácticamente en todos los experimentos los peces nadan en flujos uniformes y homogéneos, a pesar de las intensas fluctuaciones de velocidad del agua que se observan en estos dispositivos de remonte. Sólo recientemente, se ha comenzado a considerar el efecto de la turbulencia en la capacidad de natación de los peces (Enders et al., 2003; Liao et al., 2003; Pavlov et al., 2000).

Liao (2007) realiza una revisión bibliográfica a este respecto y señala como los flujos con fluctuaciones caóticas y amplias de velocidad pueden repeler a los peces, mientras que los flujos alterados que mantienen un componente de previsibilidad pueden atraerlos. La capacidad de mantener la estabilidad en flujos complejos, ya sea con movimientos activos o pasivos, juega un papel importante en si los peces buscan o evitan la turbulencia. Por una parte, se ha documentado como la turbulencia puede aumentar el coste de natación (Enders et al., 2003; Hinch y Rand, 1998; Pavlov et al., 2000; Webb, 1998) pudiendo incluso llegar a causar daños a los peces en niveles extremadamente altos, como en las proximidades de las turbinas de las centrales hidroeléctricas (Odeh et al., 2002). No obstante, los peces también pueden reducir el coste de locomoción explotando la turbulencia, mediante el uso de dos mecanismos distintos aunque no

exclusivos: la utilización de regiones con velocidad del flujo reducida, manteniendo su posición sin realizar una natación activa (Heggenes, 2002; McMahon y Gordon, 1989; Puckett y Dill, 1984; Shuler et al., 1994), y el aprovechamiento de energía de los vórtices, dependiendo fundamentalmente de la ratio entre el diámetro del vórtice y la longitud del pez (Liao et al., 2003; Triantafyllou et al., 2002). En el caso de la turbulencia de escala superior a la talla del pez (Figura 5c), Odeh et al. (2002) señalan que puede provocar pérdidas de equilibrio y desorientación del pez, reduciendo su capacidad natatoria y aumentando la vulnerabilidad a los predadores.

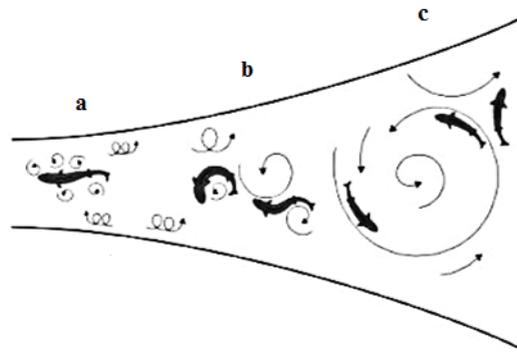


Figura 5 Escala de la turbulencia comparada con el tamaño de un pez (Odeh et al., 2002).

Por último, los peces requieren unos calados mínimos que les permitan alcanzar su potencial de natación (Dane, 1978). La inmersión total elimina el riesgo de falta de oxígeno, permite al pez desarrollar un empuje máximo y reduce el riesgo de lesiones corporales debido al contacto con el fondo del dispositivo de paso (Oregon Department of Forestry, 2000). En estudios de comportamiento “fast-start” (movimientos rápidos utilizados por los peces para evadir depredadores o capturar presas) como los llevados a cabo por Webb et al. (1991) con trucha arcoíris se han observado disminuciones del 30-50% en su velocidad de natación con pequeños calados. En estos contextos, los autores entienden como calados bajos los menores a 2-3 veces la altura de la aleta caudal. Asimismo, en la literatura pueden encontrarse otras recomendaciones de calado mínimo para facilitar el paso de peces en dispositivos como los caños de drenaje, expresadas también en función de las dimensiones del pez o simplemente como un valor mínimo. Por ejemplo, en las recomendaciones de diseño del estado de Alaska se establece un calado superior a 2.5 veces la altura de la aleta caudal, mientras que en el caso del estado de Washington el límite inferior de calado se sitúa en 0.24 m para la trucha adulta, el salmón rosado o el salmón keta y en 0.30 m para el salmón plateado o el salmón rojo (Hotchkiss y Frei, 2007). En el caso concreto de escalas de hendidura vertical, Teijeiro et al. (2006) evalúan varios diseños en función

de las capacidades de natación de los peces y sugieren valores mínimos de calado. Para el paso de la trucha sugieren un calado mínimo de 40 cm y para el paso de salmones de 50 cm.

2.3 Dispositivos de franqueo de obstáculos

2.3.1 Consideraciones generales de diseño

2.3.1.1 Factores de implantación

En el momento de la implantación de los dispositivos de franqueo existen numerosos condicionantes medioambientales que influyen directamente en su eficacia. Sin embargo, la influencia de la mayor parte de estos parámetros sobre el comportamiento de las especies migratorias está mal documentada, por lo que es difícilmente traducible en criterios de dimensionamiento (Pena, 2004).

A la hora de construir una obra de paso cabe destacar los siguientes factores (Pena, 2004):

- **Biológicos:** especies migratorias presentes en el curso de agua, ciclos biológicos, estacionalidad de los movimientos migratorios, capacidades de natación y salto, preferencias de las distintas especies en cuanto a luminosidad, temperatura...
- **Hidrológicos:** características hidrológicas del río, niveles del agua, variaciones estacionales de caudal...
- **Hidráulicos:** velocidad del flujo, variaciones de calado en el paso, relaciones caudal-calado, nivel de turbulencia, pendientes, geometría de la obra, disipación de energía...
- **Topográficos:** batimetría del lecho, situación de la obra, topografía de las riberas y del lecho, existencia de pozas a la entrada y salida de los pasos...
- **Gestión del agua:** mantenimiento de los caudales ecológicos, uso de los recursos hídricos, gestión medioambiental...

Cuando se analizan las causas de un funcionamiento deficiente de una estructura de este tipo, también se observan frecuentemente ciertos factores:

- **Ausencia de llamada:** a causa de una mala localización o un caudal insuficiente en la entrada en relación con el caudal del río.
- **Mala altimetría:** en relación con las variaciones de los niveles aguas arriba y aguas abajo

durante el periodo de migración, resultando en un caudal demasiado alto o bajo, o en un salto excesivo en la entrada. Esto puede ser debido a una mala apreciación del rango de niveles aguas arriba y aguas abajo durante la fase de planificación del proyecto, o a un cambio posterior en dichos niveles.

- Dimensionamiento defectuoso: un volumen reducido de depósitos, unos niveles de turbulencia y aireación excesivos, un salto entre depósitos elevado, una profundidad de agua insuficiente o un patrón de flujo en las piscinas no adecuado para las especies objetivo.
- Colmatación o bloqueo: debido a una mala protección contra cuerpos a la deriva, a un diseño de entrada muy expuesta, a defectos de mantenimiento o a una mala alimentación.
- Mal funcionamiento de los órganos mecánicos que regulan el caudal y los saltos entre piscinas, o que garantizan el funcionamiento del dispositivo en el caso de ascensores o esclusas para peces.

2.3.1.2 Localización de la entrada y efecto llamada

La entrada, es decir, el componente de la estructura situado más aguas abajo de una escala de peces convencional, es la parte individual más importante de los dispositivos de franqueo (Clay, 1995). Los otros dos elementos integrantes de un dispositivo son la escala propiamente dicha y la salida de los peces (o entrada del caudal). Para que un paso pueda considerarse eficaz es necesario que el pez pueda encontrar la entrada y franquear el obstáculo sin retraso, estrés o daños perjudiciales en su migración río arriba.

La atracción hacia un dispositivo de franqueo va a estar ligada a su localización en el obstáculo, en particular a la situación de la entrada, así como a las condiciones hidrodinámicas (caudales, velocidades, líneas de corriente) en sus proximidades (Elvira et al., 1995). El pez debe poder detectar el flujo de agua proveniente del paso a la mayor distancia posible de la entrada. La atracción estará ligada a la situación y orientación de la “llamada de agua”, su velocidad y su caudal. La entrada o entradas no deben estar enmascaradas ni por las salidas de las turbinas o de los vertederos, ni por zonas de recirculación o de aguas muertas. La entrada del paso no representa más que una parte reducida comparada con el tamaño del obstáculo y está alimentada por un caudal constituido por una fracción limitada del caudal total del curso de agua.

El problema de la atracción de los dispositivos se plantea en diferentes términos según las

especies a las que se dirija. Para los migradores diádromos se procurará atraer a todos los peces (o al menos el mayor número posible) al pie de la obra, con objeto de minimizar los retrasos en la migración. Para ciertas especies holobióticas, en particular los ciprínidos, bastará con restablecer una comunicación en el curso de agua a través del obstáculo. Se dará más importancia a la comodidad del pez en el paso que a la atracción hacia éste (Elvira et al., 1995).

En una presa existente, o en un obstáculo natural como un rápido o un salto, es posible observar el comportamiento de los peces al pie del obstáculo, es decir, su ruta de migración, sus zonas de concentración y los puntos de la presa donde se efectúan sus tentativas de franqueo. Estas indicaciones permiten elegir la situación de la entrada del paso. De manera general, el pez tiene tendencia a remontar la corriente lo más aguas arriba posible, hasta que se encuentra con una caída de una altura infranqueable o con corrientes o turbulencias demasiado violentas. La colocación de pasos en las orillas o en sus proximidades es preferible a la instalación en medio de la presa, no solamente porque los migradores tienen una tendencia general a desplazarse por las orillas sino también para facilitar el acceso para su control, vigilancia y mantenimiento (Larinier et al., 1998).

En una obra en proyecto, o en un curso de agua donde las especies migratorias han desaparecido y son objeto de un plan de restauración, no se pueden hacer más que hipótesis sobre el comportamiento del pez ante el obstáculo y sólo puede ser tenida en cuenta la experiencia de la persona que proyecta la obra. Cuando las zonas de bloqueo de los peces no están claramente identificadas, la eficacia de un dispositivo de franqueo será mayor si se instalan varias entradas en los puntos que a priori parecen más favorables.

El problema es particularmente complicado, así como de difícil solución, en aquellos casos en que el dispositivo de franqueo está destinado a diversas especies cuyas capacidades de natación y comportamiento migratorio pueden ser diferentes, y algunas veces hasta mal conocidos. Si el paso está destinado a salmones, la entrada estará situada lo más aguas arriba posible, relativamente cerca de la salida de las turbinas. Por el contrario, esta instalación no será favorable para los pequeños ciprínidos, que no poseen las mismas capacidades de natación. Para estas especies será preferible situar la entrada del paso aguas abajo, en una zona menos turbulenta. De aquí la necesidad de definir al principio de un proyecto las especies a las que está destinada la obra. En términos generales, los objetivos biológicos de la construcción de una escala de peces están evolucionando hacia la consideración de todos los movimientos de un gran número de especies y tamaños (Mallen-Cooper y Stuart, 2007; Silva et al., 2009), por lo que este problema es de gran relevancia.

Por otra parte, el caudal en el dispositivo de franqueo debe ser suficiente para competir con el caudal del curso de agua en el periodo de migración. De manera general debe ser del orden del 1 al 5% del caudal circulante (Larinier et al., 1998). La atracción será mayor cuanto más importante sea el caudal que transita por el paso y, en general, se puede afirmar que el aumento del caudal de atracción se traducirá en una mejora de la eficacia.

También es indispensable crear al nivel de la entrada del paso velocidades de agua elevadas, pero compatibles con todas las especies migratorias implicadas. Se puede adoptar como velocidad mínima en la entrada un valor del orden de 1 m/s, y la velocidad óptima para los salmónidos y los grandes migradores se estima del orden de 2 a 2.4 m/s (Larinier et al., 1998). Las velocidades del agua en la o las entradas tienen que ser lo suficientemente elevadas para las diferentes condiciones de nivel aguas abajo que se pueden encontrar en el periodo de migración. De manera general, pueden mantenerse velocidades suficientes modulando el caudal en el paso según las condiciones de nivel aguas abajo. Es importante, por tanto, conocer bien los niveles de agua en el periodo de migración que se tienen aguas arriba y abajo del obstáculo.

Por último, cabe señalar que la situación de la entrada en el obstáculo no es el único factor a tener en cuenta. La salida del paso no tiene que estar situada ni en una zona de fuerte velocidad, en las proximidades de un aliviadero, para que el pez no pase otra vez aguas abajo, ni en una zona de aguas muertas o de recirculación en la que pueda quedar atrapado.

2.3.1.3 Estacionalidad de los movimientos migratorios

Las migraciones de muchas especies son estacionales y están muy ligadas a una combinación de condiciones medioambientales (esencialmente caudales y temperatura del agua) que provocan o favorecen el desplazamiento de los peces y, por lo tanto, su interacción con diversos obstáculos (Ovidio y Philipart, 2002). En consecuencia, cualquier política de restauración del paso debe estudiar el comportamiento migratorio de las especies presentes en el río. La superposición de los periodos migratorios de las diferentes especies presentes en los ríos provoca que la exigencia de libre circulación sea casi permanente (Larinier et al., 1998)

El diseño inadecuado de las obras de paso puede aumentar el tiempo requerido para la migración, con los consecuentes efectos sobre las poblaciones de peces. En la cuenca del río Columbia, por ejemplo, los juveniles de salmón real alcanzan el estuario alrededor de 40 días más tarde que cuando no existían las presas, lo que supone haber doblado el tiempo necesario para la migración de los juveniles al mar (Marmulla, 2001). Estos retrasos suponen un aumento de la exposición a los predadores y a muchos otros riesgos como la exposición a organismos patógenos y parásitos.

Además, las fluctuaciones en los niveles de agua y velocidades debido a las demandas de energía también pueden tener importantes efectos sobre los peces: se puede inhibir su comportamiento migratorio, los juveniles pueden ser barridos por los altos caudales o quedar atrapados debido a las reducciones de caudal, etc. (Petts, 1984).

2.3.1.4 Eficiencia y eficacia de los dispositivos

La noción de la idoneidad de los dispositivos de paso es un concepto complejo, que sólo puede ser definido respecto a los objetivos biológicos marcados en su construcción. Los objetivos biológicos dependerán de las especies consideradas, del número de obstáculos existentes en el sistema hídrico y de la posición relativa de los obstáculos en el curso de agua.

En un paso diseñado para especies diádromas como el salmón y localizado aguas abajo de todas las zonas de desove, el objetivo es mover a toda la población migratoria a través del mismo. Si el río presenta numerosos obstáculos, el objetivo es minimizar el tiempo que le lleva al pez atravesar el obstáculo, de forma que el pez alcance las áreas de reproducción a tiempo. Por otra parte, si el paso está localizado aguas arriba de las zonas de desove, los requisitos de porcentaje y tiempo pueden ser menos exigentes a la vista de que el pez se puede reproducir aguas abajo y que la motivación a migrar puede ser variable. En cualquier caso, la escala de peces no debe constituir un factor limitante en el mantenimiento a largo plazo de las poblaciones migratorias (Marmulla, 2001).

En el caso de pasos de peces para especies potamódromas, cuyos objetivos biológicos son sobre todo evitar el fraccionamiento de las poblaciones en los distintos tramos, no es necesario pretender mover toda la población situada aguas abajo del obstáculo. El dispositivo puede permitir el ascenso de un cierto número de individuos que constituyan una proporción significativa con respecto a la población aguas abajo del obstáculo.

No obstante, el objetivo de un paso para peces puede ser más ambicioso y puede consistir en proporcionar paso para todos los individuos que deseen atravesar el obstáculo. Varios estudios (Mallen-Cooper y Stuart, 2007; Silva et al., 2009) recogen como los objetivos biológicos de la construcción de las escalas de peces están evolucionando hacia la consideración de todos los movimientos de un gran número de especies y tamaños. Sin embargo, los criterios hidráulicos y biológicos varían con las especies y el tamaño (Katopodis, 1990, 1999), entre otros aspectos por las diferencias en cuanto a capacidades natatorias. La mayoría de los dispositivos de paso han sido concebidos originalmente para facilitar el paso de salmónidos (Aarestrup y Jepsen, 1998; Linnik et al., 1998; Gowans et al., 1999; Stuart y Mallen-Cooper, 1999; Rivinoja et al., 2001),

familia de peces de alto valor comercial y con unas capacidades locomotoras muy elevadas. Por ello, en cursos fluviales donde no están presentes de forma natural los salmónidos, la instalación de este tipo de dispositivos ha mostrado una baja eficiencia con la ictiofauna nativa de estas áreas (Stuart y Mallen-Cooper, 1999). Además, las distintas especies también pueden presentar diferentes patrones de migración en la presa y aguas abajo de la escala (Johlander, 1999), con los consiguientes requerimientos para posicionar la entrada. Esto puede suponer unas demandas prácticamente imposibles de cubrir a la hora de diseñar el dispositivo.

Para determinar el grado de mitigación del impacto proporcionado por un paso de peces pueden utilizarse los conceptos de eficacia y eficiencia (Larinier, 2000). La eficacia refleja cualitativamente la capacidad del dispositivo para permitir el paso de todas las especies implicadas en un amplio rango de condiciones ambientales durante el período de migración. La eficacia puede ser medida mediante inspección visual, muestreos, contadores automáticos por resistividad o detección automática mediante técnicas de vídeo (Travade et al., 1998). Por su parte, la eficiencia de un dispositivo de paso de peces describe de una forma cuantitativa su funcionamiento, pudiéndose definir como la proporción entre los individuos que pueden continuar su migración después de atravesar exitosamente el dispositivo en un tiempo razonable y aquellos individuos que estaban presentes a pie de obstáculo. Las técnicas de marcado y de telemetría son usualmente utilizadas para valorar la eficiencia de los pasos de peces, así como los efectos acumulativos de varias presas a lo largo de un curso fluvial (Larinier, 2000)

Existen límites en la eficiencia de un paso para peces. Aun siendo 100% efectivo, un paso puede ser insuficiente para mantener el balance de una población migratoria a largo plazo. Como se ha señalado previamente, además de los problemas propios del paso de peces, hay efectos indirectos como los cambios en el régimen hidrológico, la calidad de aguas, el incremento en la predación, o la pérdida o deterioro de hábitat, que pueden ser también factores limitantes. Estos aspectos son altamente dependientes de las especies y el emplazamiento. Otras medidas de mitigación, como por ejemplo las relativas a la gestión de caudales en ciertas épocas del año, pueden resultar indispensables (Marmulla, 2001).

2.3.2 Tipología

Existe una gran variedad de dispositivos de remonte para los migradores, que pueden ser divididos según su funcionamiento en dispositivos discontinuos y dispositivos continuos (Figura 6). En los dispositivos discontinuos los peces son pasivamente transportados (OTA, 1995), mientras que en los de tipo continuo el pez debe realizar un trabajo de natación activo para

remontar el obstáculo. Otra característica importante de los dispositivos discontinuos es su funcionamiento cíclico, que puede implicar trastornos en el remonte natural de los peces por la discontinuidad de su actividad. Esta diferencia con los dispositivos continuos se convierte también en su mayor inconveniente, ya que el sistema es atractivo solamente en una fase de tiempo muy limitada, por lo que el pez presente a pie de obstáculo puede dejar la zona antes de que el ciclo retorne a una fase de atracción (Larinier et al., 1998). La principal ventaja de la instalación de un dispositivo discontinuo reside en su coste prácticamente independiente de la altura del obstáculo a franquear.

En esta sección se describen los principales dispositivos de remonte continuos, dentro de los que se incluyen las escalas de peces de hendidura vertical.

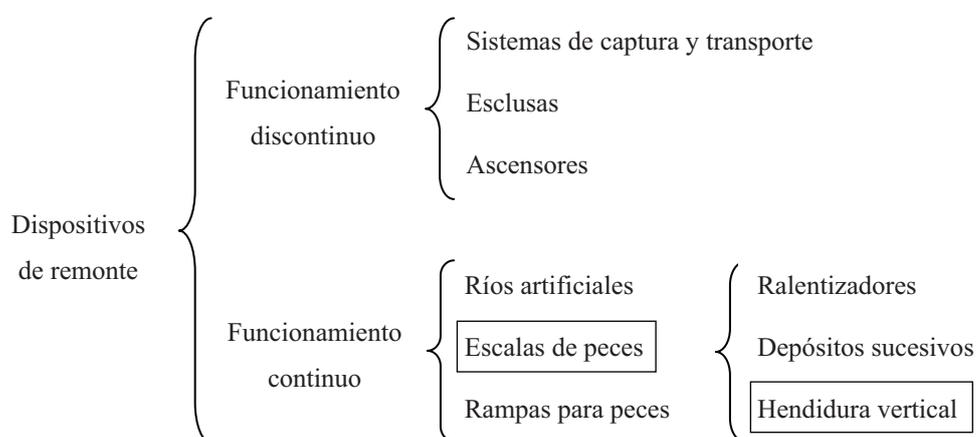


Figura 6 Principales tipos de dispositivos de remonte de obstáculos para peces migratorios.

2.3.2.1 Ríos artificiales

Los ríos artificiales son sistemas formados por un canal de baja pendiente (menor del 5%) que unen la zona de aguas arriba del obstáculo con la zona aguas abajo paralelamente al cauce principal, intentando imitar una corriente natural (Figura 7). Dentro del dispositivo se recrean las condiciones naturales de pendiente, caudal y sustrato; se utilizan materiales similares a los de la cuenca y se intenta integrar completamente el dispositivo en la zona. Estas estructuras están siendo ampliamente utilizadas después del éxito alcanzado en Europa en pequeñas presas (Cox y Welcomme, 1998; Gebler, 1996; Jungwirth, 1996; Nielsen, 1996; Parasiewicz et al., 1998; Seifert, 1996).

Además de la ventaja de una buena adaptación a las condiciones paisajísticas de la zona, este tipo de obra permite una utilización multiusos. Así, respetando ciertos criterios de diseño, puede

constituir simultáneamente un dispositivo de paso y un recorrido de aguas vivas para el descenso en canoas (Larinier et al., 1998).

Uno de los inconvenientes es que su funcionamiento óptimo se reduce a un pequeño rango de calados aguas arriba, así como la alta sensibilidad a las variaciones del nivel aguas abajo (Odeh, 2000). También debe tenerse en cuenta que la baja pendiente implica una gran necesidad de espacio y problemas de atracción de los migradores.



Figura 7 Río artificial en el río Gave de Pau en los Pirineos Atlánticos (Larinier et al., 1998).

2.3.2.2 Rampas para peces

Se denominan rampas para peces a aquellos dispositivos conformados en forma de rampa que se sitúan a continuación del obstáculo, hacia río abajo. Con la utilización de estos sistemas en pendiente se pretende eliminar el salto de agua al repartirlo a lo largo de toda la rampa e integrarlos efectivamente dentro del ecosistema fluvial.

La pendiente longitudinal de estos pasos ronda el 5% (1:20), aunque también existen tipos de rampa con una doble pendiente donde la pendiente lateral no suele exceder el 6.7% (1:15). El calado sobre la rampa debe ser superior a un mínimo de 60 cm (Cowx y Welcomme, 1998). La conformación del lecho puede ser muy variable como se aprecia en la Figura 8.

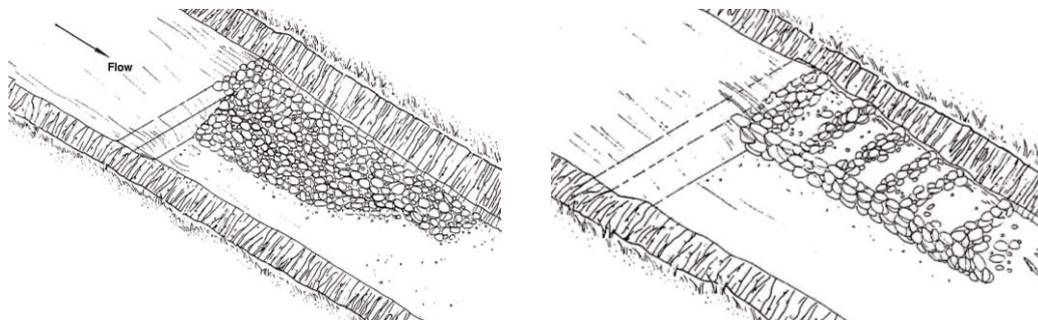


Figura 8 Diferentes tipos de rampas para peces, vista en perspectiva (Cowx y Welcomme, 1998).

Una de las principales ventajas de estos pasos es que el dispositivo está instalado sobre el propio lecho del río, lo que los hace fácilmente localizables por los migradores (Cowx y Welcomme, 1998); por otro lado se integran bien dentro del ecosistema fluvial.

2.3.2.3 Escalas de ralentizadores (Denil)

Las escalas de ralentizadores son dispositivos de franqueo que derivan de un modelo original puesto en funcionamiento por un científico belga, G. Denil. La idea consistía en un canal rectilíneo en pendiente dividido por una serie de separadores (deflectores o ralentizadores) colocados próximos unos a otros (Figura 9). Estos ralentizadores crean unas contracorrientes con velocidades opuestas al flujo principal que aumentan la disipación de energía a la vez que “impulsan” a los peces en su viaje de remonte.

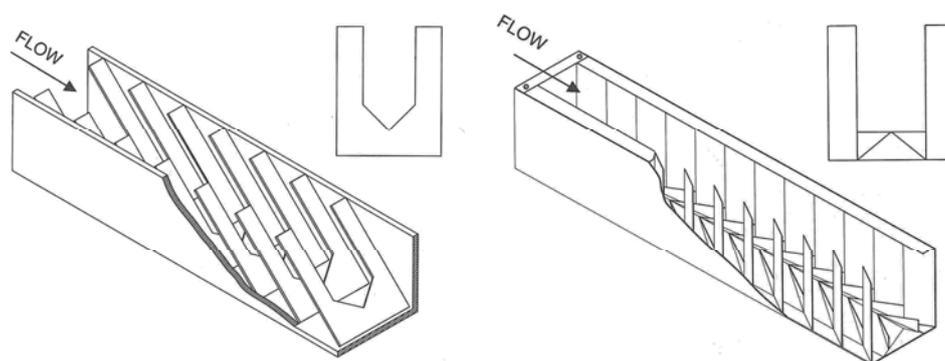


Figura 9 Escala de ralentizadores planos tipo Denil (izquierda) y tipo Alaska (derecha) (Odeh, 1999).

A lo largo de los años se han desarrollado diversos tipos de escalas de ralentizadores. Se pueden dividir en:

- Escalas de ralentizadores planos, tipo “Denil” y sus variantes como los ralentizadores tipo “Fatou”
- Escalas con ralentizadores más complejos, tipo “Alaska”
- Escalas de ralentizadores de fondo

El flujo asociado a estas escalas es altamente turbulento, lo que reduce la sedimentación en el interior de la escala y proporciona una gran capacidad de atracción (Katopodis, 1992). Por el contrario, el mal funcionamiento debido a la colmatación por cuerpos flotantes es un problema comúnmente asociado a este tipo de escala (OTA, 1995).

Para la pendiente de la escala, Clay (1995) señala valores comprendidos entre 11.3-18.5%,

Katopodis (1992) establece un rango entre 10-25% y OTA (1995) aporta una variación de pendientes de 10-15%.

2.3.2.4 Escalas de depósitos sucesivos

Las escalas de depósitos sucesivos son los dispositivos con más amplia difusión en el mundo (Clay, 1995). Consisten, de forma general, en un canal en pendiente dividido por tabiques transversales de diferentes diseños que conforman una serie de depósitos o piscinas sucesivas (Figura 10).

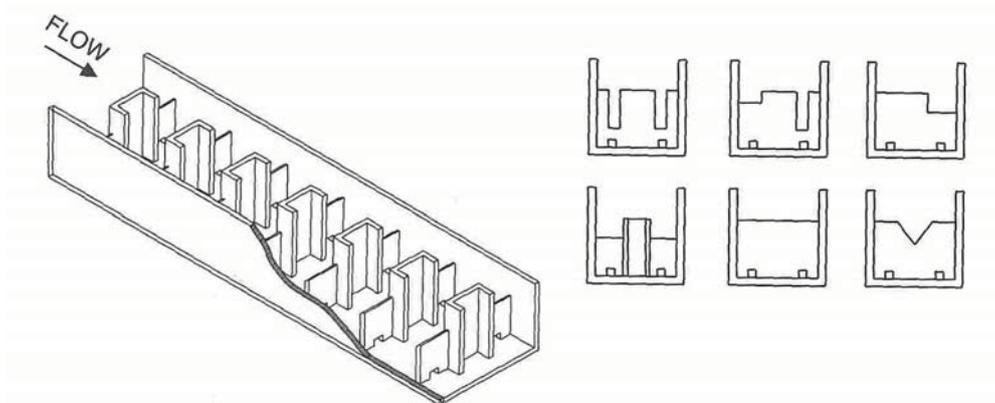


Figura 10 Escala de depósitos sucesivos y diferentes configuraciones de los tabiques que conforman las piscinas (Odeh, 1999).

Las escalas de depósitos sucesivos son susceptibles de adaptarse con relativa facilidad a las obras hidráulicas ya existentes; esta característica junto con la posibilidad de soportar cambios de dirección (incluso giros bruscos de 180°) las convierte en una de las mejores soluciones al franqueo de obstáculos. Por otro lado, es un paso mucho menos selectivo que las escalas de ralentizadores, es decir, ofrece mejores condiciones cuando existen varias especies migratorias en el curso fluvial. Las pendientes medias utilizadas en este tipo de dispositivo oscilan alrededor del 10% (Bell, 1986; OTA, 1995).

Dependiendo de las características de los tabiques divisores de los depósitos, las escalas de depósitos sucesivos se pueden clasificar en:

- Tabiques vertientes: la corriente de agua desborda por encima de los tabiques, que en su diseño más simple no tienen ningún tipo de orificios ni hendiduras.
- Tabiques con hendiduras: similar al anterior, pero con hendiduras o vertederos (laterales o superiores).

- Tabiques vertientes con orificios sumergidos: el paso de los peces se realiza tanto por una cota superior, al nivel del vertido del tabique, como por los orificios sumergidos.
- Tabiques con hendiduras asociadas a orificios sumergidos: es un diseño mixto entre los dos anteriores. En general, la hendidura y el orificio están situados sobre una diagonal del tabique, siendo la orientación en el tabique siguiente conforme a la otra diagonal.

2.3.2.5 Escalas de hendidura vertical

Las primeras escalas de peces de hendidura vertical fueron desarrolladas para su construcción en los rápidos del Hell's Gate en el río Fraser (Canadá) a través de estudios sobre modelo reducido (Clay, 1995). De forma simplificada, consisten en un canal rectangular en pendiente dividido en un cierto número de depósitos mediante tabiques transversales que poseen una hendidura vertical a lo largo de toda su altura (Figura 11). Se trata, por tanto, de un tipo especial de escala de depósitos sucesivos. El agua discurre a través de la hendidura de una piscina hacia la siguiente (Wu et al., 1999) hasta alcanzar el río, aguas abajo del obstáculo. La diferencia entre los niveles aguas arriba y aguas abajo se divide así en un cierto número de pequeños saltos (Rajaratnam et al., 1986).

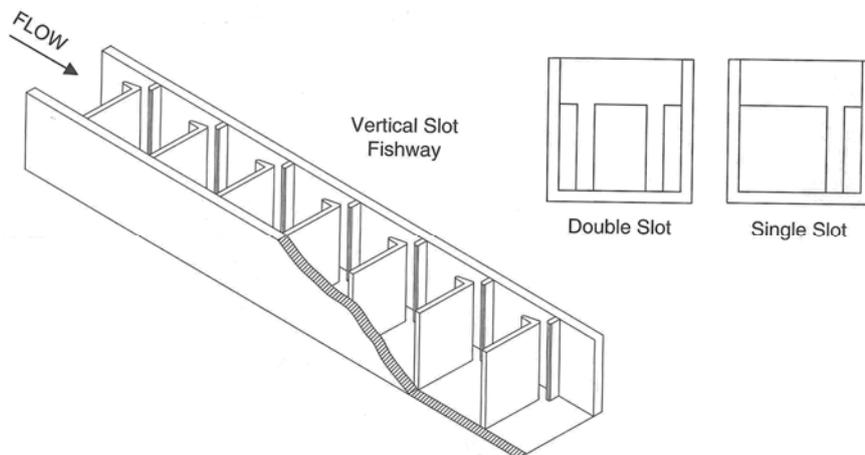


Figura 11 Escalas de hendidura vertical. Diferentes configuraciones de los tabiques que conforman las piscinas: de simple o de doble hendidura (Odeh, 1999).

A partir del modelo original que constaba de doble hendidura, se construyeron en todo el mundo dispositivos similares basados en el mismo principio, la mayoría de las veces provistos de una sola hendidura. La geometría de las ranuras y las dimensiones de los depósitos pueden variar sensiblemente de una instalación a otra. Así, pueden existir diferentes tipos de escalas de hendidura vertical según tengan o no deflectores laterales, con simple o doble hendidura, con

zócalo en la solera de la hendidura, con deflectores longitudinales cortos asociados a los tabiques transversales principales, etc. Sin embargo, a partir de estudios efectuados en Canadá sobre modelo reducido (Rajaratnam et al., 1986, 1992) se recomiendan longitudes de depósito del orden de 10 veces la anchura de la hendidura y anchuras de depósito de aproximadamente 8 veces la anchura de la hendidura.

Las escalas de hendidura vertical son frecuentemente usadas para obstáculos de poca altura y en obstrucciones naturales donde los caudales son incontrolables o sufren grandes variaciones. Una de las grandes ventajas de las escalas de hendidura vertical es su adaptabilidad a las variaciones de nivel, permaneciendo estable su funcionamiento hidráulico. Otras características ventajosas de cara al remonte de los migradores son las siguientes: proporcionan zonas de descanso a los migradores en su ascenso, permiten que los peces elijan la profundidad de natación según las condiciones de luz, turbidez, etc., y facilitan un camino de ascenso no tortuoso por el dispositivo (Clay, 1995). Esto es particularmente importante para los no-salmónidos en ríos tropicales y subtropicales, que presentan menores capacidades natatorias y/o no tienen capacidad de salto (Stuart y Mallen-Cooper, 1999).

2.4 Estudios hidráulicos en escalas de hendidura vertical

Este tipo de estudios están destinados tanto a caracterizar hidráulicamente la estructura de paso como a optimizar su diseño, de forma que se consigan velocidades, saltos y niveles de turbulencia compatibles con las especies objetivo. Habitualmente se realizan sobre modelos físicos, aunque también es posible utilizar modelos numéricos de flujo en lámina libre, que complementan los resultados experimentales.

Históricamente, la gran mayoría de estos estudios hidráulicos se han llevado a cabo en modelos físicos a escala reducida (Larinier et al., 1998; Katopodis y Williams, 2012). Dependiendo del tipo de investigación a realizar las escalas de los modelos varían considerablemente (de 1:3 a 1:10 en estudios del paso propiamente dicho; de 1:10 a 1:25 en estudios de la implantación de la obra). Se trata de estudios costosos (en tiempo y en recursos), pero que permiten evitar errores que serían difíciles y mucho más costosos de rectificar a posteriori.

Los estudios sobre modelo numérico suponen un ahorro en tiempo y en recursos con respecto a los ensayos experimentales. No obstante, dadas las complejas características del flujo en estos dispositivos, es necesario tener presentes las hipótesis y simplificaciones realizadas por los distintos modelos y analizar con cautela los resultados obtenidos (Cea et al., 2007a).

2.4.1 Estudios en modelo físico

Los estudios llevados a cabo por Rajaratnam et al. (1986, 1992) y realizados en la Universidad de Alberta (Canadá) pueden considerarse unos de los primeros estudios clave para el desarrollo de las escalas de hendidura vertical. Rajaratnam et al. (1986) analizan 7 diseños diferentes de escalas de hendidura vertical (Figura 12) con pendientes próximas al 5%, 10% y 15%, y para un amplio rango de caudales. Miden experimentalmente la velocidad del agua y los calados en el centro de las piscinas sobre un modelo situado en un canal de 5 metros de largo con una sección de 0.46 m de ancho por 0.91 m de alto.

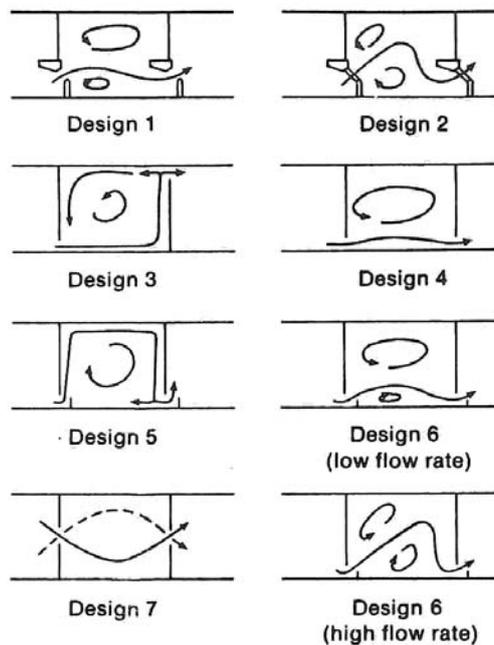


Figura 12 Diseños experimentales y patrones de circulación (Rajaratnam et al., 1986).

En este trabajo se establecen las bases que regirán los posteriores estudios:

- Definen las dimensiones geométricas de las piscinas en función de la anchura de hendidura.
- Caracterizan el flujo uniforme en estos dispositivos como el que se produce cuando el calado medido en el punto medio de la piscina no varía a lo largo de toda la escala, quedando de esta forma constante el salto entre dos piscinas consecutivas.
- Trazan aproximadamente las líneas de corriente, diferenciando entre las zonas de chorro directo de hendidura a hendidura y las zonas de recirculación.

- Comienzan el estudio de los patrones de la superficie libre del agua.
- Describen algunos perfiles verticales de las velocidades.
- Definen los factores de adimensionalización para el caudal y el calado relativo, y establecen la existencia de una relación lineal entre ambas, de la forma:

$$Q^* = \alpha \left(\frac{y_o}{b_o} \right) + \beta \quad Q^* = \frac{Q}{\sqrt{g S_o b_o^5}} \quad (2.7)$$

donde Q es el caudal que circula por la escala, g es la aceleración debida a la gravedad, S_o es la pendiente geométrica de la escala, b_o es la anchura de la hendidura, y_o es el calado medido en el punto medio de la sección transversal central y α y β son coeficientes que sólo dependen de la geometría de las piscinas. Para cada uno de los diseños se establece un valor de los coeficientes α y β (Tabla 2).

Tabla 2 Ecuaciones adimensionales de descarga para los modelos estudiados por Rajaratnam et al. (1986).

Diseño 1	$Q^* = 3.77 \left(\frac{y_o}{b_o} \right) - 1.11$	Diseño 5	$Q^* = 2.67 \left(\frac{y_o}{b_o} \right) - 0.52$
Diseño 2	$Q^* = 3.75 \left(\frac{y_o}{b_o} \right) - 3.52$	Diseño 6	$Q^* = 2.71 \left(\frac{y_o}{b_o} \right)$
Diseño 3	$Q^* = 2.84 \left(\frac{y_o}{b_o} \right) - 1.62$	Diseño 7	$Q^* = 2.91 \left(\frac{y_o}{b_o} \right) - 3.22$
Diseño 4	$Q^* = 5.85 \left(\frac{y_o}{b_o} \right) + 0.67$		

Este estudio tiene continuación en el análisis de 18 diferentes diseños de escalas de hendidura vertical (Figura 13 y Figura 14) llevado a cabo por Rajaratnam et al. (1992). La metodología experimental es similar, con pequeñas variaciones en las dimensiones de los modelos. El modelo cuenta con 9 piscinas sobre un canal de 4.88 m de largo por 0.305 m de ancho y con una altura de 0.56 m. Al igual que en el estudio previo se utiliza un amplio rango de caudales y tres pendientes de próximas al 5%, 10% y 15%.

Siguiendo el esquema de análisis de Rajaratnam et al. (1986) se calculan las ecuaciones adimensionales para cada uno de los 18 modelos (Tabla 3). Se obtienen asimismo las líneas de corriente que describen la circulación del agua para los 18 diseños, y se agrupan los modelos con un funcionamiento hidráulico similar.

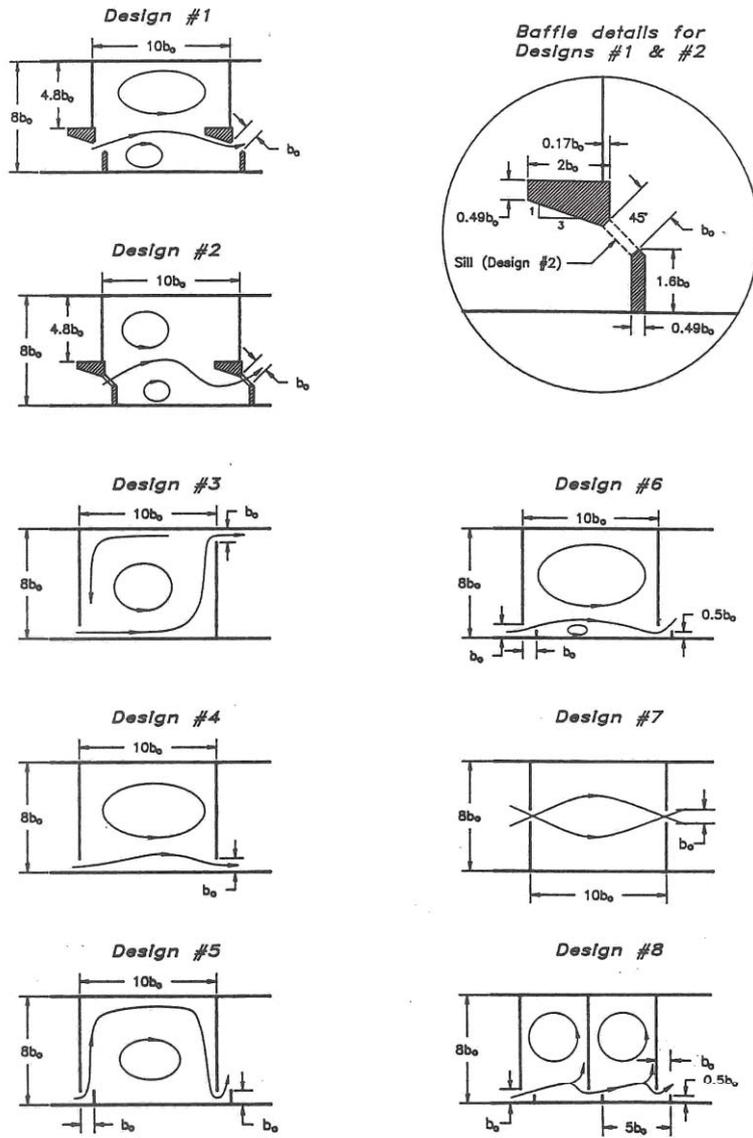


Figura 13 Detalle de los 18 diseños de escalas de hendidura vertical y patrones de circulación (Rajaratnam et al., 1992) [continúa]

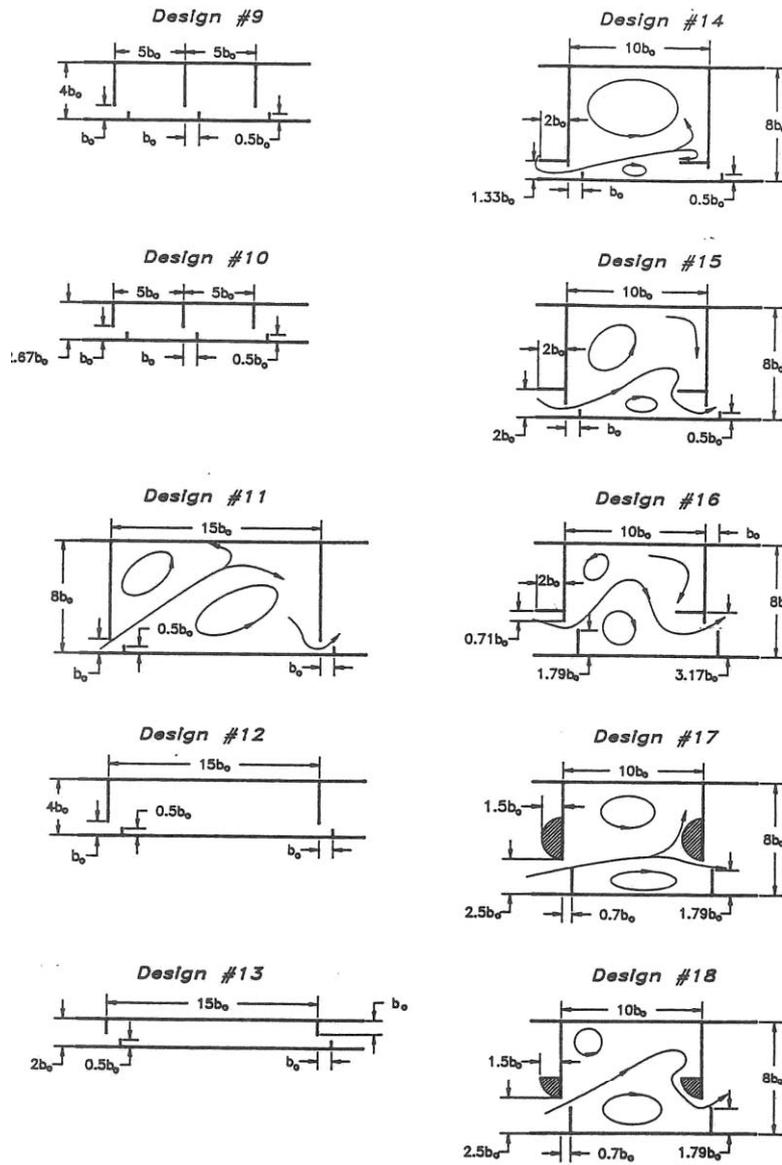


Figura 14 [continuación] Detalle de los 18 diseños de escalas de hendidura vertical y patrones de circulación (Rajaratnam et al., 1992).

Teniendo en cuenta parámetros como niveles de turbulencia, campos de velocidades, velocidades en la hendidura, salto entre piscinas o facilidad constructiva, los autores recomiendan unas dimensiones geométricas próximas a $8b_0$ para la anchura y $10b_0$ para la longitud de piscina. Dentro de los diseños estudiados que cumplen estas relaciones, los autores recomiendan los diseños 6, 16 y 18.

Tabla 3 Ecuaciones adimensionales de descarga (Rajaratnam et al., 1992) para los modelos diferentes a los previamente estudiados en Rajaratnam et al., 1986.

Diseño 8	$Q^* = 1.66 \left(\frac{y_0}{b_0} \right)$	Diseño 14	$Q^* = 3.21 \left(\frac{y_0}{b_0} \right)$
Diseño 9	$Q^* = 1.65 \left(\frac{y_0}{b_0} \right)$	Diseño 15	$Q^* = 2.89 \left(\frac{y_0}{b_0} \right)$
Diseño 10	$Q^* = 1.40 \left(\frac{y_0}{b_0} \right)$	Diseño 16	$Q^* = 3.59 \left(\frac{y_0}{b_0} \right)$
Diseño 11	$Q^* = 2.98 \left(\frac{y_0}{b_0} \right)$	Diseño 17	$Q^* = 3.27 \left(\frac{y_0}{b_0} \right)$
Diseño 12	$Q^* = 3.11 \left(\frac{y_0}{b_0} \right)$	Diseño 18	$Q^* = 3.71 \left(\frac{y_0}{b_0} \right)$
Diseño 13	$Q^* = 4.13 \left(\frac{y_0}{b_0} \right)$		

Posteriormente, Wu et al. (1999) estudian más profundamente el diseño 18. Utilizan un canal de 9.75 m de largo, 0.912 de ancho y 0.6 m de alto en el que colocan un total de siete piscinas con este diseño. Cada piscina se construye a una escala 1:2.67 considerando una anchura de la hendidura para el prototipo estándar de 0.305 m; siendo las dimensiones 0.912 de ancho, 1.14 m de largo con una hendidura de 0.114 m. Las dimensiones en relación a la hendidura son las consideradas como idóneas en estudios previos, $10b_0 \times 8b_0$ (Figura 15). El trabajo experimental se realiza para tres pendientes (5%, 10% y 15%) y para caudales entre 10 y 69 l/s.

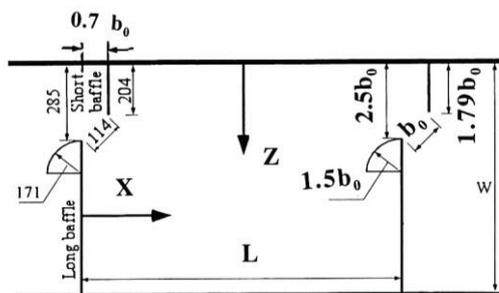


Figura 15 Dimensiones de la configuración experimental del diseño 18, vista en planta (Wu et al., 1999).

De lo relatado por Wu et al. (1999) las conclusiones más reseñables son:

- Definen dos patrones de circulación del agua para el flujo establecido en la escala. En el patrón 1, el flujo que sale de la hendidura atraviesa de forma directa la piscina hasta llegar a la siguiente hendidura, dejando dos zonas de recirculación a ambos lados. En el patrón 2, en las proximidades de la solera parte del flujo que sale de la hendidura se dirige a la esquina contraria y parte toma la dirección de la hendidura siguiente. En la parte superior del flujo, la circulación del agua es sensiblemente diferente (Figura 16). El patrón 1 se observa en los ensayos con pendiente del 5%, mientras que el patrón 2 se produce para las pendientes del 10 y el 20%.

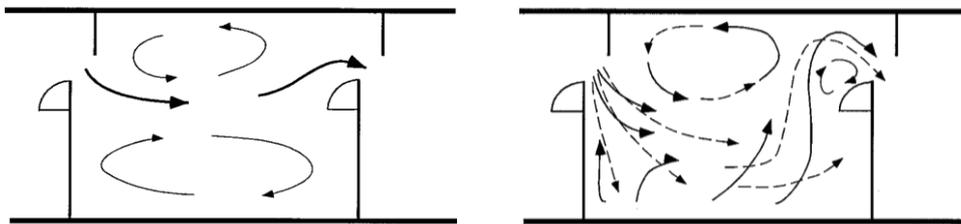


Figura 16 Patrones de circulación observados en el diseño 18: patrón 1 (izquierda) y patrón 2 (derecha). Línea continua para la circulación en las cercanías de la superficie, línea a trazos en las proximidades de la solera (Wu et al., 1999).

- Calculan las ecuaciones de descarga según la adimensionalización propuesta por Rajaratnam et al. (1986) teniendo en cuenta sus datos experimentales y los obtenidos por Rajaratnam et al. (1992), así como la relación existente entre el caudal adimensional (Q^*) y el calado en la hendidura (y_b), y la relación entre y_b e y_o (calado medido en la sección transversal central).

$$Q^* = 3.75 \left(\frac{y_o}{b_o} \right) \quad Q^* = \frac{2(y_b/b_o)}{S_o^{0.2}} \quad y_o = 0.533 \frac{y_b}{S_o^{0.2}} \quad (2.8)$$

- Definen y calculan el promedio de potencia disipada por unidad de volumen E :

$$E = \frac{\rho g Q \Delta h}{L W y_o} = \frac{\rho g Q S_o}{W y_o} \quad (2.9)$$

donde E es la potencia disipada por unidad de volumen (W/m^3), ρ es la densidad del agua (1000 kg/m^3), g es la aceleración de la gravedad (m/s^2), Q es el caudal circulante (m^3/s), Δh es el desnivel entre depósitos (m), L y W son la longitud y la anchura de las piscinas respectivamente (m), e y_o es el calado medio en la sección transversal central

(m). Teniendo en cuenta la relación $Q^* - y_o$, el valor de la potencia disipada puede escribirse como:

$$E = 3.75 \rho (g S_o)^{1.5} \frac{b_o}{W} \sqrt{b_o} \quad (2.10)$$

Con lo que se obtiene para el prototipo estándar (con anchura de hendidura de 0.305 m) unos valores de E de 89, 251 y 709 W/m³ para las pendientes del 5, 10 y 15%, respectivamente.

- Estudian las distribuciones de las velocidades a varios niveles con respecto a la solera, tanto en la hendidura como en el resto de la piscina, localizando las máximas velocidades (Tabla 4, Figura 17) en las proximidades de la hendidura. Destacan la bidimensionalidad del flujo para la pendiente del 5%.

Tabla 4 Velocidades máximas en las cercanías de la hendidura para diferentes escenarios experimentales (Wu et al., 1999).

S_o (%)	Q (l/s)	V_{max} (m/s)	Distancia a hendidura (m)
5	52	1.22	0.20
10	31	1.54	0.06
10	52	1.72	0.10
20	39	2.11	0
20	69	2.10	0.10

- Consideran la máxima velocidad en la hendidura aproximadamente igual a $\sqrt{2g\Delta h}$

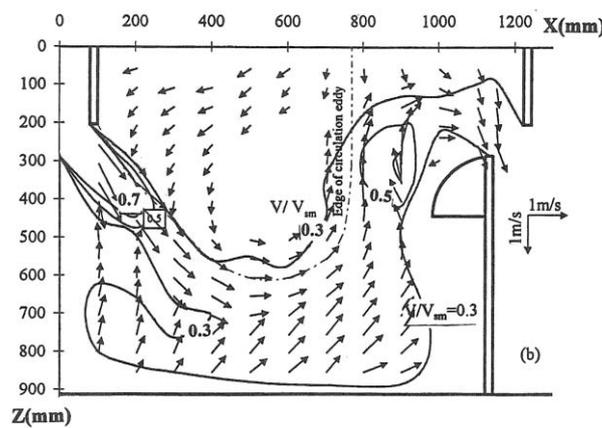


Figura 17 Campo de velocidades en las cercanías de la superficie del agua en el diseño 18, para $S_o=10\%$ y $Q=31$ l/s (Wu et al., 1999).

Puertas et al. (2004) continúan la línea de investigación iniciada por Wu et al. (1999) de análisis detallado de los diseños recomendados por Rajaratnam et al. (1992), centrándose en los diseños 16 y 6 (referidos como T1 y T2 respectivamente) y para pendientes del 5.7% y del 10% (Figura 18). Se presentan a continuación las conclusiones más relevantes obtenidas por dicho grupo de investigación.

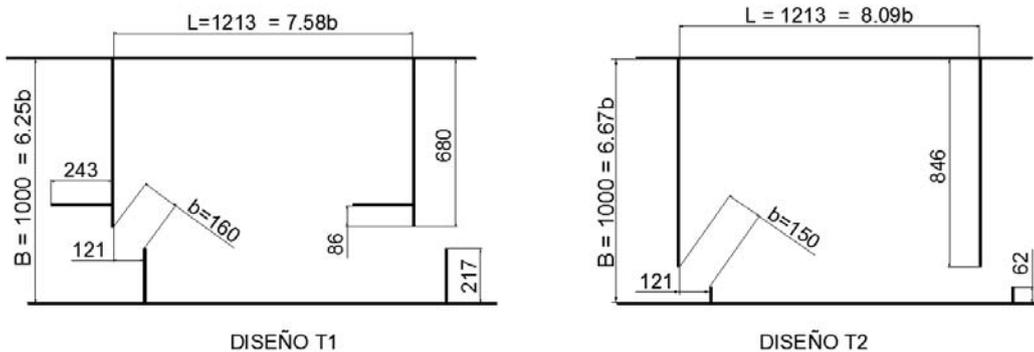


Figura 18 Dimensiones en mm de los modelos de piscinas estudiados por Puertas et al. (2004).

En primer lugar, definen un nuevo caudal adimensional Q^A , que permite encontrar las ecuaciones de descarga, según la expresión:

$$Q^A = \alpha \left(\frac{y_o}{b} \right)^\beta \quad Q^A = Q / \sqrt{g b^5} \quad (2.11)$$

Las relaciones encontradas son lineales, según se puede observar en la Tabla 5. Realizan asimismo la comparación con las ecuaciones de descarga de Rajaratnam et al. (1992), utilizando la definición de caudal adimensional propuesta por este último, y trasladando los resultados mediante la semejanza de Froude a una anchura de hendidura común. Además, encuentran relaciones lineales entre los diferentes calados característicos (el calado en la hendidura, el calado medio, el calado máximo y el calado mínimo) y el calado relativo en la sección transversal central y_o/b .

Por otra parte, constatan en los campos de calados que el comportamiento de la superficie del agua depende íntimamente de la configuración de los tabiques. Además la configuración de los campos de calados es prácticamente independiente del caudal circulante y de la pendiente.

Observan como el flujo establecido en las escalas es fundamentalmente bidimensional, desarrollándose en planos paralelos a la solera con velocidades verticales de escasa importancia excepto en la región de la hendidura. Las velocidades a lo largo de la vertical son constantes, independientemente de la distancia a la solera. Asimismo, señalan como las velocidades en

cualquier punto de la piscina dependen de la posición de dicho punto, de la configuración del diseño y de la pendiente; pero no están relacionadas con el caudal. En la Figura 19 y en la Figura 20 se muestran distintos planos de velocidad para los diferentes modelos y las dos pendientes estudiadas.

Tabla 5. Ecuaciones de descarga para los dos diseños de escalas de hendidura vertical; entre paréntesis, coeficiente de correlación r^2 (Puertas et al., 2004).

	Diseño T1		Diseño T2	
S_0 (%)	5.7	10.054	5.7	10.054
Q^A	$0.631y_0/b$ (0.9946)	$0.8888y_0/b$ (0.9889)	$0.6867y_0/b$ (0.9903)	$0.9988y_0/b$ (0.9903)

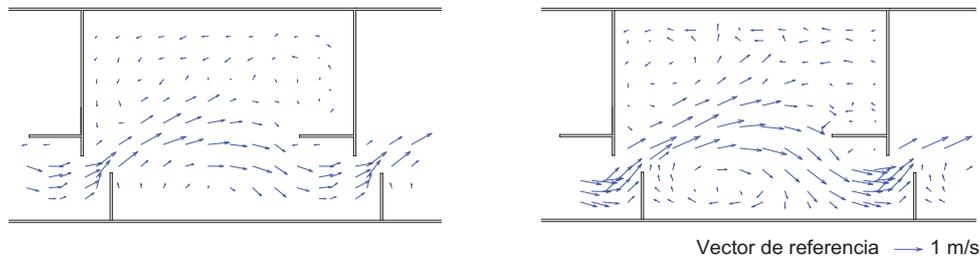


Figura 19 Campos de velocidades horizontales en planos paralelos a la solera para el diseño T1, para dos situaciones experimentales: $S_0=5.7\%$, $Q=0.085 \text{ m}^3/\text{s}$, $h=35 \text{ cm}$ (izquierda); $S_0=10.054\%$, $Q=0.105 \text{ m}^3/\text{s}$, $h=5 \text{ cm}$ (derecha) (Puertas et al., 2004).

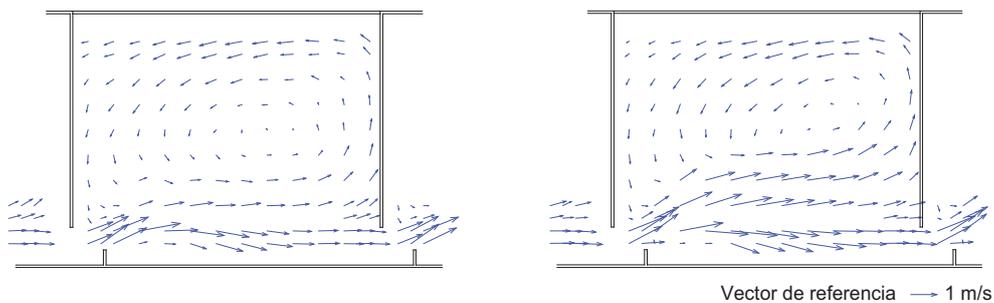


Figura 20 Campos de velocidades horizontales en planos paralelos a la solera para el diseño T2, para dos situaciones experimentales: $S_0=5.7\%$, $Q=0.054 \text{ m}^3/\text{s}$, $h=25 \text{ cm}$ (izquierda); $S_0=10.054\%$, $Q=0.075 \text{ m}^3/\text{s}$, $h=25 \text{ cm}$ (derecha) (Puertas et al., 2004).

A partir de los resultados experimentales de los campos de velocidades, definen tres patrones de flujo, que se muestran en la Figura 21. Estos patrones forman en general dos regiones. Una zona donde el flujo circula, con trayectoria curvilínea, directamente de una hendidura a la hendidura siguiente con altas velocidades, denominada región de flujo directo. Y una zona caracterizada por

la existencia de remolinos de eje vertical, velocidades menores y por flujos en sentido inverso, denominada región de recirculación.

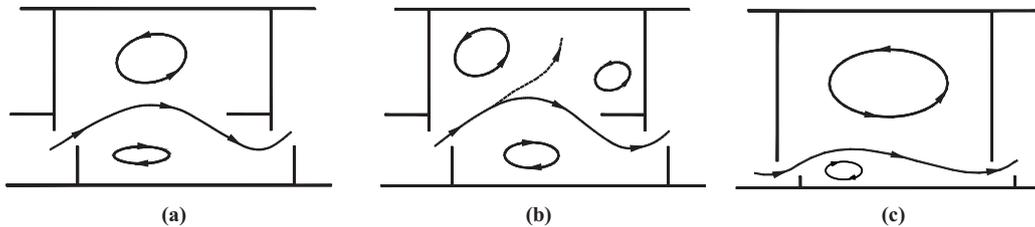


Figura 21 Patrones de flujo en las piscinas, a) diseño T1, $So=5.7\%$; y $So=10.054\%$ con $Q^A < 2.75$; b) diseño T1, $So=10.054\%$ con $Q^A > 2.75$. c) diseño T2 (Puertas et al., 2004).

Para evaluar los niveles de aireación y turbulencia en las escalas, utilizan como indicador la potencia disipada por unidad de volumen. En ambos diseños el valor de la potencia disipada es muy similar, e independiente del caudal circulante.

Además de obtener el valor de la potencia disipada, Puertas et al. (2004) estudian la energía cinética turbulenta: su distribución en las piscinas, su dependencia con el caudal y su variación con la altura sobre la solera. Las zonas de alta energía turbulenta se corresponden con la región de flujo directo donde las velocidades son más elevadas, es decir, especialmente en la hendidura y en las áreas adyacentes a ésta siguiendo la dirección del flujo principal. La región de recirculación, que ocupa gran parte de la piscina en los patrones de circulación, se corresponde con amplias áreas de baja turbulencia. En general, la energía cinética turbulenta es independiente tanto del caudal circulante como de la altura sobre la solera considerada. Sin embargo, para la zona de altos niveles de turbulencia se aprecian mayores valores en las proximidades de la solera y en la capa más superficial.

Por su parte, Liu et al. (2006) profundizan en el estudio de la estructura del flujo y de la turbulencia del diseño 18 (Rajaratnam et al., 1992; Wu et al., 1999), para dos pendientes, 5.06% y 10.52%, y dos caudales, 31.2 l/s y 52 l/s. Realizan dos tipos de ensayos: ensayos encaminados a estudiar los planos de velocidades y ensayos dirigidos a caracterizar el chorro (la zona de flujo directo).

En este diseño, comparan las velocidades en las piscinas con las velocidades máximas en la hendidura. Así, observan que las velocidades en las zonas de flujo directo son de aproximadamente el 60-70 % de las velocidades máximas en la hendidura (V_{ms}), mientras que en las regiones de recirculación las velocidades son menores del 30% de V_{ms} . En la Figura 22 se muestran los campos de velocidades en las piscinas para cuatro situaciones experimentales. Se

observa que para la pendiente inferior el flujo es más directo de hendidura a hendidura con dos zonas de recirculación. En cambio, para la pendiente de 10.5% la salida del agua de la hendidura es mucho más diagonal, creando un campo de velocidades con una zona de recirculación centrada en la piscina.

Los patrones de la energía cinética turbulenta y la línea de máxima velocidad se muestran en la Figura 23. Asimismo, Liu et al. (2006) estudian la distribución de la velocidad longitudinal en la zona de flujo directo (chorro) a partir de la línea de máxima velocidad. En la Figura 24 se muestra la velocidad longitudinal promediada en el tiempo u_j y adimensionalizada (u_j/u_{jm}) con la velocidad longitudinal máxima u_{jm} .

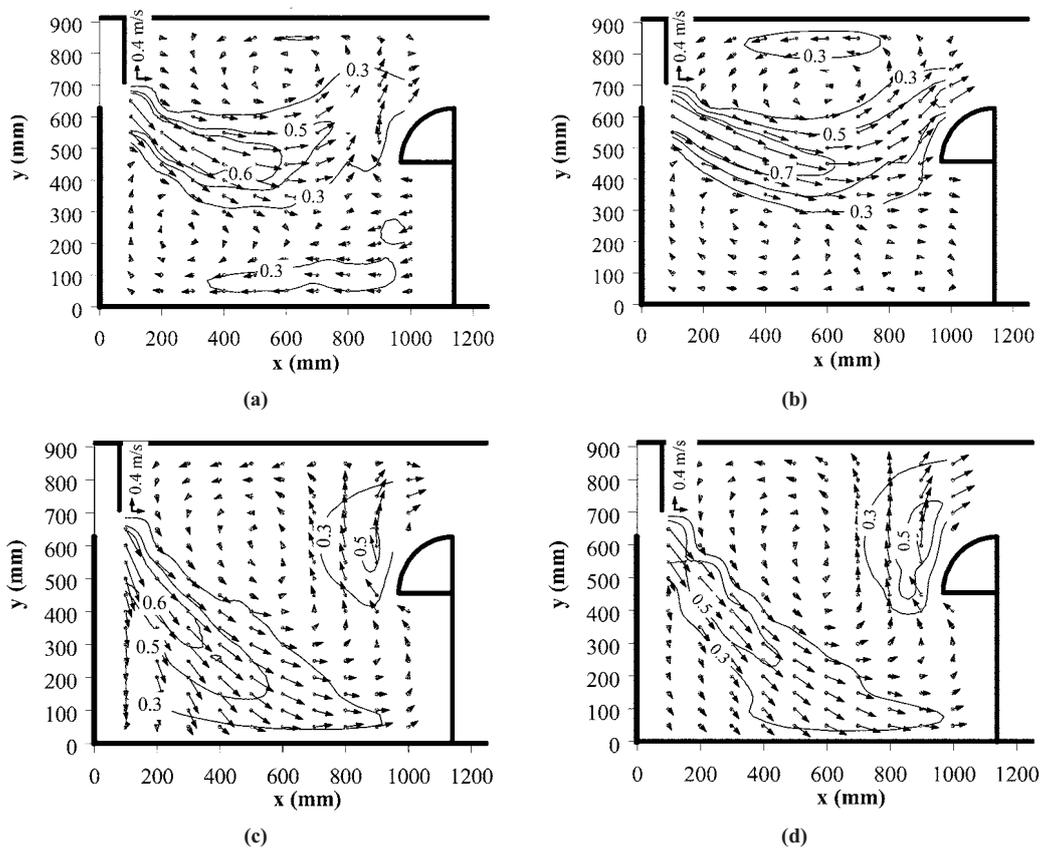


Figura 22 Planos de velocidad en el diseño 18. a) $S=5\%$, $Q= 52$ l/s, $z=10$ mm; b) $S=5\%$, $Q= 52$ l/s, $z=300$ mm, c) $S=10.5\%$, $Q= 31.2$ l/s, $z= 10$ mm, d) $S=10.5\%$, $Q= 31.2$ l/s, $z= 70$ mm (Liu et al., 2006).

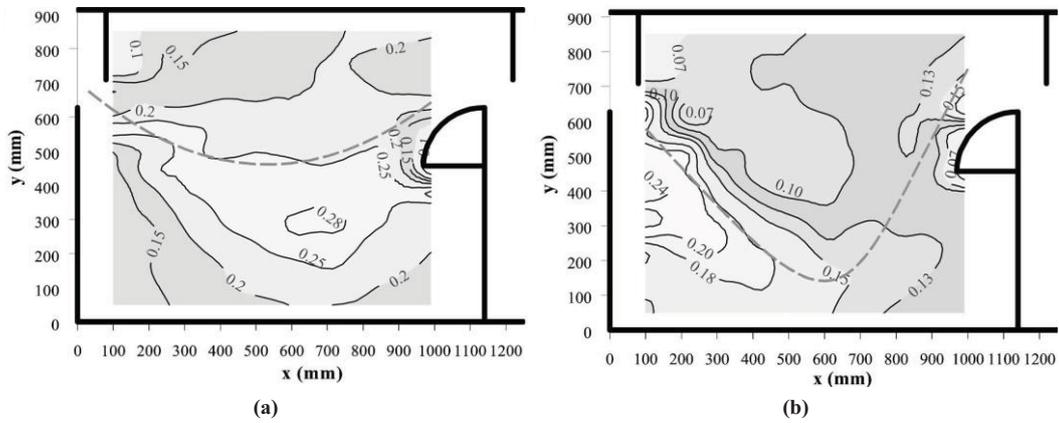


Figura 23 Líneas de contorno de la energía cinética turbulenta (adimensionalizada) y filamento de máxima velocidad. a) $S=5\%$, $Q=52$ l/s, $z=300$ mm; b) $S=10.5\%$, $Q=31.2$ l/s, $z=70$ mm (Liu et al., 2006).

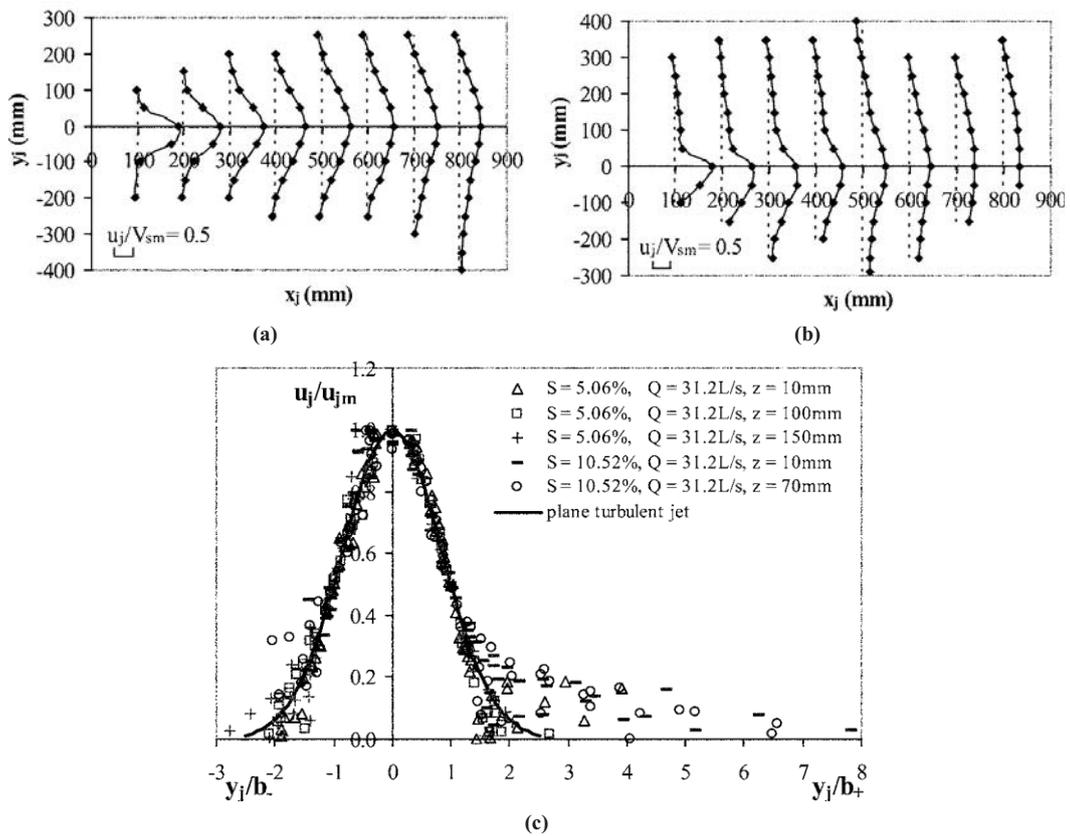


Figura 24 Distribución de la velocidad media longitudinal en el chorro. a) $S=5\%$, $Q=31.2$ l/s, $z=150$ mm; b) $S=10.5\%$, $Q=31.2$ l/s, $z=70$ mm, c) perfil de la velocidad adimensional (Liu et al., 2006).

Más recientemente, Tarrade et al. (2008) caracterizan el flujo en varias configuraciones de escalas de hendidura vertical, profundizando en el cálculo de la bidimensionalidad-tridimensionalidad de los campos de velocidad y en la cuantificación de la energía cinética turbulenta.

El modelo físico consta de 5 piscinas construidas a escala 1:4 tomando como referencia una hendidura estándar de 0.3 m. Estudian cuatro configuraciones de las piscinas (longitud de $L=0.75$ m con anchuras de $B=0.675$ m, 0.575 m, 0.5 m y 0.425 m) para tres diferentes pendientes (5, 10 y 15%) y tres caudales de ensayo (18, 23 y 27 l/s) (Figura 25). Adicionalmente, en una segunda fase de los ensayos, introducen en dos de las configuraciones cilindros de dimensión igual a la anchura de hendidura b , para analizar las modificaciones producidas en el flujo.

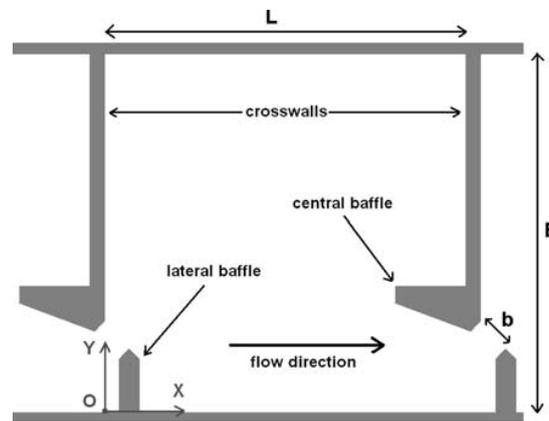


Figura 25 Características geométricas de una piscina (Tarrade et al., 2008).

Las medidas de velocidad se obtienen mediante el sistema PIV (Particle Image Velocimetry) en dos planos paralelos a la solera y en un plano vertical que pasa por las hendiduras. De forma complementaria, Tarrade (2007) realiza medidas con velocímetros ADV (Acoustic Doppler Velocimetry), a lo largo de varios perfiles verticales.

Como resultados más significativos de dichos estudios cabe señalar:

- Distinguen dos patrones de flujo, en función de la ratio longitud/anchura de piscina, y en los que se diferencian 3 áreas: una zona de flujo principal y dos grandes zonas de recirculación. Para la anchura mayor, el chorro relativamente recto resultante de la hendidura genera dos grandes recirculaciones en sentidos opuestos a ambos lados. En cambio, para las dos anchuras menores el chorro curvo impacta la pared contraria, creando una intensa recirculación en su parte convexa (Figura 26). En el caso de la

anchura de piscina intermedia, el patrón de flujo está también afectado por la pendiente de la escala, pues es posible generar ambos patrones.

- Confirman que, tal y como se ha señalado en otros estudios, el flujo en las piscinas es prácticamente bidimensional. La forma de las zonas de recirculación y los centros de las mismas no varían significativamente con la altura, y las velocidades y energía turbulenta permanecen idénticas desde la solera a la superficie. Exceptuando la zona de la hendidura, la componente vertical de la velocidad es menos significativa que las velocidades longitudinales y transversales.
- Observan como las velocidades y la energía cinética turbulenta varían de forma importante con la pendiente, mientras que permanecen prácticamente constantes al variar los caudales.
- Encuentran una buena correlación entre la energía cinética turbulenta media medida en las piscinas y la potencia disipada por unidad de volumen calculada. Ambas variables aumentan con la pendiente de la escala y permanecen independientes del caudal (Figura 27).
- Analizan las modificaciones que se producen en el flujo al introducir un obstáculo, considerando distintas posiciones dentro de la piscina y diferentes tipos de obstáculo. Observan como la colocación de un cilindro de dimensión igual a la anchura de hendidura en la zona de la salida de la hendidura puede limitar el número y tamaño de las zonas de recirculación, reducir los gradientes de velocidad en los contornos del flujo principal y disminuir la turbulencia (Figura 28). Teniendo en cuenta estas variaciones, consideran que puede facilitar el ascenso de las especies de pequeño tamaño.

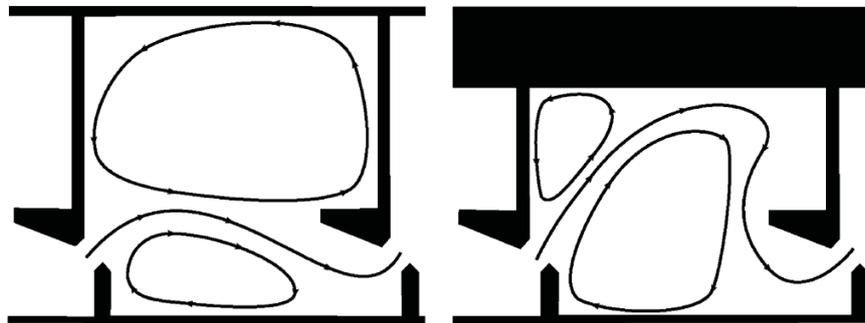


Figura 26 Patrones de flujo en la escala para una pendiente del 10% y B=2.7 m y 2 m (Tarrade et al., 2008).

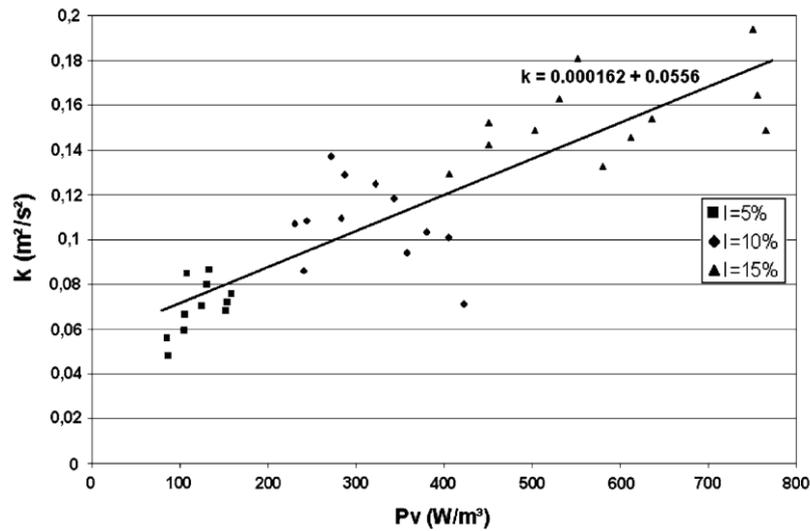


Figura 27 Relación entre la energía cinética turbulenta media en la piscina y la potencia disipada por unidad de volumen en $Z=0.6 \text{ m}$ (Tarrade et al., 2008).



Figura 28 Patrones de flujo en la escala al introducir un cilindro para una pendiente del 10% y $B=2.7 \text{ m}$ y 2 m (Tarrade et al., 2008).

Como análisis complementario, Tarrade et al. (2011) examinan en detalle la cinemática de estos flujos para dos anchuras ($B=0.675 \text{ m}$ y 0.5 m) y analizan las contribuciones medias y fluctuante. Realizan medidas bidimensionales con un velocímetro de partículas PIV (Particle Image Velocimetry) para determinar varios parámetros cinemáticos como la energía cinética turbulenta o la vorticidad.

Los campos de vorticidad medios muestran como el cortante es muy significativo dentro de una piscina para las diferentes anchuras, y los autores sugieren que podría suponer una barrera para las migraciones de los peces. Los altos valores de la energía cinética turbulenta en el chorro principal y la alta variación entre la vorticidad media y las distribuciones instantáneas de

vorticidad revelan como sólo una parte de la dinámica del flujo se alcanza estudiando el comportamiento medio. En esta línea, en este estudio evalúan la vorticidad instantánea y asocian más del 85% de la energía del flujo a las grandes estructuras de vórtice y a la dinámica media del flujo. Asimismo, localizan los máximos de la velocidad instantánea, velocidad media, energía cinética turbulenta, vorticidad media y vorticidad instantánea.

2.4.2 Estudios en modelo numérico

Los avances en los modelos numéricos para el cálculo del flujo en lámina libre han propiciado su aplicación a la hidráulica de las escalas de peces de hendidura vertical. En principio, la utilización de modelos numéricos requiere menos recursos físicos y económicos, y reduce el tiempo necesario para llevar a cabo un determinado estudio.

Estudios experimentales como los descritos anteriormente (Liu et al. 2006; Puertas et al. 2004; Rajaratnam et al. 1986, 1992; Tarrade et al. 2008; Wu et al. 1999) han puesto de manifiesto el carácter bidimensional del flujo en estos dispositivos, excepto en la zona de la hendidura vertical. Esto ha abierto la puerta a la utilización de modelos bidimensionales promediados en profundidad para simular el flujo, como en los estudios llevados a cabo por Cea et al. (2007b) o Chorda et al. (2010). No obstante, otros autores como Heimerl et al. (2008) y López (2010) han empleado modelos tridimensionales. A continuación se extraen las conclusiones más destacadas de dichos estudios.

En los trabajos desarrollados por Cea et al. (2007b) se estudian en modelo numérico los dos diseños de escalas de hendidura vertical previamente analizados experimentalmente por Puertas et al. (2004) (Figura 29). El estudio evalúa la posibilidad de usar un modelo de aguas someras bidimensional acoplado con un modelo de turbulencia adecuado para calcular el patrón de flujo y el campo de turbulencia en dichos diseños. El modelo resuelve las ecuaciones de aguas someras promediadas en profundidad, que asumen una distribución de presión hidrostática y un campo de velocidad homogéneo en profundidad. Dado que estas condiciones no se cumplen en algunas regiones del flujo, los autores analizan la calidad de los resultados numéricos, comparándolos con los resultados experimentales. En relación a los modelos de turbulencia, se emplean tres modelos promediados en profundidad de diferente complejidad: un modelo de longitud de mezcla, un modelo k- ϵ y un modelo de tensiones algebraicas. Tanto el modelo de longitud de mezcla como el modelo k- ϵ son modelos de viscosidad turbulenta lineales, que se basan en relacionar las tensiones de Reynolds con el tensor de velocidades de deformación medias mediante la hipótesis de Boussinesq. En cambio, los modelos de tensiones algebraicas (Algebraic

Finalmente, Cea et al (2007b) señalan que este tipo de simulaciones numéricas pueden ser consideradas una herramienta complementaria muy útil de cara al diseño de escalas de hendidura vertical. No obstante, los resultados numéricos en diseños de piscina más complejos y para pendientes mayores del 10% deben ser tomados con precaución, ya que la hipótesis de presión hidrostática puede ya no ser válida.

Por su parte, Chorda et al. (2010) utilizan un modelo de flujo en lámina libre bidimensional (TELEMAC-2D) similar al empleado por Cea et al. (2007b) para modelizar el diseño de escala de hendidura vertical estudiado experimentalmente por Tarrade et al. (2008) y Tarrade (2007) (Figura 30). Realizan simulaciones con dos anchuras de piscina diferentes y con tres pendientes distintas: 5, 10 y 15%. En un primer cálculo fijan una viscosidad turbulenta constante y posteriormente utilizan un modelo de turbulencia k- ϵ .

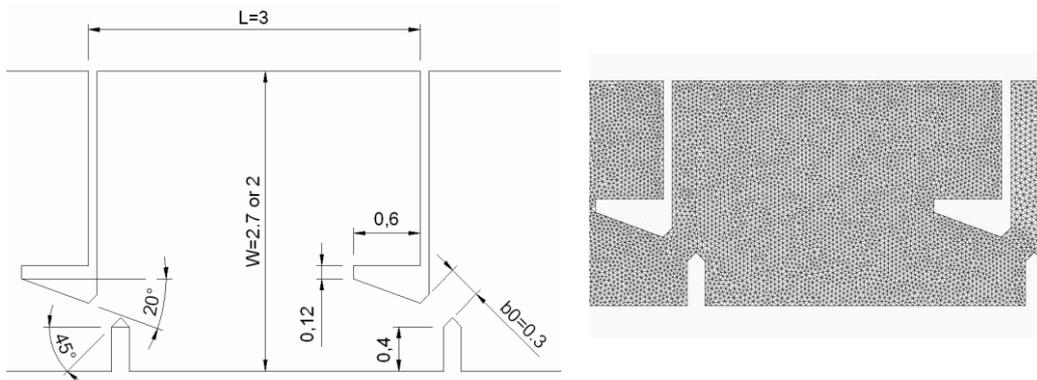


Figura 30 Dimensiones geométricas (m) y malla de cálculo de la escala de peces estudiada por Chorda et al. (2010) en modelo numérico.

La discretización espacial se realiza mediante una malla no estructurada que incluye una piscina de entrada, cinco piscinas completas y una piscina de salida. La malla tiene un tamaño uniforme de 0.03 m en las piscinas centrales y 0.05 m en la primera y última piscinas (Figura 30). En la entrada se prescribe un caudal constante y en la salida una relación calado-caudal y una distribución de velocidad uniforme, correspondientes a los estudios experimentales. En los contornos cerrados se aplica una condición de deslizamiento libre (sin fricción), mientras que para la fricción de fondo se selecciona un coeficiente de Manning de $n=0.0105 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$.

Los resultados numéricos se comparan con las mediciones experimentales de Tarrade et al. (2008) y las de Tarrade (2007) para validar el modelo. En el caso de las simulaciones con viscosidad turbulenta constante ($0.002 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$), se obtienen unos resultados que difieren enormemente de los experimentales. Se comprueba así que, dados los fuertes gradientes

hidrodinámicos, es necesario prestar una correcta atención a la modelización de la turbulencia, siendo necesario la utilización de un modelo de turbulencia.

En cambio, utilizando un modelo de turbulencia $k-\epsilon$, se obtiene un buen acuerdo con los resultados experimentales, con unas características turbulentas del flujo en las piscinas del mismo orden de magnitud que las medidas. No obstante, se sobrestima la intensidad de la turbulencia principalmente en la región de la hendidura, donde se producen intensos gradientes de velocidad, y aparecen limitaciones en la modelización de la zona del chorro y en regiones de estancamiento, debido a la utilización de un modelo de turbulencia basado en la viscosidad turbulenta como el modelo $k-\epsilon$.

Chorda et al. (2010) señalan como el modelo 2D de aguas someras empleado es capaz de reproducir correctamente las velocidades medias y los niveles de turbulencia para los patrones bidimensionales encontrados en una escala de peces de hendidura vertical. Además, es posible obtener dichas características del flujo con un coste computacional relativamente bajo. Esta capacidad permite realizar amplias pruebas sobre distintas configuraciones, minimizando así enormemente el volumen de experimentación en modelos a escala.

Por otra parte, en los trabajos desarrollados por Heimerl et al. (2008) se emplean dos modelos tridimensionales: el FENFLOSS, un código basado en el promediado de Reynolds de las ecuaciones de Navier-Stokes y desarrollado por el Institute of Fluid mechanics and Hydraulic Machinery (IHS) de la Universidad de Stuttgart, y el modelo CFX. La principal diferencia entre las simulaciones realizadas con los dos modelos es el tratamiento de la superficie libre. En el caso del modelo FENFLOSS la superficie libre se introduce como un contorno fijo de pared, mientras que con el programa CFX es posible utilizar un modelo multifase capaz de crear un contorno entre dos fluidos.

La geometría de la escala de peces de hendidura vertical estudiada está basada en investigaciones previas llevadas a cabo por Larinier et al. (2002) (Figura 31). Presenta una anchura de hendidura de 0.17 m, una longitud de piscina de 1.38 m y una anchura de piscina de 1.13 m. Se consideran tres posiciones distintas de los elementos de guiado y tres posibles longitudes de los mismos. El flujo se simula en cuatro piscinas completas.

Uno de los aspectos analizados en este trabajo es la distribución de las velocidades en las proximidades de la hendidura (Figura 31). Las máximas velocidades no se alcanzan en el centro de la hendidura, como se asume en otros trabajos, sino que se localizan directamente aguas abajo de la hendidura. Además, se señala que la velocidad no se distribuye uniformemente a lo largo de

la hendidura, sino que disminuye en la dirección de la superficie del agua. Las velocidades máximas se encuentran próximas a la solera y la mitad inferior de la piscina. En la superficie libre, las velocidades máximas se alcanzan aproximadamente 25 cm aguas abajo de la hendidura en la dirección del centro de la piscina.

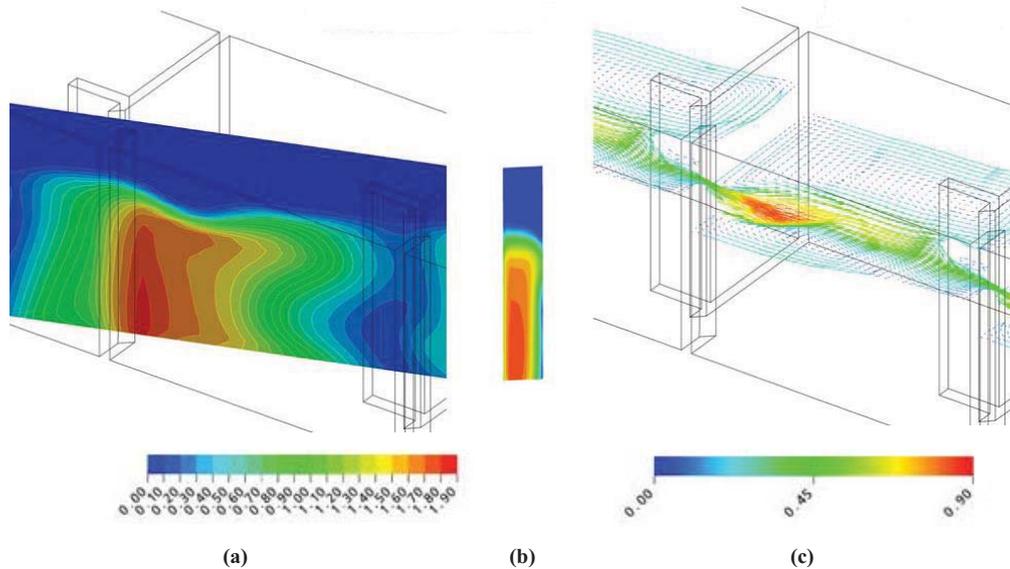


Figura 31 Distribución de velocidades en la hendidura: en la dirección del flujo principal (a), en la salida de la hendidura (b) y en la superficie (c) (Heimerl et al., 2008).

Otro de los aspectos analizados es la utilización de elementos de guiado del flujo. Sin elementos de guiado del flujo las líneas de corriente describen una curva pronunciada que es casi un pliegue. En cambio, al introducir un elemento de guiado el agua se mueve siguiendo una curva suave y fluye uniformemente hacia y a través de la hendidura. Al desplazar el elemento hacia la hendidura se consigue un campo de velocidades más uniforme, con valores pico menores. La proximidad a la hendidura significa que la velocidad del flujo en la hendidura es máxima en su centro. La posición del elemento de guiado influye en el ángulo con que el flujo principal alcanza la hendidura. El flujo principal se dirige en mayor o menor medida al centro de la piscina, influyendo en todo el volumen de la piscina (Figura 32). Por su parte, la influencia de la longitud del elemento de guiado es similar a la descrita para las variaciones en la posición (Figura 33). En consecuencia, Heimerl et al. (2008) recomiendan la instalación de elementos de guiado en los diseños de escalas de hendidura vertical.

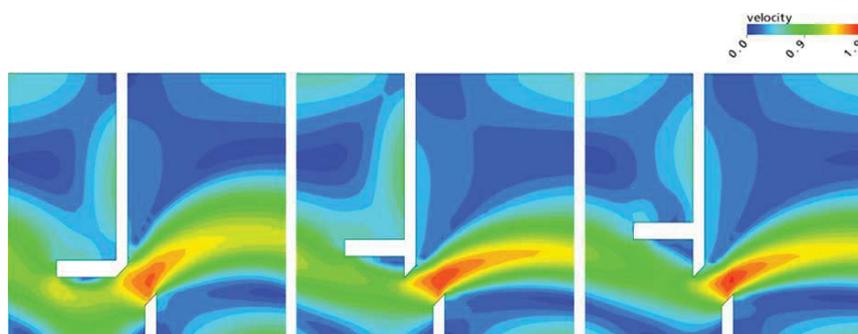


Figura 32 Patrón de flujo para diferentes posiciones de los elementos de guiado. Geometría original en el centro (Heimerl et al., 2008).

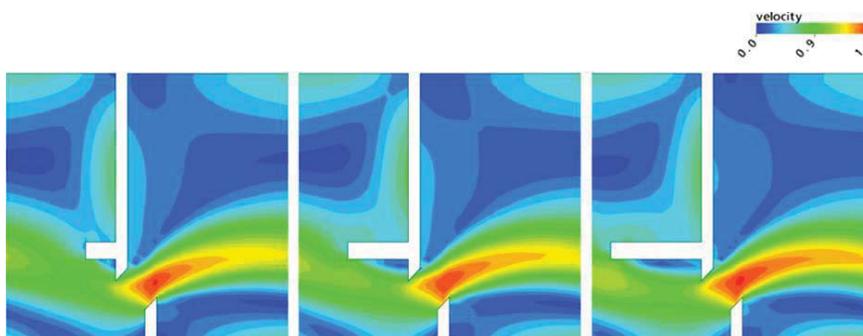


Figura 33 Patrón de flujo para diferentes longitudes de los elementos de guiado. Geometría original en el centro (Heimerl et al., 2008).

Por último, López (2010) estudia la aplicabilidad del método de Hidrodinámica de Partículas Suavizadas (Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH) al diseño de estructuras hidráulicas. Este método se caracteriza por la discretización lagrangiana del medio continuo mediante un conjunto de partículas, y por la reducción del problema al estudio de la interacción entre las mismas. Uno de los estudios de validación de López (2010) se lleva a cabo en una escala de peces, comparando los resultados numéricos con los obtenidos experimentalmente en un modelo físico a escala real situado en el Centro de Estudios Hidrográficos del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEH-CEDEX). Las dimensiones geométricas del modelo se muestran en la Figura 34, y el estudio se realiza con una pendiente del 7.5%. Para su modelización se emplean 328973 partículas fijas de 0.02 m en los contornos y 187676 partículas de 0.035 m para reproducir el agua.

El autor compara mediante análisis visual los patrones de circulación de flujo obtenidos numérica y experimentalmente (Figura 35). Asimismo, realiza una calibración con datos de velocidades medidas con sonda ADV en una malla de puntos del modelo físico. En ambos casos, observa

una gran correspondencia entre el modelo físico y el matemático. Por ello, López (2010) señala que la simulación numérica SPH es una alternativa viable para simular el comportamiento del flujo en estos dispositivos, que proporciona un buen ajuste con los campos de velocidades medidos experimentalmente.

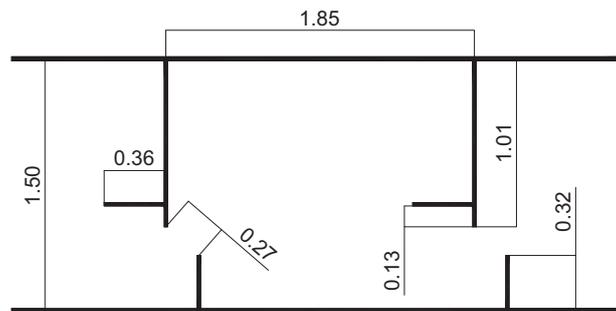


Figura 34 Dimensiones geométricas de las piscinas (m) y configuración de los deflectores (López, 2010).

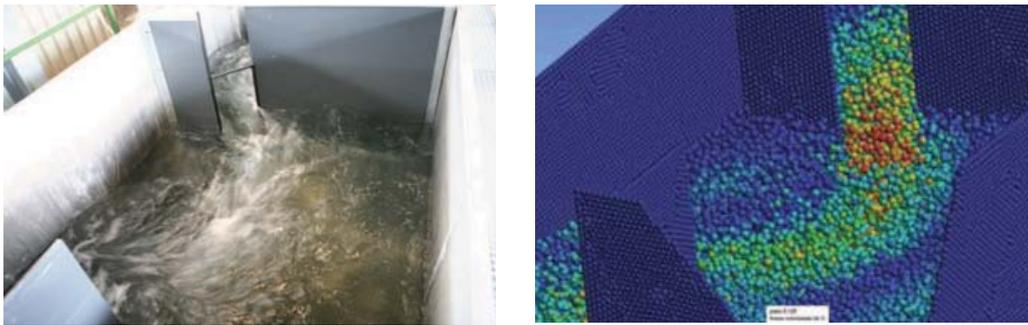


Figura 35 Detalle del chorro en la hendidura en modelo físico (izquierda) y numérico (derecha) (López, 2010).

2.5 Estudios biológicos en escalas de peces

Una posible aproximación al estudio de los movimientos de los peces en las escalas de peces es el seguimiento de los ejemplares en campo en situaciones naturales. Esta aproximación permite analizar la eficiencia de las escalas de peces y esclarecer qué proporción de las poblaciones migratorias realmente remontan y qué proporción alcanzan la entrada de los dispositivos. No obstante, el comportamiento de los peces en la naturaleza está influenciado por un gran número de factores y parámetros incontrolables. En consecuencia, la investigación basada únicamente en campañas de campo puede no ser capaz de determinar los mecanismos que permiten al pez localizar y remontar el paso eficientemente (Guiny et al., 2005).

Otra posible aproximación son los estudios experimentales en modelos físicos diseñados al efecto, en los que las condiciones ambientales están controladas y en los que es posible, por

ejemplo, realizar grabaciones detalladas de los movimientos de los peces (Guiny et al., 2005). Este tipo de estudios, en los que las variables de interés pueden ser manipuladas, constituyen una gran oportunidad para obtener una visión genérica sobre el comportamiento de los peces (Kempt et al., 2006; Silva et al., 2010).

En este apartado se incluyen una serie de trabajos que se engloban dentro de esta segunda categoría. Además de describir las características principales de estos estudios experimentales en modelo físico, se repasan las principales técnicas utilizadas para controlar el comportamiento de los ejemplares en este tipo de ensayos. Dado el limitado número de trabajos de este tipo, se han incluido en esa sección estudios en otros dispositivos similares, además de en escalas de peces de hendidura vertical propiamente dichas.

2.5.1 Técnicas de seguimiento

Controlar en detalle el comportamiento de los peces en un dispositivo de remonte es una tarea compleja. La falta de información detallada sobre los movimientos de los distintos ejemplares, así como los tamaños de muestra generalmente pequeños, limitan habitualmente las evaluaciones biológicas de las escalas de peces (Castro-Santos et al., 1996). Para solucionar este problema se emplean distintas técnicas de seguimiento, algunas de las cuales se describen a continuación.

Una primera opción para controlar los movimientos de los peces en una escala es utilizar métodos de marcaje, que requieren colocar transmisores en los ejemplares. Entre este tipo de métodos cabe destacar la tecnología PIT (Passive Integrated Transponder), ya que ha mostrado una utilidad creciente en los estudios de comportamiento de peces, incluyendo los relativos a los pasos para peces (Castro-Santos et al., 1996; Lucas et al., 1999; Stuart et al., 2008). Este sistema de marcaje interno permite el reconocimiento individual de los peces y puede aplicarse sobre un amplio rango de tallas del pez, desde pequeños alevines hasta adultos. Otra gran ventaja es que la tecnología PIT es casi independiente de condiciones medioambientales como la salinidad o el calado que restringen otros sistemas de detección remota, siempre que los ejemplares marcados nadan dentro del rango del detector (Aarestrup et al., 2003). En el caso de las evaluaciones biológicas de escalas de peces, la colocación de antenas en distintas posiciones en la escala, incluyendo la entrada y la salida de la misma, permite analizar el tiempo que cada ejemplar requiere para remontar una o varias piscinas, y el tiempo total de ascenso, una vez que el pez ha localizado con éxito la entrada. Un ejemplo de utilización de esta tecnología se muestra en la Figura 36, donde se pueden observar las antenas colocadas en los pasos entre piscinas en una escala de peces en el río Yakima (Washington). No obstante, la tecnología PIT no permite el

control de los movimientos de los peces dentro de las piscinas, ni la definición detallada de sus trayectorias o el modo en que utilizan las distintas zonas del dispositivo.

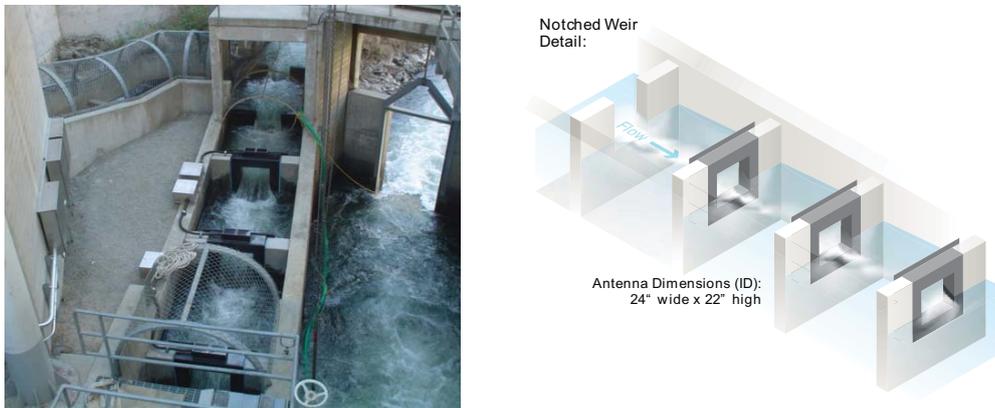


Figura 36 Disposición de antenas para la detección de peces con marcaje PIT-tag en la escala de peces de Roza Dam (río Yakima, Washington). Fuente: PTAGIS. The Columbia Basin PIT Tag Information System. Disponible en: www.ptagis.org (consultado en enero de 2013).

Otra posibilidad es emplear la observación directa y la grabación de vídeo. Esta técnica está limitada por la ubicación y el número de las estaciones de observación, el coste del equipo de grabación y del personal empleado para analizar los vídeos, y la necesidad de aguas claras y de buena iluminación, cuya manipulación puede afectar al comportamiento del pez (Castro-Santos et al., 1996). No obstante, los avances en las técnicas de visión artificial muestran potencial para reducir o incluso eliminar las necesidades de personal para verificar las grabaciones (Morais et al., 2005).

Así, se han empleado recientemente distintas técnicas de visión artificial para el estudio del comportamiento de peces. Duarte et al. (2004) utilizan dos técnicas diferentes de identificación y seguimiento de peces en un tanque, que se basan en el contraste de color de los ejemplares con el fondo y en el uso de marcas fluorescentes. Por su parte, Deng et al. (2004) estudian la capacidad de natación de los peces en flujos turbulentos utilizando DPIV (Digital Particle Image Velocimetry) e imágenes digitales de alta resolución. Morais et al. (2005) trabajan en el desarrollo de técnicas de visión artificial que permiten adquirir de forma automática información precisa sobre el comportamiento de las especies que remontan una escala. En concreto, desarrollan una nueva técnica que permite seguir y contar los individuos mientras entran, salen y se mueven en una secuencia de vídeo obtenida a partir de una cámara estática. Aunque la mayoría de estos trabajos se llevan a cabo en unas condiciones hidrodinámicas distintas a las que se pueden encontrar en una escala de peces, este tipo de técnicas presentan un gran potencial, ya

que permiten adquirir gran cantidad de información con unas necesidades de personal muy bajas. Además, son métodos en general poco intrusivos, que no suponen una gran perturbación en el comportamiento de los peces.

2.5.2 Estudios experimentales en modelo físico

En este tipo de estudios se analiza en detalle el comportamiento del pez en instalaciones experimentales de laboratorio, en las que las condiciones ambientales están altamente controladas. De esta forma, es posible evitar que los resultados se vean influenciados por las condiciones específicas del emplazamiento en el que se encuentra el dispositivo, tal y como ocurre en los estudios de campo. En los experimentos se deben simular las condiciones hidrodinámicas a las que se enfrentan los peces en dispositivos reales (Haro et al., 2004).

El primer estudio que se comenta en este apartado es el realizado por Guiny et al. (2005). En este trabajo se llevan a cabo una serie de ensayos con el objetivo de evaluar la eficiencia de paso relativa del salmón juvenil a través de un amplio rango de dispositivos de paso: hendiduras verticales, orificios, vertederos y combinaciones de los tres. El dispositivo experimental consiste, de forma simplificada, en un canal con un panel extraíble que incorpora uno de los tipos de paso estudiados, dividiendo así el canal en dos piscinas. Guiny et al. (2005) realizan una serie de ensayos con ejemplares juveniles de salmón procedentes de centros de acuicultura y con longitudes entre 8 y 14 cm, y con una temperatura media del agua de 15°C (oscilando entre 11.3 y 19.2°C). Dichos ejemplares se ensayan en grupos de 20, permaneciendo 40 minutos hasta ser retirados si no atraviesan el dispositivo. Los peces se observan visualmente de forma directa y se realizan asimismo grabaciones en vídeo con cámaras situadas en una ventana lateral, dentro del canal y verticalmente sobre el área de estudio.

En relación con las hendiduras verticales, las principales conclusiones del estudio son las siguientes:

- La eficiencia es mucho mayor en las hendiduras verticales y orificios que en los vertederos, esta eficiencia entendida como la proporción de individuos que pasan (44% y 66%, respectivamente, frente a 2.5%) con iguales calados y velocidades comparables.
- La eficiencia desciende casi linealmente al incrementar las velocidades en las proximidades del dispositivo de paso, en el caso de orificios y hendiduras. O lo que es lo mismo, la eficiencia de los orificios y hendiduras verticales está directamente correlacionada con las velocidades en sus entradas.

- Los ejemplares utilizan estrategias comportamentales que minimizan el gasto energético y maximizan el uso de cobertura. En general nadan a lo largo de los laterales del canal, utilizan las zonas de recirculación para el avance y atraviesan la hendidura en un ángulo oblicuo para minimizar el tiempo empleado en las altas velocidades del chorro (Figura 37).

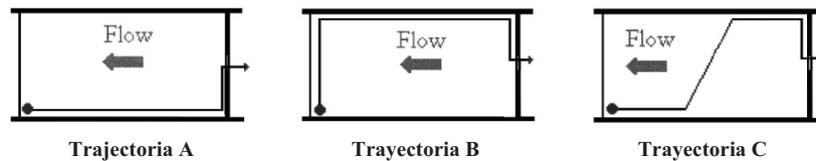


Figura 37 Trayectorias esquemáticas seguidas por los juveniles: trayectoria A, 35%; trayectoria B, 33%; y trayectoria C, 11% (Guiny et al., 2005).

Cabe señalar que, en un estudio previo utilizando el mismo dispositivo experimental, Guiny et al. (2003) estudian la preferencia de machos maduros de trucha y juveniles de salmón por entradas de tipo orificio y azud, con iguales velocidades y niveles de turbulencia. Al igual que en el caso de los juveniles de salmón, la trucha también muestra una gran preferencia por los orificios sumergidos.

Otro estudio similar al descrito anteriormente, aunque con otra especie objetivo, es el llevado a cabo en el Laboratorio Nacional de Ingeniería Civil en Lisboa. En este trabajo, Silva et al. (2009) realizan una serie de experimentos en una escala de depósitos sucesivos a escala real (1:1) con ejemplares de barbo común ibérico, *Barbus bocagei* (Steindachner, 1864). El objetivo del estudio es evaluar la respuesta de esta especie a varias configuraciones hidráulicas. Por una parte, la preferencia por nadar a través de orificios sumergidos o por saltar por encima de las hendiduras superficiales, y la influencia de dimensiones de las hendiduras y los regímenes de flujo (chorro sumergido “*plunging*” o chorro superficial “*streaming*”, Clay (1995)) sobre las hendiduras en esta preferencia. Por otro lado, analizan los tiempos de paso a través de los orificios sumergidos y de las hendiduras superficiales, y su relación con el caudal circulante.

La investigación se lleva a cabo en un modelo de escala de depósitos sucesivos con un total de 6 piscinas separadas por 5 deflectores, cada uno de los cuales incorpora un orificio sumergido y una hendidura superficial de anchura ajustable en lados opuestos para crear una trayectoria del flujo sinusoidal. La pendiente del dispositivo es del 8.5%. Se ensayan 45 ejemplares de barbo de longitud total entre 14.0 y 28.5 cm, que fueron capturados en río durante la época de migración reproductiva. Estos ejemplares se ensayan en grupos de 15, siendo la duración aproximada de los experimentos de 5 horas. El comportamiento de los peces se monitoriza se forma continua a

través de las ventanas laterales de la escala por medio de observación directa y grabación de vídeo.

Al igual que en el estudio de Guiny et al. (2003) para la trucha común y el salmón, una importante proporción del movimiento de ascenso se produce a través de los orificios sumergidos. También se observa la influencia del régimen de flujo, ya que en el caso de chorro sumergido (“*plunging*”), esta proporción se incrementa significativamente. Los autores atribuyen estas bajas proporciones de uso de las hendiduras superficiales con chorro sumergido a las limitaciones natatorias propias de la especie. Por otra parte, el tiempo necesario para el paso sobre la hendidura superficial es significativamente mayor que para el orificio sumergido. En consecuencia, Silva et al. (2009) señalan como los orificios sumergidos parecen ser una opción claramente mejor para el paso de esta especie.

Posteriormente, Silva et al. (2010) exploran los efectos de la velocidad del agua y la turbulencia en el comportamiento de la misma especie de ciprínido - el barbo común ibérico - durante el ascenso de una escala de depósitos sucesivos. En concreto, analizan la relación entre los distintos parámetros hidráulicos y los tiempos de tránsito en individuos de distintas tallas, y tratan de averiguar qué parámetros afectan más significativamente al rendimiento de los peces.

Los ensayos se llevan a cabo en el mismo dispositivo experimental que en el trabajo previo (Silva et al., 2009), pero en este caso los deflectores no presentan aberturas superficiales, en base a las conclusiones de dicho estudio. Se realiza una medición detallada de las velocidades instantáneas usando un velocímetro acústico Doppler (ADV) para 4 configuraciones hidráulicas, en las que varía el área de los orificios y el caudal circulante. En base a las velocidades registradas se calculan dos descriptores de turbulencia: la energía cinética turbulenta y las tensiones de Reynolds.

En este estudio se capturan 80 individuos, que se clasifican en función de su talla (en pequeños: $15 < LC < 25$ cm y grandes: $25 \leq LC < 35$ cm, siendo LC es la longitud total). Los experimentos, de aproximadamente 1.5 horas de duración, se realizan bajo las 4 condiciones hidráulicas anteriormente señaladas, ensayando un ejemplar adulto de cada talla simultáneamente. El comportamiento de los peces se monitoriza de forma continua a través de las ventanas laterales por medio de observación directa y un sistema de grabación centrado en la segunda piscina. Por observación directa se analizan los tiempos empleados por cada pez en entrar en el canal, ascender de una piscina a la siguiente y ascender completamente la escala. Los vídeos se analizan para extraer la posición del pez dentro de la piscina considerando una malla (Figura 38) y para

calcular el tiempo de tránsito en cada celda de la malla. Posteriormente se relaciona el tiempo de tránsito en cada celda con los valores de los parámetros hidráulicos.

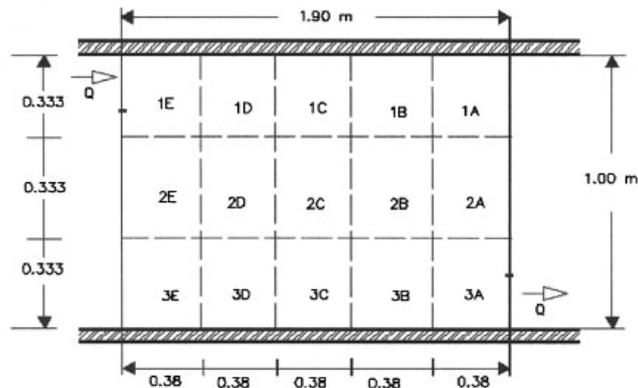


Figura 38 Malla de referencia utilizada para observar el comportamiento de los peces (Silva et al., 2010).

En todos los experimentos, los peces muestran una gran capacidad para remontar la escala, aunque se aprecian ciertas diferencias en relación con el tamaño. Los adultos de mayor tamaño presentan una mayor tasa de éxito y necesitan menos tiempo para ascender la escala, en relación con los adultos de pequeño tamaño. Por otra parte, los barbos pasan un mayor tiempo de tránsito en celdas con velocidades bajas ($0.20\text{-}0.40\text{ m s}^{-1}$), pero este efecto es más destacado en el grupo de menor tamaño. De la misma forma, los barbos ocupan principalmente áreas con baja energía cinética turbulenta ($<0.05\text{ m}^2/\text{s}^2$), particularmente los de menor tamaño.

Los efectos de las tensiones de Reynolds en los movimientos de los barbos varían en función de la componente considerada en cada una de las tres dimensiones (Silva et al., 2010; Santos et al., 2012). Las correlaciones entre el tiempo de tránsito del pez y las tensiones horizontales son las mayores de entre todas las variables hidráulicas consideradas, lo que sugiere la importancia de esta variable como parámetro clave para determinar los movimientos de esta especie en las escalas de depósitos sucesivos (Figura 39). Por el contrario, no se encuentran correlaciones significativas entre las componentes verticales de las tensiones de Reynolds y el tiempo de tránsito. Al igual que con el resto de parámetros hidráulicos, los efectos de las componentes horizontales son más significativos en los individuos de menor tamaño, que parecen evitar las áreas de alta turbulencia. En general, los individuos permanecen menos tiempo en celdas con altas tensiones de Reynolds (los valores absolutos varían entre 20 y 60 N/m^2).

Los autores señalan como posible causa de la menor tasa de éxito de los individuos de pequeño tamaño la alta turbulencia observada en las cercanías de los orificios sumergidos. Las elevadas

tensiones cortantes pueden causar desorientación y reducir la capacidad natatoria con altos caudales, particularmente para los ejemplares más pequeños. Dicha desorientación puede haber sido causada por un efecto más pronunciado de los grandes vórtices turbulentos sobre su pequeña superficie corporal, en comparación con individuos de mayor talla.

Los autores sugieren modificar las características del flujo en las piscinas mediante la colocación de estructuras sumergidas, y examinar en qué medida la turbulencia, particularmente la componente horizontal de las tensiones de Reynolds, puede ser reducida. De esta forma, se facilitaría y reduciría el tiempo de ascenso de los pequeños individuos.

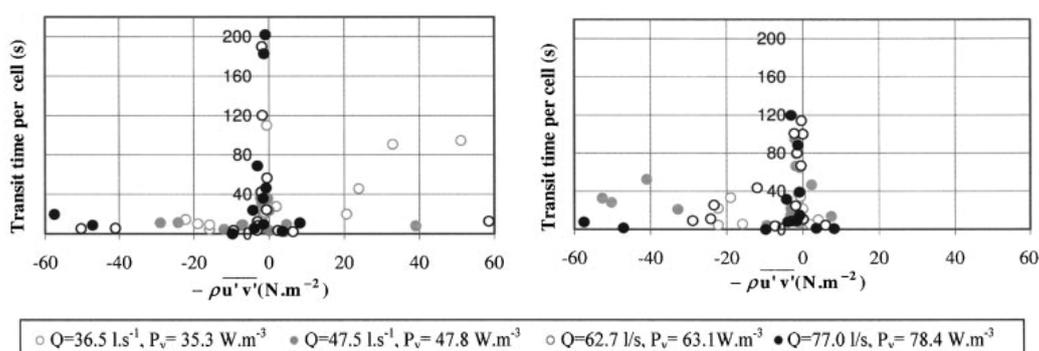


Figura 39 Distribución del tiempo de tránsito del pez versus la componente horizontal de las tensiones de Reynolds en cada celda en $z=0.25h_m$, h_m es el calado medio de piscina. Adultos de pequeño tamaño (izquierda), adultos de mayor tamaño (derecha) (Silva et al., 2010).

Por último, se comentan en esta sección los resultados del estudio biológico llevado a cabo por Tarrade (2007) y Wang (2010) en el dispositivo experimental caracterizado hidráulicamente por Tarrade et al. (2008), con una pendiente del 10%.

Tarrade (2007) evalúa el comportamiento en el dispositivo de ejemplares de trucha común, de grupos de ciprínidos en los que predominan el rutilo (*Rutilus rutilus*), el gobio (*Gobio gobio*), el ródeo (*Rhodeus sericeus*) y el cacho (*Leuciscus cephalus*), y de ejemplares de anguila. Dado que utiliza un modelo físico reducido (escala 1/4), emplea ejemplares de talla pequeña (aproximadamente 80 mm para las truchas y los ciprínidos y 260 mm en las anguilas), y tiene en cuenta los efectos de escala en las capacidades natatorias. Esto otorga al estudio un cierto carácter cualitativo. Su análisis se centra en tres aspectos: las posiciones preferenciales de los peces, la eficacia local de paso en función de la configuración de piscina (anchura de piscina de $B=2$ m ó 2.7 m a escala real e inclusión de un cilindro, Figura 28) y los tiempos de permanencia.

Para ello, realiza grabaciones en vídeo con una cámara situada sobre la tercera piscina, y señala la posición ocupada por los peces cada 2 minutos, considerando una malla con celdas de 7.5 cm y

para un tiempo total de 1 hora. Para evaluar la eficacia local de paso, contabiliza el número de ejemplares que consiguen remontar la hendidura de aguas arriba y lo relaciona con los que consiguen alcanzar la piscina durante un período de 120 minutos.

A partir de los ensayos con trucha común, Tarrade (2007) señala tres zonas preferentes (Figura 40), que se corresponden con regiones con valores bajos de velocidad y energía turbulenta. En relación con la configuración de la piscina, detecta un aumento de la eficacia local de paso al colocar un cilindro, independientemente de la especie y el anchura considerada (Figura 41). Este aumento es más destacado en los salmónidos y los ciprínidos. No obstante, también observa como la introducción del obstáculo puede provocar un incremento del tiempo de permanencia en algunos casos. En general, dadas las altas eficacias obtenidas al incluir el cilindro, el autor recomienda esta configuración.

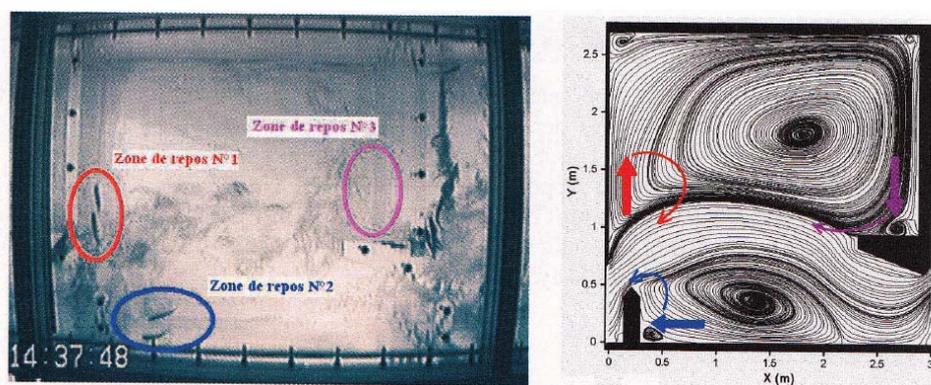


Figura 40 Localización de las tres principales zonas preferentes y orientación de los peces (Tarrade, 2007).

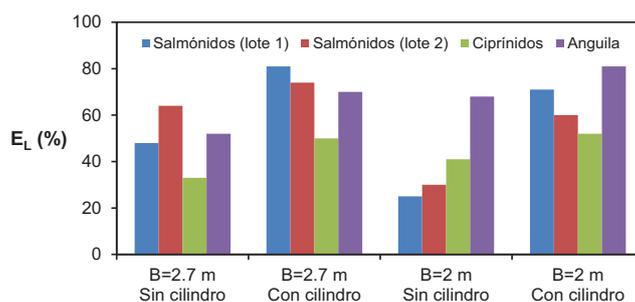


Figura 41 Eficacias locales de paso (E_L) obtenidas en los ensayos. Adaptado de Tarrade (2007).

Wang et al. (2010) analizan el comportamiento de ejemplares juveniles de trucha común en este mismo dispositivo, considerando la anchura de $B=2.7$ m y sin cilindro. Estudian fundamentalmente la utilización de las zonas de bajas velocidades como zonas de descanso y las trayectorias seguidas por los distintos ejemplares, a partir de grabaciones en vídeo.

Los ensayos se realizan con una pendiente de la escala del 10% y un caudal de 23 l/s. Se utilizan ejemplares de trucha común procedentes de centros de acuicultura con una longitud entre 80 y 120 mm, y la temperatura media del agua en la escala es de 17.9 °C (variando entre 16 y 19°C). El comportamiento del pez se graba de forma continua en vídeo por medio de una cámara situada bajo la solera de la tercera piscina (Figura 42), lo que permite la digitalización de su posición con el tiempo. Los peces se introducen en grupos de 20-30 ejemplares en la parte inferior de la escala y permanecen en el canal 90 minutos hasta ser retirados.

Wang et al. (2010) observan como las dos zonas de recirculación más frecuentemente utilizadas por los peces para largos períodos son la zona 1 y zona 2 (Figura 42). Las dimensiones de estas zonas, expresadas como una función de la anchura de hendidura son 3.1b por 2.4 b para la zona 1, y 1.3b por 2.5b para la zona 2. Además, los peces descansan frecuentemente durante un período corto de tiempo en la zona 3, antes de avanzar en su recorrido por la piscina. La frecuencia de uso de cada una de las zonas es, de media, 33%, 19% y 48% para la zona 1, 2 y 3, respectivamente, con valores medios de tiempo de permanencia de 11.5, 30.5 y 1 segundo.

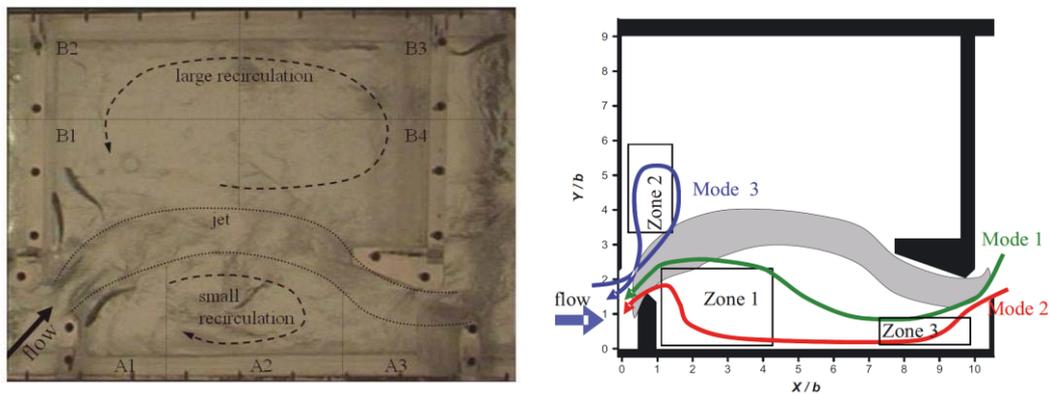


Figura 42 Imagen de los vídeos grabados durante los ensayos (izquierda), zonas de descanso más frecuentemente utilizadas y modos de ascenso típicos de los ejemplares ensayados (Wang et al., 2010).

Por otra parte, distinguen tres modos típicos de ascenso exitoso para los ejemplares ensayados de trucha común (Figura 42). En el modo 1 los peces entran y permanecen por un corto período detrás del deflector pequeño, atravesando rápidamente la hendidura hacia la siguiente piscina aguas arriba. En el modo 2 (el más frecuente) los peces entran en la piscina y permanecen parados en la zona 3 por un período muy corto de tiempo (entre 1 y 3 segundos aproximadamente) antes de desplazarse a la zona 1, donde permanecen varios segundos o minutos. Antes de atravesar la hendidura permanecen detrás del deflector pequeño, muy próximos al flujo principal. En el modo 3 el pez viene de la piscina superior hacia la zona de

recirculación grande y permanece en la zona 2. Tras una estancia de varios minutos o incluso superior, se mueve próximo al flujo principal y al deflector de mayor tamaño, y entonces desarrolla su velocidad punta para continuar ascendiendo la escala.

Capítulo 3. Modelización numérica

3.1 Introducción

En los últimos años, se han producido considerables avances en la mecánica de fluidos computacional, CFD (Computational Fluid Dynamics), que permiten su aplicación a nuevos problemas que anteriormente sólo podían ser abordados desde el punto de vista experimental. En principio, la utilización de modelos numéricos requiere menos recursos físicos y económicos, y reduce el tiempo necesario para llevar a cabo un determinado estudio. En el caso de estructuras hidráulicas como las escalas de peces, es posible probar un gran número de alternativas de diseño en un menor tiempo y con un coste bajo. Así, se puede conseguir una reducción sustancial de los plazos de entrega y los costes de un nuevo diseño.

Previamente a la elaboración del modelo, es necesario identificar y formular el problema de flujo en términos de los fenómenos físicos que deben ser tenidos en cuenta. En este caso, debe decidirse principalmente si se emplea un modelo en dos o tres dimensiones y si es necesario el uso de un modelo de turbulencia. Los estudios experimentales previos en escalas de peces de hendidura vertical (Liu et al., 2006; Puertas et al., 2004; Rajaratnam et al., 1992; Tarrade et al., 2008; Wu et al., 1999) muestran que la velocidad media en este tipo de estructuras es prácticamente bidimensional, siendo la velocidad vertical mucho menor que la horizontal. Esto abre la posibilidad de utilizar un modelo numérico de aguas poco profundas promediado en profundidad para simular el flujo en los distintos diseños (Cea et al., 2007b; Chorda et al., 2010). No obstante, no es inmediato que las ecuaciones de aguas someras bidimensionales (2D-SWE) sean capaces de reproducir el patrón de flujo en una escala de hendidura vertical. De hecho, muchas de las hipótesis que se realizan en la derivación de las 2D-SWE (y que se describirán posteriormente en la sección 3.3.1) se incumplen en algunas regiones del flujo, especialmente en la región de la hendidura. Por otra parte, el elevado nivel de turbulencia y los altos gradientes de velocidad en las piscinas también requieren prestar una especial atención a la modelización de la turbulencia.

En este trabajo se opta por utilizar un modelo numérico en volúmenes finitos basado en las ecuaciones de aguas someras bidimensionales y desarrollado por el Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente de la Universidad de A Coruña. Este modelo ha sido validado con resultados experimentales en diversas estructuras hidráulicas y con datos de campo en ríos y

estuarios (Cea et al. 2006, 2007a, b; Cea, 2008). Con este modelo, se estudia la hidrodinámica de una serie de diseños de escalas de hendidura vertical, prestando especial atención al patrón de flujo y al campo de velocidades que se desarrolla en las piscinas. Estas simulaciones constituyen lo que se denomina en este trabajo estudio hidrodinámico numérico.

Cabe señalar que estos trabajos se enmarcan dentro de la línea de trabajo del grupo de investigación en modelización numérica de estructuras hidráulicas, entre cuyos estudios previos destaca el de Cea et al (2007b). En dicho estudio se realiza una calibración muy rigurosa del modelo numérico empleado en esta tesis en dos diseños de escala de peces de hendidura vertical, comparando con los resultados experimentales de Pena (2004).

3.2 Diseños de escalas de hendidura vertical

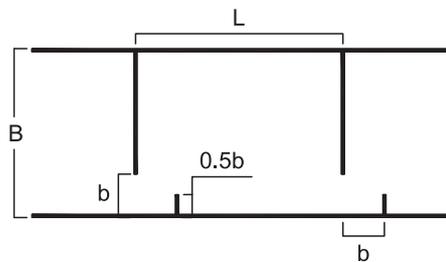
En base a los estudios experimentales previos en escalas de peces de hendidura vertical (Liu et al., 2006; Puertas et al., 2004; Rajaratnam et al., 1992; Tarrade et al., 2008; Wu et al., 1999) se han escogido 4 diseños genéricos de piscina, que se denominan tipo I, II, III y IV (Figura 43 y Figura 44), y que se estudian mediante el uso complementario de la modelización física y numérica. Los tipo I son diseños 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. Las dimensiones geométricas de las piscinas se definen en función de la anchura de hendidura b , entendida en cada diseño como la correspondiente a la sección de flujo de menor anchura de todas las posibles.

Se calcula el campo de flujo en estos 4 diseños genéricos y, para cada uno de ellos, se prueban distintas dimensiones geométricas de piscina (Tabla 6). Específicamente, se estudian 16 dimensiones diferentes de piscina para el diseño tipo I, 6 para el diseño tipo II y el diseño tipo III y 5 para el diseño tipo IV. Las dimensiones geométricas se detallan en la Tabla 6 para cada diseño. La pendiente del fondo es del 5%, aunque los diseños tipo I también se calculan con una pendiente mayor, concretamente del 10%.

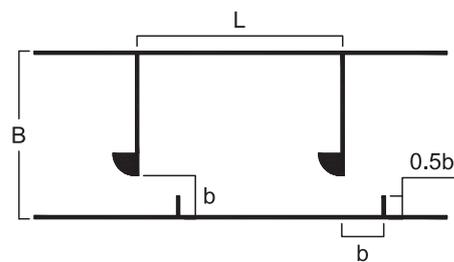
Tabla 6 Dimensiones geométricas de las piscinas en los 33 diseños estudiados en el modelo numérico.

Tipo	Diseño	B	L	b (m)
I	D2_2.5	2b	2.5b	0.500
	D2_5	2b	5b	0.500
	D2_10	2b	10b	0.500
	D2_15	2b	15b	0.500
	D2.67_2.5	2.67b	2.5b	0.375
	D2.67_5	2.67b	5b	0.375
	D2.67_10	2.67b	10b	0.375
	D2.67_15	2.67b	15b	0.375
	D4_2.5	4b	2.5b	0.250
	D4_5	4b	5b	0.250
	D4_10	4b	10b	0.250
	D4_15	4b	15b	0.250
	D8_2.5	8b	2.5b	0.125
	D8_5	8b	5b	0.125
	D8_10	8b	10b	0.125
	D8_15	8b	15b	0.125

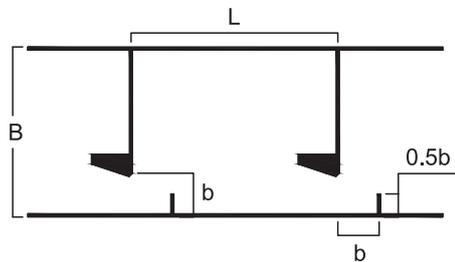
Tipo	Diseño	B	L	b (m)
II	D4_5	4b	5b	0.250
	D4_10	4b	10b	0.250
	D4_15	4b	15b	0.250
	D8_5	8b	5b	0.125
	D8_10	8b	10b	0.125
	D8_15	8b	15b	0.125
III	D4_5	4b	5b	0.250
	D4_10	4b	10b	0.250
	D4_15	4b	15b	0.250
	D8_5	8b	5b	0.125
	D8_10	8b	10b	0.125
	D8_15	8b	15b	0.125
IV	D4_5	4b	5b	0.250
	D4_10	4b	10b	0.250
	D6.25_7.58	6.25b	7.58b	0.160
	D8_5	8b	5b	0.125
D8_10	8b	10b	0.125	



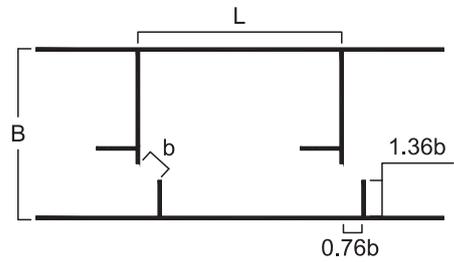
(a) Diseños tipo I



(b) Diseños tipo II



(c) Diseños tipo III



(d) Diseños tipo IV

Figura 43 Características geométricas de los diferentes diseños de piscina.

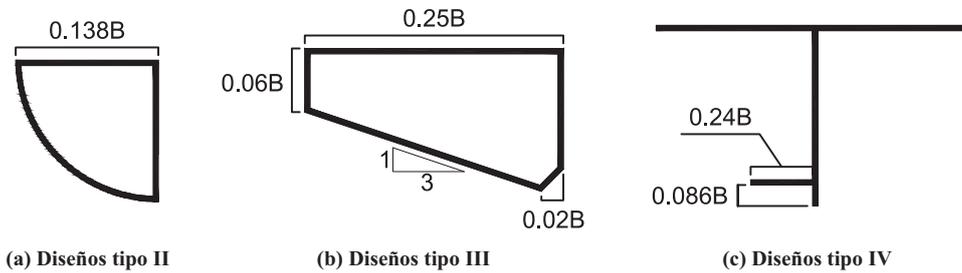


Figura 44 Detalle de los elementos de guiado del flujo en los diferentes diseños.

3.3 Ecuaciones

En este apartado se presenta el modelo numérico bidimensional escogido para realizar las distintas simulaciones. Se describen las ecuaciones resueltas por el modelo numérico y el esquema numérico utilizado para su resolución. El modelo resuelve las ecuaciones de Saint Venant bidimensionales, e incorpora una serie de modelos de turbulencia, que permiten tener en cuenta su efecto sobre el campo de velocidad media.

3.3.1 Ecuaciones hidrodinámicas

Las ecuaciones que gobiernan el movimiento de un fluido son las ecuaciones de Navier-Stokes. En esta sección se describe brevemente el proceso de obtención de las ecuaciones de Saint Venant bidimensionales a partir de estas ecuaciones, y se hace hincapié en las distintas aproximaciones realizadas.

Las ecuaciones de Navier-Stokes para un fluido incompresible constituyen un sistema de 4 ecuaciones que consideran la conservación de la masa y el momento, de la forma:

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + F_i \quad i=1,3 \quad (3.2)$$

donde u_i ($i=1,2,3$) son las componentes de la velocidad instantánea, τ_{ij} es el tensor de tensiones viscosas, p es la presión y F_i son las fuerzas externas por unidad de masa.

Dado el alto coste computacional que conlleva resolver estas ecuaciones directamente en aplicaciones de la ingeniería hidráulica, el enfoque más común es resolver las ecuaciones de Navier-Stokes con el promediado de Reynolds (RANS). Las ecuaciones RANS se obtienen al

descomponer los valores instantáneos de las variables en un valor medio \bar{u} y una fluctuación u' , lo que se conoce como descomposición de Reynolds:

$$u = \bar{u} + u' \quad (3.3)$$

Introduciendo la descomposición de Reynolds dada por la Ecuación 3.3 en las ecuaciones de Navier-Stokes (Ecuación 3.1 y Ecuación 3.2), promediando las ecuaciones, y teniendo en cuenta que la media de conjunto de la fluctuación de la velocidad es cero ($\overline{u'} = 0$), se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\bar{\tau}_{ij} - \overline{u'_i u'_j} \right] \quad i=1,3 \quad (3.5)$$

Los términos $\overline{u'_i u'_j}$ que surgen debido a la no linealidad del flujo convectivo se conocen como las tensiones de Reynolds o tensiones turbulentas. Solamente las 3 tensiones de Reynolds normales contribuyen a la energía cinética turbulenta (k) del flujo, que se define como:

$$k = \frac{1}{2} \left(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2} \right) \quad (3.6)$$

Las tensiones de Reynolds son 6 nuevas incógnitas que deben ser calculadas. Esto es lo que se conoce como problema de cierre de la turbulencia, ya que hay más incógnitas que ecuaciones y, en consecuencia, es necesario cerrar el problema con ecuaciones adicionales. Para resolver este problema, los modelos de turbulencia para las ecuaciones RANS aproximan de alguna manera el término correspondiente a las tensiones de Reynolds relacionándolo con las variables medias, de modo que no describen los detalles de las fluctuaciones turbulentas, sino el efecto de dichas fluctuaciones sobre las variables medias. La aproximación más común son los modelos de viscosidad turbulenta (eddy viscosity models), que se basan en relacionar las tensiones de Reynolds con el tensor de velocidades de deformación medias mediante la hipótesis de Boussinesq:

$$-\overline{u'_i u'_j} = \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (3.7)$$

donde ν_t es la viscosidad turbulenta y k es la energía cinética turbulenta. En el apartado 3.3.2 se describen los dos modelos de turbulencia utilizados en este trabajo para evaluar el valor de la viscosidad turbulenta.

Las ecuaciones de aguas someras bidimensionales se obtienen promediando en profundidad las ecuaciones de Reynolds tridimensionales (3D-RANS) y asumiendo las hipótesis de distribución de presión hidrostática y de campo de velocidad uniforme en profundidad (Rodi, 1980). Así, las ecuaciones 2D de aguas someras promediadas en profundidad (2D-SWE) pueden escribirse en forma conservativa como:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_j}{\partial x_j} = 0 \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial q_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{q_i q_j}{h} + g \frac{h^2}{2} \delta_{ij} \right) = -gh \frac{\partial z_b}{\partial x_i} - \frac{\tau_{b,i}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left((v + v_t) h \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \quad i=1,2 \quad (3.9)$$

donde h es el calado, U_i son las componentes horizontales promediadas en profundidad de la velocidad del agua, $q_i = hU_i$ son las dos componentes del caudal unitario, $\tau_{b,i}$ son las dos componentes horizontales de la tensión de fondo, ρ es la densidad del agua, g es la aceleración de la gravedad, v es la viscosidad laminar del agua y v_t es la viscosidad turbulenta.

En la derivación matemática de estas ecuaciones se asume una distribución de presión hidrostática y una distribución de velocidad uniforme en la vertical. A continuación se describen brevemente las implicaciones principales de estas aproximaciones, de cara a entender las limitaciones de las ecuaciones y a interpretar correctamente los resultados obtenidos.

La distribución de presión hidrostática es principalmente una consecuencia de asumir una separación de las escalas características verticales y horizontales. Esto ocurre cuando tanto la escala de longitud horizontal L_n como la escala de velocidad horizontal U_n son mayores que las verticales H_n y W_n , lo cual es una característica típica de los flujos cuasi-bidimensionales. La definición de las escalas horizontales y verticales no es trivial, y depende de las condiciones del flujo y de la geometría. En un problema de propagación de onda larga somera, la escala horizontal viene dada por la longitud de onda, mientras que la escala vertical viene dada por el calado, ya que es a lo largo de esas distancias donde ocurren los cambios en presión y velocidad más relevantes. En algunos casos, la escala de longitud vertical viene dada por las variaciones del fondo y la lámina libre en lugar de por el calado y, en consecuencia, la condición de separación de escalas es realmente una restricción de la lámina libre y de la pendiente del fondo. Este es el caso de las escalas de peces de hendidura vertical. En estas estructuras la escala de longitudes vertical viene dada por el salto de la superficie libre entre dos piscinas consecutivas, mientras que la escala de longitudes horizontal viene dada por la longitud de la piscina. Dado que se estudia el flujo en condiciones uniformes (igual calado en puntos equivalentes de cada piscina), la ratio

entre las escalas verticales y horizontales es igual a la pendiente del fondo, a excepción de la zona de la hendidura. En consecuencia, las 2D-SWE pueden a veces ser aplicadas a flujos con un mayor calado, asumiendo que la pendiente del fondo y la lámina libre son pequeñas.

Otra de las aproximaciones más relevantes es la de comportamiento homogéneo en la vertical. Esta aproximación supone que los valores tanto de la velocidad como de las tensiones de Reynolds son casi independientes de la coordenada vertical. En un caso general, el valor de los términos de dispersión lateral y longitudinal depende fuertemente de la existencia de corrientes secundarias verticales, que aparecen típicamente cuando los efectos de curvatura en el campo de velocidades son importantes. Estos flujos secundarios crean no-uniformidades en el perfil vertical de las velocidades horizontales. No obstante, en el caso concreto de las escalas de peces de hendidura vertical, los estudios experimentales previos (Liu et al., 2006; Puertas et al., 2004; Rajaratnam et al., 1992; Tarrade et al., 2008; Wu et al., 1999) muestran que la velocidad media en este tipo de estructuras es prácticamente bidimensional, siendo la velocidad vertical mucho menor que la horizontal. Aunque esto no es así en todas las regiones del flujo (se incumple fundamentalmente en la región de la hendidura), estudios numéricos previos como los desarrollados por Cea et al. (2007b) y Chorda et al. (2010) han puesto de manifiesto la validez de esta aproximación en varios diseños de escalas de hendidura vertical.

3.3.2 Modelo de turbulencia

El patrón de flujo en las escalas de hendidura vertical se caracteriza por un chorro principal que atraviesa la piscina desde la hendidura de entrada a la de salida, y por la formación de zonas de recirculación a los lados de dicho flujo principal. Para poder predecir estas zonas de recirculación y estos importantes gradientes de velocidad es necesaria una correcta modelización de la turbulencia. Por una parte, unos excesivos niveles de turbulencia hacen muy homogéneos los perfiles de velocidad y tienden a eliminar las zonas de recirculación. Por otro lado, unos niveles bajos de energía turbulenta agudizan los perfiles demasiado y predicen velocidades máximas excesivamente elevadas. De ahí la importancia de seleccionar un modelo de turbulencia apropiado.

La viscosidad turbulenta que aparece en las 2D-SWE se calcula por medio de un modelo de turbulencia promediado en profundidad, que se deriva de modelos de turbulencia RANS introduciendo de alguna forma los efectos de la fricción de fondo y de la poca profundidad en el campo de turbulencia.

En este trabajo se emplean dos modelos de turbulencia promediados en profundidad: un modelo de longitud de mezcla y un modelo k-ε. El modelo de longitud de mezcla es un modelo fácil de implementar y barato en términos de recursos computacionales, que ha demostrado ser aceptable en flujos bidimensionales sencillos con cambios suaves en la dirección del flujo. En cambio, en flujos donde la convección y difusión causan diferencias significativas entre la producción y destrucción de turbulencia, el uso de un modelo de longitud de mezcla no es adecuado. En estos casos es necesario considerar la dinámica de la turbulencia, con un modelo tipo k-ε.

3.3.2.1 Modelo de longitud de mezcla

El modelo de longitud de mezcla es un modelo algebraico relativamente sencillo, que asume un equilibrio local de la turbulencia y una turbulencia isotrópica. La viscosidad turbulenta se calcula a partir de los gradientes de velocidad horizontal media y la fricción de fondo como:

$$\nu_t = l_s^2 \sqrt{2S_{ij}S_{ij} + \left(2.34 \frac{u_f}{\kappa h}\right)^2} \quad u_f = \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho}} \quad (3.10)$$

$$l_s = \min(0.267\kappa h, \kappa d_{\text{wall}}) \quad (3.11)$$

donde $\kappa=0.41$ es la constante de von Karman, u_f es la velocidad de fricción de fondo, l_s es la escala de longitud turbulenta, d_{wall} es la distancia a la pared más cercana y S_{ij} es el tensor de velocidades de deformación medias, de la forma:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.12)$$

Este modelo tiene en cuenta la producción de turbulencia debido a fricción de fondo y a gradientes horizontales de velocidad, pero no considera el transporte convectivo ni la disipación de turbulencia.

3.3.2.2 Modelo k-ε

El modelo k-ε para aguas someras empleado en este trabajo está basado en el propuesto por Rastogi y Rodi (1978), como una versión promediada en profundidad del modelo k-ε original de Jones y Launder (1972). El modelo k-ε de Rastogi y Rodi ha sido utilizado en numerosos trabajos de modelización del flujo en aguas someras (Duc et al., 2004; Rameshwaran y Shiono, 2003; Wilson et al., 2002; Wu, 2004). En lugar de resolver la turbulencia tridimensional y su disipación, resuelve su valor promediado en profundidad. Algunas versiones ligeramente diferentes del modelo han sido propuestas desde entonces, por ejemplo, el modelo de Babarutsi y

Chu (1991), aunque no han sido tan ampliamente utilizadas.

El modelo resuelve una ecuación de transporte para la energía cinética turbulenta k y otra para la tasa de disipación ε de energía turbulenta. El modelo tiene en cuenta la producción debido al rozamiento del fondo, la producción por gradientes de velocidad, la disipación, el transporte convectivo y la difusión turbulenta.

La hipótesis de Boussinesq de viscosidad turbulenta no funciona bien cuando la turbulencia es fuertemente anisótropa, como ocurre en zonas con fuertes remolinos, en regiones con importantes gradientes de presión. La principal causa de estos problemas es que la viscosidad turbulenta se asume como isotrópica. En los modelos promediados en profundidad, la anisotropía entre la dirección vertical y horizontal está introducida en las ecuaciones por la diferente forma en que se modeliza la producción de turbulencia horizontal 2D y la turbulencia 3D generada por fricción de fondo. No obstante, el problema de la anisotropía en el plano horizontal sigue presente. En los casos en los que la turbulencia es fuertemente anisótropa, el modelo k - ε sobreestima la producción de energía cinética turbulenta. Esto puede conducir a valores excesivamente grandes de energía turbulenta cerca de regiones muertas, que pueden propagarse y afectar a la solución en todo el dominio numérico. Para mejorar las predicciones del modelo numérico, se ha utilizado un limitador propuesto por Menter (1993), basado en observaciones empíricas, que limita la ratio entre la producción horizontal de turbulencia y la tasa de disipación.

Otro de los inconvenientes de la hipótesis de Boussinesq, que está en cierta forma relacionado con la predicción de valores de turbulencia excesivamente grandes en la turbulencia anisótropa, es que puede producir valores negativos de las tensiones normales de Reynolds. Para corregir esta situación, se ha impuesto una condición sobre la viscosidad turbulenta que fue propuesta por Durbin (1996) para modelos de viscosidad turbulenta lineales. Esta condición limita el máximo valor de la viscosidad turbulenta para evitar que las tensiones normales de Reynolds calculadas con la hipótesis de Boussinesq alcancen valores negativos.

Ambos limitadores no implican una correcta modelización de la turbulencia en estas regiones, pero pueden mejorar los resultados numéricos, evitando niveles de turbulencia extremadamente altos. Considerando los limitadores de Menter y Durbin, las ecuaciones del modelo k - ε para aguas someras implementadas en el modelo utilizado en este trabajo son las siguientes:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial U_j k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \min(2\nu_t S_{ij} S_{ij}, 10 \cdot \varepsilon) + c_k \frac{u_r^3}{h} - \varepsilon \quad (3.13)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial U_j \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(v + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + c_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2v_t S_{ij} S_{ij} + c_\varepsilon \frac{u_f^4}{h^2} - c_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.14)$$

$$c_k = c_f^{-1/2} \quad c_\varepsilon = 3.6 c_k^{3/2} c_{\varepsilon 2} c_\mu^{1/2} \quad c_f = \frac{\tau_b}{\rho} \frac{1}{|U|^2} \quad (3.15)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad v_t = \min \left(c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \frac{k}{3} \left(\frac{2}{S_{ij} S_{ij}} \right)^{1/2} \right) \quad (3.16)$$

Con las constantes:

$$c_\mu = 0.09 \quad c_{\varepsilon 1} = 1.44 \quad c_{\varepsilon 2} = 1.92 \quad \sigma_k = 1.0 \quad \sigma_\varepsilon = 1.31 \quad (3.17)$$

3.3.3 Fricción de fondo

La fricción del fondo tiene un doble efecto en las ecuaciones de flujo. Por un lado produce una fuerza de fricción que se opone a la velocidad media, y por otro lado, produce turbulencia. Ambos efectos se pueden caracterizar por la velocidad de fricción u_f , de la forma:

$$u_f = \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho}} \quad (3.18)$$

donde τ_b es el módulo de la tensión de fondo y ρ es la densidad del agua.

Dado que se trata de un modelo promediado en profundidad, no es posible calcular la velocidad de fricción por medio de funciones de pared estándar, ya que las ecuaciones no se resuelven en la dirección vertical. Por lo tanto, es necesario relacionar la velocidad de fricción u_f con la velocidad media promediada en profundidad mediante un coeficiente de fricción c_f (Ecuación 3.15).

En este trabajo, la fricción de fondo se evalúa mediante la fórmula de Manning, la cual utiliza el coeficiente de Manning n como parámetro. La fórmula de Manning utiliza el siguiente coeficiente de rugosidad:

$$c_f = g \frac{n^2}{h^{1/3}} \quad (3.19)$$

Por lo que resulta:

$$\frac{\tau_{b,i}}{\rho} = g \frac{n^2 |U|}{h^{4/3}} U_i \quad i=1,2 \quad (3.20)$$

3.3.4 Contorno pared

Para tener en cuenta el efecto de las paredes laterales, se introduce una condición de contorno tipo fricción, que consiste en imponer una fuerza tangencial en dirección opuesta al flujo en el contorno. La velocidad de fricción de pared u^* se calcula a partir de la ley logarítmica de pared para contornos lisos, que viene dada por:

$$U_t = \frac{u^*}{\kappa} \ln \left(9.0 \frac{y_n u^*}{\nu} \right) \quad (3.21)$$

donde U_t es la componente de la velocidad tangencial a la pared, y_n es la distancia en perpendicular a la pared más cercana y $\kappa=0.41$ es la constante de von Karman.

3.3.5 Esquemas numéricos

Tanto las ecuaciones hidrodinámicas como las correspondientes al modelo de turbulencia se resuelven por el método de volúmenes finitos. La discretización del dominio espacial se realiza mediante una malla no estructurada de volúmenes finitos, que pueden ser cuadriláteros o triángulos, o combinaciones de ambos.

Para discretizar el flujo convectivo en las ecuaciones de momento es posible utilizar el esquema descentrado de primer orden de Roe (1986) o una extensión de segundo orden de este esquema basada en una reconstrucción tipo MUSCL (Monotone Upstream Scheme for Conservation Laws) (Toro, 2001). También es posible emplear el esquema híbrido propuesto en Cea et al. (2006), que utiliza una reconstrucción de segundo orden tipo MUSCL de las variables conservativas caudal unitario q_x y q_y , mientras que mantiene una reconstrucción de primer orden para el calado h . De esta forma la difusión numérica en las ecuaciones de momento se reduce considerablemente, sin una reducción significativa de la estabilidad numérica del esquema.

Al calcular el flujo en varios diseños de escalas de peces de hendidura vertical, Cea et al. (2007b) observan que este esquema híbrido produce resultados similares a un esquema completamente de segundo orden. En la calibración del modelo incluida en el apartado 3.4 de este capítulo se muestran resultados con ambos esquemas, así como con un esquema de orden 1.

El término pendiente del fondo se discretiza con un esquema descentrado (Bermúdez y Vázquez-Cendón, 1994), mientras que la fricción de fondo y los términos de difusión turbulenta se discretizan con un esquema centrado. El flujo convectivo en el modelo $k-\epsilon$ también se discretiza con un esquema descentrado de segundo orden. Todos los términos fuente en las ecuaciones $k-\epsilon$

se discretizan con un esquema centrado. Una descripción más exhaustiva de los esquemas numéricos del modelo puede encontrarse en Cea et al. (2007a).

3.4 Calibración del modelo

Previamente a la ejecución de las simulaciones en los diferentes diseños de escalas, es necesario realizar una calibración del modelo numérico. En primer lugar, se debe estudiar la dependencia de los resultados numéricos de aspectos tales como la discretización espacial o el modelo de turbulencia. Por otra parte, se debe definir el tipo de condiciones de contorno que se introducirán en el modelo, que en este caso serán un caudal perpendicular al contorno en la entrada y una altura de lámina libre en la salida. Dado el limitado número de piscinas incluidas en el dominio espacial, es importante establecer un procedimiento para fijar la condición de contorno aguas abajo, de forma que se consiga lo que se conoce en estos dispositivos como condiciones de flujo uniforme. Por último, es necesario fijar el valor del coeficiente de Manning para evaluar la fricción de fondo.

Las dimensiones geométricas de las piscinas están definidas en función de la anchura de hendidura b (Tabla 6), por lo que cada diseño se caracteriza por unos determinados valores de las relaciones adimensionales L/b y B/b . En este caso, las dimensiones geométricas en el modelo numérico se han fijado considerando un ancho de piscina B de 1 m, manteniendo los valores L/b y B/b correspondientes a cada diseño.

3.4.1 Convergencia en malla

El flujo en cada diseño de escala se calcula utilizando una malla estructurada por bloques que contiene una piscina de entrada, 3 piscinas completas y una piscina de salida. Los resultados numéricos y experimentales se comparan en la segunda piscina activa (Figura 45) y se comprueba en todos los casos que no hay diferencias significativas entre el campo de flujo en la segunda y tercera piscinas. Por tanto, se asume un flujo uniforme en estas dos piscinas, entendiendo como tal el caracterizado por calados iguales en puntos equivalentes de las piscinas.

Para poder aceptar los resultados de una simulación se necesita tener la certeza de que éstos son independientes de la discretización espacial. Para obtener una solución independiente de la malla, se realiza un análisis de convergencia en malla para el diseño D4_5 tipo I, para un caudal de 100 l/s y una pendiente del 5%. Se prueban tres mallas con diferente resolución espacial, denominadas M0, M1 y M2, en las que el número de elementos en cada malla es de 4438, 9561 y

14755, respectivamente (Tabla 7). Se comparan las velocidades longitudinales en dos secciones transversales (Figura 45): la sección media de la piscina central ($x=2.5$ m) y una sección que atraviesa la tercera hendidura ($x=3.3$ m). No se encuentran diferencias significativas entre los resultados obtenidos con las dos mallas más finas (mallas M1 y M2) (Tabla 7 y Figura 47). En consecuencia, se decide trabajar con un tamaño medio de elemento de 5 cm^2 (correspondiente a la malla M1), con una densidad ligeramente mayor en la región de la hendidura (Figura 46).

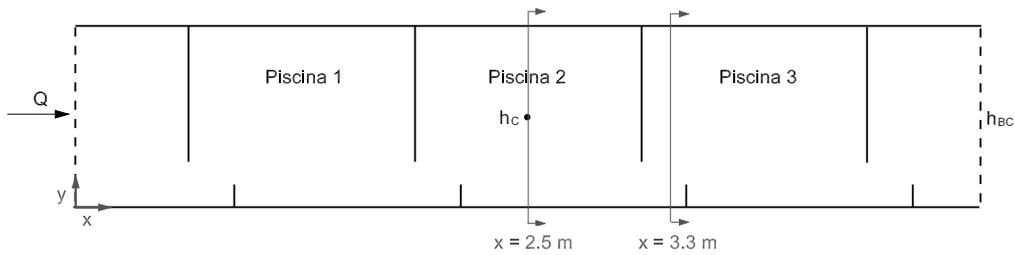


Figura 45 Esquema de la geometría considerada en el modelo numérico. Las dimensiones se corresponden con el diseño D4_5.

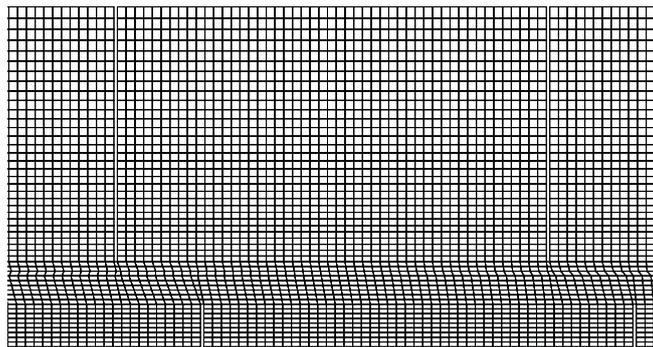


Figura 46 Detalle de la malla seleccionada para el diseño D4_5 tipo I (malla M1).

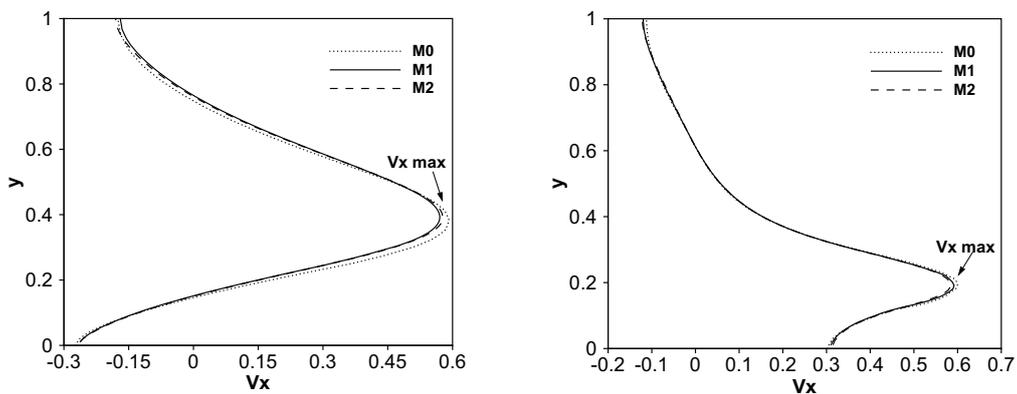


Figura 47 Velocidad longitudinal V_x (m/s) en el diseño D4_5 tipo I. Sección transversal $x=2.5$ m (izquierda), $x=3.3$ m (derecha), $Q=100$ l/s, $S=5\%$; origen de coordenadas x - y definido en la Figura 45.

Tabla 7 Características de las mallas M0, M1 y M2 y V_x max (m/s) (Figura 47) para el diseño D4_5 tipo I con caudal de 100 l/s y pendiente del 5%; origen de coordenadas x-y definido en la Figura 45.

	Malla		
	M0	M1	M2
Número de elementos	4438	9561	14755
Tamaño medio de elemento (cm ²)	11.27	5.23	3.39
V_x max, sección transversal $x=2.5$ m (m/s)	0.591	0.570	0.577
V_x max, sección transversal $x=3.3$ m (m/s)	0.600	0.592	0.584

3.4.2 Condiciones de contorno

Para resolver las ecuaciones del modelo es necesario fijar las condiciones de flujo en los contornos abiertos. En este caso, se modelizan 3 caudales distintos para cada diseño, de forma que se cubre el rango de calados adecuados para el funcionamiento de este tipo de escala. Estos caudales se imponen como condición de contorno aguas arriba, mientras que en el contorno de aguas abajo se fijan los calados. En el contorno de entrada el caudal se distribuye uniformemente de forma perpendicular al contorno. En el contorno de salida, la altura de lámina libre se fija iterativamente para cada caudal de forma que se obtenga el mismo calado en el punto central de todas las piscinas (lo que se conoce en estos dispositivos como condiciones de flujo uniforme). Para fijar la condición de contorno de salida, se realizan distintas simulaciones para cada diseño variando la cota de la lámina libre. Para cada simulación, el calado en el centro de la segunda y tercera piscina activa se compara con la condición de contorno. Cabe señalar que, siguiendo este procedimiento, no se utilizan datos experimentales para definir la condición de contorno de salida en el modelo numérico. Un ejemplo de este proceso iterativo utilizado para fijar la condición de contorno de salida se muestra en la Tabla 8. En este ejemplo, la condición de contorno de salida seleccionada es $h_{BC}=0.52$ m.

Tabla 8 Comparación entre el calado en el centro de segunda piscina (h_C) y el calado en el contorno de salida (h_{BC}) para el diseño D4_2.5, $Q=50$ l/s y $S=5\%$, variando la condición de contorno de salida. Nota: $D=h_{BC}-h_C$.

h_{BC} (m)	h_C (m)	D (m)
0.444	0.464	-0.020
0.480	0.490	-0.010
0.520	0.520	0
0.540	0.536	0.004
0.650	0.629	0.021

3.4.3 Modelo de turbulencia

La modelización de la turbulencia es muy relevante en la simulación del flujo en las escalas, dado el alto nivel de turbulencia en este tipo de estructuras hidráulicas. En este apartado se compara el campo de velocidades, el campo de viscosidad turbulenta y el patrón de flujo para el diseño D4_5 con dos modelos de turbulencia: el modelo de longitud de mezcla (LM) y el modelo k- ϵ . Se analizan las simulaciones correspondientes a tres caudales distintos, que cubren el rango de calados adecuados para el funcionamiento de la escala, y para una pendiente del 5%.

En relación con el campo de velocidades, el modelo k- ϵ predice velocidades que son muy poco sensibles al caudal de entrada (Figura 48 y Figura 49). En cambio, los resultados obtenidos con el modelo de longitud de mezcla son más sensibles a variaciones de caudal. Con este modelo el tamaño de la zona de recirculación superior se reduce (Figura 48) y las velocidades máximas en la zona central de las piscinas disminuyen notablemente (sección $x=2.5$ m en Figura 49) al aumentar el caudal. En consecuencia, el acuerdo entre los resultados obtenidos con los dos modelos de turbulencia también depende del caudal simulado (Figura 50). En este caso se observan mayores diferencias para el mayor caudal.

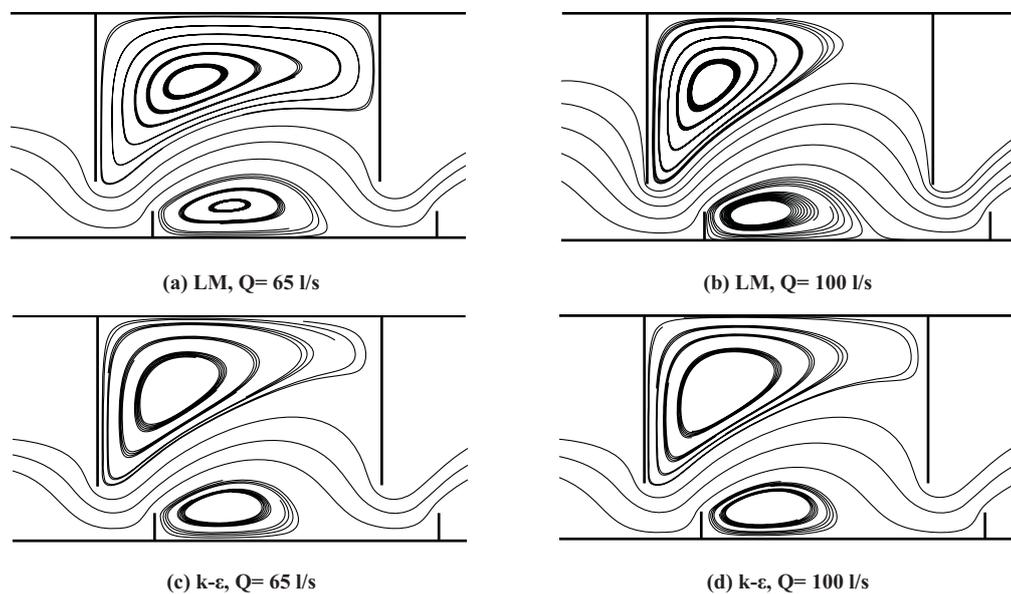


Figura 48 Líneas de corriente en el diseño D4_5 con $S=5\%$ para distintos caudales con el modelo de turbulencia de longitud de mezcla (figuras a y b) y el modelo de turbulencia k- ϵ (figuras c y d).

Esto es así porque el modelo de longitud de mezcla asume que la escala de longitud turbulenta utilizada para calcular la viscosidad turbulenta depende directamente del calado, lo cual no es

cierto en el caso de las escalas de hendidura vertical, donde la escala de longitud turbulenta depende del tamaño de las recirculaciones horizontales. En consecuencia, con calados mayores las tensiones turbulentas dadas por el modelo de longitud de mezcla aumentan (Figura 51) y los perfiles de velocidad se vuelven más tendidos. Esto no ocurre en el modelo $k-\epsilon$, donde la escala de longitud turbulenta viene dada por la energía cinética turbulenta y la disipación.

Por todo ello, los campos de viscosidad turbulenta obtenidos con los dos modelos son muy diferentes. Con el modelo de longitud de mezcla la viscosidad turbulenta se incrementa con el caudal, ya que este modelo supone que la turbulencia está limitada por el calado. Además, no considera la propagación aguas abajo de la turbulencia, por lo que los valores de viscosidad turbulenta son muy similares en las tres piscinas (Figura 52).

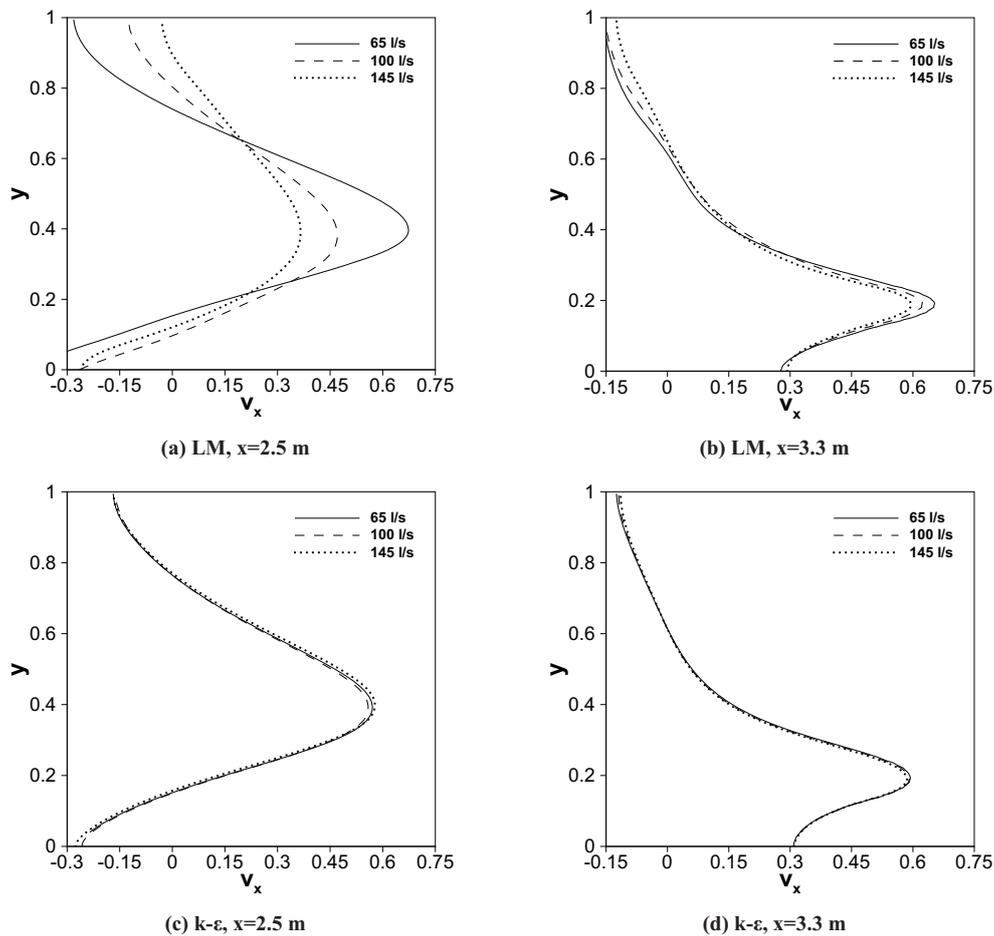


Figura 49 Velocidad longitudinal V_x (m/s) en dos secciones transversales con distintos caudales para los dos modelos de turbulencia, $S=5\%$, origen de coordenadas x - y definido en la Figura 45.

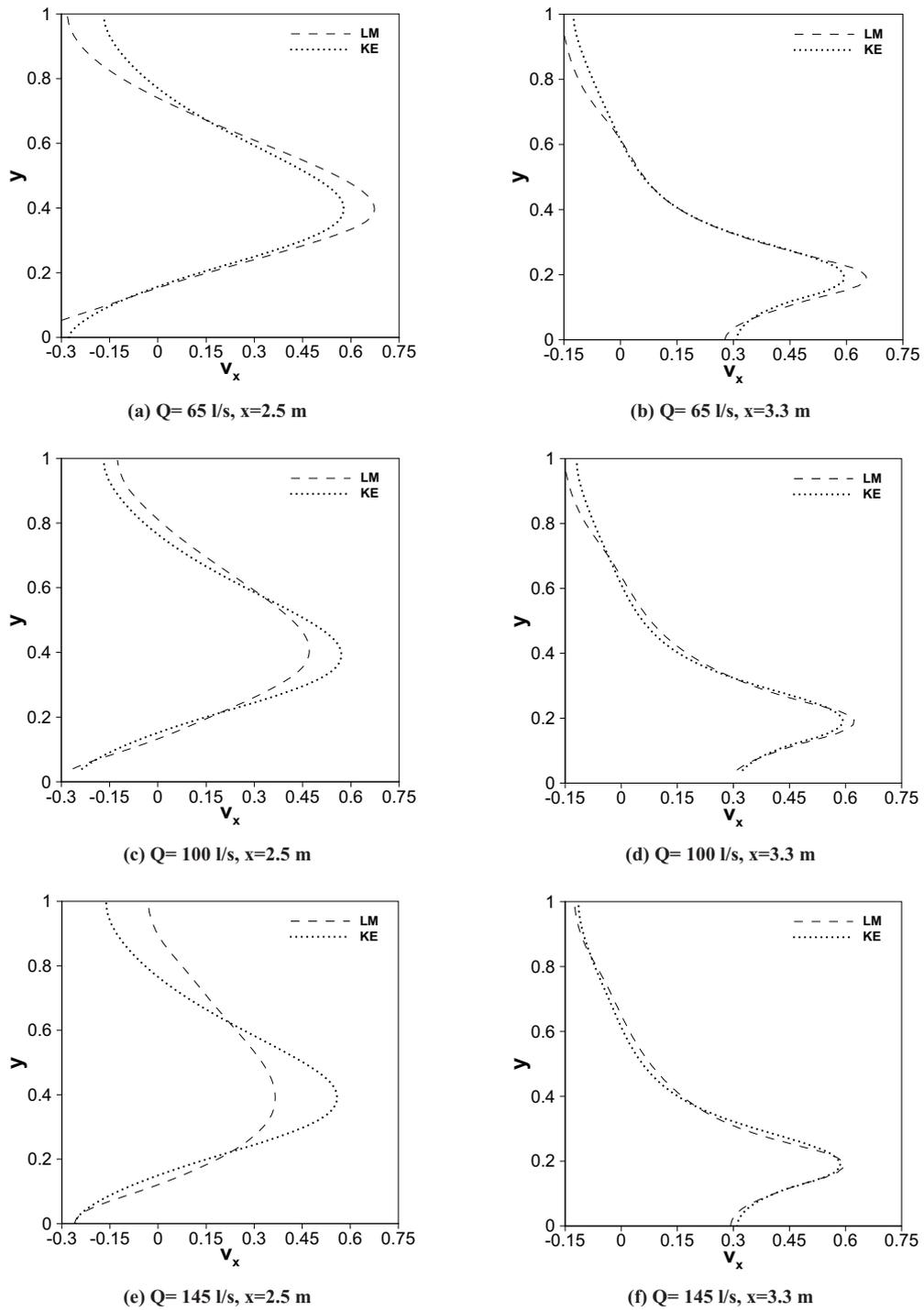


Figura 50 Velocidad longitudinal V_x (m/s) en dos secciones transversales con los dos modelos de turbulencia para distintos caudales, $S=5\%$, origen de coordenadas x - y definido en la Figura 45.

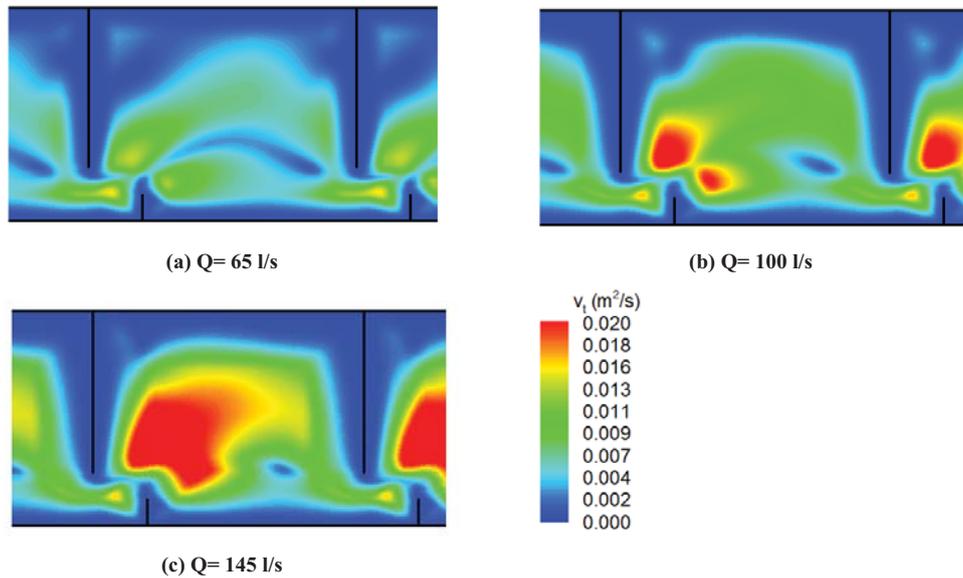


Figura 51 Campo de viscosidad turbulenta v_t desarrollado en las piscinas en el diseño D4_5 con $S=5\%$ para distintos caudales con el modelo de longitud de mezcla.

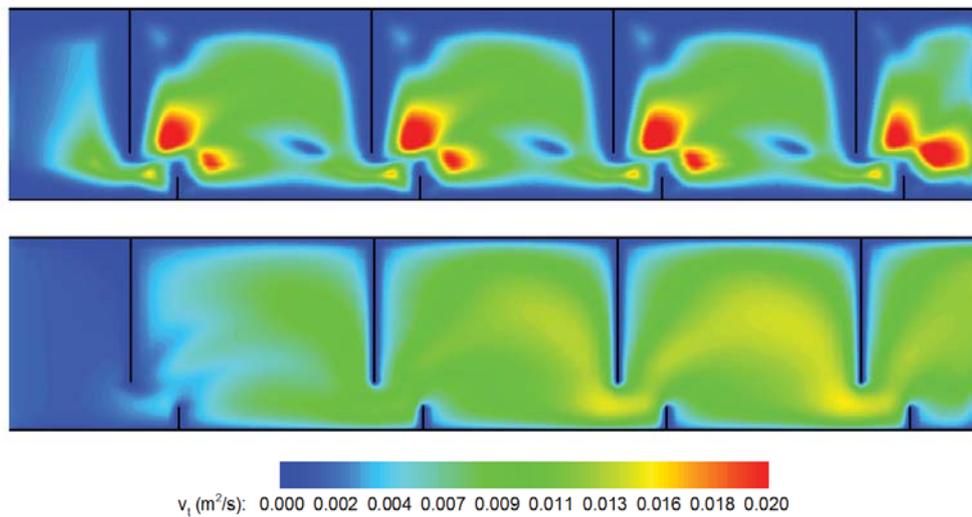


Figura 52 Campo de viscosidad turbulenta v_t desarrollado en las piscinas en el diseño D4_5 tipo I para $Q=100 \text{ l/s}$ y $S=5\%$ con el modelo de longitud de mezcla (arriba) y el modelo $k-\varepsilon$ (abajo).

En base a los resultados expuestos y a estudios similares previos con este mismo modelo (Cea et al., 2007b) se opta por utilizar un modelo de turbulencia $k-\varepsilon$ en todas las simulaciones. Este modelo requiere imponer las condiciones de turbulencia y disipación en el contorno de entrada, cuyos valores en el contorno son difíciles de estimar. Un nivel de turbulencia demasiado elevado

no es deseable ya que requeriría mucho tiempo para disipar y, en consecuencia, afectaría fuertemente a los resultados en las piscinas aguas abajo. Es más aconsejable permitir que la turbulencia se desarrolle al pasar a través de la primera piscina. Por esta razón, se toma $k=0.05 \text{ m}^2/\text{s}^2$ y $\varepsilon=0.1 \text{ m}^2/\text{s}^3$, que son valores bajos en comparación con los que se alcanzan en la segunda y tercera piscinas. La primera piscina activa tiene así una función de transición, permitiendo que se desarrollen los campos de energía cinética turbulenta y velocidad. En todos los casos, se verifica que los valores de viscosidad turbulenta calculados por el modelo en la segunda y tercera piscina son similares (Figura 53).

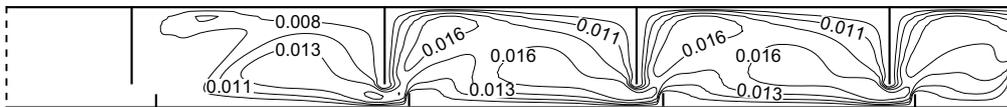


Figura 53 Campo de viscosidad turbulenta (m^2/s) en el diseño D4_10 tipo I con $S=5\%$.

3.4.4 Fricción de fondo

El único parámetro empírico que aparece en las ecuaciones del flujo medio es el coeficiente de rugosidad del fondo. En el estudio llevado a cabo por Cea et al. (2007b) se observa como este parámetro no es significativo en el desarrollo del flujo, y no se aprecian diferencias para valores del coeficiente de Manning entre $n=0$ (sin fricción) y $n=0.03 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$. En este trabajo se utiliza un coeficiente de Manning de $0.015 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$.

3.4.5 Esquema numérico

En este apartado se analiza si es posible utilizar en las simulaciones un esquema numérico de primer orden para la discretización espacial del flujo convectivo o si es necesario utilizar un esquema híbrido de primer y segundo orden. En base al estudio previo desarrollado por Cea et al. (2007b), un esquema híbrido como el descrito en el apartado 3.5 es equivalente a nivel práctico a un esquema de orden dos.

Para ello, se analizan los campos de velocidades y calados que se obtienen con varios esquemas numéricos en el diseño D4_5 con la malla M1, para el caudal de 100 l/s y con el modelo de turbulencia $k-\varepsilon$. En la Figura 54 se puede observar la influencia en el patrón de flujo y en los campos de velocidades y calados de los tres posibles esquemas: el esquema de orden 1, el esquema de orden 2 y el esquema híbrido. Como ya se ha señalado anteriormente, este último utiliza una discretización de primer orden para el calado y una de segundo orden para los caudales unitarios.

Las diferencias entre los resultados obtenidos con el esquema de orden 1 y el esquema de orden 2 son muy significativas. El esquema de primer orden es demasiado difusivo, y no es capaz de reproducir las zonas de recirculación que aparecen a ambos lados del flujo principal (Figura 54a). La difusión excesiva es debida al esquema numérico. Cabe señalar que estos resultados están íntimamente ligados al tamaño de malla empleado. Para que el esquema de orden 1 proporcione resultados aceptables sería necesario un tamaño de malla excesivamente fino, lo que incrementaría considerablemente el tiempo de cálculo.

En cambio, las diferencias entre los resultados obtenidos con el esquema híbrido y el esquema completamente de orden 2 son menos significativas (Figura 54). Los campos de calados y los patrones de flujo calculados son muy similares, y el tamaño de las zonas de recirculación es prácticamente idéntico con ambos esquemas. Las mayores diferencias se observan en el campo de velocidades, obteniéndose velocidades ligeramente mayores con el esquema híbrido.

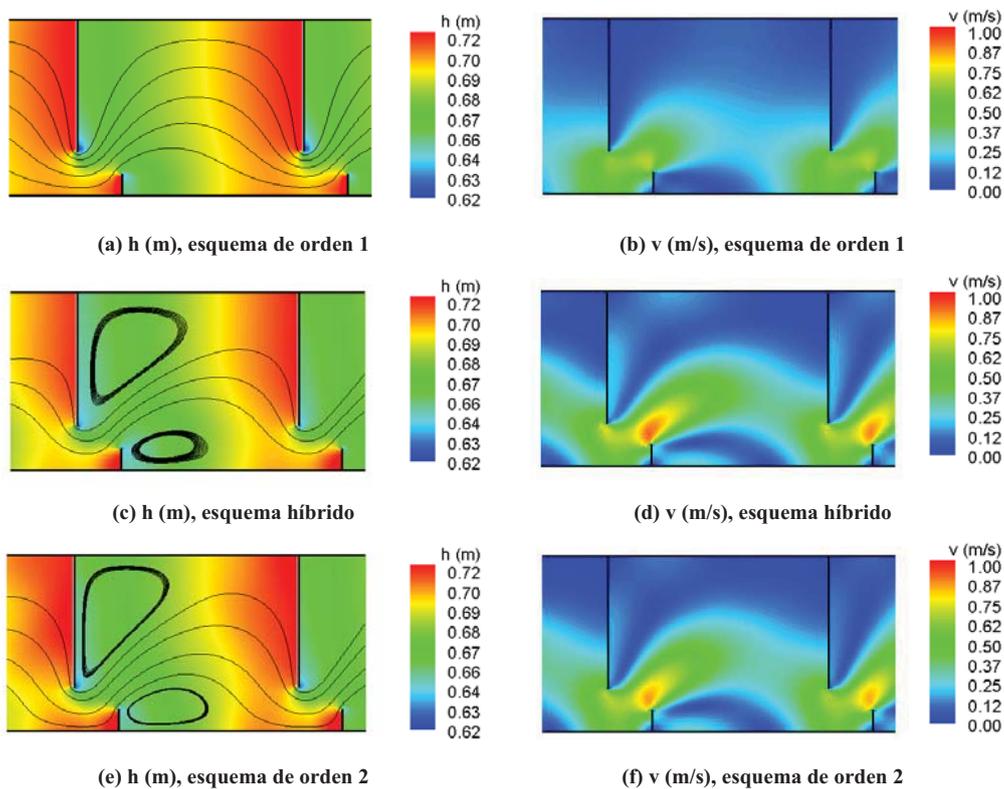


Figura 54 Influencia del esquema numérico en los campos de velocidades y calados. Diseño D4_5, $Q=100$ l/s, modelo de turbulencia $k-\epsilon$.

En consecuencia, resulta necesario utilizar un esquema de segundo orden para los caudales unitarios, que elimina la mayoría de la difusión numérica del esquema de primer orden. Dada la mayor estabilidad del esquema híbrido frente al esquema de orden 2, se opta por el primero para las restantes simulaciones.

3.5 Observaciones finales

En este capítulo se describe el modelo numérico utilizado para simular el flujo en 33 diseños de escalas de hendidura vertical, cuya geometría se define en el apartado 3.2. A lo largo del capítulo se muestran las ecuaciones hidrodinámicas resueltas por el modelo, así como las relativas al modelo de turbulencia. Además, en el apartado 3.4 se realiza una calibración del modelo centrada en cinco aspectos: la convergencia en malla, las condiciones de contorno, el modelo de turbulencia, la fricción de fondo y el esquema numérico. A continuación se resumen brevemente las conclusiones de dicha calibración, de cara a las posteriores simulaciones.

En relación con la discretización espacial, se utiliza una malla estructurada por bloques con un tamaño medio de elemento de 5 cm^2 y con una densidad ligeramente mayor en la región de la hendidura. En el contorno abierto de aguas arriba se impone el caudal de entrada en dirección perpendicular al contorno, mientras que aguas abajo se fija la altura de lámina libre. Dicha altura de lámina libre se establece siguiendo un procedimiento iterativo que no requiere el uso de datos experimentales.

El modelo de turbulencia seleccionado es un modelo de tipo $k-\epsilon$, que requiere imponer condiciones de turbulencia y disipación en el contorno de entrada. En este caso, los valores adoptados en la entrada son $k=0.05 \text{ m}^2/\text{s}^2$ y $\epsilon=0.1 \text{ m}^2/\text{s}^3$. Por otra parte, la fricción de fondo se evalúa mediante la fórmula de Manning, y se adopta un valor del coeficiente $n=0.015 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$.

Por último, para discretizar el flujo convectivo se emplea el esquema numérico híbrido propuesto en Cea et al. (2006). Este esquema utiliza una reconstrucción de segundo orden para los caudales unitarios, mientras que mantiene una reconstrucción de primer orden para el calado.

Capítulo 4. Metodología experimental

4.1 Introducción

Dadas las complejas características del flujo en las escalas de peces de hendidura vertical, se estima necesario comparar los resultados del modelo numérico descrito en el capítulo 3 con resultados experimentales. Además de utilizar para este fin estudios de otros autores (Pena, 2004; Rajaratnam et al., 1992), se llevan a cabo una serie de ensayos en un modelo físico a escala reducida, en los que se analiza el comportamiento hidráulico de 28 diseños de escalas de hendidura vertical, agrupados en tres diseños genéricos. Estos ensayos, en los que se realiza una evaluación sistemática de caudales y calados en cada diseño, constituyen lo que se denomina en este trabajo estudio hidrodinámico experimental, y se describen en el apartado 4.2.

El estudio del funcionamiento hidráulico de un diseño constituye el primer paso para evaluar su eficiencia biológica, ya que esta evaluación debe estar basada en el ajuste de sus características hidrodinámicas con las necesidades de las especies objetivo. No obstante, estos entornos hidrodinámicos son altamente complejos desde el punto de vista del pez, y existe un gran desconocimiento sobre el comportamiento de las distintas especies en estos ambientes artificiales. Características hidráulicas tales como las distribuciones de velocidad y de turbulencia parecen tener influencia en la eficacia de los dispositivos (Hotchkiss, 2002; Katopodis, 2005; Odeh et al., 2002; Pavlov et al., 2000), 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.

En consecuencia, con el objetivo de analizar el comportamiento de distintas especies de peces en una escala de peces de hendidura vertical, se realizan asimismo ensayos con ejemplares de salmónidos y ciprínidos en un modelo físico a tamaño real (escala 1:1), cuyas características se describen en la sección 4.3.1. Como varios autores han señalado (Kemp et al., 2006; Silva et al., 2010), los estudios de laboratorio en condiciones controladas constituyen excelentes oportunidades para conocer mejor el comportamiento de los peces. En este caso, se ha utilizado una nueva técnica no intrusiva que permite realizar un seguimiento completo de la trayectoria de los ejemplares durante el ascenso. El sistema se fundamenta en la grabación en vídeo del

movimiento de los ejemplares a través de las piscinas y en el uso de técnicas de visión artificial y algoritmos de reconocimiento de imágenes basados en redes neuronales, y se describe en la sección 4.3.3. En esa misma sección se explica además el procedimiento seguido para analizar la utilización que realizan los ejemplares de las distintas regiones del flujo, así como para calcular las velocidades y aceleraciones que desarrollan las distintas especies durante el ascenso a partir de la reconstrucción de la trayectoria. Cabe señalar que dentro de las especies estudiadas se incluyen ciprínidos autóctonos de la Península Ibérica, como la boga del Tajo (*Pseudochondrostoma polylepis*) o el barbo común ibérico (*Luciobarbus bocagei*), cuyas necesidades y características en lo referente a pasos para peces han sido históricamente poco estudiadas.

4.2 Estudio hidrodinámico

Con el objetivo de estudiar el funcionamiento hidrodinámico de distintos diseños de escalas de peces de hendidura vertical se llevan a cabo una serie de ensayos en un modelo físico a escala reducida. Los resultados de estos ensayos se utilizan para analizar la influencia de las variaciones geométricas en el comportamiento hidrodinámico de las escalas de hendidura vertical. Para ello, se determinan las ecuaciones de descarga de cada diseño, que relacionan el caudal circulante con el calado, y se analiza su variación con las dimensiones geométricas básicas de las piscinas. Asimismo, los resultados experimentales se comparan con los obtenidos con el modelo numérico descrito en el capítulo 3. En este apartado se describe el dispositivo y la metodología experimental empleados.

Este estudio se enmarca dentro de la línea de trabajo del grupo de investigación (el Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente de la Universidad de A Coruña) en modelización física de escalas de peces, entre cuyos trabajos previos destaca el de Pena (2004). En dicho trabajo se realiza una evaluación exhaustiva de calados y velocidades en dos diseños de escalas de peces de hendidura vertical. En base a este y otros trabajos (Liu et al. 2006; Rajaratnam et al. 1986, 1992; Tarrade et al. 2008 o Wu et al. 1999) cuestiones como el carácter bidimensional del flujo en este tipo de dispositivos se dan por buenas.

4.2.1 Dispositivo experimental

El estudio hidrodinámico experimental se lleva a cabo en el laboratorio de hidráulica de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de A Coruña. En el canal

de flujo en lámina libre de dicho laboratorio (Figura 55) se ensayan los tres tipos genéricos de escalas de peces de hendidura vertical denominados tipo I, tipo II y tipo III (Figura 56) y, para cada uno de ellos, se prueban distintas dimensiones geométricas de las piscinas. Concretamente, se estudian 16 diseños para el tipo I, 6 diseños para el tipo II y 6 diseños para el tipo III, lo que supone un total de 28 diseños de escalas de hendidura vertical (Tabla 9). No se han ensayado los diseños tipo IV del estudio numérico (Figura 43), ya que se dispone de los datos del estudio experimental exhaustivo de Pena (2004) y los rangos de dimensiones geométricas habituales en este diseño tipo son reducidos. Las dimensiones de las piscinas en el modelo físico mantienen las mismas relaciones B/b y L/b que las estudiadas con el modelo numérico.



Figura 55 Canal de flujo en lámina libre del laboratorio de hidráulica de la E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de A Coruña.

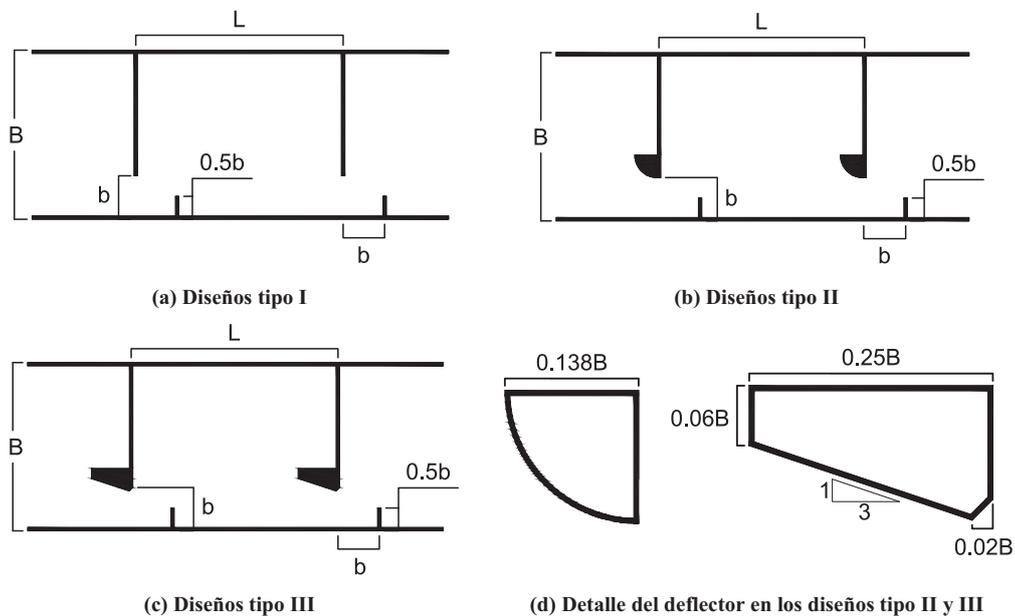


Figura 56 Configuración de los deflectores en los tres diseños tipo estudiados.

El modelo físico consiste en un canal de acero inoxidable de 7 m de largo con una sección rectangular de 0.3 m de ancho y 0.35 m de profundidad, que se introduce dentro del canal hidráulico. La solera del canal está recubierta por una lámina de metacrilato ranurada, donde se insertan los deflectores según las diferentes configuraciones (Figura 57). Las dimensiones geométricas y el número de piscinas se detallan en la Tabla 9 para cada diseño. Todos los datos analizados en este trabajo experimental se corresponden con una pendiente del 5%. En relación con los caudales suministrados, el circuito hidráulico cerrado de este laboratorio puede aportar al canal un máximo de 70 l/s, y el rango de caudales ensayado en cada diseño se muestra en la Tabla 9.

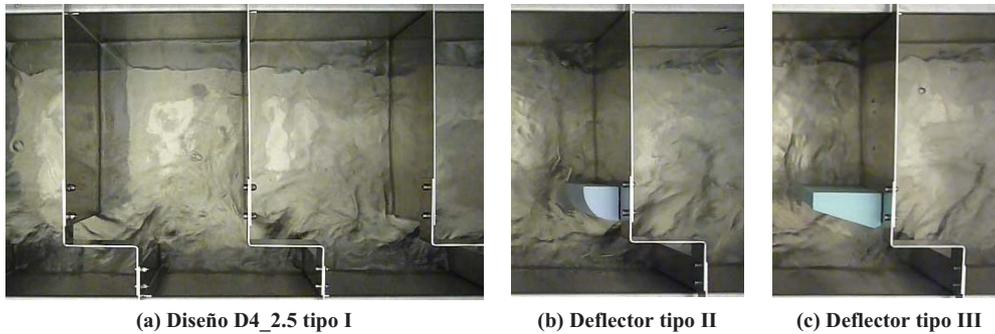


Figura 57 Vista en planta de uno de los diseños ensayados y de los deflectores tipo II y III.

4.2.2 Ensayos

Los ensayos están centrados en el cálculo de las ecuaciones de descarga, que relacionan en cada diseño el caudal circulante con el calado en la sección central de las piscinas. Para poder definir estas relaciones caudal-calado, cada diseño se prueba para tres caudales diferentes. Estos caudales se imponen como condición de contorno aguas arriba y, al final del canal, el calado se fija mediante una compuerta hasta alcanzar un flujo uniforme (entendido en estos dispositivos como igual calado en puntos equivalentes en cada piscina). Para considerar que se ha alcanzado dicho flujo uniforme, se comprueba en cada ensayo que la diferencia entre los calados medidos en el centro de las tres piscinas centrales es inferior a 1 cm. El esquema de los ensayos puede verse en la Figura 58.

Tabla 9 Dimensiones geométricas de los 28 diseños estudiados experimentalmente y rango de caudales ensayado. Las dimensiones de las piscinas están dadas en función de la anchura de hendidura, b. Nota: N=número de piscinas, Q_{\min} =caudal mínimo ensayado, Q_{\max} = caudal máximo ensayado.

	Diseño	B	L	b (m)	N	$Q_{\min} - Q_{\max}$ (l/s)	
Tipo	I	D2_2.5	2b	2.5b	0.150	10	5.5 – 10.5
		D2_5	2b	5b	0.150	9	8.0 – 12.8
		D2_10	2b	10b	0.150	4	12.3 – 21.0
		D2_15	2b	15b	0.150	3	22.1 – 27.0
		D2.67_2.5	2.67b	2.5b	0.113	10	3.4 – 6.3
		D2.67_5	2.67b	5b	0.113	10	5.3 – 9.6
		D2.67_10	2.67b	10b	0.113	6	8.7 – 13.3
		D2.67_15	2.67b	15b	0.113	4	10.5 – 16.5
		D4_2.5	4b	2.5b	0.075	10	2.4 – 4.1
		D4_5	4b	5b	0.075	10	3.9 – 5.7
		D4_10	4b	10b	0.075	9	4.7 – 9.1
		D4_15	4b	15b	0.075	6	5.7 – 9.1
		D8_2.5	8b	2.5b	0.038	10	0.9 – 1.9
		D8_5	8b	5b	0.038	10	1.4 – 2.8
		D8_10	8b	10b	0.038	10	2.8 – 3.7
	D8_15	8b	15b	0.038	10	3.0 – 4.2	
	II	D4_5	4b	5b	0.075	10	4.7 – 7.2
		D4_10	4b	10b	0.075	9	6.1 – 8.8
		D4_15	4b	15b	0.075	6	8.1 – 12.2
		D8_5	8b	5b	0.038	10	2.7 – 3.5
		D8_10	8b	10b	0.038	10	3.7 – 4.9
		D8_15	8b	15b	0.038	10	3.3 – 5.6
	III	D4_5	4b	5b	0.075	10	5.5 – 7.5
		D4_10	4b	10b	0.075	9	6.9 – 9.8
		D4_15	4b	15b	0.075	6	8.4 – 11.4
		D8_5	8b	5b	0.038	10	2.4 – 3.1
		D8_10	8b	10b	0.038	10	3.0 – 4.7
		D8_15	8b	15b	0.038	10	4.0 – 5.4

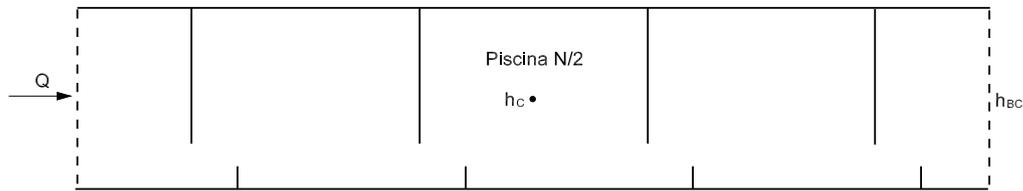


Figura 58 Esquema general de los ensayos. El número de piscinas N está indicado en la Tabla 9.

La medición del caudal suministrado a la escala se realiza mediante un caudalímetro electromagnético de la marca ABB, serie MagMaster. El principio de funcionamiento de los caudalímetros electromagnéticos consiste en crear un campo magnético uniforme perpendicular a la dirección del flujo, lo que provoca una fuerza electromotriz inducida. Un par de electrodos colocados sobre las paredes internas de la tubería cuantifican la diferencia de potencial causada por la fuerza electromotriz inducida. Esta fuerza electromotriz será proporcional al caudal que discurre por la tubería. Este tipo de caudalímetros alcanzan precisiones del orden de $\pm 0.15\%$ sobre la medida, con la tubería llena y atendiendo a ciertas normas de colocación (y a que la tubería esté llena de líquido, que es la situación normal de uso en el laboratorio).

La medición del calado en el centro de la piscina se realiza con una sonda de calados DHI Wave Meter 102E del Danish Hydraulic Institute. El principio de funcionamiento del DHI Wave Meter radica en medir la conductividad entre dos electrodos paralelos parcialmente inmersos en agua. El sensor de calado (Figura 59) consta de dos barras paralelas de acero inoxidable que funcionan a modo de electrodos; al sumergirlos en un fluido se cuantifica la conductividad del volumen de agua presente entre los dos electrodos. La conductividad varía proporcionalmente a los cambios del volumen de agua entre los electrodos, es decir, es proporcional a la altura de la superficie libre del agua. La resolución del sensor de calado es menor de 1 mm.

Finalmente, se graba un vídeo de aproximadamente 30 s de duración para cada diseño de piscina para definir mediante observación visual el patrón de flujo (Figura 60 y Figura 61). Los trazadores utilizados son esferas de aproximadamente 1 cm de diámetro y con una densidad similar a la del agua.



Figura 59 Sensor de calados (Wave Gauge Type 202).

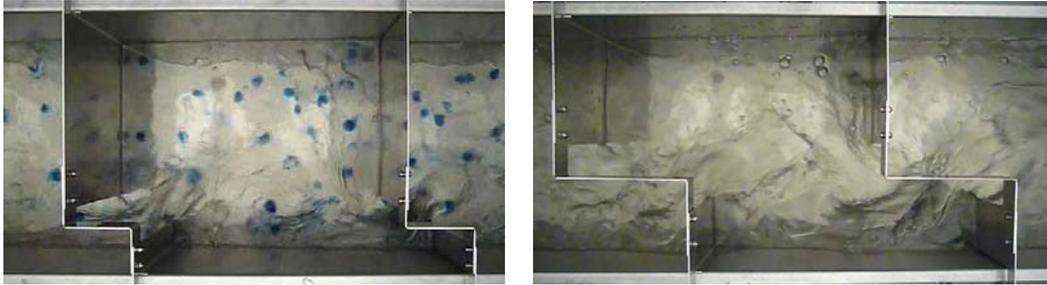


Figura 60 Vista en planta del diseño D4_5 tipo I con los trazadores utilizados para definir el patrón de flujo mediante observación visual (izquierda) y vista en planta del diseño D2_2.5 tipo I (derecha).



Figura 61 Vista en planta del diseño D8_15 tipo II con los trazadores utilizados para definir el patrón de flujo mediante observación visual (izquierda) y vista en planta del diseño D8_10 tipo III (derecha).

4.3 Estudio biológico

Con el objetivo último de comprender mejor la interacción entre los procesos biológicos y físicos involucrados en el remonte de una escala de hendidura vertical, se llevan a cabo una serie de ensayos con ejemplares vivos en un modelo físico a escala real. En esta sección se describe el dispositivo experimental, que dispone de una infraestructura de adquisición de imágenes para grabar en vídeo los movimientos de los ejemplares durante los ensayos. Asimismo, se describe la metodología empleada para procesar las imágenes obtenidas con este sistema y las características de los ensayos realizados.

4.3.1 Dispositivo experimental

Los ensayos del estudio biológico se llevan 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 62). 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 63. El modelo incluye un depósito

de alimentación elevado de 2.30 m de altura y cuya solera se sitúa a 1.60 m del suelo, que define en planta un cuadrado de 3.40 x 3.40 m². Asimismo, al final de la escala de peces se diseña un recinto para introducir a los peces previamente a la experimentación. Este recinto forma parte de un gran depósito de 27 m de largo, 4.50 m de ancho y 1.60 m de alto, cuyo volumen almacena el agua necesaria para poner en funcionamiento la escala de peces en circuito cerrado. Durante los ensayos el caudal se fija en 250 l/s y la pendiente de la escala en el 7.5%.



Figura 62 Instalación experimental en el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX (CEH-CEDEX).

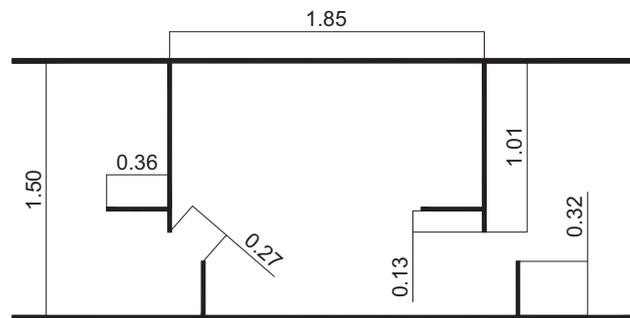


Figura 63 Dimensiones geométricas de las piscinas (m) y configuración de los deflectores.

Tal y como se ha comentado en el capítulo 2, controlar en detalle el comportamiento de los peces en un dispositivo de remonte es una tarea compleja. A continuación se describe el procedimiento seguido en este trabajo. Cabe señalar que se trata de una técnica no intrusiva y que permite obtener gran cantidad de información con un buen nivel de precisión.

En este caso, 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 (se colocan 4 cámaras por piscina y una adicional en la salida) y que se fijan al canal mediante una serie de estructuras de aluminio. La disposición de las

cámaras permite cubrir totalmente la zona próxima al fondo en las 7 piscinas. 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) para evitar los reflejos y turbulencias en la superficie del agua. La disposición de las cámaras con sus correspondientes estructuras de fijación se muestra en la Figura 64 y las condiciones de grabación se ilustran en la Figura 65.

Como se ha señalado anteriormente y pese al gran número de cámaras, el sistema constituye una herramienta de monitorización muy poco intrusiva. Todas las estructuras de sujeción se colocan por la parte exterior del canal, y únicamente está sumergida la parte inferior de las carcasas de metacrilato. Además, el sistema permite que la supervisión del ensayo se realice a distancia, sin necesidad de definir puntos de observación directa en las proximidades del canal.



Figura 64 Disposición de la red de cámaras instalada en el modelo con las correspondientes estructuras de soporte.

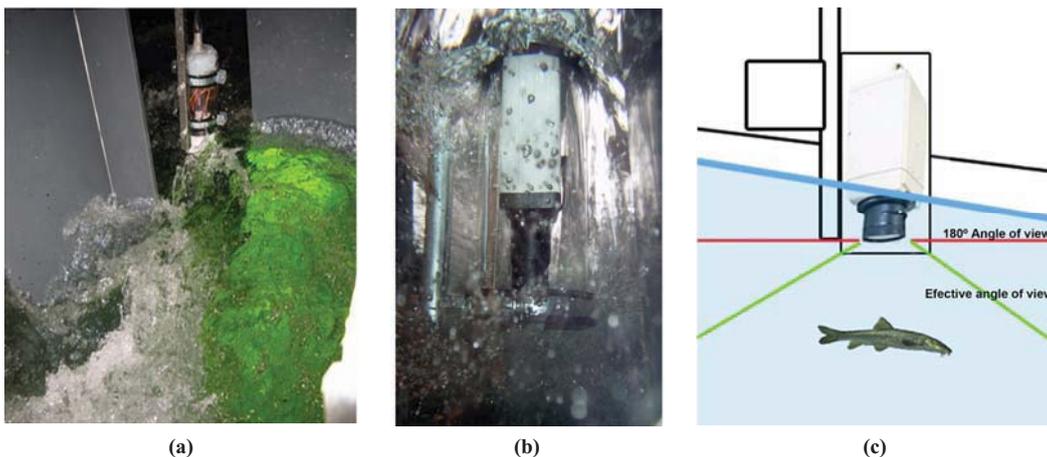


Figura 65 Imágenes tomadas durante los ensayos de las condiciones de grabación (a y b) y esquema de operación de cada cámara (c).

Para la adquisición de los datos, se utiliza un sistema robusto con gran capacidad de almacenaje y que permite sincronizar la grabación en todas las cámaras con una precisión de 0.04 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 en tiempo real. 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 (vídeo quad), un multiplexor (vídeo mux) y un monitor de televisión de 27 pulgadas. Los vídeo quads recogen todas las señales de vídeo de las cámaras y el vídeo mux permite seleccionar dichas señales para visualizarlas en el monitor. Cada vídeo quad dispone de 8 entradas para videograbadores y el vídeo mux consta de 4 entradas para vídeo 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 (switch) para conseguir las 29 conexiones para los videograbadores. El esquema global de la infraestructura se muestra en la Figura 67.

Por último, como complemento al sistema de cámaras, la escala de peces consta de un sistema de radiofrecuencia para la localización e identificación de los peces. Para ello es necesario implantar en los peces un microchip, que es detectado al pasar por cuatro antenas colocadas a lo largo de la escala (Figura 66). Una de las antenas está situada en la entrada de la escala, otra en la salida y las dos restantes en hendiduras intermedias.



Figura 66 Ubicación de una de las antenas en la hendidura de la escala y colocación de un microchip en un pez.

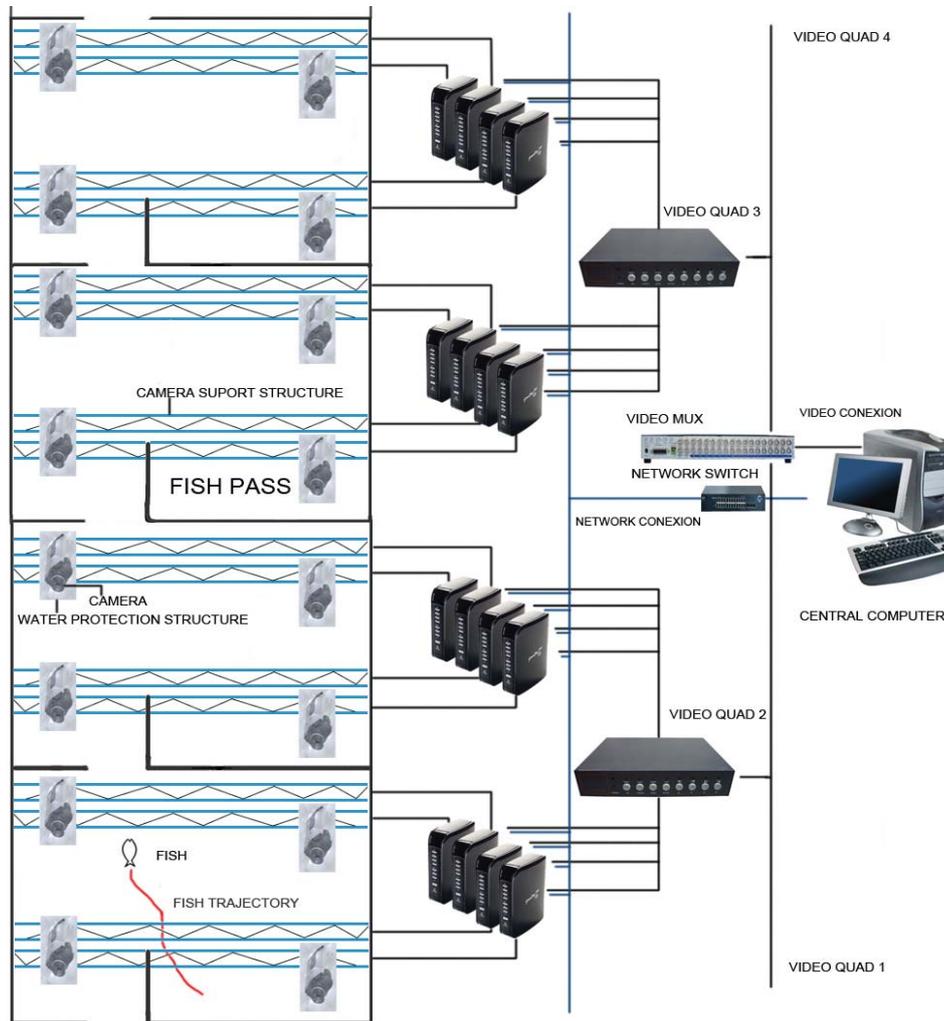


Figura 67 Esquema global de la infraestructura de adquisición de datos.

4.3.2 Ensayos

Se han realizado ensayos con tres especies diferentes de peces (Figura 68):

- Trucha común (*Salmo trutta*). Esta especie se distribuye por la cabecera de numerosos ríos peninsulares y falta en algunos ríos de levante, en el sur de España y en la cuenca del Guadiana. La talla mínima de los adultos oscila entre 15 y 20 cm, pero su tamaño puede ser muy superior, alcanzando 40 cm o más.
- Boga del Tajo (*Pseudochondrostoma polylepis*). Pertenece a la familia de los ciprínidos, es un endemismo de la cuenca del Tajo y ha sido introducida en las cuencas del Júcar y

Segura. De color plateado y aletas casi blancas, en España llega a alcanzar los 40 cm de largo.

- Barbo común (*Luciobarbus bocagei*). Se trata de una especie de pez ciprínido endémico de la península Ibérica. Habita las cuencas de los ríos Tajo, Duero, Vouga y Mondego. Es una especie de gran tamaño, en comparación con el resto de los ciprínidos, que puede alcanzar hasta un metro de longitud, aunque la mayoría de los ejemplares rondan los 40 cm.

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 (cuenca del Tajo), en las proximidades de San Martín de Valdeiglesias (Madrid). A todos los ejemplares se les implanta un microchip que los identifica individualmente.



(a) Trucha común, *Salmo trutta* (Foto: Benigno Elvira)



(b) Boga del Tajo, *Pseudochondrostoma polylepis* (Foto: Benigno Elvira)



(c) Barbo común, *Luciobarbus bocagei* (Foto: David Pérez)

Figura 68 Especies de peces objeto del estudio.

Los ensayos se llevan a cabo únicamente durante los períodos de reproducción de cada especie, es decir, entre diciembre y febrero para la trucha, abril y mayo para la boga y mayo y junio para el barbo. En consecuencia, los experimentos se llevaron a cabo el 3 de febrero de 2010 (ensayos con trucha), el 6 de mayo de 2010 y 14 de abril de 2011 (ensayos con boga) y el 20 de mayo de 2010 y el 19 de mayo de 2011 (ensayos con barbo). La temperatura del agua durante los experimentos fue de 14.4°C (03/02/2010), 18.4°C (06/05/2010), 19.2°C (14/04/2011), 18.9°C

(20/05/2010) y 20.8°C (19/05/2011), respectivamente. El caudal se mantuvo constante a 250 l/s, lo que proporciona unos calados en la escala de aproximadamente 0.8 m, dentro de los rangos recomendados para este tipo de dispositivos.

En cada ensayo se introdujeron grupos de 12 a 25 ejemplares de la especie correspondiente en el recinto situado en la parte inferior de la escala y se les permitió remontar por su propia voluntad (sin forzar su ascenso) durante 24 horas, siendo al menos 6 horas grabadas por el sistema de cámaras. Cabe mencionar que los ensayos se limitan únicamente al canal de la escala, no contemplándose la entrada y salida del dispositivo.

La talla de los ejemplares ensayados varía entre 15 y 25 cm para la trucha, de 10 a 20 cm para la boga y de 30 a 35 cm para el barbo. En el caso de la trucha y la boga los ejemplares se distribuyen homogéneamente en dos grupos de tamaño en cada ensayo. Así, aproximadamente la mitad de los ejemplares de trucha tienen una talla comprendida entre 15 y 20 cm, y la otra mitad entre 20 y 25 cm. En el caso de la boga, se consideran ejemplares pequeños entre 10 y 15 cm y ejemplares grandes entre 15 y 20 cm. De nuevo, la mitad de los individuos se corresponden con cada grupo en cada ensayo.

4.3.3 Técnica de visión artificial desarrollada

En esta sección se analiza la técnica empleada para extraer la trayectoria seguida por el pez a partir de las imágenes del sistema de grabación. Aunque las bases de esta técnica, fundamentada en el uso de redes neuronales y técnicas de visión artificial, escapan del alcance de esta tesis, se realiza a continuación una breve descripción de la misma. La técnica ha sido desarrollada y aplicada ad hoc para estas campañas experimentales en colaboración con el grupo RNASA (Redes de Neuronas Artificiales y Sistemas Adaptativos) de la Universidad de A Coruña. Cabe señalar que una descripción completa puede encontrarse en Rodríguez et al. (2011). Posteriormente, se explica 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 consiste en 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. En la Figura 69 se muestra el resultado de integrar las 4 cámaras de una piscina, con la superposición de los campos de las cámaras. Esto implica que cuando el pez se encuentra en áreas en las que los campos de las cámaras se superponen, será observado al mismo tiempo por cámaras diferentes y desde diferentes perspectivas (Figura 70).

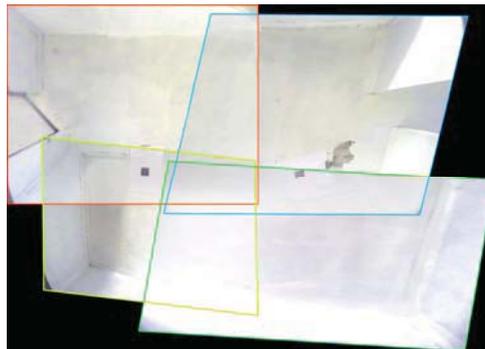


Figura 69 Integración las imágenes proyectadas de las 4 cámaras que forman una piscina. Cada polígono representa el campo de una cámara diferente.

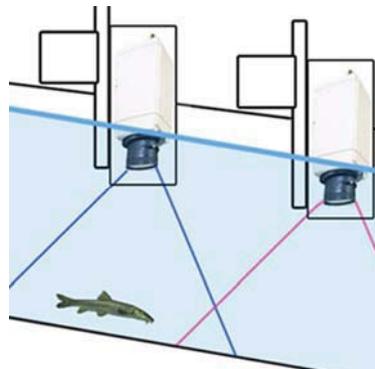


Figura 70 Representación esquemática de la combinación de varias cámaras.

Una vez se ha definido esta transformación, se procede a segmentar las imágenes, es decir, a clasificar y etiquetar los diferentes elementos de la imagen para separar el área ocupada por el pez del resto de la imagen o fondo. En este caso, el método de segmentación utiliza una red de neuronas artificiales de tipo Self-Organizing Map (SOM) (Kohonen, 1982). En la Figura 71 se muestra un ejemplo de la salida de la red neuronal SOM a partir de imágenes reales de los ensayos.

Finalmente, se procede al análisis de los objetos segmentados mediante técnicas de visión artificial, con el objetivo de definir el centroide del pez. Para ello se utiliza la clasificación de

imagen generada previamente por la red de neuronas artificiales, que describe cada uno de los cuerpos conexos encontrados en la imagen. 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. Así, se han definido procedimientos para fusionar dos cuerpos conexos cuyas características pueden corresponder con un pez o con una parte de un pez y para descartar aquéllos cuerpos que, debido a su tamaño o forma, se consideran ruido. En la Figura 72 se muestra el centroide proporcionado por el algoritmo con diferentes imágenes segmentadas por la red neuronal, concretamente las imágenes de la Figura 71.

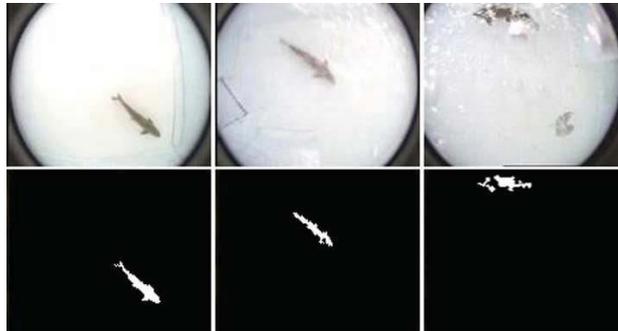


Figura 71 Diferentes imágenes reales obtenidas durante los ensayos (arriba) y el resultado de su análisis con la red de neuronas artificiales (abajo). El color blanco indica la detección de un pez.

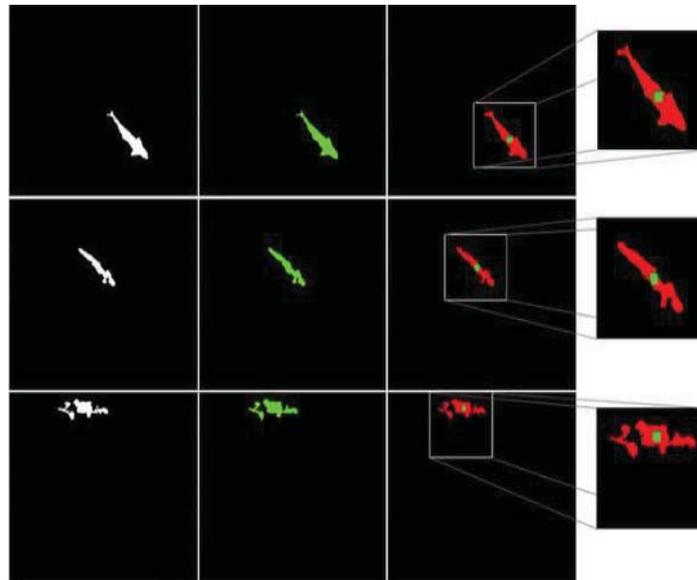


Figura 72 Imágenes segmentadas por la red de neuronas artificiales (columna izquierda), detección del pez (columna intermedia) y determinación del centroide (columna derecha).

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:

$$\left[(X_{t_0}, Y_{t_0}), (X_{t_1}, Y_{t_1}), \dots, (X_{t_i}, Y_{t_i}), \dots, (X_{t_N}, Y_{t_N}) \right]_{\min(\Delta t)=0.04s} \quad (4.1)$$

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:

$$\bar{v}_{obs} = \left(\frac{X_{t_i} - X_{t_{i-1}}}{t_i - t_{i-1}}, \frac{Y_{t_i} - Y_{t_{i-1}}}{t_i - t_{i-1}} \right) \quad (4.2)$$

donde \bar{v}_{obs} es el vector 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 por medio de la siguiente ecuación:

$$\bar{v}_{nat} = \bar{v}_{obs} - \bar{v}_a \quad (4.3)$$

donde \bar{v}_{nat} es el vector velocidad de natación del pez y \bar{v}_a es el vector velocidad del agua. La velocidad del agua en cada punto se obtiene con el modelo numérico descrito en el capítulo 3, basado en las ecuaciones de aguas someras promediadas en profundidad bidimensionales. Siguiendo el procedimiento descrito en dicho capítulo, se ha construido un modelo numérico con la geometría del modelo físico. El campo de velocidad del agua así obtenido para cada piscina se muestra en la Figura 73.

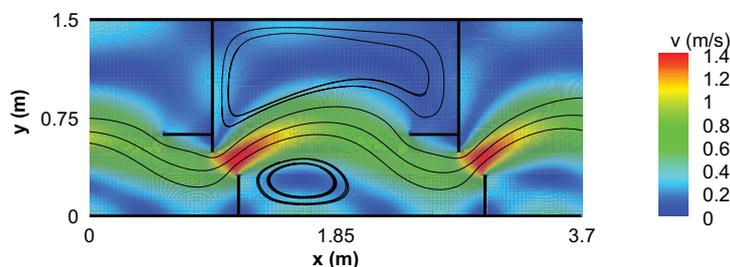


Figura 73 Campo de velocidad del agua y líneas de corriente utilizadas para evaluar la velocidad de natación.

Una vez conocidas las velocidades de natación, se calculan las aceleraciones \bar{a}_i de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\bar{a}_i = \left(\frac{V_{\text{natx},ti} - V_{\text{natx},ti-1}}{t_i - t_{i-1}}, \frac{V_{\text{naty},ti} - V_{\text{naty},ti-1}}{t_i - t_{i-1}} \right) \quad (4.4)$$

Donde v_{natx} y v_{naty} son las componentes según los ejes x e y, respectivamente, de la velocidad de natación.

Por último, se examina el uso que realizan los ejemplares de las distintas zonas del flujo, en especial de las zonas de recirculación. Este análisis relaciona el vector de posición de cada ejemplar, definido por la Ecuación 4.1, con las características cinemáticas de las piscinas. Para ello, la trayectoria completa de cada ejemplar se divide entre pasos de hendidura y zonas de descanso. Las posibles zonas de descanso consideradas se muestran en Figura 74, y se corresponden con zonas de recirculación con bajos niveles de turbulencia y velocidad. En el apartado 5.3.2 se explica más en detalle cómo se han definido estas áreas. Los denominados pasos de hendidura son los tramos de trayectoria situados inmediatamente antes y después de la sección de la hendidura, señalada en línea discontinua en la Figura 74.

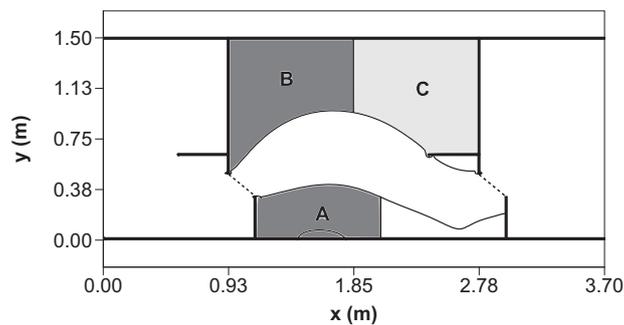


Figura 74 Posibles áreas de descanso A, B y C consideradas en este trabajo, delimitadas a partir del campo de velocidades y de energía cinética turbulenta en las piscinas. En línea discontinua la sección de la hendidura.

En los pasos de hendidura se analizan en detalle las velocidades y aceleraciones de los ejemplares, siguiendo la metodología comentada anteriormente. En relación con los descansos, se analizan principalmente dos aspectos: la frecuencia de uso de cada una de las posibles zonas y los tiempos de permanencia. En este trabajo, la frecuencia de utilización se entiende como el cociente entre el número de descansos realizados en una zona y el número de descansos totales efectuados durante el ascenso. Por su parte, el tiempo de permanencia es el tiempo transcurrido desde la entrada hasta la salida de cada zona. De esta forma, se determinan las zonas de flujo con mayor tiempo de tránsito y las zonas de descanso preferentes.

Capítulo 5. Análisis de resultados

5.1 Introducción

A lo largo del presente capítulo se describen los resultados alcanzados en esta tesis. En el apartado 5.2 se muestran los resultados del estudio hidrodinámico realizado en distintos diseños de escalas de hendidura vertical, utilizando tanto el modelo numérico descrito en el capítulo 3 como la metodología experimental descrita en el capítulo 4. En esta primera fase de la tesis se analizan los parámetros hidráulicos que generalmente se consideran para evaluar la eficiencia de un diseño: la velocidad en la hendidura, el calado en las piscinas, el patrón de flujo y la potencia disipada por unidad de volumen. A partir de estos resultados, se examina la influencia del tipo de diseño y de las dimensiones geométricas de las piscinas en las características del flujo.

Por otra parte, en la sección 5.3 se presentan los resultados de la segunda fase experimental: el estudio biológico. Esta fase comprende la ejecución de cinco ensayos con tres especies diferentes y su análisis siguiendo la metodología propuesta en el capítulo 4. Dicho análisis permite conocer la trayectoria seguida por los peces en el remonte, las velocidades y aceleraciones desarrolladas en los pasos de hendidura y las zonas de la escala con mayores tiempos de permanencia. En base a los resultados obtenidos, se analiza el potencial de la metodología para estudiar el comportamiento de los peces en estos dispositivos de un modo sistemático y prolongado en el tiempo.

Por último, en el apartado 5.4 se propone una metodología para evaluar y comparar distintos diseños desde el punto de vista biológico, relacionando las características hidráulicas de las piscinas con las necesidades biológicas de las especies objetivo. Para facilitar la utilización de esta metodología se desarrolla asimismo una aplicación informática cuyas características se describen en este mismo apartado.

5.2 Estudio hidrodinámico

En esta sección se muestran los resultados del estudio hidrodinámico, tanto los calculados con el modelo numérico como los obtenidos a partir de los ensayos experimentales en modelo reducido. Se realiza una comparación entre los mismos y, en los casos en los que es posible, se comparan los resultados obtenidos con el modelo numérico con resultados experimentales de otros autores.

Concretamente, se emplean los resultados experimentales de Rajaratnam et al. (1992) y de Pena (2004) para validar las simulaciones en siete diseños del tipo I y las simulaciones en los diseños del tipo IV, respectivamente.

Esta sección se estructura en cuatro apartados. El apartado 5.2.1 está centrado en la definición de los patrones de flujo que se desarrollan en las piscinas, en función de las características geométricas de la escala de peces. En el segundo apartado se analizan los campos de velocidades desarrollados, para a continuación definir las curvas de descarga de cada diseño en la sección 5.2.3. Por último, en el apartado 5.2.4 se estudia la potencia disipada en las piscinas y la distribución espacial de la turbulencia.

5.2.1 Patrones de flujo

En función de las dimensiones geométricas de las piscinas, se desarrollan dos tipos de patrones de flujo denominados FP1 (Figura 75) y FP2 (Figura 76). En ambos patrones se pueden distinguir tres regiones: una región de flujo principal definida por un chorro de gran velocidad, donde se dan las mayores velocidades, y dos zonas de recirculación con velocidades bajas.

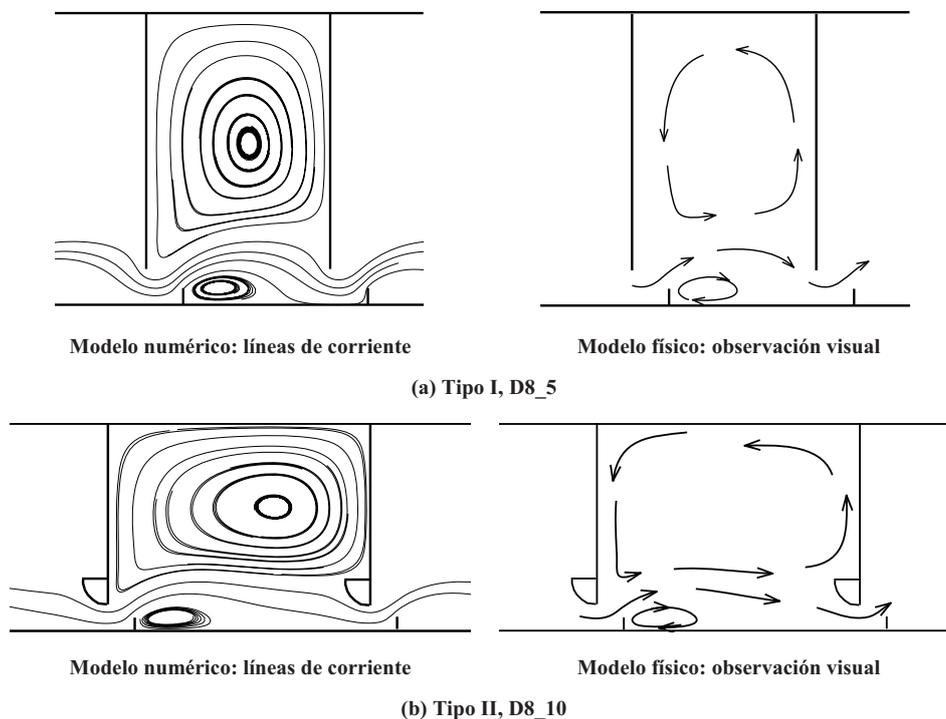


Figura 75 Representación esquemática del patrón de flujo 1 (FP1) a partir de observación visual y líneas de corriente numéricas en dos de los diseños estudiados.

En el primer patrón (Figura 75), el flujo principal atraviesa la piscina siguiendo una trayectoria directa y casi rectilínea, creando una gran zona de recirculación entre los deflectores laterales. En la parte derecha del flujo principal, una pequeña zona de recirculación, rotando en el sentido de las agujas del reloj, se desarrolla entre los deflectores laterales de menor tamaño.

En el segundo patrón (Figura 76), el flujo principal sigue una trayectoria curva al atravesar la hendidura y choca directamente contra la pared opuesta. El área de recirculación de gran tamaño que aparece en el primer patrón se reduce y se desplaza hacia la esquina de aguas arriba. Al otro lado del flujo principal, el vórtice tiende a ocupar el espacio vacío en la parte convexa del flujo.

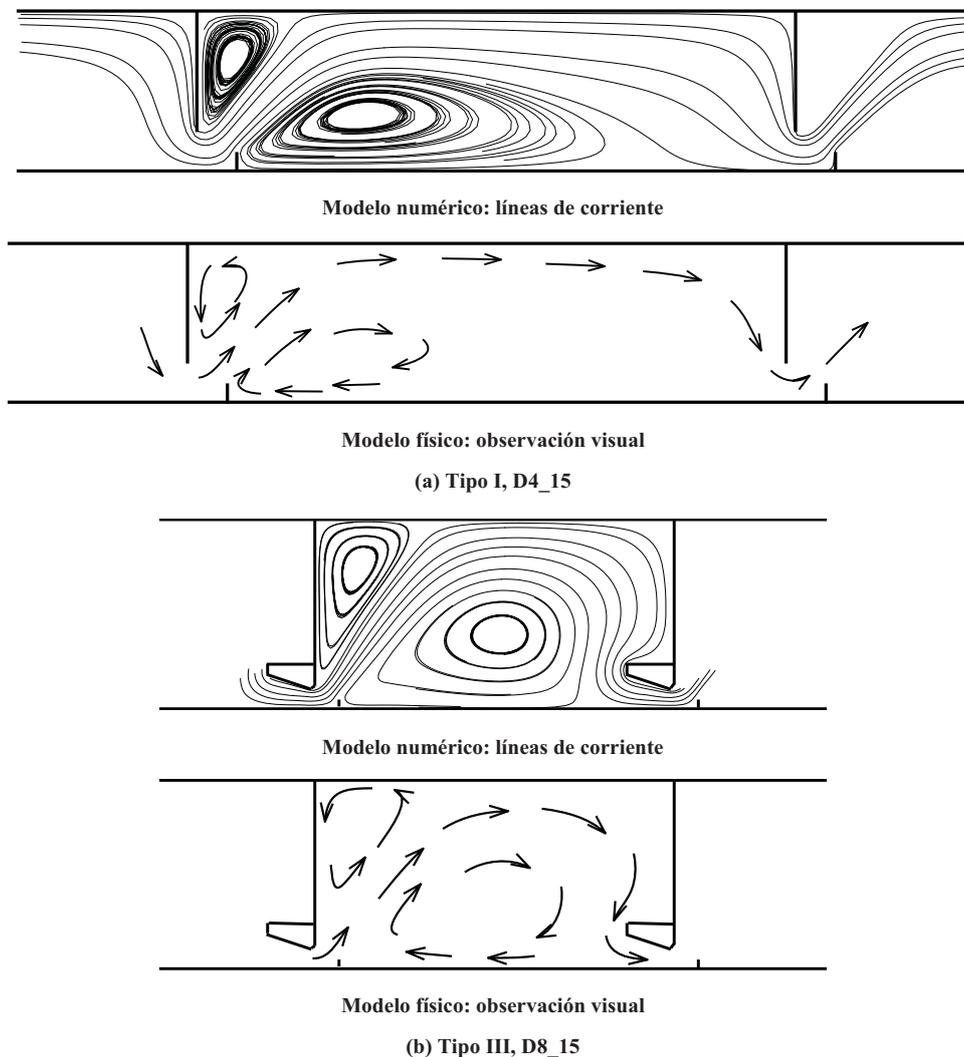


Figura 76 Representación esquemática del patrón de flujo 2 (FP2) a partir de observación visual y líneas de corriente numéricas en dos de los diseños estudiados.

De acuerdo con la Tabla 10, el primer patrón se observa en los diseños tipo I, II y III en los que la relación entre la longitud y la anchura de piscina L/B es menor a 1.3. Esto se observa tanto en las simulaciones numéricas (con pendientes del 5% y 10% en el caso de los diseños tipo I, y del 5% en los restantes tipos) como en los experimentos de laboratorio. El segundo patrón se corresponde con los diseños donde L/B es mayor a 1.8. Por tanto, de acuerdo con los modelos numéricos y físicos, la transición entre los dos patrones en estos tres diseños tipo se produce en el rango (1.3, 1.8) del cociente L/B para las pendientes analizadas.

Tabla 10 Patrones de flujo (FP) en los 33 diseños estudiados. L/B y L/B' son los cocientes entre la longitud y la anchura de las piscinas, siendo B la anchura total y B' la anchura desde el extremo del deflector lateral pequeño.

	Diseño	FP	L/B	L/B'
Tipo I	D2_2.5	FP1	1.25	1.67
	D2_5	FP2	2.5	3.33
	D2_10	FP2	5	6.67
	D2_15	FP2	7.5	10
	D2.67_2.5	FP1	0.94	1.15
	D2.67_5	FP2	1.88	2.31
	D2.67_10	FP2	3.75	4.62
	D2.67_15	FP2	5.63	6.92
	D4_2.5	FP1	0.63	0.71
	D4_5	FP1	1.25	1.43
	D4_10	FP2	2.5	2.86
	D4_15	FP2	3.75	4.29
	D8_2.5	FP1	0.31	0.33
	D8_5	FP1	0.63	0.67
	D8_10	FP1	1.25	1.33
D8_15	FP2	1.88	2	
Tipo II	D4_5	FP1	1.25	1.43
	D4_10	FP2	2.5	2.86
	D4_15	FP2	3.75	4.29
	D8_5	FP1	0.63	0.67
	D8_10	FP1	1.25	1.33
	D8_15	FP2	1.88	2
	Tipo III	D4_5	FP1	1.25
D4_10		FP2	2.5	2.86
D4_15		FP2	3.75	4.29
D8_5		FP1	0.63	0.67
D8_10		FP1	1.25	1.33
D8_15		FP2	1.88	2
Tipo IV	D4_5	FP1/FP2	1.25	1.89
	D4_10	FP2	2.5	3.79
	D6.25_7.58	FP1	1.21	1.55
	D8_5	FP1	0.63	0.75
	D8_10	FP1	1.25	1.51

En el caso de los diseños tipo IV, cabe señalar como para un mismo cociente L/B se pueden observar patrones de flujo diferentes dependiendo del diseño. Así, para un cociente L/B de 1.25 se obtiene mediante modelización numérica un patrón FP1 en el diseño D8_10, mientras que en el diseño D4_5 se produce un patrón intermedio entre el FP1 y FP2 (Figura 77). Esto sugiere que la relación L/B puede no ser adecuada para representar la transición entre los distintos patrones de flujo en este caso. Además, este cociente no permite comparar adecuadamente los diseños tipo I, II y III con los diseños tipo IV, puesto que la mayor longitud del deflector lateral pequeño en este

último tipo ($1.36b$ frente a $0.5b$), desplaza el flujo principal hacia el centro de la piscina y reduce la zona de recirculación que se forma en su parte izquierda.

Por todo ello, se ha definido el parámetro L/B' , siendo B' la anchura de piscina desde el extremo del deflector lateral pequeño (Figura 78), con el que se pretende aglutinar los resultados de los cuatro tipos de diseños. Con este parámetro L/B' , la transición entre los dos patrones para los cuatro diseños tipo se produce en el rango (1.7, 2.0), de acuerdo con la Tabla 10. Dado que autores como Wu et al. (1999) o Pena (2004) han constatado en algunos diseños variaciones de los patrones de flujo con la pendiente, estos resultados deben ser tomados con cautela para pendientes superiores a las analizadas ($>10\%$).

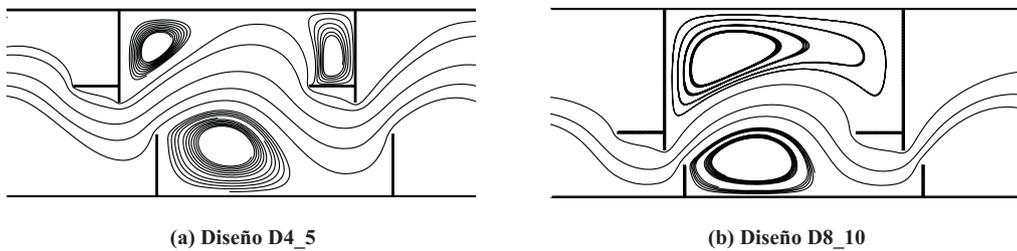


Figura 77 Líneas de corriente numéricas en dos diseños tipo IV con igual cociente L/B .

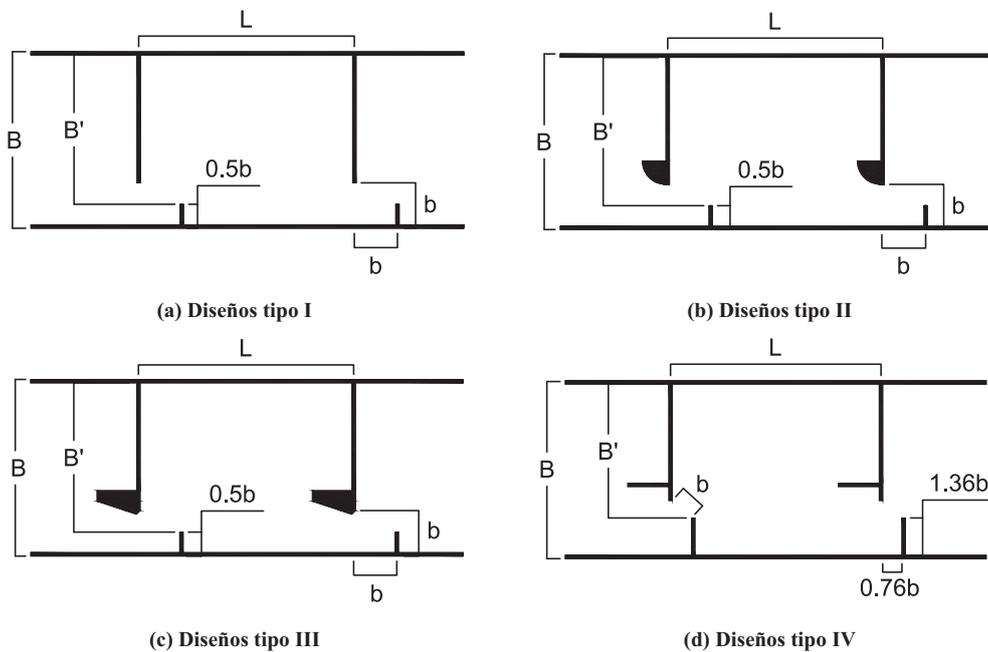


Figura 78 Definición de la dimensión geométrica B' en los diferentes diseños tipo de piscina.

A falta de estudios biológicos en los que se establezcan claramente las preferencias de las distintas especies, parece razonable evitar tanto las relaciones L/B y L/B' menores como las relaciones L/B y L/B' mayores (Figura 79). En el primer caso, los diseños se caracterizan por un patrón de flujo tipo FP1, cuya zona de recirculación de mayor tamaño está situada a la izquierda del flujo principal. Para las relaciones L/B' y L/B menores (que se corresponden con los diseños D8_2.5, D8_5 y D4_2.5, con $L/B' < 0.75$ y $L/B < 0.63$), esta zona de recirculación presenta una forma muy alargada, ya que la longitud de piscina es muy pequeña respecto a la longitud del deflector lateral de mayor tamaño. En principio, esto no supone una mejora de las condiciones para el remonte de los peces, pero sí un incremento del coste de la escala. Por ello, parece más aconsejable aumentar la longitud de piscina (pasando así de un diseño D4_2.5 a un diseño D4_5 y de un diseño D8_2.5 ó D8_5 a un diseño D8_10), manteniendo el mismo patrón de flujo tipo.

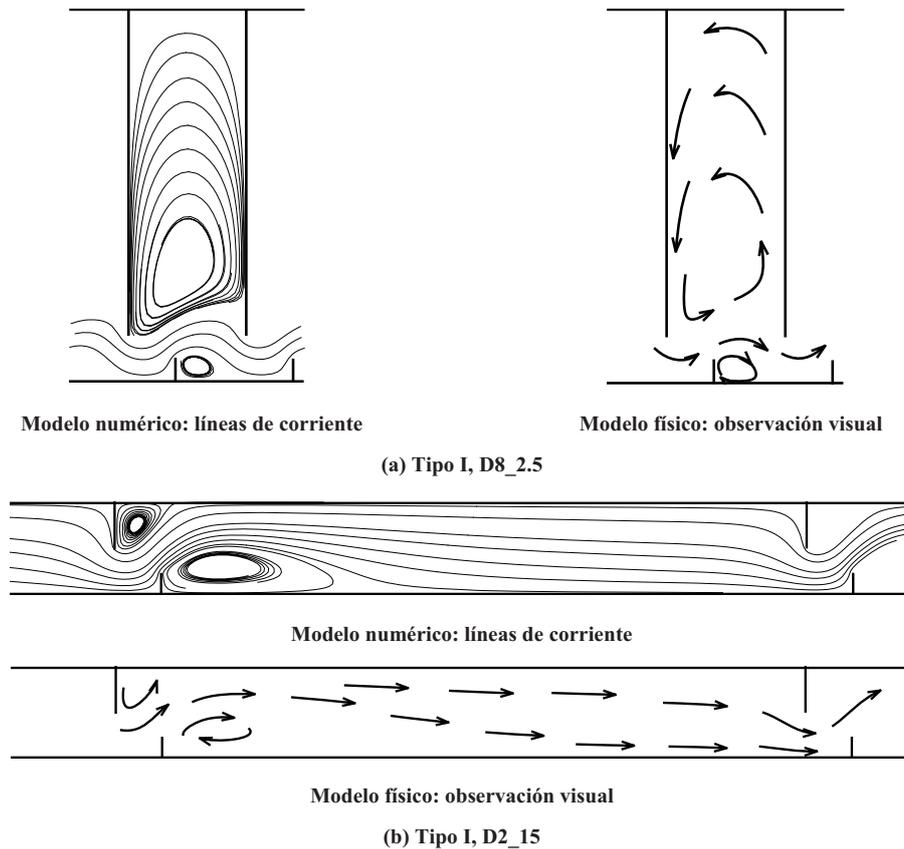


Figura 79 Representación esquemática del patrón de flujo a partir de observación visual y líneas de corriente numéricas en un diseño con unas relaciones L/B y L/B' muy bajas (arriba) y en un diseño con unas relaciones L/B y L/B' muy elevadas (abajo).

En el segundo caso, los diseños presentan un patrón de flujo tipo FP2, cuya zona de recirculación de mayor tamaño está ubicada a derecha del flujo principal. Para las relaciones L/B' y L/B mayores (que se corresponden con los diseños D2_15, D2_10 y D2.67_15, con $L/B' > 6.67$ y $L/B > 5$) esta zona de recirculación se ubica únicamente en la parte de aguas arriba de la piscina. Así, en la mitad de aguas abajo de cada piscina, la escala es prácticamente asimilable a un canal. Por ello, se estima que las zonas de descanso podrían ser insuficientes para el pez, y se considera más conveniente disminuir la longitud de piscina (pasando así de un diseño D2_15 ó D2_10 a un diseño D2_5 y de un diseño D2.67_15 a un diseño D2.67_10), manteniendo el mismo patrón de flujo tipo.

5.2.2 Velocidad media en la hendidura

Uno de los factores críticos que determinan la eficiencia de un diseño de escala de hendidura vertical es la velocidad en la hendidura, región en la que las velocidades del agua alcanzan sus valores máximos. Desde el punto de vista del pez, la sección de la hendidura es ineludible para su ascenso y supone un esfuerzo máximo. De ahí el interés en evaluar las velocidades que se desarrollan en la hendidura con los distintos diseños y en compararlas con la capacidad natatoria de las especies objetivo.

Se puede definir una velocidad media en la hendidura (v_s) a partir del calado medio en la misma (h_s) aplicando la ecuación de continuidad:

$$v_s = \frac{Q}{h_s \cdot b'} \quad (5.1)$$

donde b' es la anchura de hendidura definida según se indica en la Figura 80, es decir, es la distancia entre los extremos de los deflectores transversales principal y secundario. Con esta definición se obtiene una velocidad media representativa de la zona de la hendidura.

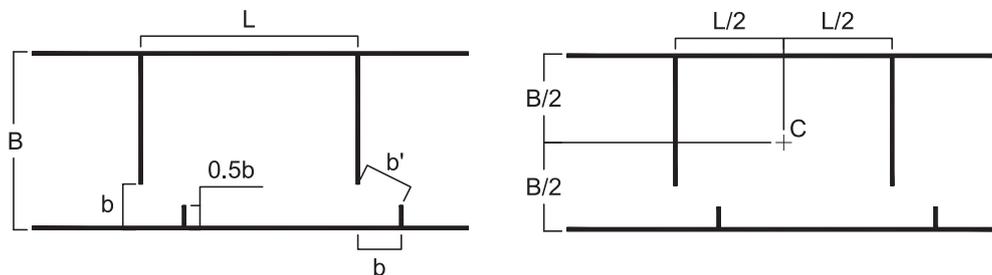


Figura 80 Definición de la dimensión geométrica b' (izquierda) y del punto C de medida del calado en el centro de piscina en los ensayos experimentales (derecha).

Los resultados numéricos muestran que el calado medio en la hendidura (h_s) está linealmente relacionado con el calado en el centro de la piscina situada aguas arriba (h_c), siguiendo la relación $h_s=0.96h_c$ para los diseños tipo I y tipo III, y $h_s=0.98h_c$ para los diseños tipo II y tipo IV, con $S=5\%$ (Figura 81). Estas relaciones han sido utilizadas en los resultados experimentales para evaluar el calado en la hendidura, ya que el calado se mide únicamente en el centro de la piscina (Figura 80).

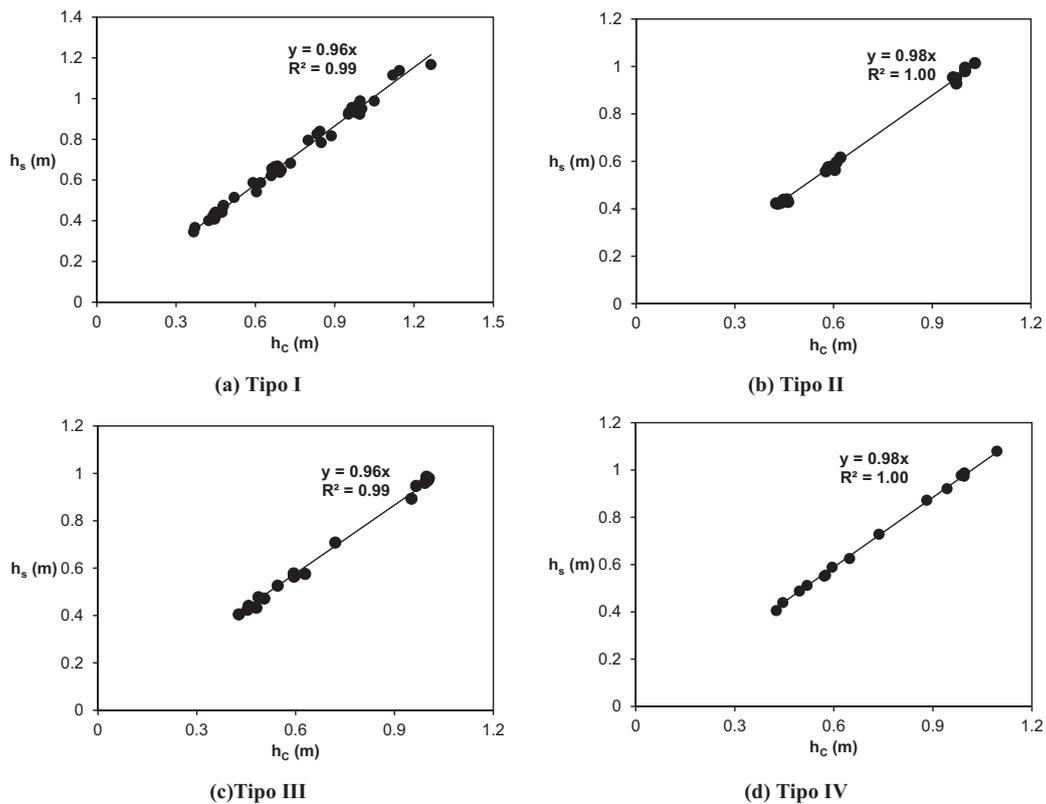


Figura 81 Relación entre el calado en el centro de la piscina (h_c) y el calado medio en la siguiente hendidura aguas abajo (h_s) para los cuatro tipos de diseño. Resultados numéricos para $S=5\%$.

Las dimensiones de las piscinas en el modelo numérico mantienen las mismas relaciones geométricas B/b y L/b que en el modelo físico, pero las dimensiones en el modelo físico se han reducido a escala 1:0.3. Para poder comparar las velocidades numéricas y experimentales en la hendidura, se escala la velocidad experimental de la siguiente forma:

$$v_s^* = v_s \sqrt{\lambda_L} = v_s \sqrt{\frac{1}{0.3}} \quad (5.2)$$

donde v_s^* es la velocidad escalada experimental en la hendidura aplicando la ley de semejanza de

Froude y λ_L es la escala de longitudes, que en este caso toma el valor de 1/0.3.

La pérdida de carga ΔE en la hendidura de una escala de peces de hendidura vertical es proporcional a $v^2/2g$, dado que el flujo es altamente turbulento. En consecuencia, la velocidad en cada hendidura puede expresarse también como una función de la pérdida de carga entre piscinas, ΔE , como $\sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta E}$. Dado que se considera un flujo uniforme en la escala, la pérdida de carga se puede aproximar al salto entre piscinas ($\Delta E = \Delta H$), y el salto entre piscinas ΔH es proporcional a la longitud de piscina L y a la pendiente de la escala S ($\Delta H = S \cdot L$). En la Figura 82 se puede observar como para condiciones de flujo uniforme la lámina en cada piscina es prácticamente horizontal y como el salto entre piscinas coincide con la variación de la cota del fondo. Así, la velocidad en la hendidura viene dada por:

$$v_s = C_{vs} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta E} = C_{vs} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta H} = C_{vs} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot S \cdot L} \quad (5.3)$$

donde C_{vs} es un coeficiente que depende de la geometría de la piscina.

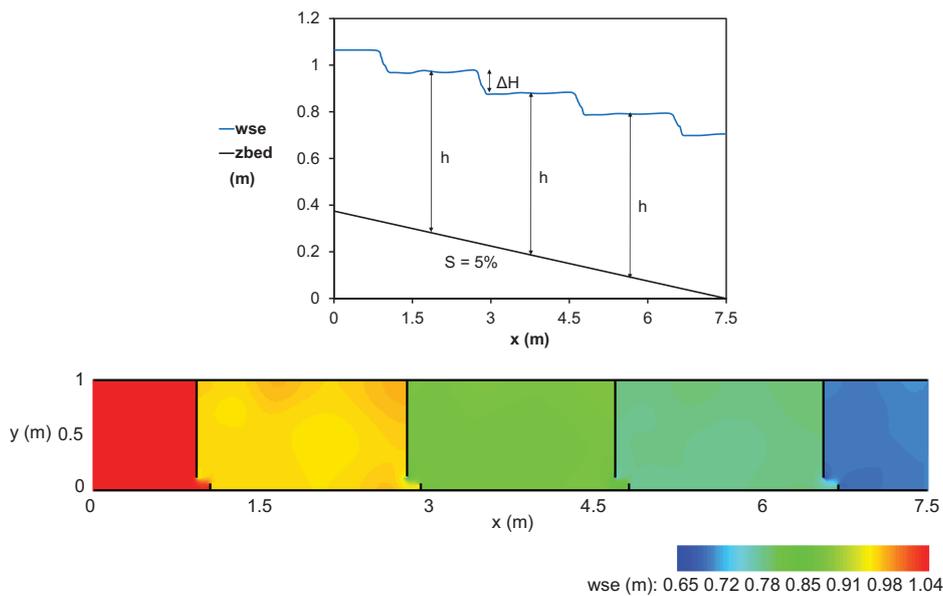


Figura 82 Altura de la lámina de agua (wse) siguiendo una línea de corriente (arriba) y campo de altura de lámina (abajo) en el diseño D8_15 (tipo I) con pendiente $S=5\%$, x = dirección longitudinal de la escala.

En la Tabla 11 y la Figura 83 se muestran las velocidades medias en la hendidura obtenidas a partir de los resultados numéricos y experimentales en los distintos diseños usando la Ecuación 5.1 y Ecuación 5.2. A medida que aumenta la longitud de la piscina sin que varíen el resto de dimensiones, se observan mayores velocidades en la hendidura en todos los tipos de diseño. Aunque la diferencia relativa entre las velocidades en la hendidura numéricas y experimentales

es elevada en algunos diseños, esta influencia de la longitud de piscina se observa claramente en ambos modelos.

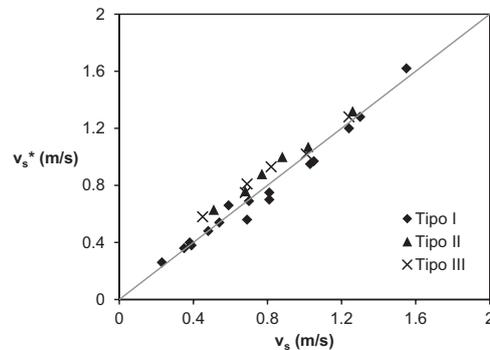


Figura 83 Distribución sobre la recta 1:1 de la velocidad media en la hendidura calculada con el modelo numérico v_s (m/s) frente a la velocidad escalada experimental en la hendidura v_s^* (m/s).

También en la Tabla 11 se muestra el valor del coeficiente C_{vs} para cada diseño. De acuerdo con dicha tabla, el coeficiente C_{vs} de los diseños tipo I aumenta ligeramente con el parámetro L/b , mientras que no se observa una tendencia clara para el parámetro B/b . Si se comparan entre sí diseños con distinto B/b e igual L/b , se observa como un aumento de este parámetro B/b puede estar asociado tanto a una disminución como a un aumento muy ligeros del coeficiente C_{vs} . En cambio, a medida que aumenta la relación L/b para un mismo B/b , la tendencia es al incremento del coeficiente C_{vs} (Figura 84 y Figura 85).

Estos resultados sugieren que los coeficientes C_{vs} en el diseño tipo I se pueden definir en función del parámetro L/b . En la Figura 86 se muestra el ajuste entre los valores del coeficiente C_{vs} y una línea de tendencia polinómica de orden 2, tanto para los resultados numéricos como para los experimentales. Las diferencias entre las líneas de tendencia numérica y experimental son muy bajas (el error cuadrático medio es de 0.018, el cual es un valor significativamente menor al valor medio del coeficiente C_{vs}), por lo que se puede afirmar que tanto los resultados numéricos como los experimentales siguen aproximadamente una misma línea de tendencia. La dispersión de los valores de los coeficientes con respecto a la línea de tendencia es más baja para los resultados numéricos que para los experimentales ($R^2=0.87$ frente a $R^2=0.57$), lo que puede estar asociado con las limitaciones de los ensayos experimentales (reducido número de piscinas ensayado en algunos diseños; reducido tamaño del dispositivo experimental y, por tanto, incremento del error relativo; etc.). Por ello, se muestran en lo que sigue únicamente los resultados del modelo numérico.

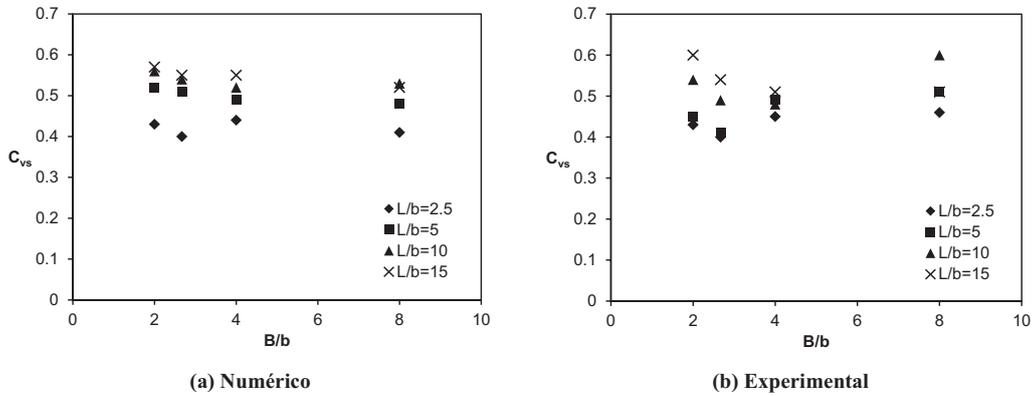


Figura 84 Variación del coeficiente C_{vs} en los diseños tipo I con B/b .

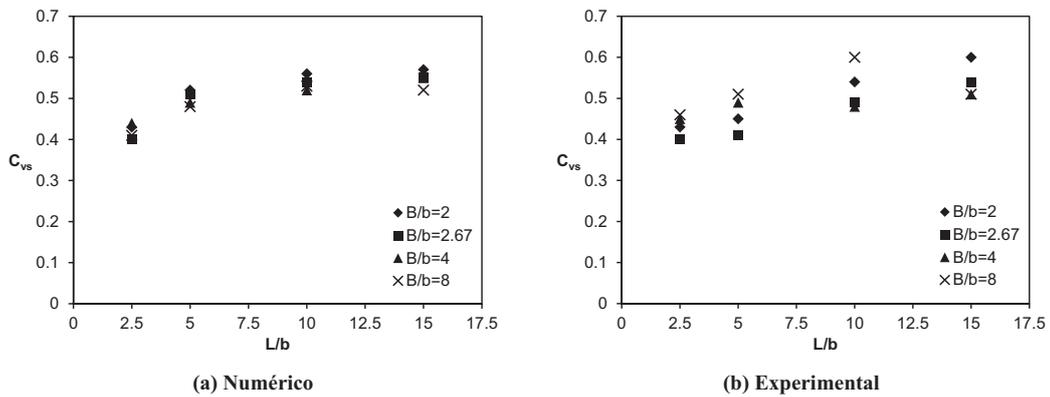


Figura 85 Variación del coeficiente C_{vs} en los diseños tipo I con L/b .

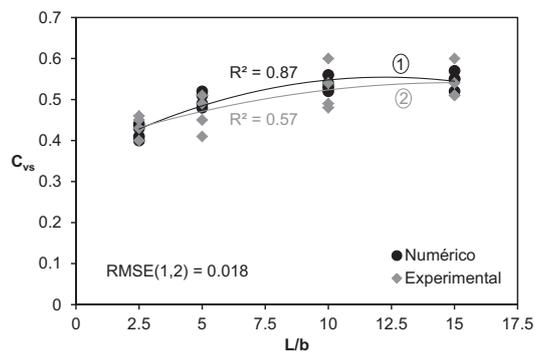


Figura 86 Variación del coeficiente C_{vs} en los diseños tipo I con L/b . Línea de tendencia numérica y experimental. RMSE: error cuadrático medio (Root Mean Squared Error).

Tabla 11 Velocidad media en la hendidura calculada con el modelo numérico v_s (m/s), velocidad escalada experimental en la hendidura v_s^* (m/s) y coeficiente C_{vs} para los distintos diseños con pendiente $S=5\%$. Nota: los valores de velocidades indicados son la media de los resultados para los 3 caudales ensayados o simulados.

Tipo	Diseño	L/b	B/b	v_s^*	v_s (m/s)	C_{vs} experimental	C_{vs} numérico
I	D2_2.5	2.5	2	0.48	0.48	0.43	0.43
	D2_5	5	2	0.70	0.81	0.45	0.52
	D2_10	10	2	1.20	1.24	0.54	0.56
	D2_15	15	2	1.62	1.55	0.60	0.57
	D2.67_2.5	2.5	2.67	0.38	0.39	0.40	0.40
	D2.67_5	5	2.67	0.56	0.69	0.41	0.51
	D2.67_10	10	2.67	0.95	1.03	0.49	0.54
	D2.67_15	15	2.67	1.28	1.30	0.54	0.55
	D4_2.5	2.5	4	0.36	0.35	0.45	0.44
	D4_5	5	4	0.54	0.54	0.49	0.49
	D4_10	10	4	0.75	0.81	0.48	0.52
	D4_15	15	4	0.97	1.05	0.51	0.55
	D8_2.5	2.5	8	0.26	0.23	0.46	0.41
	D8_5	5	8	0.40	0.38	0.51	0.48
	D8_10	10	8	0.66	0.59	0.60	0.53
	D8_15	15	8	0.69	0.70	0.51	0.52
II	D4_5	5	4	0.76	0.68	0.69	0.62
	D4_10	10	4	1.07	1.02	0.68	0.65
	D4_15	15	4	1.32	1.26	0.69	0.66
	D8_5	5	8	0.63	0.51	0.80	0.65
	D8_10	10	8	0.88	0.77	0.80	0.70
	D8_15	15	8	1.00	0.88	0.74	0.65
III	D4_5	5	4	0.75	0.68	0.68	0.62
	D4_10	10	4	1.02	1.01	0.65	0.65
	D4_15	15	4	1.28	1.24	0.67	0.65
	D8_5	5	8	0.58	0.45	0.74	0.57
	D8_10	10	8	0.81	0.69	0.73	0.63
	D8_15	15	8	0.93	0.82	0.68	0.61
IV	D4_5	5	4	-	0.82	-	0.74
	D4_10	10	4	-	1.25	-	0.80
	D6.25_7.58	7.58	6.25	-	0.84	-	0.77
	D8_5	5	8	-	0.49	-	0.63
	D8_10	10	8	-	0.88	-	0.79

En base a lo expuesto, se considera que los 16 diseños tipo I pueden definirse mediante únicamente 4 valores del coeficiente C_{vs} , dependiendo de la longitud de las piscinas L (Figura 87 y Tabla 12). En este caso, cada coeficiente C_{vs} se obtiene por interpolación lineal de 12 puntos de datos (cada coeficiente describe 4 diseños y se prueban 3 caudales para cada diseño). Dentro del rango usual de la ratio L/b , aproximadamente entre 7.5 y 12, el coeficiente C_{vs} se puede considerar prácticamente constante, con un valor de 0.54 (Figura 87).

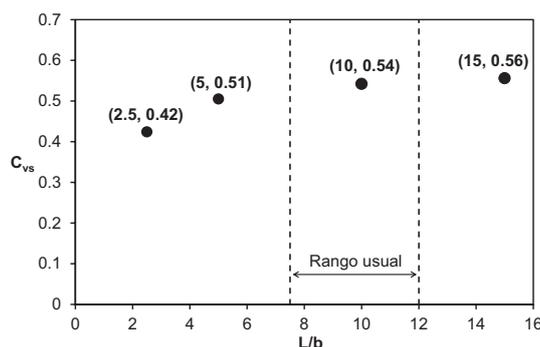


Figura 87 Variación del coeficiente C_{vs} en los diseños tipo I con L/b . Las líneas discontinuas delimitan el rango habitual del parámetro L/b .

Tabla 12 Valores del coeficiente C_{vs} para los diseños tipo I considerando únicamente 4 valores para los 16 diseños.

	Longitud L			
	2.5b	5b	10b	15b
Coefficiente C_{vs}	0.42	0.51	0.54	0.56

En el caso de los diseños tipo II y III el estudio abarca un rango de variación de las ratios B/b y L/b más reducido que en el caso de los diseños tipo I. Dentro de esos rangos, la variación del coeficiente C_{vs} es inferior al 12.9% en los diseños tipo II e inferior al 14.0% en los tipo III (resultados numéricos), sin seguir una tendencia clara. En consecuencia, se considera una relación lineal entre la velocidad en la hendidura y $\sqrt{S \cdot L}$, con un coeficiente $C_{vs} = \text{constante}$ para cada tipo de diseño (Figura 88). Se obtiene así un coeficiente $C_{vs} = 0.65$ para los diseños tipo II y $C_{vs} = 0.63$ para los diseños tipo III. Cada coeficiente se obtiene por interpolación lineal de 18 resultados, ya que cada coeficiente describe 6 diseños y se ensayan o simulan 3 caudales por diseño.

Por último, en el caso de los diseños tipo IV, se opta igualmente por definir un coeficiente C_{vs} constante para todos los diseños. A excepción del diseño D8_5, fuera del rango de las dimensiones habituales para este tipo de diseños (presenta una relación $L/B = 0.63$), las

variaciones en los valores del coeficiente C_{vs} son inferiores al 8.1%. Con esta aproximación se obtiene un coeficiente $C_{vs}=0.78$ (Figura 88).

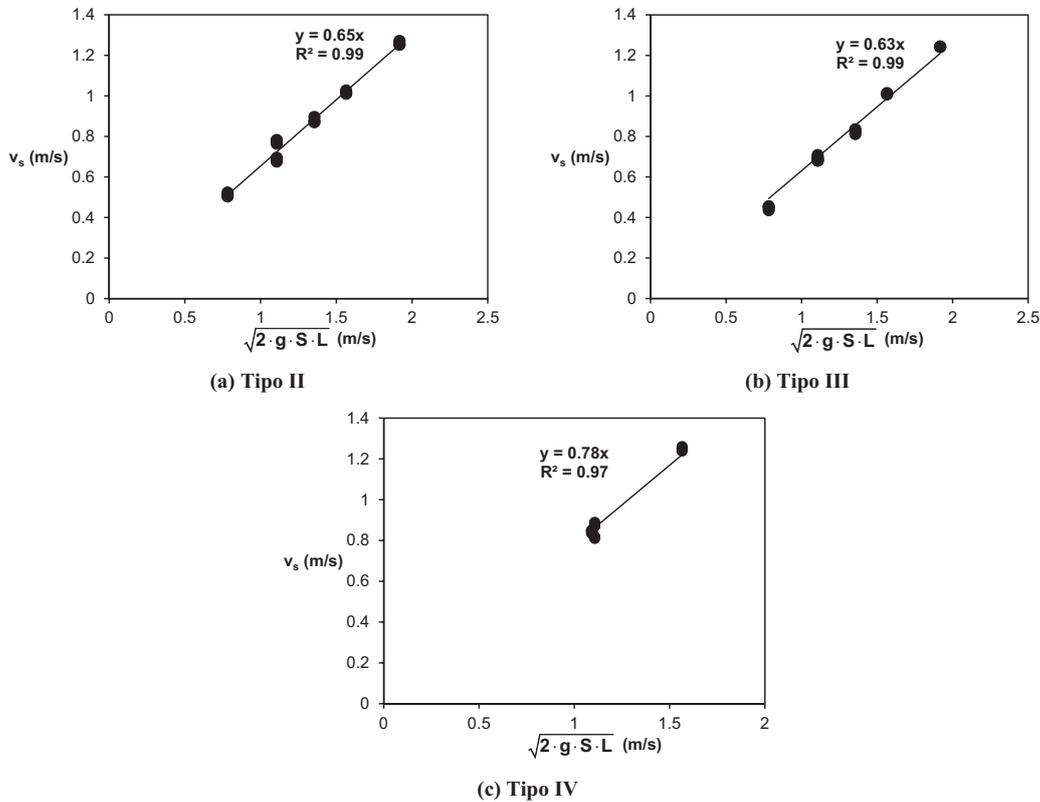


Figura 88 Variación de la velocidad media en la hendidura v_s con $\sqrt{2 \cdot g \cdot S \cdot L}$ para los 6 diseños tipo II, los 6 diseños tipo III y los 5 diseños tipo IV.

En consecuencia, para una primera estimación de las velocidades medias en la hendidura en un diseño cuyas dimensiones geométricas se encuentran dentro de los rangos habituales, parece suficiente considerar un valor del coeficiente C_{vs} constante para cada tipo de diseño. De esta forma, los valores de C_{vs} obtenidos a partir de modelo numérico son de 0.54 para los diseños tipo I, de 0.65 para los tipo II, 0.63 para los tipo III y 0.78 para los tipo IV (Tabla 13).

Así, los mayores valores del coeficiente C_{vs} se corresponden con los diseños tipo IV, seguidos de los diseños tipo II y III. Las diferencias en el coeficiente C_{vs} entre los diseños tipo II, III son poco significativas y, por tanto, para una misma pendiente S y longitud de piscina L , muestran velocidades medias en la hendidura similares. En comparación con los diseños tipo I, los valores del coeficiente C_{vs} son mayores. En consecuencia, estos diseños presentan mayores velocidades medias en la hendidura v_s para una misma pendiente S y longitud de piscina L (Ecuación 5.3).

Esto supone que, para una misma especie y talla objetivo, los diseños tipo II, III y IV permiten menores longitudes de piscina o menores pendientes de la escala. Es decir, para cumplir con un determinado valor límite de v_s , el producto $S \times L$ en estos diseños debe ser menor que en los diseños tipo I.

Tabla 13 Valores del coeficiente C_{vs} sugeridos en una primera aproximación para diseños cuyas dimensiones se encuentran dentro de los rangos habituales.

	Diseño tipo			
	I	II	III	IV
Coeficiente C_{vs}	0.54	0.65	0.63	0.78

5.2.3 Curvas de descarga

El conocimiento del calado que presenta un diseño de escala con un determinado caudal circulante tiene una gran importancia. Por una parte, los peces necesitan un calado mínimo para poder desarrollar su potencial de natación (Dane, 1978). La sumersión total elimina el riesgo de falta de oxígeno para el pez, le permite un máximo avance y disminuye el riesgo de lesión por contacto con el fondo de la escala. Por otra parte, el caudal en la entrada de la escala debe ser lo suficientemente relevante (en comparación con el resto de caudales vertidos por la obra que se pretende superar) como para producir un campo de velocidades detectable y atrayente para los migradores.

Se ha evaluado el coeficiente de descarga C_d que relaciona el caudal adimensionalizado, tal y como definen Rajaratnam et al. (1992), con el calado relativo en el centro de la piscina h_c/b , de la forma:

$$\frac{Q}{\sqrt{g \cdot S \cdot b^5}} = C_d \cdot \frac{h_c}{b} \quad (5.4)$$

Este coeficiente C_d ha sido tradicionalmente empleado para describir el funcionamiento de este tipo de estructuras. Un mayor valor del coeficiente C_d implica que para el mismo caudal los calados alcanzados son menores y, por tanto, las velocidades y la capacidad de desagüe son mayores. Por el contrario, valores bajos del coeficiente de desagüe significan menores eficiencias de desagüe y una mayor sensibilidad de la escala frente a las variaciones de caudal (las variaciones de caudal entrante producen variaciones del calado más significativas).

Por otra parte, considerando la Ecuación 5.1 y la Ecuación 5.3, el caudal también puede

expresarse como una función de la longitud de la piscina L , la pendiente S , la anchura de hendidura b y el calado en el centro de piscina h_c , según:

$$Q = C_{vs} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot S \cdot L} \cdot b' \cdot h_s = C_q \cdot \sqrt{g \cdot S \cdot L} \cdot b \cdot h_c \quad (5.5)$$

donde $C_q = C_{vs} \cdot \sqrt{2} \cdot b' \cdot h_s / (b \cdot h_c)$ es un nuevo coeficiente de descarga. De esta forma, el coeficiente C_q es el producto del coeficiente C_{vs} por una constante en cada tipo de diseño, puesto que las relaciones b'/b y h_s/h_c no varían dentro de cada tipo (Figura 81). En la sección 5.2.2 se muestra como es posible considerar, en una primera aproximación y para los rangos de dimensiones geométricas habituales, un valor constante de C_{vs} para cada tipo de diseño. En consecuencia, con un único valor del coeficiente C_q para cada tipo de diseño es posible realizar una primera estimación de la relación entre caudales y calados en un diseño específico.

En esta sección se examinan ambos coeficientes de descarga en todos los diseños estudiados. Los valores obtenidos para cada diseño se muestran en la Tabla 14. Cada coeficiente se calcula considerando los tres caudales simulados (Tabla 15, Tabla 16 y Tabla 17) o ensayados (Tabla 18 y Tabla 19). Además, en el caso de los diseños tipo I se han utilizado resultados con dos pendientes diferentes, del 5% y el 10%.

Las diferencias entre los coeficientes obtenidos numérica y experimentalmente son en general bajas (inferiores al 10% en más del 70% de los diseños). Además de comparar entre sí los coeficientes de descarga numéricos y experimentales obtenidos (Tabla 14), se han recopilado resultados experimentales de otros autores en estos mismos diseños. Como se ha señalado anteriormente, los diseños D2_15, D2.67_5, D4_5, D4_15, D8_5, D8_10 y D8_15 tipo I han sido previamente estudiados experimentalmente por Rajaratnam et al. (1992) con pendientes del 5.7%, 10% y 15%. La comparación entre los valores experimentales y numéricos del coeficiente de descarga C_d se muestra en la Tabla 20. Las mayores diferencias aparecen en el diseño D2_15, probablemente porque es el diseño con un mayor salto entre piscinas ($\Delta H = SL$) y, por tanto, los efectos tridimensionales cerca de la hendidura se vuelven más importantes. En todo caso, no es un diseño de utilidad práctica, debido al elevado valor de la ratio entre la longitud de piscina y la anchura de piscina ($L/B=7.5$), como ya se ha puesto de manifiesto en el apartado 5.2.1. Por otra parte, Pena (2004) estudia experimentalmente el diseño D6.25_7.58 tipo IV con dos pendientes: 5.7% y 10%. A partir de sus resultados experimentales se pueden calcular los coeficientes de descarga definidos anteriormente, que toman los siguientes valores: $C_d=2.72$ y $C_q=0.99$. Esto supone una diferencia relativa con los resultados numéricos de este estudio del 7.0% para los coeficientes de descarga.

Tabla 14 Coeficientes de descarga numéricos y experimentales C_d y C_q para los distintos diseños. Nota: los resultados numéricos para los diseños tipo I incluyen la pendiente tanto del 5% como del 10%, d_r =diferencia relativa.

Tipo	Diseño	Coeficiente C_d		Coeficiente C_q		d_r (%)
		Numérico	Experimental	Numérico	Experimental	
I	D2_2.5	1.07	1.02	0.68	0.65	4.5
	D2_5	1.71	1.49	0.77	0.67	14.6
	D2_10	2.68	2.58	0.85	0.82	3.7
	D2_15	3.25	3.49	0.84	0.90	7.0
	D2.67_2.5	1.02	0.96	0.65	0.61	5.8
	D2.67_5	1.64	1.39	0.73	0.62	17.5
	D2.67_10	2.55	2.38	0.81	0.75	7.2
	D2.67_15	3.16	3.21	0.82	0.83	1.4
	D4_2.5	1.08	1.11	0.68	0.70	2.9
	D4_5	1.69	1.66	0.76	0.74	2.1
	D4_10	2.50	2.31	0.79	0.73	8.3
	D4_15	3.14	2.96	0.81	0.76	6.2
	D8_2.5	1.02	1.12	0.65	0.71	8.9
	D8_5	1.73	1.77	0.78	0.79	2.0
	D8_10	2.68	2.89	0.85	0.91	6.8
	D8_15	3.12	3.00	0.81	0.77	4.6
II	D4_5	2.14	2.38	0.96	1.06	9.8
	D4_10	3.16	3.33	1.00	1.05	5.1
	D4_15	3.79	4.12	0.98	1.06	8.0
	D8_5	2.28	2.78	1.02	1.25	18.0
	D8_10	3.44	3.90	1.09	1.23	11.9
	D8_15	3.87	4.43	1.00	1.14	12.8
III	D4_5	2.12	2.29	0.95	1.02	7.2
	D4_10	3.08	3.13	0.98	0.99	1.5
	D4_15	3.67	3.93	0.95	1.01	6.5
	D8_5	1.97	2.52	0.88	1.13	21.8
	D8_10	3.03	3.51	0.96	1.11	13.6
	D8_15	3.54	4.01	0.91	1.03	11.6
IV	D4_5	2.30	-	1.03	-	-
	D4_10	3.53	-	1.12	-	-
	D6.25_7.58	2.92	-	1.06	-	-
	D8_5	1.97	-	0.88	-	-
	D8_10	3.42	-	1.08	-	-

Tabla 15 Caudal de entrada Q (l/s) y calado en el centro de las piscinas h_c (m) en cada simulación numérica para los diseños tipo I, pendiente S=5%.

		Longitud L			
		2.5b	5b	10b	15b
Ancho B	2b	Q ₁ =120 / h _{C1} =0.45 Q ₂ =175 / h _{C2} =0.66 Q ₃ =265 / h _{C3} =1.00	Q ₁ =200 / h _{C1} =0.47 Q ₂ =310 / h _{C2} =0.73 Q ₃ =450 / h _{C3} =1.05	Q ₁ =295 / h _{C1} =0.45 Q ₂ =435 / h _{C2} =0.66 Q ₃ =660 / h _{C3} =1.00	Q ₁ =500 / h _{C1} =0.62 Q ₂ =715 / h _{C2} =0.89 Q ₃ =1025/h _{C3} =1.26
	2.67b	Q ₁ =60 / h _{C1} =0.37 Q ₂ =95 / h _{C2} =0.59 Q ₃ =135 / h _{C3} =0.84	Q ₁ =100 / h _{C1} =0.37 Q ₂ =155 / h _{C2} =0.60 Q ₃ =225 / h _{C3} =0.85	Q ₁ =180 / h _{C1} =0.44 Q ₂ =280 / h _{C2} =0.69 Q ₃ =405 / h _{C3} =0.99	Q ₁ =225 / h _{C1} =0.44 Q ₂ =350 / h _{C2} =0.69 Q ₃ =505 / h _{C3} =1.00
	4b	Q ₁ =50 / h _{C1} =0.52 Q ₂ =80 / h _{C2} =0.83 Q ₃ =110 / h _{C3} =1.15	Q ₁ =65 / h _{C1} =0.44 Q ₂ =100 / h _{C2} =0.68 Q ₃ =145 / h _{C3} =0.99	Q ₁ =95 / h _{C1} =0.45 Q ₂ =145 / h _{C2} =0.67 Q ₃ =210 / h _{C3} =0.95	Q ₁ =120 / h _{C1} =0.45 Q ₂ =190 / h _{C2} =0.70 Q ₃ =270 / h _{C3} =0.98
	8b	Q ₁ =15 / h _{C1} =0.48 Q ₂ =25 / h _{C2} =0.80 Q ₃ =35 / h _{C3} =1.12	Q ₁ =25 / h _{C1} =0.48 Q ₂ =35 / h _{C2} =0.67 Q ₃ =50 / h _{C3} =0.97	Q ₁ =35 / h _{C1} =0.45 Q ₂ =55 / h _{C2} =0.68 Q ₃ =80 / h _{C3} =0.97	Q ₁ =40 / h _{C1} =0.42 Q ₂ =65 / h _{C2} =0.69 Q ₃ =90 / h _{C3} =0.95

Tabla 16 Caudal de entrada Q (l/s) y calado en el centro de las piscinas h_c (m) en cada simulación numérica para los diseños tipo I, pendiente S=10%.

		Longitud L			
		2.5b	5b	10b	15b
Ancho B	2b	Q ₁ =170 / h _{C1} =0.45 Q ₂ =230 / h _{C2} =0.61 Q ₃ =370 / h _{C3} =1.00	Q ₁ =270 / h _{C1} =0.44 Q ₂ =350 / h _{C2} =0.58 Q ₃ =550 / h _{C3} =0.93	Q ₁ =610 / h _{C1} =0.63 Q ₂ =800 / h _{C2} =0.85 Q ₃ =1000/ h _{C3} =1.07	Q ₁ =1400 / h _{C1} =1.23 Q ₂ =1700 / h _{C2} =1.50 Q ₃ =1900 / h _{C3} =1.67
	2.67b	Q ₁ =105 / h _{C1} =0.46 Q ₂ =150 / h _{C2} =0.64 Q ₃ =230 / h _{C3} =0.98	Q ₁ =170 / h _{C1} =0.44 Q ₂ =220 / h _{C2} =0.58 Q ₃ =380 / h _{C3} =1.02	Q ₁ =260 / h _{C1} =0.43 Q ₂ =330 / h _{C2} =0.56 Q ₃ =560 / h _{C3} =0.97	Q ₁ =600 / h _{C1} =0.82 Q ₂ =800 / h _{C2} =1.11 Q ₃ =1000 / h _{C3} =1.40
	4b	Q ₁ =60 / h _{C1} =0.46 Q ₂ =85 / h _{C2} =0.65 Q ₃ =125 / h _{C3} =0.95	Q ₁ =95 / h _{C1} =0.46 Q ₂ =135 / h _{C2} =0.63 Q ₃ =200 / h _{C3} =0.94	Q ₁ =145 / h _{C1} =0.46 Q ₂ =190 / h _{C2} =0.60 Q ₃ =310 / h _{C3} =1.00	Q ₁ =175 / h _{C1} =0.44 Q ₂ =230 / h _{C2} =0.59 Q ₃ =360 / h _{C3} =0.93
	8b	Q ₁ =20/ h _{C1} =0.44 Q ₂ =30 / h _{C2} =0.66 Q ₃ =45 / h _{C3} =1.00	Q ₁ =35 / h _{C1} =0.45 Q ₂ =50 / h _{C2} =0.65 Q ₃ =75 / h _{C3} =0.96	Q ₁ =55 / h _{C1} =0.46 Q ₂ =65 / h _{C2} =0.54 Q ₃ =115 / h _{C3} =0.95	Q ₁ =65 / h _{C1} =0.46 Q ₂ =75 / h _{C2} =0.53 Q ₃ =140 / h _{C3} =1.01

Tabla 17 Caudal de entrada Q (l/s) y calado en el centro de las piscinas h_c (m) en cada simulación numérica para los diseños tipo II, tipo III y tipo IV, pendiente S=5%.

Tipo II		Tipo III		Tipo IV	
Diseño	Q (l/s) / h_c (m)	Diseño	Q (l/s) / h_c (m)	Diseño	Q (l/s) / h_c (m)
D4_5	Q ₁ =85 / h_{c1} =0.45 Q ₂ =110 / h_{c2} =0.58 Q ₃ =180 / h_{c3} =0.96	D4_5	Q ₁ =85 / h_{c1} =0.46 Q ₂ =110 / h_{c2} =0.59 Q ₃ =180 / h_{c3} =0.97	D4_5	Q ₁ =90 / h_{c1} =0.45 Q ₂ =120 / h_{c2} =0.60 Q ₃ =200 / h_{c3} =1.00
D4_10	Q ₁ =120 / h_{c1} =0.44 Q ₂ =160 / h_{c2} =0.58 Q ₃ =270 / h_{c3} =0.97	D4_10	Q ₁ =120 / h_{c1} =0.45 Q ₂ =160 / h_{c2} =0.60 Q ₃ =270 / h_{c3} =0.99	D4_10	Q ₁ =160 / h_{c1} =0.52 Q ₂ =270 / h_{c2} =0.88 Q ₃ =340 / h_{c3} =1.09
D4_15	Q ₁ =150 / h_{c1} =0.46 Q ₂ =200 / h_{c2} =0.60 Q ₃ =325 / h_{c3} =0.97	D4_15	Q ₁ =150 / h_{c1} =0.48 Q ₂ =200 / h_{c2} =0.63 Q ₃ =310 / h_{c3} =0.95	D6.25_7.58	Q ₁ =75 / h_{c1} =0.57 Q ₂ =85 / h_{c2} =0.65 Q ₃ =130 / h_{c3} =0.99
D8_5	Q ₁ =30 / h_{c1} =0.43 Q ₂ =45 / h_{c2} =0.62 Q ₃ =70 / h_{c3} =1.00	D8_5	Q ₁ =30 / h_{c1} =0.49 Q ₂ =45 / h_{c2} =0.72 Q ₃ =60 / h_{c3} =1.00	D8_5	Q ₁ =30 / h_{c1} =0.50 Q ₂ =45 / h_{c2} =0.74 Q ₃ =60 / h_{c3} =0.99
D8_10	Q ₁ =45 / h_{c1} =0.43 Q ₂ =65 / h_{c2} =0.61 Q ₃ =110 / h_{c3} =1.03	D8_10	Q ₁ =40 / h_{c1} =0.43 Q ₂ =50 / h_{c2} =0.55 Q ₃ =95 / h_{c3} =1.00	D8_10	Q ₁ =45 / h_{c1} =0.43 Q ₂ =60 / h_{c2} =0.57 Q ₃ =100 / h_{c3} =0.94
D8_15	Q ₁ =55 / h_{c1} =0.46 Q ₂ =70 / h_{c2} =0.59 Q ₃ =120 / h_{c3} =1.00	D8_15	Q ₁ =55 / h_{c1} =0.51 Q ₂ =65 / h_{c2} =0.59 Q ₃ =110 / h_{c3} =1.00		

Tabla 18 Caudal de entrada Q (l/s) y calado en el centro de las piscinas h_c (m) en cada ensayo experimental para los diseños tipo I.

	Longitud L				
	2.5b	5b	10b	15b	
Ancho B	2b	Q ₁ =5.5 / h_{c1} =0.13 Q ₂ =6.9 / h_{c2} =0.16 Q ₃ =10.5 / h_{c3} =0.26	Q ₁ =8.0 / h_{c1} =0.12 Q ₂ =10.3 / h_{c2} =0.17 Q ₃ =12.8 / h_{c3} =0.21	Q ₁ =12.3 / h_{c1} =0.11 Q ₂ =17.8 / h_{c2} =0.17 Q ₃ =21.0 / h_{c3} =0.20	Q ₁ =22.1 / h_{c1} =0.15 Q ₂ =24.2 / h_{c2} =0.17 Q ₃ =27.0 / h_{c3} =0.19
	2.67b	Q ₁ =3.4 / h_{c1} =0.14 Q ₂ =4.9 / h_{c2} =0.19 Q ₃ =6.3 / h_{c3} =0.25	Q ₁ =5.3 / h_{c1} =0.14 Q ₂ =7.4 / h_{c2} =0.20 Q ₃ =9.6 / h_{c3} =0.26	Q ₁ =8.7 / h_{c1} =0.14 Q ₂ =11.5 / h_{c2} =0.18 Q ₃ =13.3 / h_{c3} =0.21	Q ₁ =10.5 / h_{c1} =0.13 Q ₂ =13.3 / h_{c2} =0.16 Q ₃ =16.5 / h_{c3} =0.19
	4b	Q ₂ =2.4 / h_{c2} =0.17 Q ₃ =3.2 / h_{c3} =0.20 Q ₁ =4.1 / h_{c1} =0.24	Q ₁ =3.9 / h_{c1} =0.17 Q ₂ =4.8 / h_{c2} =0.20 Q ₃ =5.7 / h_{c3} =0.23	Q ₁ =4.7 / h_{c1} =0.14 Q ₂ =6.9 / h_{c2} =0.21 Q ₃ =9.1 / h_{c3} =0.28	Q ₁ =5.7 / h_{c1} =0.13 Q ₂ =7.0 / h_{c2} =0.17 Q ₃ =9.1 / h_{c3} =0.22
	8b	Q ₁ =0.9 / h_{c1} =0.17 Q ₂ =1.4 / h_{c2} =0.25 Q ₃ =1.9 / h_{c3} =0.33	Q ₁ =1.4 / h_{c1} =0.17 Q ₂ =1.9 / h_{c2} =0.21 Q ₃ =2.8 / h_{c3} =0.31	Q ₁ =2.8 / h_{c1} =0.19 Q ₂ =3.1 / h_{c2} =0.21 Q ₃ =3.7 / h_{c3} =0.25	Q ₁ =3.0 / h_{c1} =0.20 Q ₂ =3.8 / h_{c2} =0.25 Q ₃ =4.2 / h_{c3} =0.28

Tabla 19 Caudal de entrada Q (l/s) y calado en el centro de las piscinas h_c (m) en cada ensayo experimental para los diseños tipo II y tipo III.

Tipo II		Tipo III	
Diseño	Q (l/s) / h_c (m)	Diseño	Q (l/s) / h_c (m)
D4_5	$Q_1=4.7 / h_{C1}=0.14$ $Q_2=6.0 / h_{C2}=0.17$ $Q_3=7.2 / h_{C3}=0.21$	D4_5	$Q_1=5.5 / h_{C1}=0.16$ $Q_2=6.6 / h_{C2}=0.20$ $Q_3=7.5 / h_{C3}=0.23$
D4_10	$Q_1=6.1 / h_{C1}=0.13$ $Q_2=7.6 / h_{C2}=0.16$ $Q_3=8.8 / h_{C3}=0.18$	D4_10	$Q_1=6.9 / h_{C1}=0.16$ $Q_2=8.3 / h_{C2}=0.19$ $Q_3=9.8 / h_{C3}=0.21$
D4_15	$Q_1=8.1 / h_{C1}=0.14$ $Q_2=10.7 / h_{C2}=0.18$ $Q_3=12.2 / h_{C3}=0.21$	D4_15	$Q_1=8.4 / h_{C1}=0.15$ $Q_2=9.9 / h_{C2}=0.17$ $Q_3=11.4 / h_{C3}=0.20$
D8_5	$Q_1=2.7 / h_{C1}=0.19$ $Q_2=3.1 / h_{C2}=0.22$ $Q_3=3.5 / h_{C3}=0.24$	D8_5	$Q_1=2.4 / h_{C1}=0.19$ $Q_2=2.7 / h_{C2}=0.21$ $Q_3=3.1 / h_{C3}=0.24$
D8_10	$Q_1=3.7 / h_{C1}=0.19$ $Q_2=4.2 / h_{C2}=0.21$ $Q_3=4.9 / h_{C3}=0.24$	D8_10	$Q_1=3.0 / h_{C1}=0.17$ $Q_2=4.0 / h_{C2}=0.23$ $Q_3=4.7 / h_{C3}=0.26$
D8_15	$Q_1=3.3 / h_{C1}=0.15$ $Q_2=4.8 / h_{C2}=0.21$ $Q_3=5.6 / h_{C3}=0.25$	D8_15	$Q_1=4.0 / h_{C1}=0.19$ $Q_2=4.9 / h_{C2}=0.24$ $Q_3=5.4 / h_{C3}=0.26$

Tabla 20 Valores numéricos y experimentales del coeficiente de descarga C_d obtenidos en este trabajo para siete diseños tipo I y valores experimentales de Rajaratnam et al. (1992). Nota: d_r =diferencia relativa entre los resultados numéricos y los valores obtenidos por Rajaratnam et al. (1992) (%).

Tipo	Diseño	C_d numérico	C_d experimental	C_d Rajaratnam et al. (1992)	d_r (%)
I	D2_15	3.25	3.49	4.13	21.3
	D2.67_5	1.64	1.39	1.40	17.1
	D4_5	1.69	1.66	1.65	2.4
	D4_15	3.14	2.96	3.11	1.0
	D8_5	1.73	1.77	1.66	4.2
	D8_10	2.68	2.89	2.71	1.1
	D8_15	3.12	3.00	2.98	4.7

Aunque el coeficiente C_q es aproximadamente constante para cada tipo de piscina, existe una ligera variación de su valor con el ratio L/b para los diseños tipo I. De forma análoga a lo mostrado previamente para el coeficiente C_{vs} , se definen así coeficientes de descarga C_q variables

en función de la ratio L/b para los diseños tipo I (Tabla 21) y coeficientes de descarga C_q constantes para los diseños tipo II, III y IV (Figura 89) a partir de los resultados numéricos.

En el caso de los diseños tipo I, los coeficientes C_q mostrados en Tabla 21 se calculan a partir de las simulaciones con pendiente tanto del 5% como del 10%. Por ello, cada coeficiente se obtiene por interpolación lineal de 24 resultados (cada coeficiente describe 4 diseños y se simulan 3 caudales con 2 pendientes de fondo).

En el caso de los diseños tipo II y tipo III, los resultados numéricos proporcionan un valor de $C_q=0.99$ y $C_q=0.95$, respectivamente (Figura 89). Cada coeficiente se calcula por interpolación lineal de 18 resultados, ya que cada coeficiente describe 6 diseños y se simulan 3 caudales por diseño. En el caso de los diseños tipo IV, se obtiene un coeficiente $C_q=1.05$ por interpolación lineal de 15 resultados, que se corresponden con un total de 5 diseños con 3 caudales simulados por diseño (Figura 89).

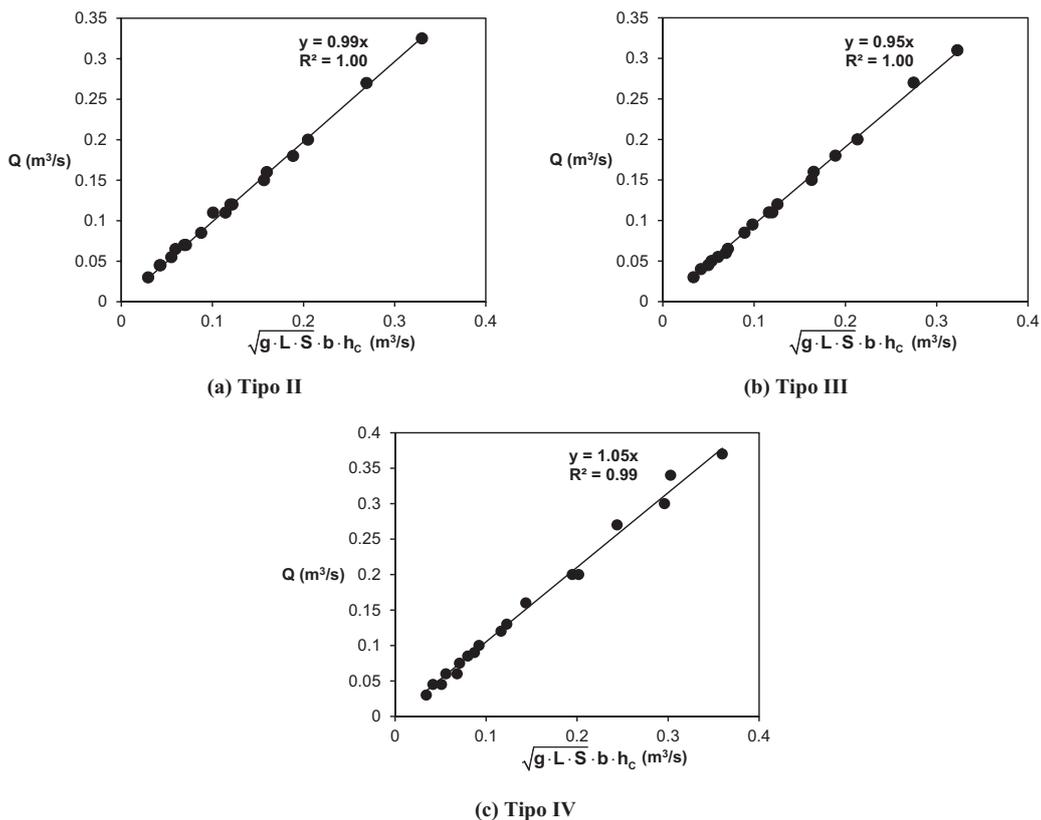


Figura 89 Variación del caudal circulante Q con $\sqrt{g \cdot S \cdot L \cdot b \cdot h_c}$ para los 6 diseños tipo II, los 6 diseños tipo III y los 5 diseños tipo IV.

Tabla 21 Valores del coeficiente de descarga C_q para los diseños tipo I considerando únicamente 4 valores para los 16 diseños.

Coeficiente C_q	Longitud L			
	2.5b	5b	10b	15b
	0.67	0.76	0.83	0.83

Al igual que con el coeficiente de descarga C_q , se ha analizado la influencia de las dimensiones geométricas de las piscinas en los valores del coeficiente C_d . Si se emplea el coeficiente C_d no es posible definir un único coeficiente constante para los diseños tipo II, III y IV, ya que un coeficiente constante C_q en diseños con distinta ratio L/b resulta en distintos coeficientes C_d en función de dicha ratio L/b (Figura 90). Esto es debido a la propia definición del coeficiente C_d , que se puede expresar en función del coeficiente C_q como $C_d = C_q \cdot \sqrt{L/b}$. Por tanto, se han definido curvas de descarga en función del parámetro L/b en todos los tipos de diseño (Figura 91).

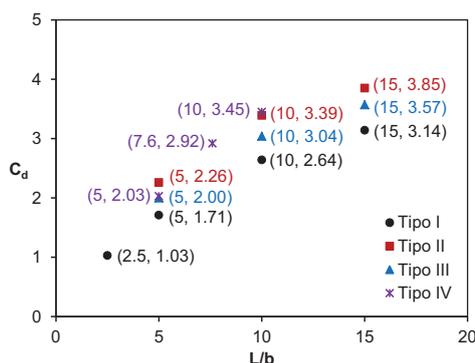


Figura 90 Variación del coeficiente de descarga C_d en los distintos diseños tipo con L/b .

En este caso, los coeficientes numéricos C_d de los diseños tipo I se obtienen por interpolación lineal de 24 resultados (cada coeficiente describe 4 diseños, y para cada diseño se utilizan 3 caudales y 2 pendientes). En los diseños tipo II, III y IV, cada nuevo coeficiente se obtiene por interpolación lineal de 6 resultados de simulaciones (cada coeficiente describe 2 diseños, y para cada diseño se utilizan 3 caudales). No obstante, se estudia únicamente un diseño tipo IV con longitud $L=7.58b$, por lo que en este caso el coeficiente C_d proviene de considerar los 3 caudales simulados numéricamente. Por ello, el coeficiente C_d mostrado en la Figura 91 para esta longitud de piscina es directamente el indicado en la Tabla 14 para el diseño D6.25_7.58.

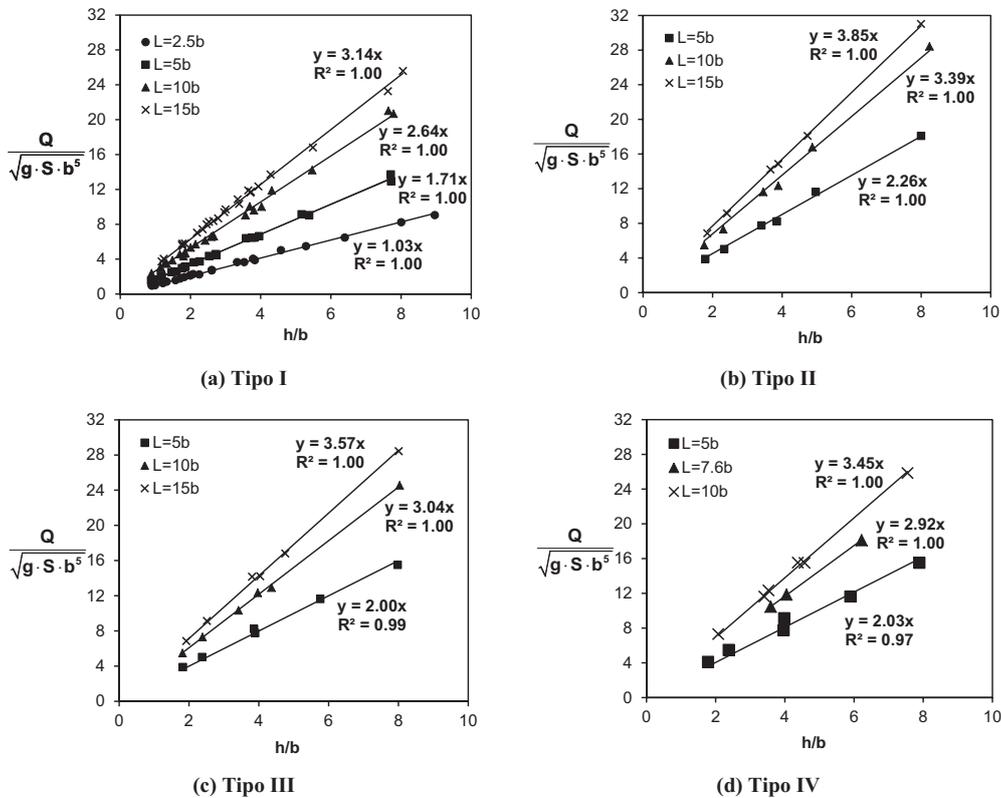


Figura 91 Curvas de descarga para los distintos diseños en función de la ratio L/b.

En la Tabla 22 se muestra, a modo de resumen, los valores de ambos coeficientes (C_d y C_q) agrupados en función de la longitud de piscina. Los valores del coeficiente de descarga C_d son mayores en los diseños tipo II, III y IV que en los de tipo I, para unas mismas dimensiones geométricas de las piscinas. Por tanto, para un mismo caudal circulante los calados alcanzados en estos diseños son menores, mientras que las velocidades y la capacidad de desagüe son mayores. Por otra parte, los resultados muestran que si se aumenta la longitud de piscina L manteniendo iguales el resto de dimensiones, el valor del coeficiente C_d aumenta significativamente. Esto implica que es necesario incrementar el caudal de entrada para conservar el calado. En cambio, la anchura de piscina B parece tener una menor influencia en los campos de calados, pues los coeficientes de descarga son poco sensibles a la ratio B/b . Por tanto, la sensibilidad frente a las variaciones de caudal de diseños en los que se mantiene la ratio L/b es muy similar, independientemente de la anchura de piscina B .

En consecuencia, para aumentar el caudal de paso por la escala una vez seleccionado un diseño (sin elevar fuera de lo razonable la altura de los tabiques), se puede recurrir a mayores pendientes

o a mayores anchuras de hendidura. En ambos casos se genera un incremento de la velocidad, ya que la velocidad media en la hendidura es proporcional a $(S \cdot L)^{1/2}$, y la longitud de piscina es proporcional a la anchura de hendidura en cada diseño. Para que la velocidad se mantenga en un rango adecuado al tipo de pez para el que se proyecta la escala es necesario cambiar de diseño. En general, si hace falta desaguar caudales grandes se puede optar por diseños con una anchura de hendidura mayor, pero que mantengan la longitud de la piscina.

Tabla 22 Tabla resumen con los valores de los dos coeficientes de descarga considerados en función de la ratio L/b.

Tipo	Longitud L	C _q numérico	C _d numérico
I	2.5b	0.67	1.03
	5b	0.76	1.71
	10b	0.83	2.64
	15b	0.83	3.14
II	5b	0.99	2.26
	10b		3.39
	15b		3.85
III	5b	0.95	2.00
	10b		3.04
	15b		3.57
IV	5b	1.05	2.03
	7.6b		2.92
	10b		3.45

5.2.4 Turbulencia

La capacidad y velocidad de natación de los peces migratorios están influenciadas por numerosos factores, tanto fisiológicos (edad, sexo, peso, estadio vital, etc.) como medioambientales (temperatura del agua, sedimentos en suspensión, luminosidad, etc.) (Beamish, 1978). La turbulencia y la aireación son factores que influyen en el comportamiento de los peces y, por tanto, en la eficiencia de las escalas de peces para el paso de migradores. Así, una excesiva turbulencia puede desorientar a los peces y la abundancia de grandes burbujas de aire puede dificultar su respiración. No obstante, Coutant (1998) señala que los migradores anádromos también pueden utilizar la energía cinética turbulenta para reducir la energía metabólica precisa en los procesos de natación. Según esta idea, existirían niveles óptimos de turbulencia para los salmónidos migratorios (Odeh et al., 2002): niveles demasiado altos producirían desorientación e

incluso lesiones y niveles excesivamente bajos influirían negativamente en la capacidad de aprovechar la energía asociada con la turbulencia de gran escala y baja intensidad, causando retrasos y lentitud en la migración.

Un indicador de la energía cinética turbulenta media en las piscinas, que habitualmente se utiliza para cuantificar la turbulencia en escalas de peces de hendidura vertical (Larinier et al., 1998), es la potencia disipada por unidad de volumen. Establece una medida aproximativa y fácil de evaluar de los niveles de turbulencia y aireación existentes en las piscinas, y se calcula de la siguiente forma:

$$E = \frac{\rho \cdot \Delta H \cdot Q \cdot g}{h_c \cdot B \cdot L} \quad (5.6)$$

donde E es la potencia disipada por unidad de volumen, ΔH es el desnivel entre piscinas, Q es el caudal, ρ es la densidad del agua, g es la aceleración de la gravedad, h_c es el calado en el centro de piscina y L y B son la longitud y anchura de las piscinas, respectivamente.

Asumiendo un flujo uniforme y la Ecuación 5.4 y Ecuación 5.5, la potencia disipada por unidad de volumen también se puede expresar como:

$$E = C_d \cdot \rho \cdot \frac{(S \cdot g \cdot b)^2}{B} = C_q \cdot \rho \cdot \sqrt{S^3 \cdot g^3 \cdot L} \cdot \frac{b}{B} \quad (5.7)$$

donde C_d y C_q son los coeficientes de descarga definidos en la Ecuación 5.4 y Ecuación 5.5, respectivamente; S es la pendiente de la escala y b es la anchura de hendidura.

En consecuencia, la potencia disipada por unidad de volumen depende de variables geométricas como la pendiente de la escala, la anchura de hendidura y la anchura de piscina, y del coeficiente de descarga que relaciona linealmente caudales y calados. Así, la potencia media disipada por unidad de volumen es constante para un diseño determinado donde se fija la geometría y la pendiente, independientemente del caudal circulante. En la Tabla 23 se muestran los valores de potencia disipada por unidad de volumen obtenidos a partir de la Ecuación 5.7 en los distintos diseños estudiados, considerando una anchura de piscina de 1 m y pendientes del 5% y del 10%. Los valores de potencia disipada por unidad de volumen son menores en los diseños tipo I frente a los diseños tipo II, II y IV, para una mismas dimensiones geométricas de las piscinas.

De forma general, se puede afirmar que para altos niveles de potencia disipada por unidad de volumen las condiciones para la natación de los peces no son adecuadas y, por tanto, son esperables mayores dificultades de remonte de las piscinas. Como referencia de los valores

máximos para la potencia disipada por unidad de volumen, Larinier et al. (2002) y Bates (2000) consideran 200 W/m^3 para pasos de peces especialmente destinados para salmónidos, aunque este valor umbral se puede aumentar hasta los 400 W/m^3 en el caso de escalas con un pequeño número de piscinas. En escalas destinadas a otras especies fluviales se recomiendan valores menores de aproximadamente 150 W/m^3 (Larinier et al., 2002), aunque se han adoptado valores mucho menores (alrededor de $40\text{-}50 \text{ W/m}^3$) en proyectos como los de la cuenca de Murray-Darling en Australia, con el objetivo de permitir el remonte de todos los peces de longitud mayor de 90 mm y de aproximadamente la mitad de los peces entre 20 y 70 mm (Barrett y Mallen-Cooper, 2006; Stuart et al., 2008). No obstante, todos estos valores son referenciales y deber ser tomados con precaución.

Tabla 23 Potencia disipada por unidad de volumen E (W/m^3) en los distintos diseños estudiados para una anchura de piscina de 1 m y pendientes del 5% y del 10%.

	Diseño	S=5%	S=10%
Tipo I	D2_2.5	131	369
	D2_5	209	591
	D2_10	326	923
	D2_15	395	1118
	D2.67_2.5	81	229
	D2.67_5	129	364
	D2.67_10	202	572
	D2.67_15	251	709
	D4_2.5	46	131
	D4_5	73	206
	D4_10	107	303
	D4_15	135	381
	D8_2.5	16	44
	D8_5	26	75
	D8_10	41	115
	D8_15	48	135

	Diseño	S=5%	S=10%
Tipo II	D4_5	92	261
	D4_10	136	384
	D4_15	163	461
	D8_5	35	98
	D8_10	52	148
	D8_15	59	166
Tipo III	D4_5	91	258
	D4_10	133	376
	D4_15	158	447
	D8_5	30	84
	D8_10	46	130
	D8_15	54	151
Tipo IV	D4_5	99	280
	D4_10	152	430
	D6.25_7.58	64	181
	D8_5	30	84
	D8_10	52	147

Este criterio de uso común tiene como principal ventaja el ser fácilmente calculable. Sin embargo, no existe una correspondencia unívoca entre los valores de potencia disipada por unidad de volumen calculados y las características físicas de turbulencia en las piscinas. Por ello, la potencia disipada por unidad de volumen no es una variable definitiva a la hora de elegir un

diseño específico de paso para peces, sino que simplemente es un parámetro más de diseño que proporciona información útil para el objetivo final de conseguir un diseño adaptado a las necesidades de las especies objetivo.

En consecuencia, como complemento al análisis anterior, se examina la distribución espacial de la energía cinética turbulenta y de su tasa de disipación, calculada con el modelo numérico $k-\epsilon$, en los distintos diseños (Figura 92 y Figura 93). Su distribución espacial depende del patrón de flujo que se desarrolla en las piscinas, aunque los máximos valores siempre se observan en las proximidades de las hendiduras. En el primer patrón de flujo (Figura 75 y Figura 92), se observan niveles muy bajos de turbulencia y disipación en la parte superior de las piscinas. En el segundo patrón (Figura 76 y Figura 93), los niveles de turbulencia y disipación se extienden por la parte superior de las piscinas, mientras que la caída es más pronunciada en la parte inferior. Esto ocurre así independientemente del tipo de diseño considerado (tipo I, II, III o IV).

La magnitud de la energía cinética turbulenta y la disipación varía con la pendiente (Figura 94 y Figura 95). Al aumentar la pendiente, se obtienen mayores valores máximos de ambas variables, que se localizan en las proximidades de la hendidura. Por tanto, disminuye el volumen de las zonas con bajos valores de energía cinética turbulenta y disipación.

El análisis de la distribución espacial de la turbulencia, junto con el patrón de flujo y el campo de velocidades, puede servir para estimar a priori la disponibilidad de zonas de descanso para los peces en un determinado diseño. La caracterización de la turbulencia puede estar basada en distintos parámetros (tensiones de Reynolds, intensidad turbulenta, energía cinética turbulenta, etc.), y recientes estudios apuntan a que puede ser necesario analizar múltiples parámetros simultáneamente para considerar los efectos parciales de cada uno de ellos sobre las capacidades natatorias y el comportamiento de los peces (Silva et al., 2012). En este caso, se analiza la distribución espacial de la energía cinética turbulenta y de su tasa de disipación, y su variación con las dimensiones geométricas de las piscinas. Se observa como, independientemente del patrón de flujo, las piscinas presentan zonas con bajos niveles de turbulencia, en relación a los niveles máximos observados en las proximidades de la hendidura. Estas zonas se corresponderían con potenciales zonas de descanso para los peces.

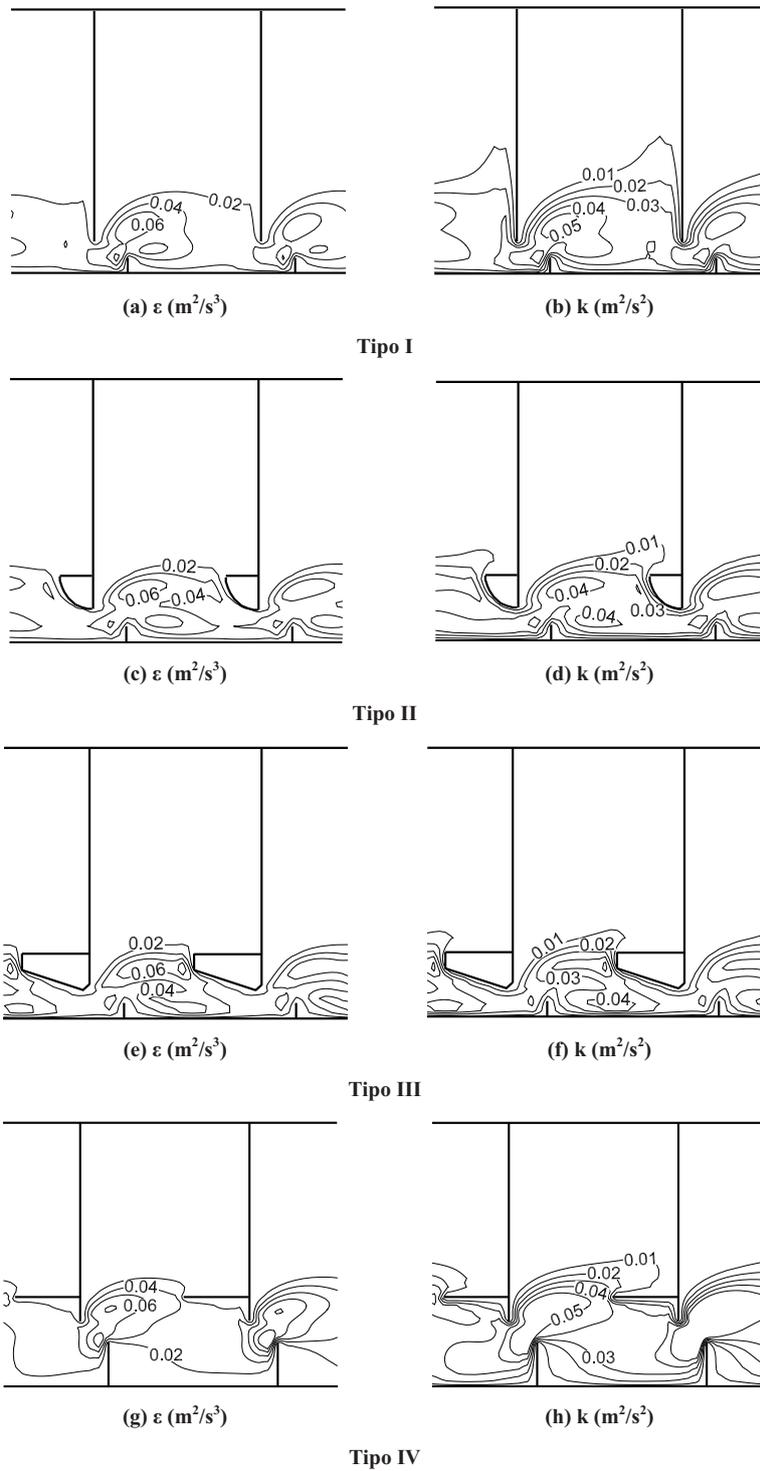


Figura 92 Distribución espacial de la tasa de disipación ε (m^2/s^3) y de la energía cinética turbulenta k (m^2/s^2) en el diseño D8_5, S=5%. Modelo numérico.

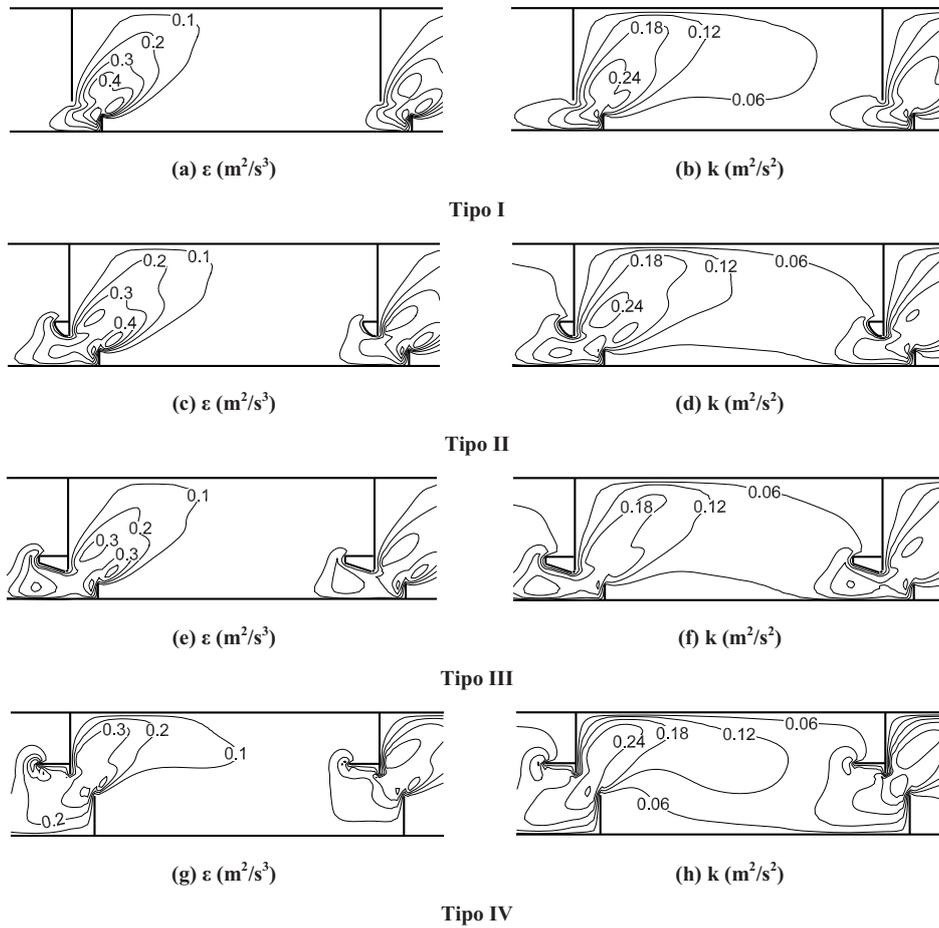


Figura 93 Distribución espacial de la tasa de disipación ϵ (m^2/s^3) y de la energía cinética turbulenta k (m^2/s^2) en el diseño D4_10, $S=5\%$. Modelo numérico.

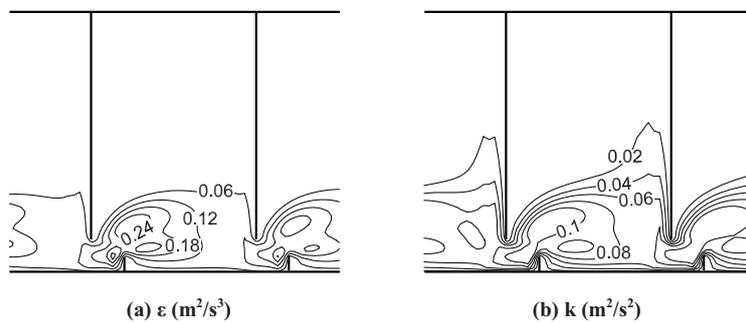


Figura 94 Distribución espacial de la tasa de disipación ϵ (m^2/s^3) y de la energía cinética turbulenta k (m^2/s^2) en el diseño D8_5 tipo I, $S=10\%$. Modelo numérico.

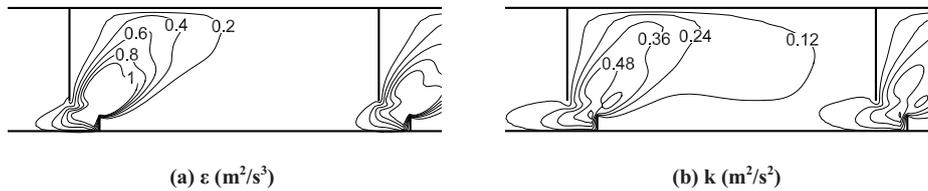


Figura 95 Distribución espacial de la tasa de disipación ϵ (m^2/s^3) y de la energía cinética turbulenta k (m^2/s^2) en el diseño D4_10 tipo I, $S=10\%$. Modelo numérico.

5.2.5 Observaciones finales

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. Los parámetros hidráulicos que generalmente se consideran para evaluar dicha eficiencia son el patrón de flujo, la velocidad media en la hendidura, el calado en las piscinas y la potencia disipada por unidad de volumen. En este trabajo se estudian estos parámetros en un total de 33 diseños de escalas de hendidura vertical, divididos en 4 diseños tipo.

Los resultados muestran como el patrón de flujo depende principalmente de la geometría de la piscina y como es posible incluir todos los diseños considerando solamente dos patrones de flujo distintos en función del parámetro L/B' . Ambos patrones de flujo presentan zonas con bajos niveles de velocidad y turbulencia, que pueden ser potencialmente empleadas por los peces como zonas de descanso.

En relación con los campos de calados, es posible considerar, en una primera aproximación, un coeficiente de descarga C_q constante para cada tipo de diseño (o lo que es lo mismo, coeficientes de descarga C_d variables en función de la ratio L/b). En los diseños tipo II, III y IV, que incorporan elementos de guiado del flujo, se obtienen mayores valores de los coeficientes de descarga que en los diseño tipo I. Por tanto, requieren un mayor caudal circulante para mantener el calado y presentan mayores velocidades medias en la hendidura. Los niveles de turbulencia obtenidos en las proximidades de la hendidura son similares en los cuatro diseños tipo.

En líneas generales, el análisis de los resultados sugiere que la longitud de la piscina y la pendiente son las principales dimensiones geométricas que afectan al flujo en la escala. Un aumento de L o S implica mayores velocidades, debido al mayor valor del salto entre piscinas. Por otra parte, un incremento en la anchura de hendidura conlleva una disminución del calado en las piscinas, y permite aumentar el caudal circulante por la escala sin generar un incremento significativo de la velocidad media en la hendidura. Por su parte, un aumento de la anchura total

de piscina permite reducir los valores de potencia disipada por unidad de volumen, ya que incrementa el tamaño de las zonas de recirculación (caracterizadas por bajos niveles de turbulencia).

Finalmente, los resultados numéricos y experimentales presentados en esta sección indican que las ecuaciones de aguas someras promediadas en profundidad, con un modelo de turbulencia tipo $k-\epsilon$, reproducen adecuadamente el campo de flujo en las escalas de peces de hendidura vertical dentro del rango usual de pendientes y sin ningún parámetro de calibración del modelo. Aunque en ciertas regiones del flujo no se cumplen las hipótesis de aguas someras, especialmente en la zona de la hendidura, los resultados numéricos muestran un acuerdo global satisfactorio con los experimentales. En los diseños que presentan mayores velocidades y a medida que se aumenta la pendiente de la escala, se podría plantear usar un modelo tridimensional para intentar mejorar las predicciones numéricas.

5.3 Estudio biológico

El estudio biológico comprende la ejecución de ensayos con tres especies de peces (trucha común, barbo común y boga del Tajo) en un modelo físico de una escala de peces a tamaño real y su posterior análisis siguiendo la metodología propuesta en el capítulo 4. De esta forma, se aplica la metodología desarrollada a ensayos reales y se analiza su viabilidad en estas condiciones.

En este apartado se muestran los resultados experimentales obtenidos al analizar dichos ensayos biológicos. 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. Para facilitar el análisis, la trayectoria completa de cada ejemplar se divide entre pasos de hendidura y zonas de descanso. Así, en los experimentos con trucha común se seleccionan y analizan un total de 24 pasos entre piscinas y 54 períodos de descanso. Por otra parte, se estudian 10 pasos de piscinas y 53 períodos de descanso para las bogas, y se examinan 47 pasos de piscinas y 58 períodos de descanso en el caso de los barbos.

Además del propio interés de los resultados, se pretende evaluar el potencial de la metodología de cara a comprender mejor el comportamiento de los peces en estos dispositivos, y valorar así la utilidad de realizar más ensayos de este tipo de forma sistemática.

5.3.1 Comportamiento general

En este apartado se realiza una descripción general del comportamiento de los distintos ejemplares en la escala durante los ensayos. Se observa como su comportamiento está fuertemente ligado a las características del flujo, que se han analizado utilizando el modelo numérico descrito en el capítulo 3 y siguiendo la misma metodología que en el estudio hidrodinámico. El patrón de flujo en este caso es de tipo FP1, siguiendo la nomenclatura empleada en dicho estudio, caracterizado por una región de flujo principal definida por un chorro de gran velocidad y una gran zona de recirculación en el lado izquierdo de dicho flujo (Figura 96). La zona de la hendidura es, por tanto, la que presenta mayores velocidades y niveles de turbulencia (Figura 97).

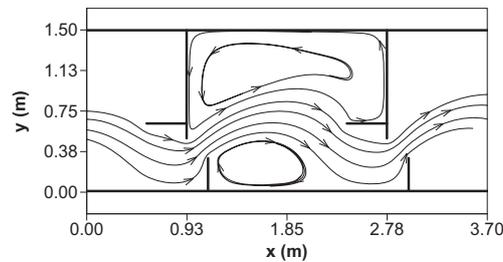


Figura 96 Líneas de corriente en las piscinas calculadas con el modelo numérico.

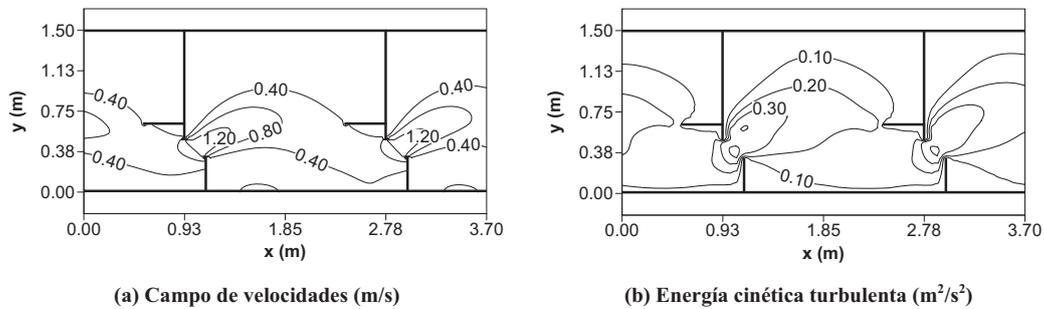


Figura 97 Campo de velocidades y campo de energía cinética turbulenta en las piscinas calculado con el modelo numérico.

En líneas generales, tanto las truchas como los barbos muestran una gran capacidad para superar la escala. Los ejemplares evitan, en la medida de lo posible, los desplazamientos por la zona de flujo principal de altas velocidades y permanecen la mayor parte del tiempo en las zonas de recirculación que se producen a ambos lados del flujo principal, en las que las velocidades y los niveles de turbulencia son menores (Figura 96 y Figura 97). A pesar de permanecer en estas zonas por largos períodos de tiempo en algunos casos, no se detectan signos de desorientación en

las grabaciones, y prácticamente no se observan descensos de piscinas.

Por el contrario, los ejemplares de boga 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 la superación de sus capacidades natatorias.

En los ensayos con trucha y barbo se comprueba que los ejemplares utilizan las zonas de recirculación situadas a ambos lados del flujo principal, e incluso se aprecian desplazamientos entre las dos zonas dentro de una misma piscina. En el caso de la zona de recirculación de mayor tamaño, situada a la izquierda del flujo principal, los ejemplares se ubican preferentemente en la zona de aguas arriba, próximos al deflector lateral. Sin embargo, en los ensayos con boga esta zona prácticamente no se utiliza, y los ejemplares se sitúan con más frecuencia en la zona de recirculación más pequeña, situada a la derecha del flujo principal. El tiempo de permanencia en cualquiera de estas zonas es muy variable, desde unos pocos segundos a varios minutos, para las tres especies. En los apartados 5.3.2 y 5.3.3 se cuantifica el uso que realizan los ejemplares de las zonas de recirculación y se analiza en detalle los pasos entre piscinas.

En cualquier caso, todas las especies realizan en los ensayos frecuentes paradas en las zonas de recirculación, y no se observan remontes de más de 4 piscinas consecutivas sin un período de descanso. Asimismo, 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. Estas observaciones son coherentes con lo señalado por otros autores como Larinier et al. (2002) sobre el uso de las proximidades de superficies (paredes o solera) para progresar y el uso de flujos recirculantes para descansar.

Por último, se ha calculado la tasa de remonte, entendida como la proporción de los individuos ensayados que consigue ascender la totalidad de la escala, clasificando a los ejemplares por especie y talla (Figura 98). Para ello se han utilizado las lecturas de las antenas del sistema de radiofrecuencia del que dispone la escala.

Las truchas de mayor tamaño presentan una mayor tasa de remonte, en relación con los ejemplares de menor talla. Así, el 63% de las truchas ensayadas con tallas comprendidas entre 20 y 25 cm consigue remontar completamente la escala, frente al 36% de los individuos con tallas entre 15 y 20 cm. Esto mismo se observa para la boga, aunque los valores de la tasa de remonte son muy inferiores (un 8% para los ejemplares entre 10 y 15 cm y un 24% para los comprendidos

entre 15 y 20 cm). Finalmente, la tasa de remonte para los barbos entre 30 y 35 cm se sitúa en el 41%. No obstante, estos resultados deben ser tomados con cautela debido al limitado número de ejemplares y a las condiciones específicas de los ensayos. En concreto, Lara et al. (2011) encuentran una mayor tasa de remonte (más del doble para algunas especies y tallas) en ensayos realizados en el mismo dispositivo y con las mismas especies, pero con caudales inferiores. Por ello, contemplan la posibilidad de que el caudal circulante pueda tener una influencia significativa sobre los resultados, aunque señalan que es necesaria más investigación para verificar este punto.

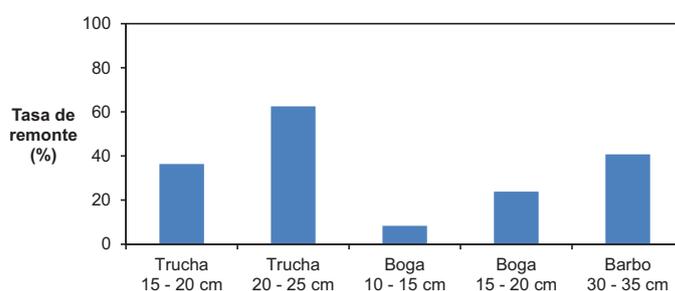


Figura 98 Tasa de remonte obtenida en los ensayos en función de la especie y talla.

5.3.2 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 la isotaca de 0.4 m/s. De esta forma, las velocidades del agua en las regiones de recirculación se encuentran dentro del rango de las velocidades de crucero de los ejemplares ensayados (estimando la velocidad máxima de crucero en $4LC/s$ y

considerando la talla mínima de 10 cm). Se ha verificado que en las áreas así definidas los niveles de turbulencia son asimismo muy bajos (Figura 97). En base a las áreas delimitadas, se han definido 3 posibles zonas de descanso, denominadas A, B y C (Figura 99). 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 10 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. De esta forma se han analizado un total de 54 periodos de descanso de trucha común, 53 periodos de descanso de boga de Tajo y 58 periodos de descanso de barbo común.

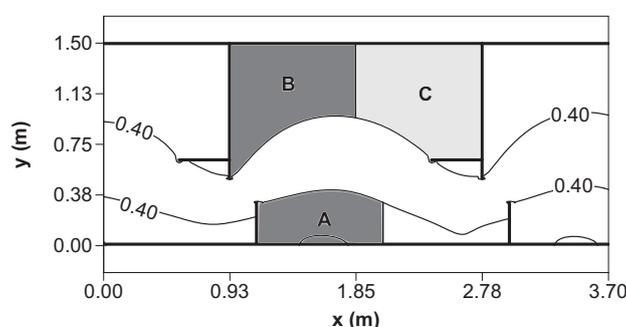


Figura 99 Definición de las zonas de descanso, en función de su situación dentro de la piscina: áreas de descanso situadas aguas arriba (gris oscuro) y aguas abajo (gris claro).

En cada una de las zonas se evalúa su frecuencia de uso y los tiempos de permanencia. En este trabajo, la frecuencia de utilización se entiende como la ratio entre el número de descansos realizados en una zona y el número de descansos totales efectuados durante el ascenso en las 7 piscinas de grabación. Por su parte, el tiempo de permanencia es el tiempo transcurrido desde la entrada hasta la salida de cada zona.

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 tiempo de permanencia de 411 y 413 s, respectivamente. Los ejemplares no permanecen en la zona C más de 10 s de manera continua, por lo que se considera que no utilizan esta zona de descanso. En el caso de las bogas, prácticamente sólo se observan descansos en la zona A, con un tiempo medio de permanencia de 397 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 53.4% y 41.4%, respectivamente, con valores medios de tiempo de permanencia de 163 s y 194 s. Al igual que en el caso de la trucha común y la boga, los ejemplares prácticamente no permanecen nunca en la zona C más de 10 s de manera continua.

Como se muestra en la Tabla 24, 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 (34 min). De igual forma, se observan descansos en el rango 10 s - 2084 s (35 min) y 10 s - 1668 s (28 min) en las bogas y los barbos, respectivamente. En el apéndice I se detalla la duración de todos los descansos analizados. Aunque no se ha podido identificar inequívocamente qué ejemplar realiza cada descanso en todos los casos, los datos disponibles apuntan a que los tiempos totales de descanso (hasta el remonte completo de las 7 piscinas) también presentan una gran variabilidad. Como muestra de ello, los tiempos de descanso totales de 8 ejemplares de trucha común que remontan completamente la escala en las grabaciones varían entre 1246 s y 5033 s (21 min y 84 min, respectivamente).

Tabla 24 Utilización de las zonas de descanso por los ejemplares de las tres especies durante los ensayos. Nota: σ es la desviación estándar.

		Frecuencia de uso (%)			Tiempo de permanencia (s)							
		Zona A	Zona B	Zona C	Zona A		Zona B		Zona C		Global	
					Media	σ	Media	σ	Media	σ	Media	σ
Especie	Trucha	57.4	42.6	0	411	424	413	406	0	-	412	412
	Boga	96.2	1.9	1.9	397	420	11	-	52	-	383	417
	Barbo	53.4	41.4	5.2	163	235	194	343	37	5	169	279

A pesar de los altos tiempos de permanencia alcanzados en algunos casos, no se aprecian en las grabaciones signos de desorientación en los ejemplares de trucha y barbo, que continúan su ascenso sin problemas al abandonar estas áreas. En el caso de las bogas, sí se observan descensos de piscinas, que podrían ser atribuibles a esta causa. Hay que tener en cuenta además que los ejemplares de boga ensayados son de menor talla que los ejemplares de trucha y barbo.

La frecuencia 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 utilizan más frecuentemente la zona A para descansar, el tiempo de permanencia medio en esta zona es menor que en la zona B. Por último, los ejemplares de bogas ensayados utilizan casi exclusivamente la zona A para descansar, con un

tiempo de permanencia medio similar al obtenido para la trucha.

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 (denominada zona A en este trabajo) 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 de la piscina son mínimos, y prácticamente no son empleadas por los peces durante los ensayos. No obstante, dado que el número de ejemplares ensayados es reducido, se estima necesario continuar con la experimentación para verificar que se trata de un comportamiento generalizado.

De ser así, esto tendría incidencia sobre los patrones de flujo recomendados para conseguir pasos eficientes. El patrón de flujo FP2 del estudio hidrodinámico no sería a priori peor que el patrón FP1, a pesar de reducir significativamente una de las zonas de recirculación, ya que anula únicamente la zona de recirculación C. Y en base a lo observado en estos ensayos, prescindir de esta zona de descanso no implicaría una reducción de la eficiencia del dispositivo.

5.3.3 Pasos de hendidura

En este apartado se comentan los resultados obtenidos en relación con los pasos entre piscinas grabados durante los ensayos. Como ya se ha indicado anteriormente, se analizan un total de 24 pasos de truchas, 10 pasos de bogas y 47 pasos de barbos. Dado el limitado número de pasos y la complejidad del fenómeno estudiado, los valores y parámetros obtenidos deben ser tomados con cautela, y el principal objetivo es analizar el potencial de la metodología propuesta.

En general, los ejemplares tratan de minimizar el tiempo empleado en la zona de altas velocidades del chorro y, una vez atravesada la zona de la hendidura, se dirigen hacia la zona de recirculación A de la siguiente piscina. No obstante, se pueden distinguir dos modos de ascenso, en función de la localización del ejemplar antes de atravesar la hendidura y de la zona empleada para aproximarse a ella. En un primer modo (Figura 100a), 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. Los individuos adoptan generalmente en la zona A la orientación que se muestra en la Figura 101 y Figura 102. Por ello, deben realizar un giro brusco para orientarse en contra del flujo principal.

En el modo 2 (Figura 100b), el ejemplar está situado en la zona de recirculación B, en la que

generalmente ha permanecido un cierto período de tiempo, y parte de la zona próxima al deflector lateral para proceder a atravesar la hendidura. Al igual que en el modo 1, la orientación habitual de los ejemplares en la zona B les obliga a realizar un giro de más de 90° para enfrentarse a la dirección del flujo principal (Figura 101 y Figura 102).

En los ensayos con trucha común, el modo de ascenso 1 es predominante (se observa en un 66.7% de los ascensos analizados), generalmente con un período de descanso previo (en el 75% de dichos 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 59.6% de los pasos analizados), con un descanso antes de atravesar la hendidura en el 63.6% de dichos casos. Todas las trayectorias analizadas, proyectadas sobre el mapa de velocidad del agua, están recogidas en el apéndice 1.

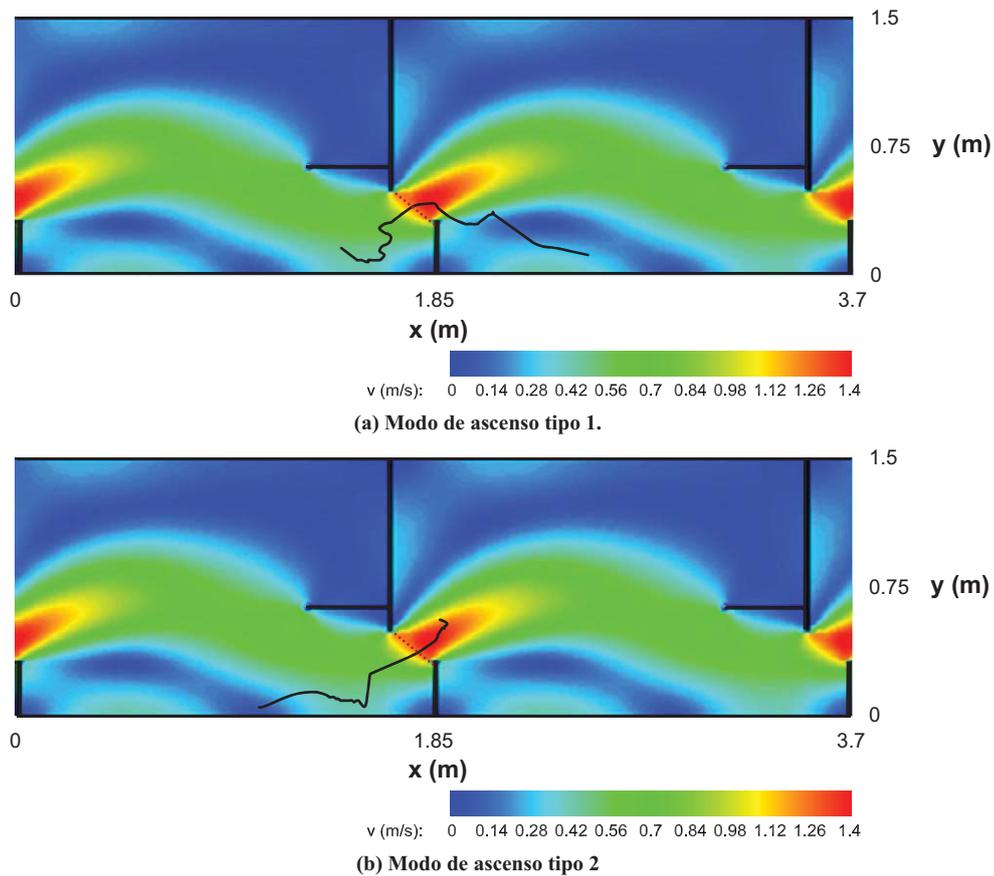


Figura 100 Ejemplo de dos trayectorias seguidas por los ejemplares de trucha común, proyectadas sobre el mapa de velocidad del agua.

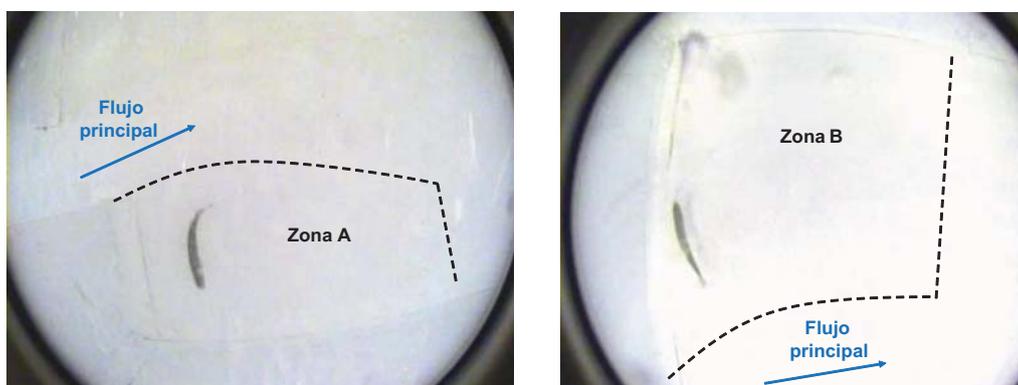


Figura 101 Imágenes captadas por las cámaras de vídeo durante los ensayos con trucha común, en las que se observa la orientación que generalmente adoptan los ejemplares en las zonas de descanso A y B. En línea discontinua el límite aproximado del área de descanso (Figura 99).

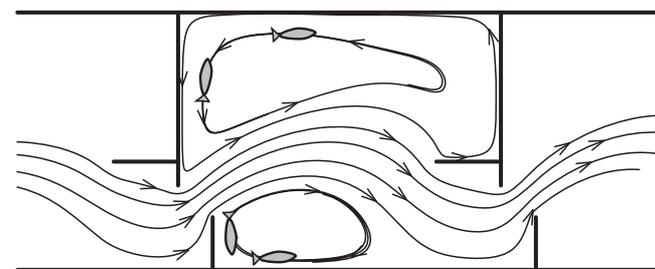


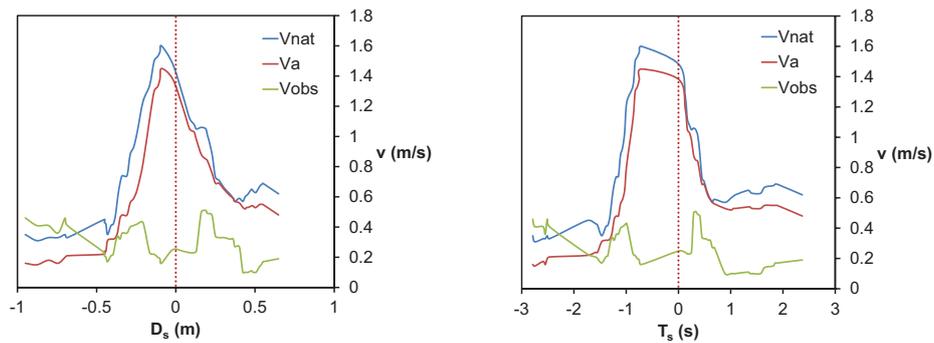
Figura 102 Orientación habitual de los ejemplares ensayados en las zonas de descanso.

Una vez definida la trayectoria seguida por los ejemplares en la zona de la hendidura, se ha calculado su velocidad observada, su velocidad de natación y su aceleración, siguiendo la metodología descrita en el capítulo 4. En la Figura 103 y Figura 104 se muestran ejemplos de los resultados obtenidos, en los que se representan las velocidades y las aceleraciones en módulo, en función de la distancia recorrida y del tiempo empleado.

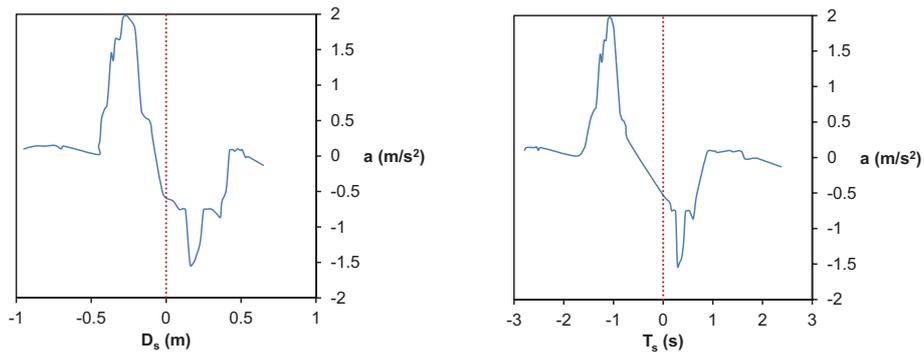
Como se observa en la Figura 103 y Figura 104, las velocidades de natación máximas se producen inmediatamente antes de atravesar la sección de la hendidura, pues es ahí donde la velocidad del agua alcanza su valor máximo. En cambio, las aceleraciones máximas se producen en la aproximación a la hendidura. Esto es debido a que los ejemplares parten de una zona de reposo y deben alcanzar un cierto nivel de velocidad para poder rebasar la sección ineludible de la hendidura. Mientras se desplazan por esta zona de mayor velocidad del agua, las variaciones de velocidad de natación son pequeñas. Por otra parte, la velocidad observada del pez es pequeña en relación con la velocidad del agua en la zona de la hendidura y en sus proximidades. En consecuencia, la velocidad de natación del pez es aproximadamente igual a la velocidad del agua

a lo largo de la trayectoria en esta zona.

Los valores promedio para la velocidad de natación y la aceleración máximas se muestran en la Tabla 25. En el caso de la trucha común, la velocidad máxima media es de 1.51 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 de 6.0 LC/s a 10.0 LC/s. Para las bogas, la velocidad de natación máxima promedio es de 1.47 m/s, que se corresponde con velocidades entre 7.4 y 14.7 LC/s. En el caso de los barbos, la velocidad máxima media es de 1.54 m/s. En este caso, si se expresa esta velocidad en función de las longitudes corporales, se obtiene un rango de variación de 4.4 a 5.1 LC/s. Como ya se ha señalado anteriormente, estas velocidades máximas de natación se alcanzan en la zona de la hendidura, debido a las altas velocidades de agua a las que se enfrenta en pez en esta región.

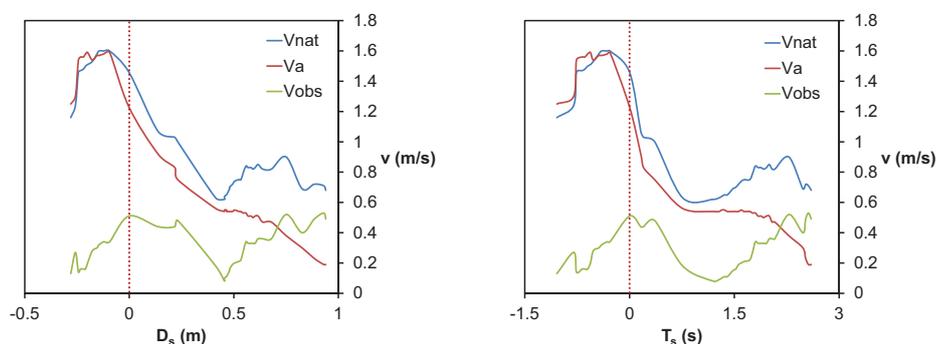


(a) Velocidad de natación del pez v_{nat} , velocidad observada del pez v_{obs} y velocidad del agua v_a (en módulo).

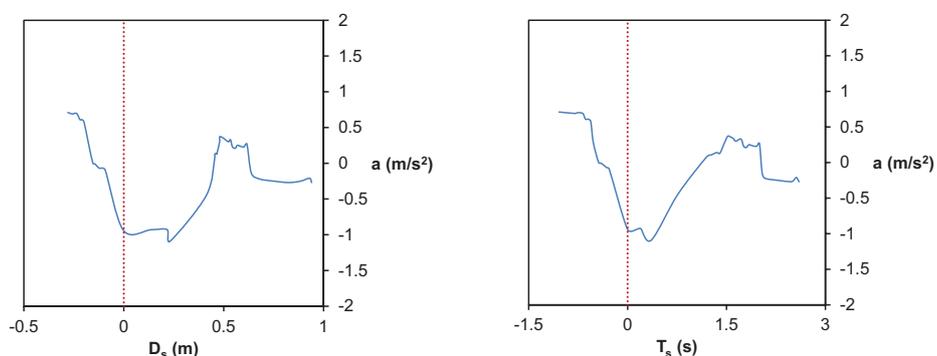


(b) Aceleración del pez a

Figura 103 Velocidades y aceleraciones calculadas para el pez que sigue la trayectoria del modo de ascenso 1 en la Figura 100. 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.



(a) Velocidad de natación del pez v_{nat} , velocidad observada del pez v_{obs} y velocidad del agua v_a (en módulo).



(b) Aceleración del pez a

Figura 104 Velocidades y aceleraciones calculadas para el pez que sigue la trayectoria del modo de ascenso 2 en la Figura 100. 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.

Tabla 25 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
Especie	Trucha	1.51	0.21	1.11	0.68
	Boga	1.47	0.20	1.07	0.81
	Barbo	1.54	0.22	1.02	0.56

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 como en los de barbo, no se supera el valor de 10LC/s propuesto por Bainbridge (1960) o Cowx y Welcomme (1998) como regla general para la velocidad máxima. Por el contrario, en el caso de la boga, las altas velocidades que son necesarias para atravesar la hendidura en relación con su talla (hasta 14.7 LC/s), muy por encima del rango de velocidades punta de 4 a 9 LC/s propuesto por Webb (1975) para los ciprínidos, podrían explicar sus dificultades para atravesar la escala.

5.3.4 Observaciones finales

En este estudio se propone una metodología para analizar el comportamiento de los peces en un modelo físico a tamaño real de una escala de peces de hendidura vertical. La metodología, que utiliza técnicas de visión e inteligencia artificial, se aplica a cinco ensayos diferentes con dos especies de ciprínidos (la boga del Tajo y el barbo común) y una especie de salmónidos (la trucha común). En los ensayos, fue posible reconstruir sus trayectorias e identificar las zonas realmente empleadas por los peces. Además, se calcularon sus velocidades y aceleraciones al pasar de una piscina a la siguiente, así como la frecuencia de uso y los tiempos de permanencia de las zonas de descanso. Por ello, se considera que la metodología proporciona una información valiosa y se estima interesante continuar con la experimentación en nuevas campañas de ensayos. En la actualidad, la campaña continúa de un modo sistemático, con otras especies.

En todas las grabaciones realizadas las tres especies ascienden por la escala realizando numerosos descansos en las zonas de recirculación que se producen a cada lado del flujo principal. Dentro de estas regiones, utilizan mayoritariamente las áreas situadas en la parte de aguas arriba de las piscinas, con unos tiempos de permanencia muy variables. Por el contrario, los ejemplares prácticamente no utilizan durante el remonte las zonas de recirculación situadas aguas abajo dentro de las piscinas. Los ejemplares se desplazan también por estas áreas de recirculación para pasar de un estanque al siguiente, evitando en la medida de lo posible el flujo principal, salvo en la zona estricta de la hendidura. Por ello, las velocidades de natación máximas se observan en la región de la hendidura y las aceleraciones máximas en la aproximación a ésta. Dado el limitado número de observaciones, los valores obtenidos en los ensayos deben ser tomados con cautela, aunque son acordes con los rangos encontrados en la literatura.

En consecuencia, los resultados muestran el potencial de la metodología para explorar las implicaciones del comportamiento de las distintas especies en el desarrollo de nuevos diseños de escalas de peces. Aunque es necesaria más investigación (mayor número de ejemplares y de especies, variaciones en los caudales circulantes, etc.) esta aproximación puede 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. 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 con 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 las necesidades de las distintas especies.

5.4 Evaluación general de los diseños

El diseño apropiado de una escala de peces de hendidura vertical 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 apartado se presenta una metodología genérica para evaluar la bondad de los distintos diseños desde este punto de vista. La metodología utiliza los campos de velocidades y las curvas de descarga obtenidas con el modelo numérico en los distintos diseños en el estudio hidrodinámico. Asimismo, para cuantificar la capacidad de natación de los peces considera las curvas de fatiga, que relacionan las velocidades del agua con la distancia que pueden recorrer, y las velocidades punta de natación para distintas especies. Además, también se tienen en cuenta los niveles máximos de potencia disipada por unidad de volumen recomendados para las distintas especies y sus necesidades de calado mínimo. Cabe destacar que para facilitar la utilización de la metodología, los resultados obtenidos se han incorporado a una aplicación informática que se presenta en el apartado 5.4.3.

Teniendo en cuenta la complejidad de los fenómenos hidráulicos y biológicos involucrados en el remonte de una escala de peces, esta metodología no pretende determinar un diseño óptimo, sino establecer una forma objetiva para comparar distintos diseños, considerando no sólo aspectos hidráulicos sino también cuantificando aspectos biológicos de las especies objetivo.

5.4.1 Metodología

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 condiciones en la escala deben ser tales que los nadadores más débiles sean capaces de atravesarlas. Como ya se ha señalado anteriormente, las velocidades de natación de los peces varían ampliamente, en relación con factores biológicos y físicos. La velocidad de natación depende de la longitud corporal (Beamish, 1978; Hammer, 1995) y varía con 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). Si las

velocidades del agua exceden su capacidad natatoria el pez se fatigará, lo que impedirá su remonte a través de la escala.

Por todo ello, 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 calculado con el modelo numérico. 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 105). No obstante, los peces son capaces de utilizar las zonas de menores velocidades dentro de las piscinas para avanzar, tal y como se ha puesto de manifiesto en el estudio biológico (Figura 106). Sin embargo, dada la ausencia de datos sobre las trayectorias reales seguidas por los ejemplares en otros diseños de escalas de peces de hendidura vertical, se opta por emplear en lo que sigue la trayectoria definida por la línea de corriente que atraviesa las hendiduras verticales.

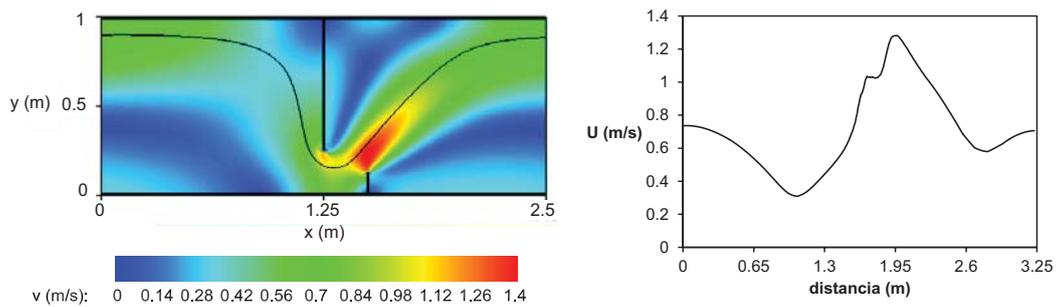


Figura 105 Campo de velocidades (m/s) (izquierda) y perfil de velocidades (derecha) a lo largo de una de las trayectorias más restrictivas en el diseño D4_10 tipo I.

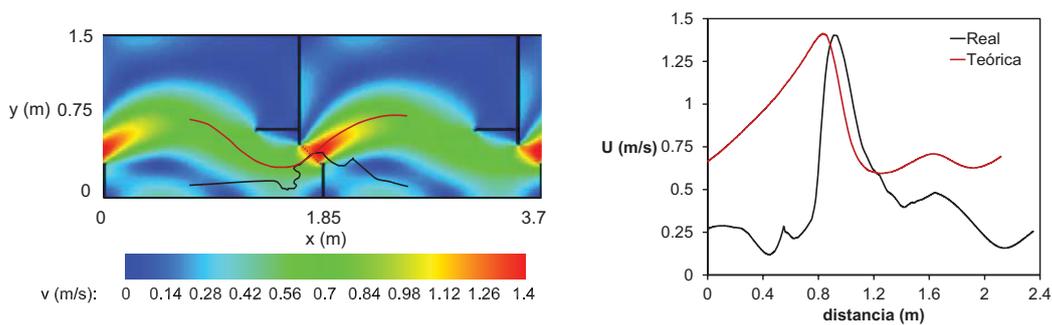


Figura 106 Campo de velocidades (izquierda) y perfil de velocidades (derecha) a lo largo de una de las trayectorias más restrictivas y de una trayectoria real seguida por un ejemplar de trucha común en el dispositivo del estudio biológico experimental.

A partir de dicha trayectoria, en el presente trabajo se consideran dos restricciones de fatiga. La primera analiza el esfuerzo que el pez debe hacer para atravesar la hendidura vertical. Esta restricción se evalúa comparando la velocidad máxima del agua en toda la trayectoria (U_{\max}) con la velocidad punta del pez objetivo. Aunque se ha optado por considerar directamente la velocidad máxima en toda la trayectoria, también sería posible utilizar para comparar la velocidad media del agua en la hendidura, definida en el apartado 5.2.2. Este criterio sería igualmente válido a efectos de comparación entre diseños, aunque sería menos restrictivo.

Debido a la falta de datos sobre las velocidades punta de natación para los salmónidos y ciprínidos ibéricos, se utiliza la regla de 10LC/s comentada en el capítulo 2 para el cálculo de dichas velocidades (Bainbridge, 1960; Hammer, 1995). Esta regla sitúa la velocidad punta en la región de 10 LC/s, donde LC es la longitud corporal del pez, independientemente de la especie considerada. Como se ha visto en el caso de los ensayos con bogas, es una regla segura, ya que se han detectado pasos en los que se rebasan los 14 LC/s.

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 ello, la segunda restricción considera el esfuerzo que el pez debe hacer para remontar una piscina completa sin descanso. Se ha limitado la distancia a recorrer por el pez a una única piscina en base al comportamiento observado en los ensayos del estudio biológico. En dichos ensayos se comprueba que los ejemplares realizan frecuentes descansos durante el ascenso en las zonas de recirculación de las piscinas, y que son contados los casos en los que un ejemplar sube más de dos estanques seguidos. No obstante, se podría fijar la distancia a recorrer por el pez en varias piscinas o incluso la escala completa, siguiendo un procedimiento análogo al que se muestra a continuación.

El modelo considera el gasto energético necesario para remontar una piscina completa, además del esfuerzo necesario para atravesar la hendidura. Para ello, es necesario conocer la relación entre las velocidades de natación y el tiempo de fatiga, mediante las denominadas curvas de fatiga. En este caso, las curvas de fatiga consideradas (en ausencia de curvas específicas para especies ibéricas) son las definidas por Elvira et al. (2008), genéricas para salmónidos y ciprínidos y temperatura media del agua (Figura 107). Estas curvas de fatiga permiten calcular 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:

$$D_{\max} = -c \cdot \exp\left(\frac{U}{c} - \frac{a}{c}(\text{LC})^b - 1\right) \quad (5.8)$$

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 este estudio, aunque se podrían aplicar, en su caso, coeficientes específicos para cada especie usando esta misma metodología.

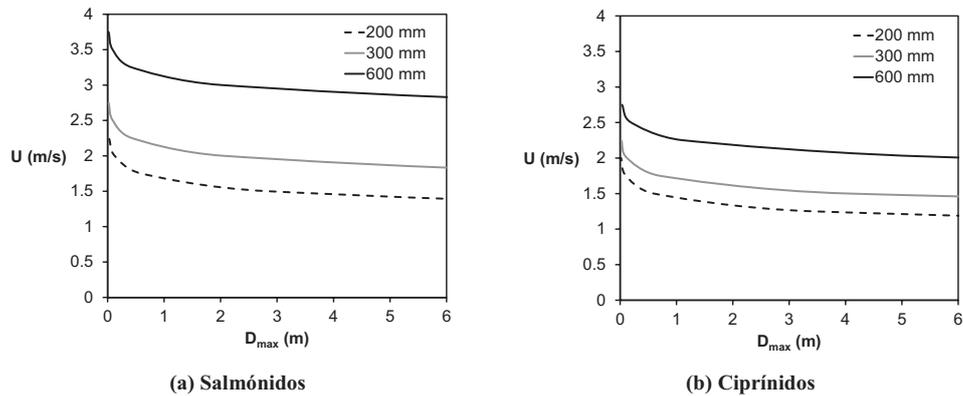


Figura 107 Curvas de fatiga para distintas tallas (200, 300 y 600 mm) de salmónidos y ciprínidos. Resultados de Elvira et al. (2008).

Teniendo en cuenta que las curvas de fatiga se definen para una velocidad de la corriente constante, mientras que la velocidad del agua a lo largo de la trayectoria es variable, es necesario calcular una velocidad equivalente constante a partir del perfil de velocidades de la trayectoria para poder aplicar la Ecuación 5.8.

Esta velocidad equivalente puede ser definida de diferentes formas. Se puede considerar que el pez nada a una velocidad constante mayor que la velocidad máxima del agua a lo largo de la trayectoria. De esta forma, la velocidad absoluta del pez sería variable, ya que la velocidad del agua varía a lo largo de la trayectoria. No obstante, se trata de un criterio muy restrictivo, ya que la velocidad del agua máxima que se produce en la hendidura es muy superior a la velocidad media de la trayectoria (Figura 105). Además, según lo observado en los pasos de hendidura del estudio biológico, la velocidad de natación del pez es aproximadamente igual a la velocidad del agua en las proximidades de la hendidura, por lo que la velocidad de natación se reduce significativamente una vez atravesada la zona estricta de la hendidura (Figura 103 y Figura 104).

En este trabajo se busca calcular una velocidad equivalente que sea representativa del esfuerzo global que el pez debe hacer para remontar la escala. Así, el esfuerzo realizado por el pez para nadar contra el perfil variable de velocidades de la corriente debe ser el mismo que para nadar contra un perfil constante de velocidad equivalente. 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:

$$E = K \cdot U_1^2 \cdot L_1 + K \cdot U_2^2 \cdot L_2 + \dots + K \cdot U_n^2 \cdot L_n = K \cdot U_{eq}^2 \cdot L_t \quad (5.9)$$

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 5.9 se reduce a:

$$U_{eq} = \sqrt{\frac{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_n^2}{n}} \quad (5.10)$$

La trayectoria seleccionada debe ser representativa del esfuerzo que el pez debe hacer para remontar toda una piscina sin descanso. En este caso se ha seleccionado la trayectoria cuya longitud (L_{t2}) es igual a la longitud de la línea de corriente que atraviesa la hendidura vertical en una piscina, y su velocidad equivalente se denomina U_{eq} . En el caso de que se disponga de datos de trayectorias reales, como en el caso del diseño estudiado experimentalmente en el estudio biológico, estas variables se calcularían de la misma forma.

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 5.7. Como referencia de los valores máximos recomendados para la potencia disipada por unidad de volumen, Larinier et al. (2002) y Bates (2000) consideran 200 W/m^3 para pasos de peces especialmente destinados para salmónidos, aunque este valor umbral se puede aumentar hasta los 400 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 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 ha adoptado un valor máximo de 200 W/m^3 para pasos cuya especie objetivo sean salmónidos y 150 W/m^3 para no salmónidos.

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, siendo ésta del orden del 32% de la longitud de horquilla para juveniles de salmón (ADF&G y ADOT&PF, 2001). Así, el calado mínimo resultante es aproximadamente el 80% de la talla del pez. En otras recomendaciones para estos dispositivos, el límite inferior del calado se sitúa entre 0.24 m y 0.30 m para salmónidos adultos (Hotchkiss y Frei, 2007 ó Bates et al., 2003). En el caso concreto de las escalas de hendidura vertical, el estudio llevado a cabo por Teijeiro et al. (2006) sugiere un calado mínimo para el paso de trucha de 40 cm, que se incrementa hasta 50 cm para el caso del salmón. Teniendo en cuenta todas estas recomendaciones y con un enfoque conservador, en este trabajo se establece un calado mínimo de 50 cm independientemente de la especie y talla. Además, hay que tener en cuenta que este calado mínimo se evalúa en el centro de piscina, pero que el calado será ligeramente menor aguas arriba de dicha sección central (Figura 108). En todo caso, este valor puede adaptarse en el caso concreto de que no sea posible garantizar este calado.

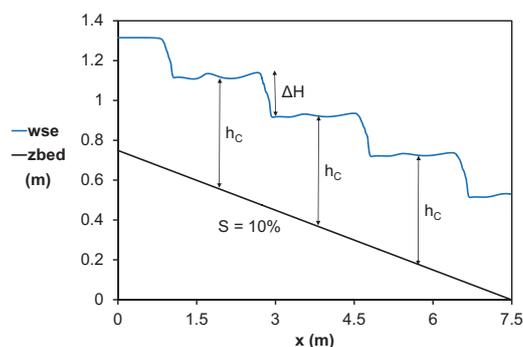


Figura 108 Altura de la lámina de agua siguiendo una línea de corriente en el diseño D8_15 (tipo I) con una pendiente del 10%, x= dirección longitudinal de la escala.

Una vez fijado este valor, es posible identificar los caudales mínimos que proporcionan dichos calados aceptables utilizando las curvas de descarga de cada diseño (Ecuación 5.5 y Tabla 14). De esta forma, es posible fijar la anchura de hendidura para una escala por la que circulará un determinado rango de caudales. En general, el caudal de diseño es una fracción del caudal del río dentro del rango 1-5% (Larinier et al., 1998). No obstante, el diseño de la anchura de hendidura también debe tener en cuenta la fauna ictiológica presente y sus necesidades de espacio. Para la trucha común, los ciprínidos y peces pequeños, anchuras de hendidura de 0.15 a 0.17 m son suficientes, mientras que para grandes salmónidos y en grandes ríos con altos caudales se recomiendan anchuras de hendidura entre 0.3 y 0.6 m (FAO/DVWK, 2002).

Por último, cabe señalar que es posible incluir en esta metodología restricciones relacionadas con otras variables, siempre que se explore la relación entre dichas variables y el comportamiento del

pez. Propiedades del flujo como la distribución y escala de la turbulencia, el tamaño de remolino o la vorticidad parecen ser importantes para un paso de peces efectivo (Hotchkiss, 2002; Katopodis, 2005; Odeh et al., 2002; Pavlov et al., 2000), aunque en la actualidad poco se sabe acerca de su influencia real en el remonte de los peces. Debido a la escasa información disponible sobre la influencia de estas variables, se ha optado por limitar la metodología a las cuatro restricciones explicadas hasta el momento (Tabla 26).

Tabla 26 Resumen de las restricciones consideradas en la metodología. Se indican las variables empleadas para evaluar la adecuación de las propiedades hidrodinámicas de la escala a los requisitos del pez objetivo.

Restricción	Caracterización hidráulica	Caracterización biológica
I	Velocidad máxima del agua en la trayectoria (U_{max})	Velocidad punta del pez objetivo
II	Velocidad equivalente del agua en la trayectoria (U_{eq})	Curva de fatiga del pez objetivo
III	Potencia disipada por unidad de volumen en las piscinas (E)	Recomendaciones de potencia disipada por unidad de volumen máxima
IV	Calado en las piscinas (h_C)	Recomendaciones de calado mínimo

5.4.2 Aplicación de la metodología

En esta sección se examina el procedimiento para identificar los diseños apropiados de escalas de hendidura vertical en vista de las capacidades de natación de los peces, sus necesidades de calado y sus requisitos en relación con la energía disipada en forma de turbulencias. El modelo aplica cuatro restricciones diferentes, que pueden clasificarse en dos restricciones de velocidad, una restricción de turbulencia y una restricción de calado.

A continuación se explican las dos restricciones relacionadas con el campo de velocidades. Las velocidades mostradas en esta sección para cada uno de los diseños analizados han sido obtenidas a partir del campo de velocidades calculado con el modelo hidrodinámico bidimensional descrito en el capítulo 3. Dado que el modelo no ha sido validado para pendientes mayores del 10%, los resultados deben ser tomados con cautela para pendientes mayores. Por otra parte, cabe señalar que no se han incluido los diseños del estudio hidrodinámico con $L=2.5b$ (los diseños D2_2.5, D2.67_2.5, D4_2.5, D8_2.5 del tipo I). Se trata de diseños con una relación L/b muy pequeña, en comparación con los rangos habituales de L/b , y que se consideran poco viables desde el punto de vista constructivo y económico por el gran número de deflectores. No obstante, en estos diseños se podría aplicar igualmente la metodología.

La primera restricción es la que relaciona la velocidad punta del pez con la velocidad máxima del agua. Para incorporar esta limitación en el modelo, se define una velocidad máxima del flujo adimensional basándose en la Ecuación 5.3, de la siguiente forma:

$$U_{\max}^* = \frac{U_{\max}}{\sqrt{2gSL}} \quad (5.11)$$

donde U_{\max} es la velocidad máxima a lo largo de la trayectoria, S es la pendiente de la escala y L es la longitud de la piscina.

La máxima velocidad adimensional a lo largo de la trayectoria restrictiva se muestra en la Tabla 27 para cada diseño. En los diseños tipo II y tipo III, la velocidad máxima adimensional U_{\max}^* parece ser prácticamente independiente de las dimensiones geométricas de las piscinas, con una variación del orden del 20% en los diseños analizados. Por otra parte, en los diseños tipo I y tipo IV, parece aumentar ligeramente con la ratio entre la longitud y anchura de piscina (L/B), como se observa en la Figura 109. No obstante, aparecen ciertas discrepancias en los valores de U_{\max}^* en los diseños tipo I con relaciones L/B menores ($L/B < 2$).

Esta primera restricción 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 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.

Posteriormente, el segundo criterio relaciona el campo de velocidades con las curvas de fatiga. Con el objetivo de aplicar estas curvas, las velocidades equivalentes y distancias recorridas de esta segunda restricción se muestran en la Tabla 27 para cada diseño. Tanto las velocidades como las longitudes se adimensionalizan para poder obtener el campo de flujo en otras situaciones con la misma geometría que la considerada en el estudio hidrodinámico, pero diferentes dimensiones globales. Así, la velocidad equivalente adimensional se define de la siguiente forma:

$$U_{eq}^* = \frac{U_{eq}}{\sqrt{2gSL}} \quad (5.12)$$

donde U_{eq} es la velocidad equivalente (Ecuación 5.10), S es la pendiente de la escala y L es la longitud de piscina. De la misma forma, se calcula el cociente entre la longitud de la trayectoria L_{t2} y la longitud de piscina L , como se muestra en la Tabla 27.

En relación con la velocidad equivalente adimensional U_{eq}^* , se obtienen valores mayores en los diseños tipo II y tipo III, en comparación con los diseños tipo I y tipo IV. A modo de ejemplo, en la Figura 110 se muestran los campos de velocidad de 4 diseños con la misma longitud y anchura de piscinas, y las velocidades son ligeramente mayores en los diseños tipo II y tipo III.

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 primera restricción, se obtiene una velocidad equivalente U_{eq} de 1 m/s a partir de la Tabla 27. Esta velocidad equivalente, introducida en la curva de fatiga (Ecuación 5.8) 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 segunda restricción el valor de la longitud de la trayectoria L_{12} debe estar por debajo de 5.9 m. Dado que el cociente L_{12}/L es de 1.18 en un diseño D4_5 tipo I (Tabla 27), 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 segunda condición.

La tercera restricción limita los niveles de turbulencia y aireación en las piscinas estableciendo valores máximos de la potencia disipada por unidad de volumen en función de las especies objetivo. En este caso, la potencia disipada por unidad de volumen debe ser inferior a 200 W/m^3 para pasos cuya especie objetivo sean salmónidos y a 150 W/m^3 en el caso de no salmónidos. Como se ha comentado anteriormente, la potencia disipada por unidad de volumen E puede definirse de la siguiente forma:

$$E = C_q \cdot \rho \cdot \sqrt{S^3 \cdot g^3 \cdot L} \cdot \frac{b}{B} \quad (5.13)$$

donde C_q es el coeficiente de descarga, S es la pendiente de la escala, L es la longitud de piscina y b es la anchura de hendidura. En la Tabla 28 se recogen los valores del coeficiente de descarga C_q considerados en cada diseño, que han sido calculados previamente en el estudio hidrodinámico.

Continuando con el ejemplo anterior del diseño D4_5 tipo I para ciprínidos, la tercera restricción limita la longitud de piscina a 1.93 m para obtener una potencia disipada por unidad de volumen inferior a 150 W/m^3 . Por tanto, en este ejemplo esta última condición sería más limitante que las dos restricciones de velocidad.

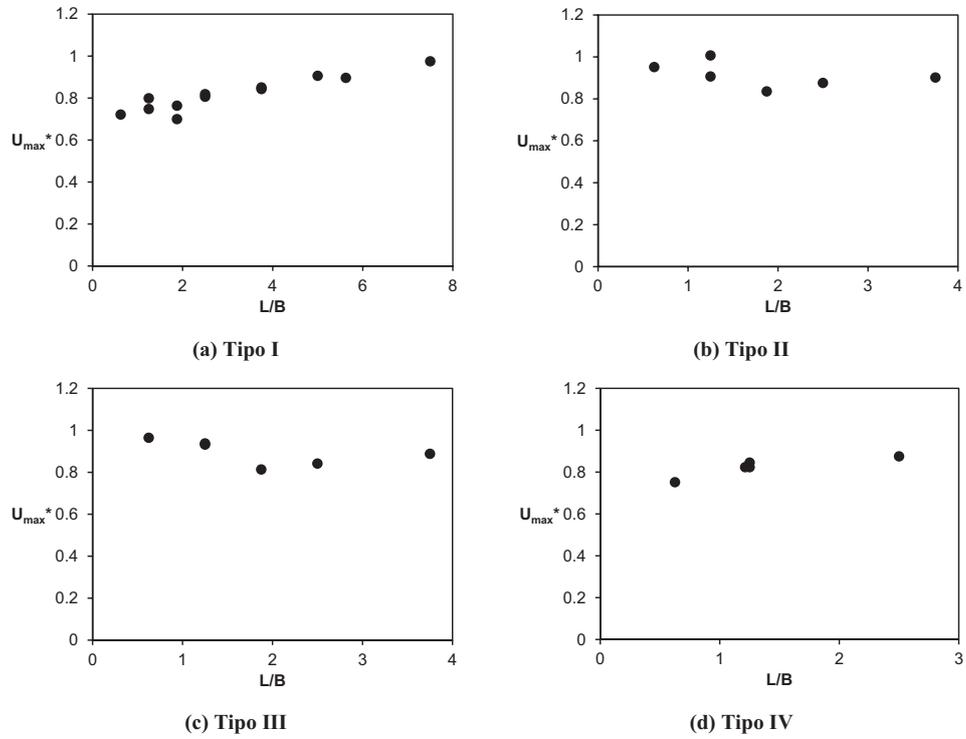


Figura 109 Variación de la velocidad máxima adimensional U_{max}^* con la ratio entre la longitud de piscina L y la anchura de piscina B.

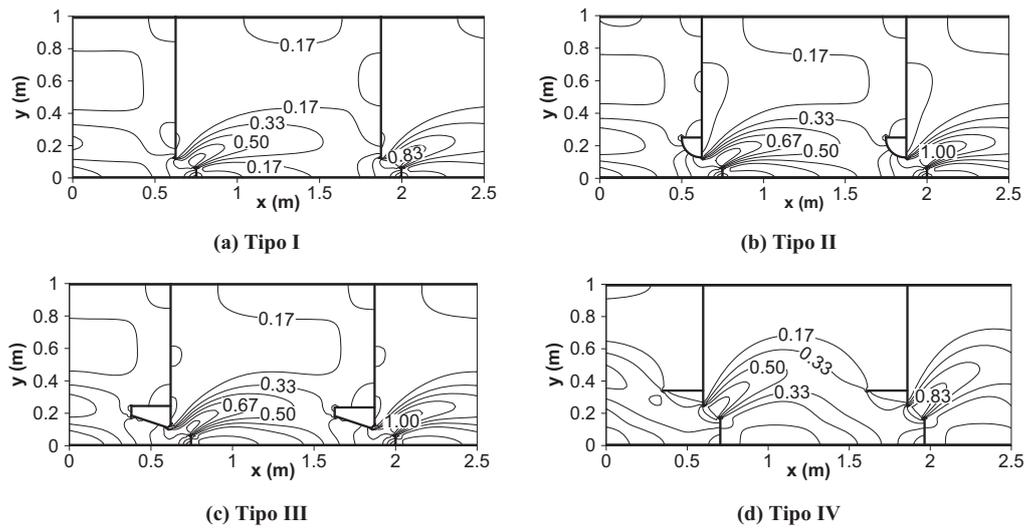


Figura 110 Campo de velocidades (m/s) para los diseños D8_10 con la misma anchura de hendidura.

Tabla 27 Velocidades del agua adimensionales U_{\max}^* , U_{eq}^* y ratio L_{t2}/L (longitud de la trayectoria/longitud de piscina) para las dos restricciones de velocidad analizadas para cada diseño.

Tipo	Diseño	Restricción I		Restricción II	
		U_{\max}^*	U_{eq}^*	L_{t2}/L	
I	D2_5	0.81	0.63	1.17	
	D2_10	0.91	0.60	1.06	
	D2_15	0.98	0.59	1.04	
	D2.67_5	0.70	0.50	1.32	
	D2.67_10	0.85	0.51	1.12	
	D2.67_15	0.90	0.49	1.07	
	D4_5	0.75	0.51	1.18	
	D4_10	0.82	0.48	1.29	
	D4_15	0.84	0.44	1.16	
	D8_5	0.72	0.52	1.13	
	D8_10	0.80	0.48	1.05	
	D8_15	0.76	0.37	1.49	
II	D4_5	0.91	0.71	1.08	
	D4_10	0.88	0.54	1.23	
	D4_15	0.90	0.49	1.13	
	D8_5	0.95	0.74	1.07	
	D8_10	1.01	0.66	1.04	
	D8_15	0.84	0.42	1.46	
III	D4_5	0.94	0.76	1.08	
	D4_10	0.84	0.55	1.30	
	D4_15	0.89	0.51	1.15	
	D8_5	0.96	0.77	1.07	
	D8_10	0.93	0.64	1.06	
	D8_15	0.81	0.43	1.61	
IV	D4_5	0.82	0.59	1.15	
	D4_10	0.87	0.59	1.17	
	D6.25_7.58	0.82	0.49	1.24	
	D8_5	0.75	0.57	1.06	
	D8_10	0.84	0.46	1.25	

Tabla 28 Coeficiente de descarga C_q para los 29 diseños considerados.

	Diseño	C_q		Diseño	C_q		Diseño	C_q
Tipo I	D2_5	0.77	Tipo II	D4_5	0.96	Tipo IV	D4_5	1.03
	D2_10	0.85		D4_10	1.00		D4_10	1.12
	D2_15	0.84		D4_15	0.98		D6.25_7.58	1.06
	D2.67_5	0.73		D8_5	1.02		D8_5	0.88
	D2.67_10	0.81		D8_10	1.09		D8_10	1.08
	D2.67_15	0.82		D8_15	1.00			
	D4_5	0.76	Tipo III	D4_5	0.95			
	D4_10	0.79		D4_10	0.98			
	D4_15	0.81		D4_15	0.95			
	D8_5	0.78		D8_5	0.88			
	D8_10	0.85		D8_10	0.96			
	D8_15	0.81		D8_15	0.91			

Por último, para aplicar la restricción de calado, se identifican los caudales mínimos que proporcionan calados mínimos aceptables para los peces. Para ello se utilizan directamente las curvas de descarga analizadas en el apartado 5.2.3, de la forma:

$$Q = C_q \cdot \sqrt{g \cdot S \cdot L} \cdot b \cdot h_c \quad (5.14)$$

donde Q es el caudal, C_q es el coeficiente de descarga y h_c es el calado en el centro de piscina. En la Tabla 28 se recogen los valores del coeficiente de descarga C_q considerados en cada diseño.

Como se ha señalado anteriormente, esto permite una estimación, para cada diseño y anchura de hendidura, del caudal mínimo para garantizar un calado aceptable para los peces. Continuando con el ejemplo previo del diseño D4_5 tipo I, al fijar la longitud de piscina L en 1.93 m se obtiene una anchura de hendidura de 0.39 m ($L=5b$ en este diseño). Este valor cumple con las dimensiones mínimas recomendadas por FAO/DVWK (2002), que fija en 0.15 m la anchura de hendidura suficiente para ciprínidos (apartado 5.4.1). Con estas dimensiones geométricas, los caudales circulantes deben ser mayores a 0.17 m³/s para conseguir un calado superior a 0.5 m en el centro de piscina.

5.4.3 Aplicación informática

En esta sección se presenta una aplicación informática basada en la metodología desarrollada en el apartado 5.4.1. Se trata de una herramienta de diseño que relaciona las características hidrodinámicas de las escalas de peces de hendidura vertical con los requisitos de las distintas especies objetivo. Así, la herramienta facilita el manejo de los resultados mostrados en el apartado 5.4.2. Teniendo en cuenta la complejidad de los fenómenos hidráulicos y biológicos involucrados, no se pretende determinar un diseño de escala óptimo, sino que se busca establecer criterios de comparación objetivos que incorporen aspectos tanto hidráulicos como biológicos.

La aplicación puede ser utilizada para el análisis de una escala de peces ya existente o en el proceso de diseño de una nueva y, en consecuencia, puede ser ejecutada en dos modos: diseño y verificación. Permite al usuario escoger entre un amplio rango de dimensiones geométricas de las piscinas y la hendidura, y entre dos familias de peces: los salmónidos y los ciprínidos. Si se emplea como herramienta de diseño, proporciona posibles modelos de escalas que cumplen todos los requisitos presentados en las secciones 5.4.1 y 5.4.2.

En el modo de diseño (Figura 111), los datos de entrada que debe introducir el usuario son los siguientes:

- La altura total del obstáculo en el que se ubica la escala
- Especies objetivo (bien salmónidos o ciprínidos)
- La talla del pez
- El tipo de diseño (a escoger entre tipo I, II, III y IV)

Dados estos datos, la aplicación impone la restricción de velocidad máxima, la condición de fatiga (velocidad de U_{eq}^* con una distancia recorrida de L_{12}/L) y la limitación de turbulencia para todos los diseños del tipo seleccionado. En consecuencia, proporciona un rango de posibles longitudes de piscina L , anchuras de piscina B , pendientes de la escala S y anchuras de hendidura b . Entonces, el usuario puede fijar los valores específicos para dichos parámetros dentro de sus respectivos rangos. Dependiendo de qué parámetros sean fijados por el usuario, la aplicación se comporta según el diagrama mostrado en la Figura 112.

Una vez que la aplicación verifica que las dimensiones seleccionadas cumplen los requisitos de velocidad y turbulencia, el código analiza las necesidades de calado (y caudal, por tanto). La aplicación muestra el caudal mínimo aceptable para un calado en el centro de piscina de 0.5 m,

que es el valor mínimo de calado establecido por defecto en la aplicación. El usuario puede modificar este valor mínimo e introducir también un calado máximo, así la aplicación proporciona el rango aceptable de caudales. Además, la aplicación calcula otras dimensiones geométricas como la longitud total de la escala L_T , la ratio L/B (longitud/anchura de piscina) o el número de piscinas del diseño seleccionado.

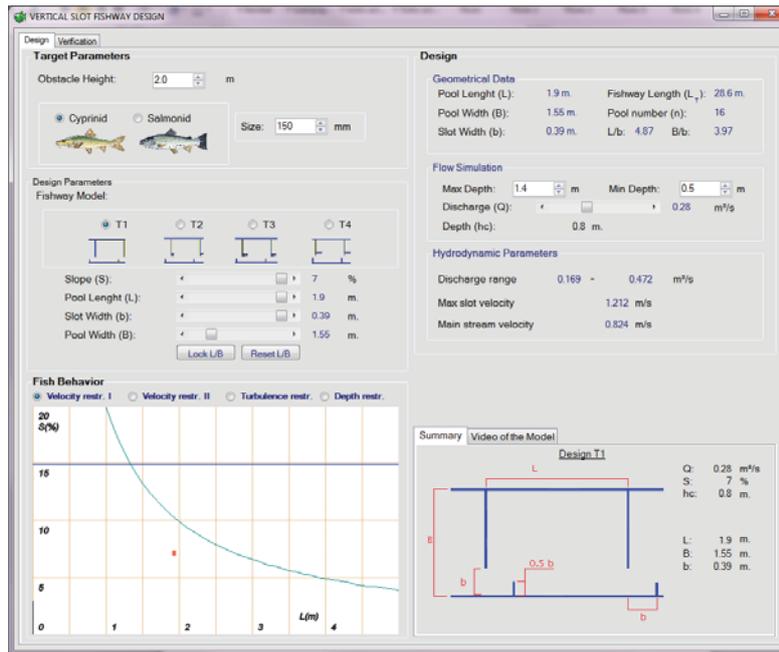


Figura 111 Captura de pantalla de la pestaña de diseño de la aplicación.

Adicionalmente, todas las restricciones se representan de forma gráfica. En la Figura 113 se muestra una salida del modelo, correspondiente al ejemplo desarrollado a lo largo del texto. La primera restricción de velocidad (Figura 113a) relaciona la pendiente de la escala con la longitud de piscina, y el punto (L, S) señalado es el correspondiente a las características geométricas seleccionadas. En la segunda restricción de velocidad (Figura 113b) se representa la curva de fatiga de la familia y talla objetivo, así como el punto (L_{t2}, U_{eq}) , que refleja las condiciones del flujo en la escala. Para que se cumplan las restricciones de velocidad, los puntos (S, L) y (L_{t2}, U_{eq}) deben estar situados por debajo de las curvas en el gráfico correspondiente. En el caso de la tercera restricción (Figura 113c) se representa gráficamente la variación de potencia disipada por unidad de volumen con la pendiente de la escala para el diseño seleccionado y se sitúa en el gráfico el punto (S, E) correspondiente a la pendiente escogida. En línea discontinua se señala el máximo valor de potencia disipada por unidad de volumen recomendado para las especies objetivo. Por último, una vez fijadas las características geométricas de las piscinas se representa

la restricción de calado (Figura 113d), con la que se define el rango de caudales (Q_{\min} , Q_{\max}) que proporcionan calados en el rango ($h_{C\min}$, $h_{C\max}$). En este modo de funcionamiento, el diseño seleccionado cumple siempre las cuatro restricciones.

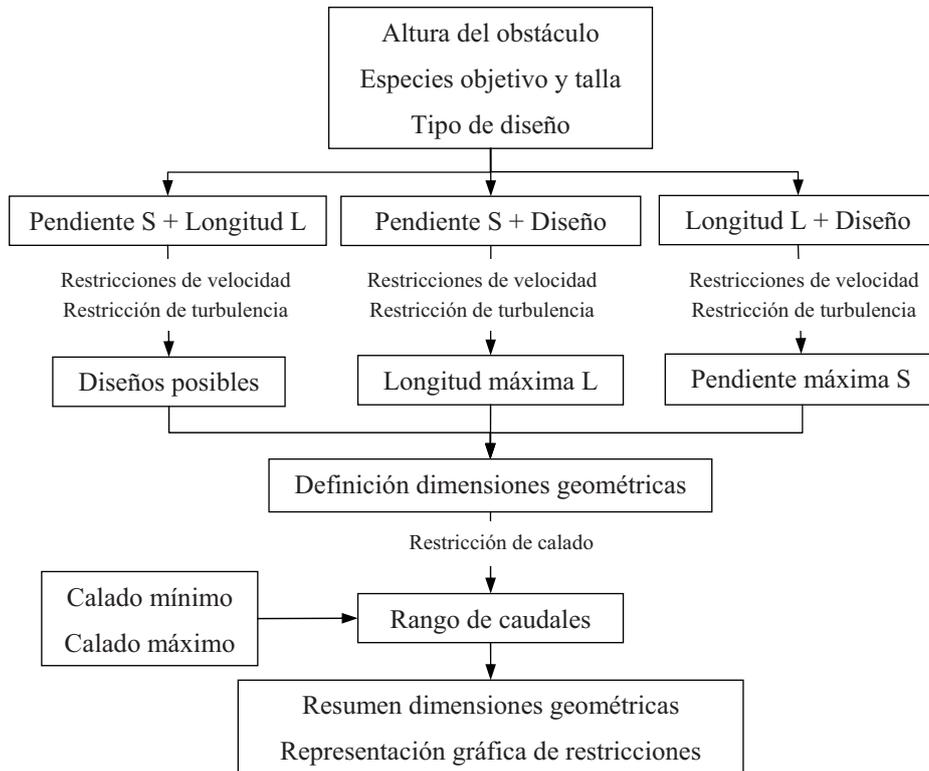


Figura 112 Esquema de funcionamiento de la aplicación.

En el modo de verificación el usuario puede introducir directamente todas las dimensiones geométricas: pendiente de la escala, tipo de diseño, longitud de piscina, anchura de hendidura y anchura de piscina. Una vez introducidas las especies objetivo y su talla, se comprueban las condiciones de velocidad y turbulencia y se representan gráficamente, como se muestra en la Figura 114. Los requisitos de calado se analizan como en el modo de diseño, tras fijar el usuario un caudal circulante y un calado mínimo y máximo.

Para todo ello, el programa comprueba que el diseño se encuentra dentro de los rangos de dimensiones geométricas estudiadas y, en su caso, aproxima el valor de U_{\max}^* , U_{eq}^* , L_{t2}/L y C_q a partir de los datos disponibles en diseños similares. En la primera restricción de velocidad se comprueba que el producto $S \times L$ proporciona una velocidad máxima inferior a 10 LC/s. A continuación, se compara el valor de L_{t2} con la distancia teórica que los peces objetivo son

capaces de recorrer con las condiciones de flujo presentes en la escala. En la tercera restricción se evalúa la potencia disipada por unidad de volumen en las piscinas y en la última se analiza el calado proporcionado por el caudal circulante introducido por el usuario. Dicho valor del calado debe estar entre el valor mínimo (por defecto 0.5 m) y el máximo indicado por el usuario.

Datos de entrada		Salida numérica	
Altura del obstáculo (m)	2.0	L (m)	1.93
Especies objetivo	Ciprínidos, 150 mm	B (m)	1.54
Tipo de diseño	I	b (m)	0.39
		L/B	1.25
Diseño	D4_5	Q (m ³ /s)	(0.17, 0.47)
S (%)	7.0	L _T (m)	28.6
Calado máximo (m)	1.4	Nº piscinas	15

Salida gráfica

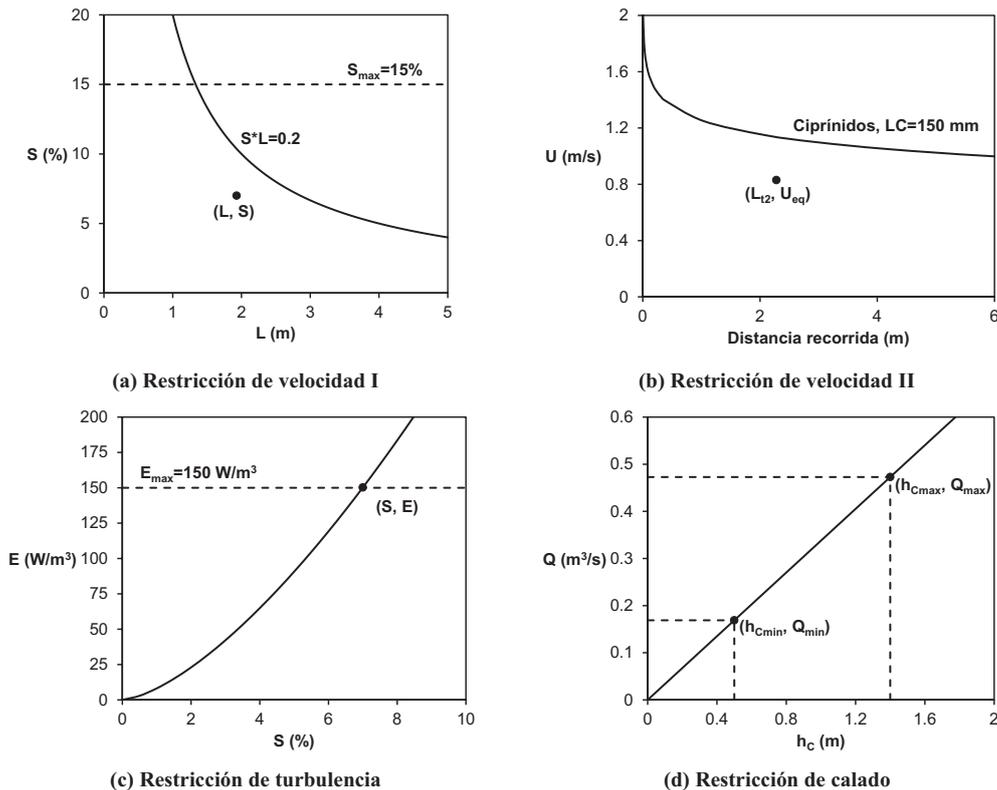


Figura 113 Ejemplo de salida de la aplicación en el modo de diseño. Las líneas continuas representan las restricciones de velocidad (a y b), la variación de la potencia disipada por unidad de volumen con la pendiente para el diseño seleccionado (c) y la relación entre el caudal y el calado en el centro de piscina (d). Los puntos representan las condiciones del flujo y las características de la escala.

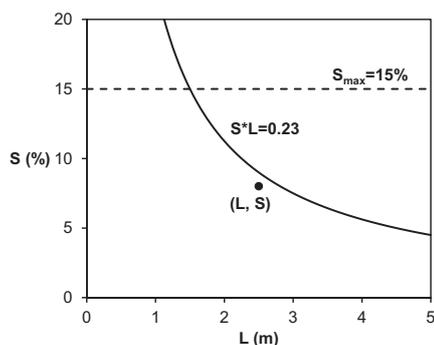
Datos de entrada

Especie objetivo	Salmónidos, 200 mm	L (m)	2.50
Tipo de diseño	II	B (m)	1.50
S (%)	8.0	b (m)	0.25
Caudal (m ³ /s)	0.3		
Calado máximo (m)	1.3		

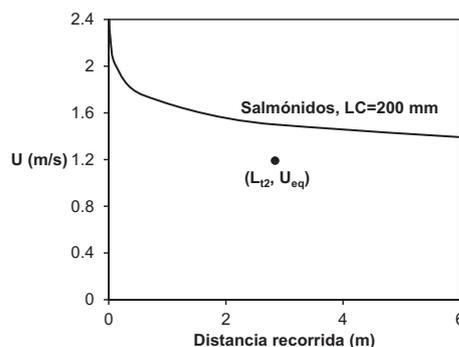
Salida numérica

Restricción de velocidad I	$S \times L = 0.2 \text{ m} < 0.23 \text{ m}$	Cumple
Restricción de velocidad II	$L_{t2} = 2.84 \text{ m} < D_{\text{max}} = 20 \text{ m}$	Cumple
Restricción de turbulencia	$E = 191 \text{ W/m}^3 < 200 \text{ W/m}^3$	Cumple
Restricción de calado	$0.5 \text{ m} < h_c = 0.82 \text{ m} < 1.3 \text{ m}$	Cumple

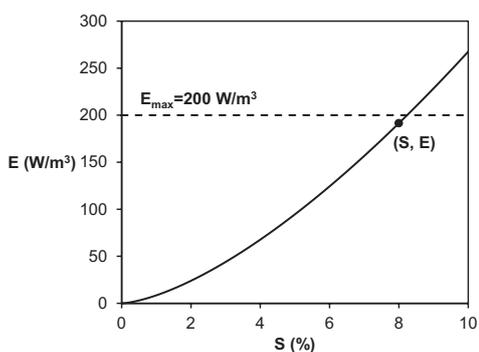
Salida gráfica



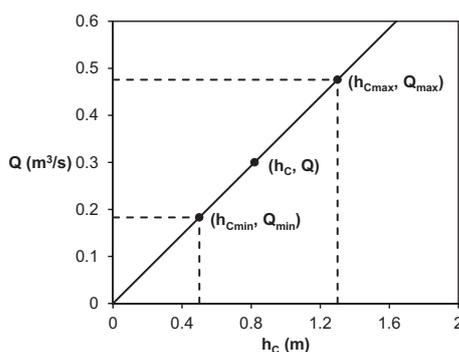
(a) Restricción de velocidad I



(b) Restricción de velocidad II



(c) Restricción de turbulencia



(d) Restricción de calado

Figura 114 Ejemplo de salida de la aplicación en el modo de verificación. Las líneas continuas representan las restricciones de velocidad (a y b), la variación de la potencia disipada por unidad de volumen con la pendiente para el diseño seleccionado (c) y la relación entre el caudal y el calado en el centro de piscina (d). Los puntos representan las condiciones del flujo y las características de la escala.

Por último, se muestra en la Figura 115 la evaluación del diseño de escala de hendidura vertical del estudio biológico (descrito en el apartado 4.3.1), con el objetivo de comparar los resultados experimentales obtenidos en los ensayos con los resultados esperables según la evaluación biológica del dispositivo. Se ha considerado en cada especie el ejemplar de menor talla, puesto que siguiendo la metodología éste será el más débil y el que tendrá mayores dificultades para remontar la escala. Así, se evalúa la idoneidad del dispositivo para truchas de 150 mm, bogas de 100 mm y barbos de 300 mm.

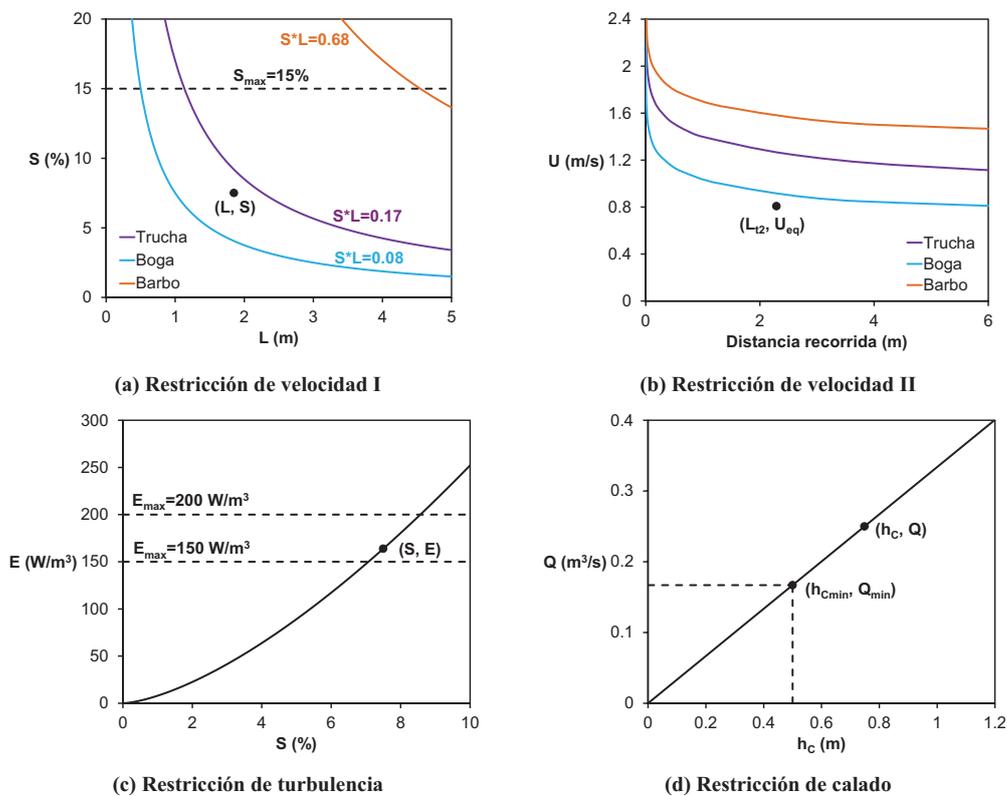


Figura 115 Salida gráfica de la aplicación considerando el diseño del estudio biológico y las tres especies ensayadas.

La primera restricción de velocidad, referida al paso por la hendidura, se cumple para las truchas y los barbos, pero no para las bogas. En cambio, la segunda restricción de velocidad se verifica para las tres especies, aunque en el caso de las bogas con un margen más estrecho. En relación con la turbulencia, la energía disipada por unidad de masa está por debajo de $200 W/m^3$, límite recomendado para salmónidos (trucha en este caso), pero supera el valor de $150 W/m^3$ recomendado para ciprínidos (bogas y barbos en este caso). Finalmente, los calados en la escala superan el calado mínimo de 0.5 m.

Estos resultados podrían explicar las bajas tasas de remonte obtenidas en las bogas de menor talla (en el rango 10-15 cm), únicamente del 8% (Figura 98). Tanto las velocidades en la hendidura como los niveles de turbulencia superan los límites recomendados para esta especie y rango de tallas.

5.4.4 Observaciones finales

En este apartado se propone una metodología para analizar la eficiencia biológica de diferentes diseños de escalas de hendidura vertical utilizando restricciones de velocidad, turbulencia y calado. Se presenta también una aplicación informática que facilita el uso de dicha metodología.

En primer lugar, se imponen dos criterios de velocidad para verificar que la velocidad del flujo es 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 de fatiga a partir de una velocidad equivalente a lo largo de la trayectoria del pez y considerando la distancia recorrida por el mismo. Las trayectorias analizadas en este estudio constituyen una restricción conservadora, ya que son muy exigentes para la fatiga del pez. Sin embargo, tal y como se ha puesto de manifiesto en el estudio biológico, los peces son capaces de percibir ligeras variaciones de la velocidad del agua y generalmente utilizan las zonas más favorables para ayudarles a progresar. Este comportamiento señala la necesidad de definir trayectorias reales de peces y, posteriormente, calcular velocidades equivalentes más precisas.

Además, 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. Por último, se evalúan las curvas de descarga en cada diseño para determinar el caudal mínimo 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 los criterios propuestos no tratan de establecer de forma exacta la menor talla de pez que es capaz de remontar la escala. Muchos 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 concreto 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 metodología.

Referencias

- Aarestrup, K., Lucas, M.C., Hansen, J.A., 2003. Efficiency of a nature-like bypass channel for sea trout (*Salmo trutta*) ascending a small Danish stream studied by PIT telemetry. *Ecology of Freshwater Fish* 12(3): 160-168.
- Aarestrup, K., Jepsen, N., 1998. Spawning migration of sea trout (*Salmo trutta* (L)) in a Danish river. *Hydrobiologia*, 371/372: 275-281.
- 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.
- Babarutsi, S., Chu, V. H., 1991. A two-length-scale model for quasi-two-dimensional turbulent shear flows. En: *Proceedings 24th Congress of IAHR*, Vol. C, Madrid, Spain, p. 51-60.
- 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.
- Barry, W.M., 1990. Fishways for Queensland coastal streams: an urgent review. *Proceedings of the International Symposium on Fishways'90*, Gifu, Japan.
- 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.
- Baum, E.T., 1994. Evolution of the Atlantic Salmon Restoration Program in Maine. En: *A Hard Look at some Tough Issues*, Calabi, S. & Stout, A. (eds.). New England Salmon Association Publisher, Maine, 371 p.
- Beach, M. H., 1984. Fish pass design criteria for the design and approval of fish passes and other structures to facilitate the passage of migratory fish in rivers. Ministry of Agriculture, Fisheries and Food - Fisheries Research Technical Report 78. Lowestoft, UK, 46 p.

- 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.
- Bell, M.C., 1986. Fisheries Handbook of Engineering Requirements and Biological Criteria. U.S. Army Corps of Engineers, Fish Passage Development and Evaluation Program, Portland, OR.
- Bermúdez, A., Vázquez-Cendón, M. E., 1994. Upwind methods for hyperbolic conservation laws with source terms. Computers & Fluids 23 (8): 1049-1071.
- Blake, R. W., 1983. Fish locomotion. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido.
- Blanco, J.C., González, J.L., 1992. Libro Rojo de los Vertebrados de España. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
- Blaxter, J.H.S., 1969. Swimming speeds of fish. FAO Fisheries Report, 62(2): 69-100.
- 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.
- Breen, M., Dyson, J., O'Neill, F.G., Jones, E., Haigh, M., 2004. Swimming endurance of haddock (*Melanogrammus aeglefinus* L.) at prolonged and sustained swimming speeds, and its role in their capture by towed fishing gears. ICES Journal of Marine Science, 61: 1071 - 1079.
- Castro-Santos, T., 2006. Modeling the Effect of Varying Swim Speeds on Fish Passage through Velocity Barriers. Transactions of the American Fisheries Society 135(5): 1230-1237.
- Castro-Santos, T., 2005. Optimal swim speeds for traversing velocity barriers: an analysis of volitional high-speed swimming behavior of migratory fishes. Journal of Experimental Biology, 208(3): 421-432.
- Castro-Santos, T., Haro, A., Walk, S., 1996. A passive integrated transponder (PIT) tag system for monitoring fishways. Fisheries Research 28(3): 253-261.
- Cea, L., 2008. Modelización numérica del flujo en aguas poco profundas: aplicación a rías y estuarios. Boletín de la Sociedad Española de Matemática Aplicada 42: 117-125.
- Cea, L., Puertas, J., Vázquez-Cendón, M. E., 2007a. Depth averaged modelling of turbulent shallow water flow with wet-dry fronts. Archives of Computational Methods in Engineering, 14(3): 303-341.

- Cea, L., Pena, L., Puertas, J., Vázquez-Cendón, M. E., and Peña, E., 2007b. Application of several depth-averaged turbulence models to simulate flow in vertical slot fishways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(2): 160-172.
- Cea, L., French, J.R., Vázquez-Cendón, M.E., 2006. Numerical modelling of tidal flows in complex estuaries including turbulence: an unstructured finite volume solver and experimental validation. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 67(13): 1909-1932.
- Chorda, J., Maubourguet, M. M., Roux, H., Larinier, M., Tarrade, L., David, L., 2010. Two-dimensional free surface flow numerical model for vertical slot fishways. *Journal of Hydraulic Research* 48(2): 141 - 151.
- Clay, C.H., 1995. *Design of Fishways and Other Fish Facilities*. Lewis Publishers, CRC Press. Boca Raton, Florida, 248 p.
- Coutant, C.C., 1998. Turbulent attraction flows for juvenile salmonid passage at dams. Oak Ridge National Laboratory, ORNL/TM-13608. Oak Ridge, Tennessee. 28 p.
- 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.
- Deng, Z., Richmond, M. C., Guensch, G. R., Mueller, R. P., 2004. Study of fish response using particle image velocimetry and high-speed, high-resolution imaging. Technical Rep. PNNL-14819, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA.
- Doadrio, I. (Ed.), 2002. *Atlas y Libro Rojo de los Peces Continentales de España*. CSIC y Ministerio de Medio Ambiente. Madrid, 374 p.
- Duarte, S., Reig, L., Oca, J., Flos, R., 2004. Computerized imaging techniques for fish tracking in behavioral studies. *European Aquaculture Society*, 310.
- Duc, B.M, Wenka, T., Rodi, W., 2004. Numerical Modeling of Bed Deformation in Laboratory Channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(9): 894–904.
- Durbin, P. A., 1996. On the k-epsilon Stagnation Point Anomaly. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 17: 89-90.

- 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.
- Elvira, B., Nicola, G.G., Almodóvar, A., Doadrio, I., Perdigones, A., Velasco, J.C., 1995. Impacto de las obras hidráulicas en la ictiofauna y medidas correctoras. Ministerio de Medio Ambiente. Convenio ICONA – Universidad Complutense. Memoria final.
- Enders, E.C., Boisclair, D., and 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: 1149-1160.
- FAO/DVWK, 2002. Fish passes – Design, dimensions and monitoring. Rome, FAO. 119 p.
- Gebler, R.J., 1996. Examples for near-natural fish facilities in Germany, drop structure conversion, fish ramps and fish bypass-channels. En: Abstracts of the International Conference on Fish Migration & Fish Bypass-Channels, Viena.
- Gowans, A. R. D., Armstrong, J. D., Priede, I. G., 1999. Movements of adult Atlantic salmon in relation to a hydroelectric dam and fish ladder. *Journal of Fish Biology*, 54: 713-726.
- Guiny, E., Ervine, D. A., Armstrong, J. D., 2005. Hydraulic and biological aspects of fish passes for Atlantic salmon. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(7): 542-553.
- Guiny, E., Armstrong, J.D., Ervine, D.A., 2003. Preferences of mature male brown trout and Atlantic salmon parr for orifice and weir fish pass entrances matched for peak velocities and turbulence. *Ecology of Freshwater Fish*, 12, 190-195.
- Hammer, C., 1995. Fatigue and exercise tests with fish. *Comparative Biochemistry and Physiology*, A 112: 1–20.
- Haro, A., Castro-Santos, T., Noreika, J., Odeh, M., 2004. Swimming performance of upstream migrant fishes in open-channel flow: a new approach to predicting passage through velocity barriers. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 61: 1590-1601.
- Harris, J.H., Gehrke, P.C., 1997. Fish and river in stress. The NSW rivers survey. Cooperative Research Centre for Freshwater Ecology, Camberra. 198 p.
- Heggenes, J. 2002 Flexible summer habitat selection by wild, allopatric brown trout in lotic environments. *Transactions of the American Fisheries Society* 131: 287–298.

- Heimerl, S., Hagmeyer, M., Ehteler, C., 2008. Numerical flow simulation of pool-type fishways: New ways with well-known tools. *Hydrobiologia*, 609(1): 189-196.
- 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: 1821–1831.
- 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. y 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.
- Johlander, A., 1999. Counting Atlantic salmon and sea trout in fishways in Southern Sweden – results and observations. En: Kamula R & Laine A (eds) Proceedings of the Nordic Conference on Fish Passage, 9-11 Sept. 1998, Oslo, Norway. DN-notat 1999-1. Trondheim, p 98-104
- Jones, W. P., Launder, B. E., 1972. The prediction of laminarization with a two-equation model of turbulence. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 15(2): 301-314.
- Jungwirth, M., 1996. Bypass channels at weirs as appropriate aids for fish migration in rhithral rivers. *Regulated rivers: research & management*, 12: 483-492.
- Katopodis, C., 2005. Developing a toolkit for fish passage, ecological flow management and fish habitat works. *Journal of Hydraulic Research*, 43(5): 451-467.
- Katopodis, C., 1999. Sustaining Fish Migrations: Swimming Performance and Fish Passage/Exclusion Methods. Proceedings of the Nordic Conference on Fish Passage, 9–11 September 1998, Oslo, Norway. DN-notat 1999-1, Trondheim, pp. 23–30.
- Katopodis, C., 1992. Introduction to fishway design. Working document, Freshwater Institute, Department Fisheries and Ocean, Winnipeg, Manitoba, Canada, 67 p.
- Katopodis C., 1990. Advancing the Art of Engineering Fishways for Upstream Migrants. Proceedings of the International Symposium on Fishways '90, Gifu, Japan, Oct. 8–10, pp. 19–28.
- Katopodis, C., Williams, J.G., 2012. The development of fish passage research in a historical context. *Ecological Engineering* 48: 8-18.

- 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 Resource and Application* 22: 429 – 440.
- Kohonen, T., 1982. Self-organized formation of topologically correct feature maps. *Biological Cybernetics* 43(1): 59–69.
- 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: 101-113.
- Larinier, M., 2000. Dams and fish migrations. En Berkamp, G., McCarteney, M., Dugan, P., McNeely, J., Acreman, M., (eds). *Dams, ecosystem functions and environmental restoration. Thematic review II. Contributing paper to the Environmental issues, dams and fish migrations of World Commission on Dams.*
- Larinier, M., Travade, F., Porcher, J.P., 2002. Fishways: biological basis, design criteria and monitoring. *Bulletin Français Pêche et Pisciculture*, 364 (Suppl.), 208.
- Larinier, M., Porcher, J.P., Travade, F., Gosset, C., 1998. Passes à poissons. Expertise conception des ouvrages de franchissement. Collection Mise au Point, Conseil Superior de la Pêche, Paris, 336 p.
- Liao, J. C., 2007. A review of fish swimming mechanics and behavior in altered flows. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 362(1487), 1973-1993.
- Liao, J.C., Beal, D.N., Lauder, G.V., Triantafyllou, M.S., 2003. Fish exploiting vortices decrease muscle activity. *Science* 302: 1566-1569.
- Linnik, V. D., Malinin, L. K., Wozniowski, M., Sych, R., Dembowski, P., 1998. Movements of adult sea trout *Salmo trutta* L. in the tailrace of a low-head dam at Włocławek hydroelectric station on the Vistula River, Poland. *Hydrobiologia*, 371/372: 335-337.
- 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.
- López, D., 2010. Aplicaciones de la Hidrodinámica Suavizada de las Partículas al estudio de fenómenos hidráulicos. Tesis doctoral, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Politécnica de Madrid.
- Lucas, M.C., Baras, E., 2001. *Migration of Freshwater Fishes*. Blackwell Science Ltd, Oxford, Reino Unido.

- Lucas, M. C., Mercer, T., Armstrong, J.D., McGinty, S., Rycroft, P., 1999. Use of a flat-bed passive integrated transponder antenna array to study the migration and behaviour of lowland river fishes at a fish pass. *Fisheries Research* 44(2): 183-191.
- Mace, G. M., Lande, R., 1991. Assessing Extinction Threats: Toward a Reevaluation of IUCN Threatened Species Categories. *Conservation Biology* 5(2): 148-157.
- Mallen-Cooper, M., 1994. Swimming ability of adult golden perch, *Maquaria ambigua* (Percichthyidae), and adult silver perch, *Bidyanus bidyanus* (Teraponidae), in an experimental vertical slot fishway. *Australian Journal of Marine and Freshwater Research* 45: 191-198.
- Mallen-Cooper, M., 1992. Swimming ability of juvenile Australian bass, *Maquaria novemaculeata* (Steindachner), and juvenile barramundi, *Lates calcarifer* (Bloch), in an experimental vertical slot fishway. *Australian Journal of Marine and Freshwater Research* 43: 823-834.
- Mallen-Cooper, M., Stuart I. G., 2007. Optimising Denil fishways for passage of small and large fishes. *Fisheries Management and Ecology* 14(1): 61-71.
- Mallen-Cooper, M., Harris, J., 1990. Fishways in Mainland south-eastern Australia. Proceedings of the International Symposium on Fishways'90, Gifu, Japan.
- Marmulla, G., 2001. Dams, fish and fisheries. Opportunities, challenges and conflict resolution. FAO Fisheries Technical Paper. Nº 419. Rome. 166 p.
- McDowall, R.M., 1988. Diadromy in fishes: migrations between freshwater and marine environments. Croom Helm, London, 308 p.
- McMahon, T. E., Gordon, F. H., 1989. Influence of cover complexity and current velocity on winter habitat use by juvenile coho salmon (*Oncorhynchus kisutch*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 46: 1551–1557.
- Menter, F. R., 1993. Zonal two-equation $k-\omega$ turbulence models for aerodynamic flows, AIAA paper 93-2906. En: 24th Fluid Dynamics Conference, Orlando, FL.
- Meyers, T.F. (1994) The program to restore atlantic salmon to the Connecticut river. En: A Hard Look at some Tough Issues, Calabi, S. & Stout, A. (eds.). New England Salmon Association Publisher, Maine, 371 p.

- Morais, E. F., Campos, M. F. M., Padua, F. L. C., Carceroni, R. L., 2005. Particle filter based predictive tracking for robust fish count. XVIII Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing, IEEE Computer Society, Natal, RN, Brazil, 367–374.
- Myrick, C.A., Cech, J.J., 2000. Swimming performances of four California stream fishes: temperature effects. *Environmental Biology of Fishes* 58: 289–295.
- Nielsen, J., 1996. Fish migration and status for the fish passage facilities in Danish lowland streams. En: *Abstracts of the International Conference on Fish Migration & Fish Bypass-Channels*, Viena.
- Odeh, M. (ed), 2000. *Advances in Fish Passage Technology - Engineering Design and Biological Evaluation*. American Fisheries Society, Bethesda, Maryland.
- Odeh, M. (ed), 1999. *Innovations in Fish Passage Technology*. American Fisheries Society, Bethesda, Maryland.
- 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-0000022-1), Portland, OR, 55 p.
- Ohlmer, W., Schwarzkopff, J., 1959. Schwimmggeschwindigkeiten von Fishen aus stehenden Binnengewässern. *Naturwissenschaften* 46: 362-363.
- Oregon Department of Forestry, 2000. Report of the Ad Hoc Forest Practices Advisory Committee on Salmon and Watershed to the Oregon Board of Forestry. Oregon Department of Forestry, Salem.
- OTA, Office of Technology Assessment, 1995. Fish passage technologies: protection at hydropower facilities. Report OTA-ENV-641, Washington, U.S. Government Printing Office.
- Ovidio, M., Philippart, J.C., 2002. The impact of small physical obstacles on upstream movements of six species of fish. *Hydrobiologia*, 483(1): 55-69.
- Parasiewicz, P., Eberstaller, J., Weiss, S., Schmutz, S., 1998. Conceptual guidelines for nature-like bypass channels. p348-362. En: Jungwirth, M., Schmutz, S., Weiss, S. (eds). *Fish migration and fish bypasses*. Fishing News Books, Oxford, UK: Blackwell Science Ltd. Publisher.

- Pavlov, D.S., Lupandin, A.I., and 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.
- Petts, G.E., 1984. *Impounded rivers*, John Wiley & Sons Ltd Publishers. Chichester, UK, 326 p.
- Puckett, K. J., Dill, L. M., 1984. The energetics of feeding territoriality in juvenile coho salmon (*Oncorhynchus kisutch*). *Behaviour* 92: 97–110.
- Puertas, J., Pena, L., and Teijeiro, T., 2004. Experimental approach to the hydraulics of vertical slot fishways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(1): 10-23.
- Quirós, R., 1989. Structures assisting the migrations of non-salmonid fish: Latin America, FAO-COPEscal Technical Paper N° 5, Rome, 41 p.
- Rajaratnam, N., Katopodis, C., and Solanki, S., 1992. New designs for vertical slot fishways. *Canadian Journal Civil Engineering*, 19(3): 402-414.
- Rajaratnam, N., Van der Vinne, G., and Katopodis, C., 1986. Hydraulics of Vertical Slot Fishways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 112(10): 909-927.
- Rameshwaran, P., Shiono, K., 2003. Computer modelling of two-stage meandering channel flows. *Water and Maritime Engineering* 156 (4): 325-339
- Rastogi, A. K., Rodi, W., 1978. Predictions of heat and mass transfer in open channels. *Journal of the Hydraulics Division HY3*: 397-420.
- Rivinoja, P., McKinnell, S., Lundqvist, H, 2001. Hindrances to upstream migration of Atlantic salmon (*Salmo salar*) in a northern Swedish river caused by a hydroelectric power-station. *Regulated Rivers: Research & Management*, 17: 101-115.
- Rodi, W., 1980. Turbulence models and their applications in hydraulics – A state of the art review. The Netherlands International Association of Hydraulic Research, Delft, Países Bajos.
- 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.

- Roe, P.L., 1986. Discrete models for the numerical analysis of time-dependent multidimensional gas dynamics. *Journal of Computational Physics*, 63: 458-476.
- Santos, J.M., Silva, A., Katopodis, C., Pinheiro, P., Pinheiro, A., Bochechas, J., Ferreira, M.T., 2012. Ecohydraulics of pool-type fishways: getting past the barriers. *Ecological Engineering*, 48: 38-50.
- Seifert, K., 1996. A bypass-system at the Danube impoundment Vohburg. En: Abstracts of the International Conference on Fish Migration & Fish Bypass-Channels, Viena.
- Shuler, S. W., Nehring, R. B., Fausch, K. D., 1994. Diel habitat selection by brown trout in the Rio Grande river, Colorado, after placement of boulder structures. *North American Journal of Fisheries Management* 14: 99–111.
- Silva, A.T., Katopodis, C., Santos, J.M., Ferreira, M.T., Pinheiro, A.N., 2012. Cyprinid swimming behaviour in response to turbulent flow. *Ecological Engineering*, 44: 314-328
- Silva, A. T., Santos, J. M., Ferreira, M. T., Pinheiro, A. N., Katopodis, C., 2010. Effects of water velocity and turbulence on the behaviour of Iberian barbel (*Luciobarbus bocagei*, Steindachner 1864) in an experimental pool-type fishway. *River Research and Applications*, 27(3): 360-373.
- Silva, A. T., Santos, J. M., Franco, A. C., Ferreira, M. T., 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(2): 173-177.
- Stolte, L. W. (1994) Atlantic salmon restoration in the Merrimack River Basin. En: A Hard Look at some Tough Issues, Calabi, S. & Stout, A. (eds.). New England Salmon Association Publisher, Maine, 371 p.
- 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: 332–346.
- 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.
- Tarrade, L., 2007. Etude des écoulements turbulents dans les passes à poissons à fentes verticales: adaptation aux petites espèces. Tesis doctoral. Universidad de Poitiers, Facultad de Ciencias Fundamentales y Aplicadas, 217 p.

- Tarrade, L., G. Pineau, D. Callaud, A. Texier, L. David, Larinier, M., 2011. Detailed experimental study of hydrodynamic turbulent flows generated in vertical slot fishways. *Environmental Fluid Mechanics* 11(1): 1-21.
- Tarrade, L., Texier, A., David, L., Larinier, M., 2008. Topologies and measurements of turbulent flow in vertical slot fishways. *Hydrobiologia*, 609(1): 177-188.
- Teijeiro, T., Puertas, J., Pena, L., Peña, E., 2006. Evaluating vertical slot fishway designs in terms of fish swimming capabilities. *Ecological Engineering* 27 (1): 37–48.
- Thorncraft, G., Harris, J.H., 2000. Fish passage and fishways in New South Wales: A status report. Technical Report 1/2000. Cooperative Research Centre for Freshwater Ecology. Office of Conservation NSW Fisheries, Sidney
- Toro, E. F., 2001. Shock-capturing Methods for Free-Surface Shallow Flows. Wiley, 326 p.
- Travade, F., Larinier, M., Boyer-Bernard, S., Dartiguelongue, J., 1998. Performance of four fish pass installations recently built in France. En: Jungwirth, M., Schmutz, S., Weiss, S. (eds). *Fish migration and fish bypasses*. Fishing News Books, Oxford, UK.
- Triantafyllou, G. S., Techet, A. H., Zhu, Q., Beal, D. N., Hover, F. S., Yue, D. K. P., 2002. Vorticity control in fish-like propulsion and maneuvering. *Integrative and Comparative Biology* 42: 1026–1031.
- 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.
- Videler, J.J., 1993. *Fish Swimming*. Fish & Fisheries Series 10, Chapman & Hall, London, 260 p
- Videler, J. J., Wardle, C. S., 1991. Fish swimming stride by stride: speed limits and endurance. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 1: 23-40.
- Wang, R. W., David, L., Larinier, M., 2010. Contribution of experimental fluid mechanics to the design of vertical slot fish passes. *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems* 396, 02.
- Weaver, C.R., 1963. Influence of water velocity upon orientation and performance of adult migrating salmonids. *Fishery Bulletin Fish Wildlife Service U.S.*, 63(1): 97-121
- Webb, P. W., 1998. Entrainment by river chub *Nocomis micropogon* and smallmouth bass *Micropterus dolomieu* on cylinders. *Journal of Experimental Biology* 201: 2403–2412.

- Webb, P. W., 1994. Exercise performance of fish. En: Advances in Veterinary Science and Comparative Medicine, vol. 38B, Comparative Vertebrate Exercise Physiology: Phyletic Adaptations (ed. J. H. Jones), Academic Press, San Diego, p 1–49.
- Webb, P. W., 1975. Hydrodynamics and energetics of fish propulsion. Bulletin of the Fisheries Research Board of Canada 190, 159 p.
- Webb, P.W., Sims, D., Schultz, W.W., 1991. The effects of an air/water surface on the fast-start performance of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). The Journal of Experimental Biology, 155: 219-226.
- Wilson, C. A. M. E., Bates, P. D., Hervoulet, J. M., 2002. Comparison of turbulence models for stage-discharge rating curve prediction in reach-scale compound channel flows using two-dimensional finite element methods. Journal of Hydrology 257 (1-4): 42-58.
- Wolter, C., Arlinghaus, R., 2003. Navigation impacts on freshwater fish assemblages: the ecological relevance of swimming performance. Reviews in Fish Biology and Fisheries 13: 63–89.
- Wu, W., 2004. Depth-averaged two-dimensional numerical modeling of unsteady flow and nonuniform sediment transport in open channels. Journal of Hydraulic Engineering 130 (10): 1013-1024.
- Wu, S., Rajaratnam, N., Katopodis, C., 1999. Structure of flow in vertical slot fishway. Journal of Hydraulic Engineering, 125(4): 351-359.
- Zhong, Y., Power, G., 1996. Environmental impacts of hydroelectric projects on fish resources in China. Regulated rivers: research and management, 12 (1): 81-98

Apéndice 1

En este apéndice se presentan los resultados detallados del estudio biológico, clasificados por especie y ensayo, incluyendo el análisis tanto de las zonas de recirculación como de los pasos de hendidura.

En el análisis de las zonas de recirculación se muestra la duración de todos los descansos observados, y se indica la piscina y la zona dentro de la piscina en la que se han producido. En el análisis de los pasos de hendidura se muestra la reconstrucción de la trayectoria, el modo de ascenso, y las velocidades de natación y aceleraciones máximas alcanzadas.

1.1 Trucha común

1.1.1 Ensayo del 3 de febrero de 2010

La duración total del ensayo es de 24 horas y se ensayan un total de 20 ejemplares.

1.1.1.1 Zonas de recirculación

Tabla 1 Tiempo de permanencia de los ejemplares de trucha común en cada una de las zonas de descanso (ensayo del 03/02/2010).

T(s) Zona/Ejemplar	Trucha 1	Trucha 2	Trucha 3	Trucha 4	Trucha 5	Trucha 6	Trucha 7	Trucha 8
Piscina 1 A	438	438	592	2053	892	493	113	
B					53		251	
C								
Piscina 2 A	230	189		1109				
B			68				47	119
C								
Piscina 3 A	364	107	23	27	887	186	48	
B		26	1133				1322	396
C								
Piscina 4 A		200		880		114		
B			373		136		325	179
C								
Piscina 5 A	156	31		278		374		
B	550		764		1472		316	193
C								
Piscina 6 A				366		165		
B					335		235	
C								
Piscina 7 A	561	255		320		785	58	
B						376	153	668
C								
T _{total} (s) A	1749	1220	615	5033	1779	2117	219	0
B	550	26	2338	0	1996	376	2649	1555
C	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 2 Tiempo medio de permanencia de los ejemplares de trucha común en cada una de las zonas de descanso (ensayo del 03/02/2010).

		T total (s)	N descansos	T medio (s)
Piscina 1	A	5019	7	717
	B	304	2	152
	C			
Piscina 2	A	1528	3	509
	B	234	3	78
	C			
Piscina 3	A	1642	7	235
	B	2877	4	719
	C			
Piscina 4	A	1194	3	398
	B	1013	4	253
	C			
Piscina 5	A	839	4	210
	B	3295	5	659
	C			
Piscina 6	A	531	2	266
	B	570	2	285
	C			
Piscina 7	A	1979	5	396
	B	1197	3	399
	C			
TOTAL	A	12732	31	411
	B	9490	23	413
	C			

1.1.1.2 Velocidades y aceleraciones en los pasos de hendidura

Valores medios

Tabla 3 Velocidad de natación y aceleración media de los ejemplares de trucha común (ensayo del 03/02/2010).

Velocidad de natación (m/s)		Aceleración (m/s ²)	
Máximo promedio	Desviación típica	Máximo promedio	Desviación típica
1.51	0.21	1.11	0.68

Modo de ascenso

- Tipo 1: 66.7% de los pasos
- Tipo 2: 33.3 % de los pasos

Paso de hendidura de trucha común nº 1

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Salmo trutta	Fecha y hora	03/02/2010, 11:20 h
Procedencia	Piscifactoría de Uña	Tª agua (°C)	14.3
Talla (cm)	25	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	2 - 3	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: descanso de 230 s en zona A
- Modo de ascenso: 1
- Velocidad de natación máxima: 1.52 m/s
- Aceleración máxima: 0.85 m/s²

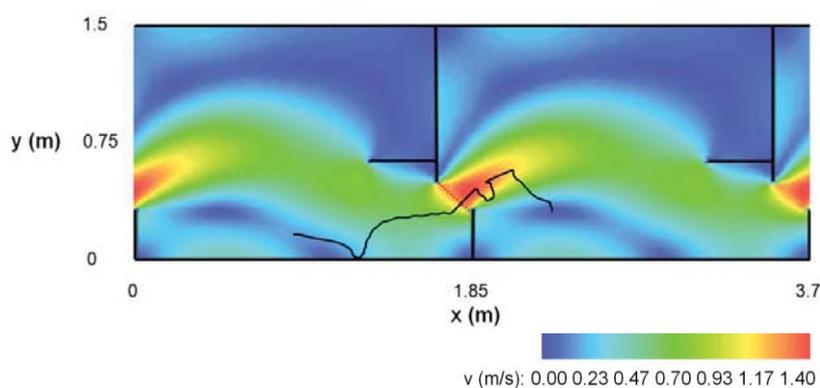


Figura 1 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de trucha común nº 2

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Salmo trutta	Fecha y hora	03/02/2010, 11:27 h
Procedencia	Piscifactoría de Uña	Tª agua (°C)	14.3
Talla (cm)	25	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	3 - 4	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: descanso de 364 s en zona A
- Modo de ascenso: 1

- Velocidad de natación máxima: 1.60 m/s
- Aceleración máxima: 1.98 m/s²

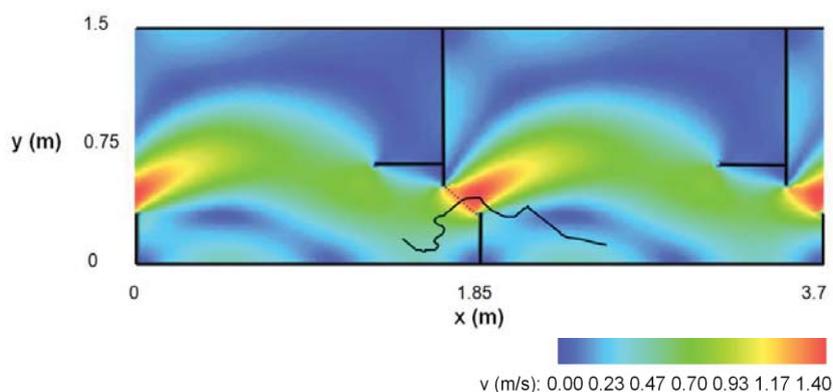


Figura 2 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de trucha común n° 3

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Salmo trutta	Fecha y hora	03/02/2010, 11:27 h
Procedencia	Piscifactoría de Uña	T ^a agua (°C)	14.3
Talla (cm)	25	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	4 - 5	Q (m ³ /s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: sin descanso
- Modo de ascenso: 1
- Velocidad de natación máxima: 1.51 m/s
- Aceleración máxima: 1.34 m/s²

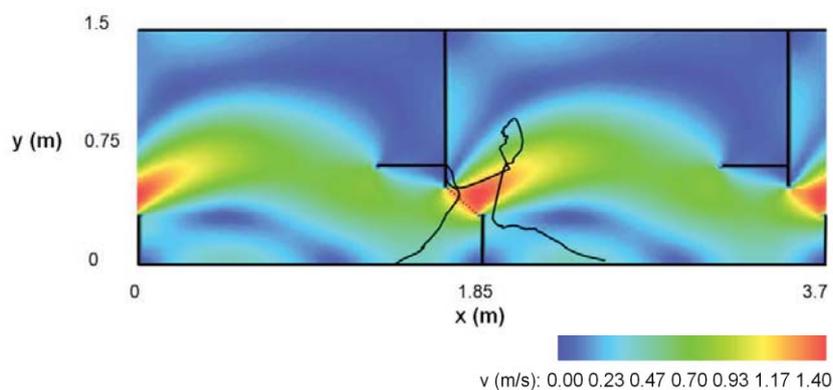


Figura 3 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de trucha común nº 4

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Salmo trutta	Fecha y hora	03/02/2010, 11:39 h
Procedencia	Piscifactoría de Uña	Tª agua (°C)	14.3
Talla (cm)	25	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	5 - 6	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: descanso de 156 s en zona A y descanso de 550 s en zona B
- Modo de ascenso: 2
- Velocidad de natación máxima: 1.23 m/s
- Aceleración máxima: 0.32 m/s²

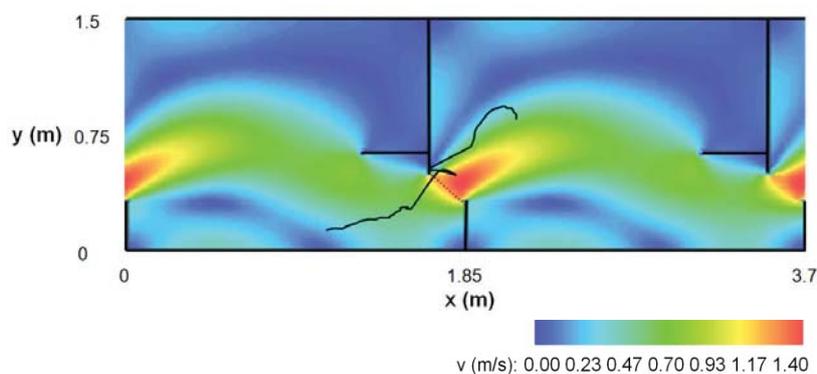


Figura 4 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de trucha común nº 5

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Salmo trutta	Fecha y hora	03/02/2010, 11:25 h
Procedencia	Piscifactoría de Uña	Tª agua (°C)	14.3
Talla (cm)	20.2	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	1 - 2	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: descanso de 438 s en zona A
- Modo de ascenso: 1
- Velocidad de natación máxima: 1.35 m/s
- Aceleración máxima: 1.30 m/s²

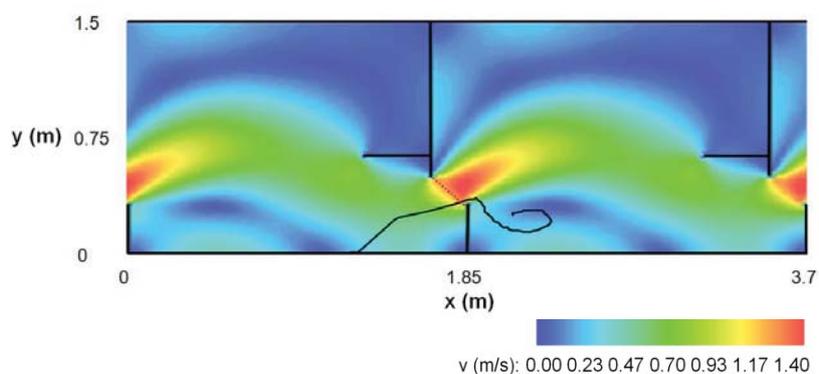


Figura 5 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de trucha común nº 6

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Salmo trutta	Fecha y hora	03/02/2010, 11:34 h
Procedencia	Piscifactoría de Uña	Tª agua (°C)	14.3
Talla (cm)	20.2	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	4 - 5	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: descanso de 200 s en zona A
- Modo de ascenso: 1
- Velocidad de natación máxima: 1.67 m/s
- Aceleración máxima: 1.10 m/s²

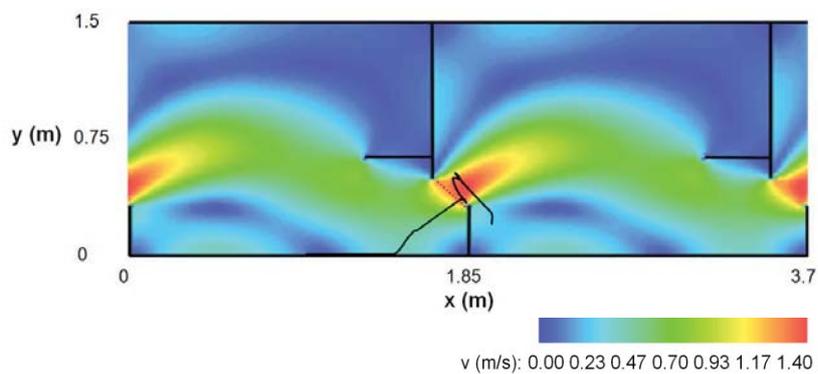


Figura 6 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de trucha común nº 7

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Salmo trutta	Fecha y hora	03/02/2010, 11:34 h
Procedencia	Piscifactoría de Uña	Tª agua (°C)	14.3
Talla (cm)	20.2	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	6 - 7	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: sin descanso
- Modo de ascenso: 1
- Velocidad de natación máxima: 1.43 m/s
- Aceleración máxima: 0.59 m/s²

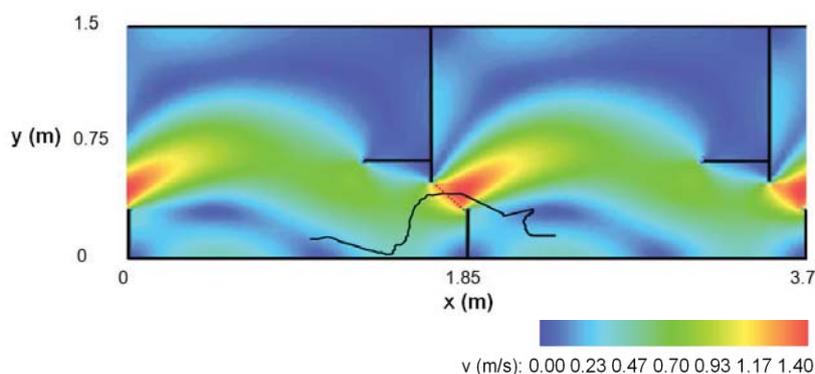


Figura 7 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de trucha común nº 8

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Salmo trutta	Fecha y hora	03/02/2010, 12:43 h
Procedencia	Piscifactoría de Uña	Tª agua (°C)	14.3
Talla (cm)	20.9	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	1 - 2	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: descanso de 592 s en zona A
- Modo de ascenso: 1
- Velocidad de natación máxima: 1.74 m/s
- Aceleración máxima: 1.17 m/s²

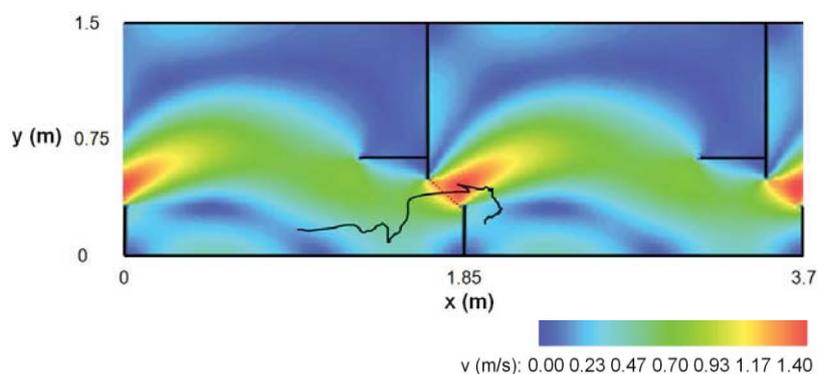


Figura 8 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de trucha común nº 9

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Salmo trutta	Fecha y hora	03/02/2010, 12:44 h
Procedencia	Piscifactoría de Uña	Tª agua (°C)	14.3
Talla (cm)	20.9	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	2 - 3	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: descanso de 68 s en zona B
- Modo de ascenso: 2
- Velocidad de natación máxima: 1.62 m/s
- Aceleración máxima: 1.25 m/s²

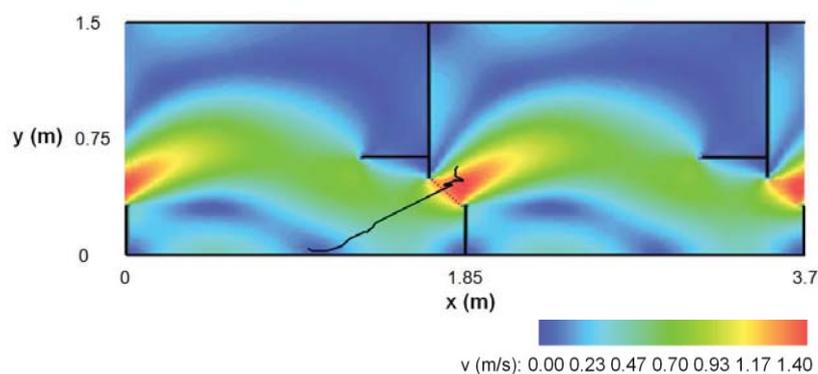


Figura 9 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de trucha común nº 10

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Salmo trutta	Fecha y hora	03/02/2010, 13:03 h
Procedencia	Piscifactoría de Uña	Tª agua (°C)	14.3
Talla (cm)	20.9	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	3 - 4	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: descanso de 23 s en zona A, descanso de 1133 s en zona B
- Modo de ascenso: 2
- Velocidad de natación máxima: 1.60 m/s
- Aceleración máxima: 0.71 m/s²

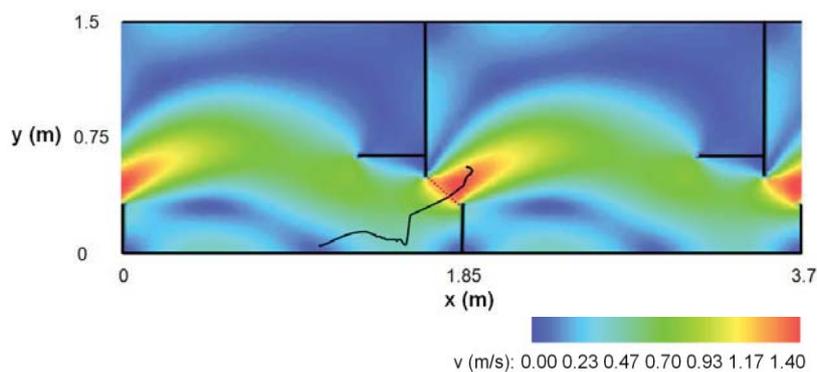


Figura 10 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de trucha común nº 11

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Salmo trutta	Fecha y hora	03/02/2010, 13:10 h
Procedencia	Piscifactoría de Uña	Tª agua (°C)	14.3
Talla (cm)	20.9	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	4 - 5	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: descanso de 373 s en zona B
- Modo de ascenso: 2
- Velocidad de natación máxima: 1.63 m/s
- Aceleración máxima: 1.88 m/s²

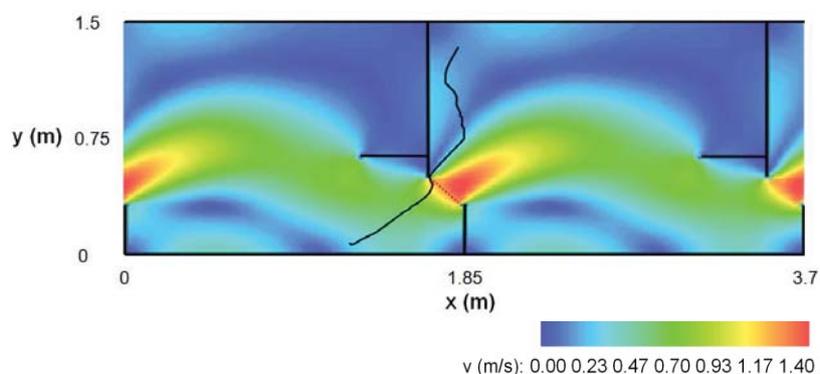


Figura 11 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de trucha común nº 12

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Salmo trutta	Fecha y hora	03/02/2010, 14:08 h
Procedencia	Piscifactoría de Uña	Tª agua (°C)	14.3
Talla (cm)	19.1	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	1 - 2	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: descanso de 2053 s en zona A
- Modo de ascenso: 1
- Velocidad de natación máxima: 1.09 m/s
- Aceleración máxima: 0.89 m/s²

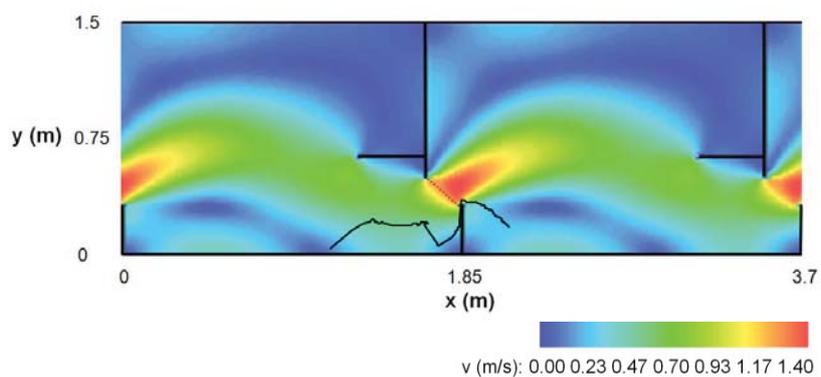


Figura 12 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de trucha común nº 13

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Salmo trutta	Fecha y hora	03/02/2010, 14:27 h
Procedencia	Piscifactoría de Uña	Tª agua (°C)	14.3
Talla (cm)	19.1	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	3 - 4	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: descanso de 27 s en zona A
- Modo de ascenso: 1
- Velocidad de natación máxima: 1.26 m/s
- Aceleración máxima: 0.23 m/s²

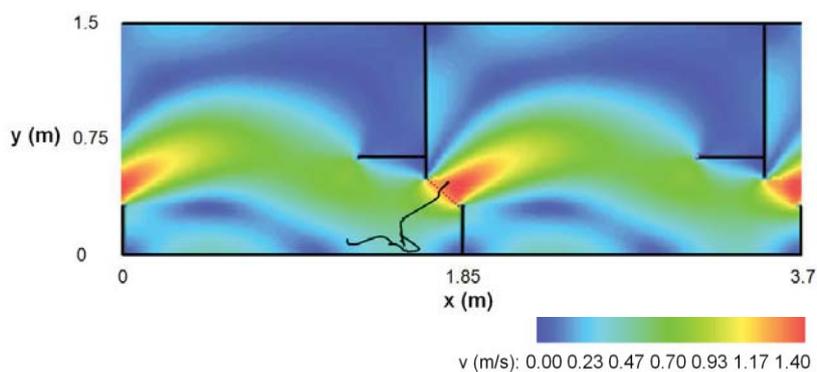


Figura 13 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de trucha común nº 14

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Salmo trutta	Fecha y hora	03/02/2010, 14:42 h
Procedencia	Piscifactoría de Uña	Tª agua (°C)	14.3
Talla (cm)	19.1	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	4 - 5	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: descanso de 880 s en zona A
- Modo de ascenso: 1
- Velocidad de natación máxima: 1.55 m/s
- Aceleración máxima: 1.56 m/s²

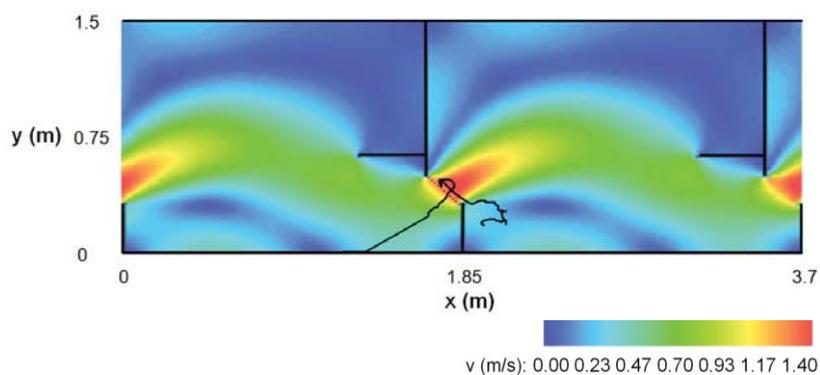


Figura 14 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de trucha común nº 15

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Salmo trutta	Fecha y hora	03/02/2010, 14:37 h
Procedencia	Piscifactoría de Uña	Tª agua (°C)	14.3
Talla (cm)	20.2	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	3 - 4	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: descanso de 887 s en zona A
- Modo de ascenso: 1
- Velocidad de natación máxima: 1.76 m/s
- Aceleración máxima: 1.68 m/s²

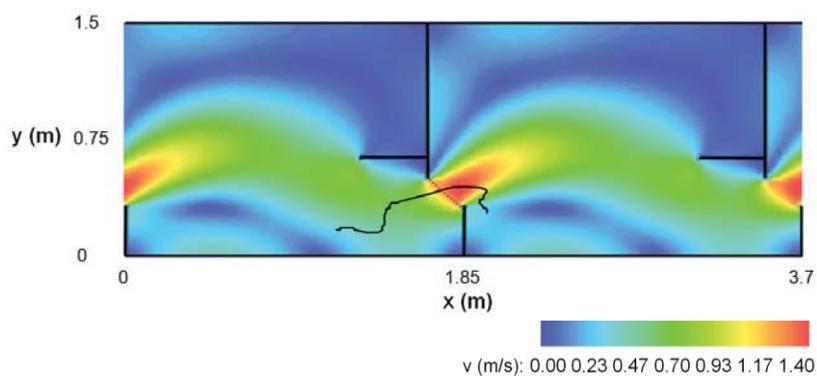


Figura 15 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de trucha común nº 16

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Salmo trutta	Fecha y hora	03/02/2010, 14:39 h
Procedencia	Piscifactoría de Uña	Tª agua (°C)	14.3
Talla (cm)	20.2	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	4 - 5	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: descanso de 136 s en zona B
- Modo de ascenso: 2
- Velocidad de natación máxima: 1.33 m/s
- Aceleración máxima: 0.75 m/s²

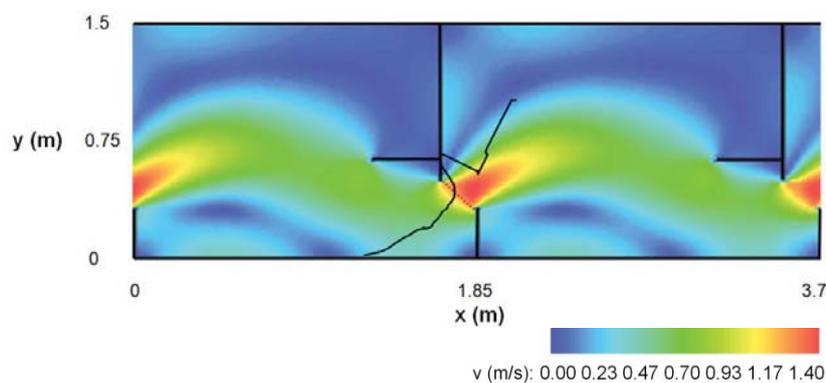


Figura 16 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de trucha común nº 17

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Salmo trutta	Fecha y hora	03/02/2010, 15:10 h
Procedencia	Piscifactoría de Uña	Tª agua (°C)	14.3
Talla (cm)	20.2	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	6 - 7	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: descanso de 335 s en zona B
- Modo de ascenso: 2
- Velocidad de natación máxima: 1.54 m/s
- Aceleración máxima: 1.43 m/s²

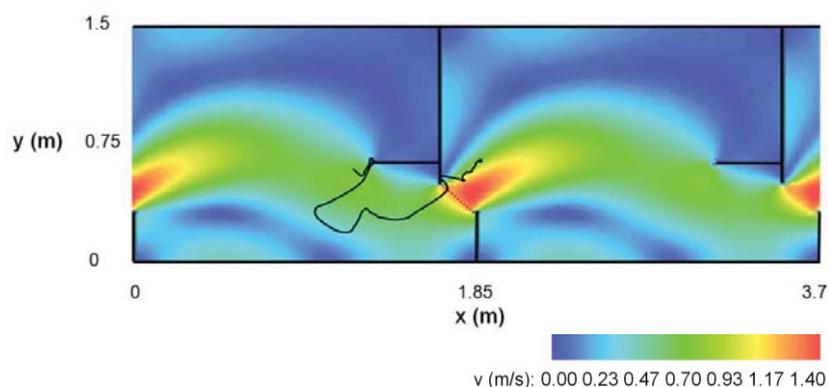


Figura 17 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de trucha común nº 18

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Salmo trutta	Fecha y hora	03/02/2010, 14:41 h
Procedencia	Piscifactoría de Uña	Tª agua (°C)	14.3
Talla (cm)	24.4	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	1 - 2	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: descanso de 493 s en zona A
- Modo de ascenso: 1
- Velocidad de natación máxima: 1.95 m/s
- Aceleración máxima: 2.66 m/s²

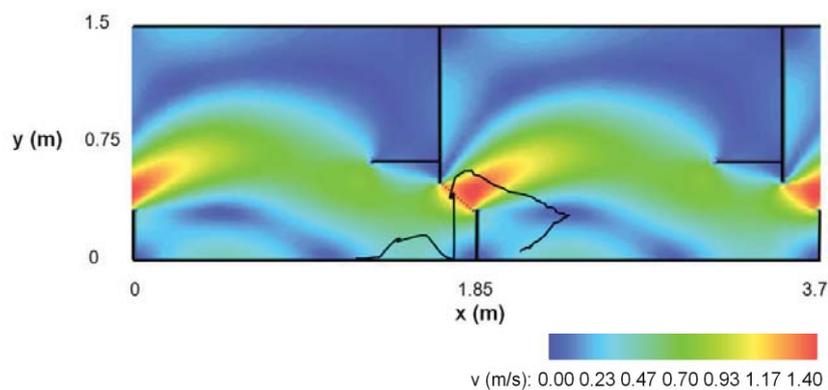


Figura 18 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de trucha común nº 19

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Salmo trutta	Fecha y hora	03/02/2010, 14:53 h
Procedencia	Piscifactoría de Uña	Tª agua (°C)	14.3
Talla (cm)	24.4	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	5 - 6	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: descanso de 374 s en zona A
- Modo de ascenso: 1
- Velocidad de natación máxima: 1.50 m/s
- Aceleración máxima: 0.74 m/s²

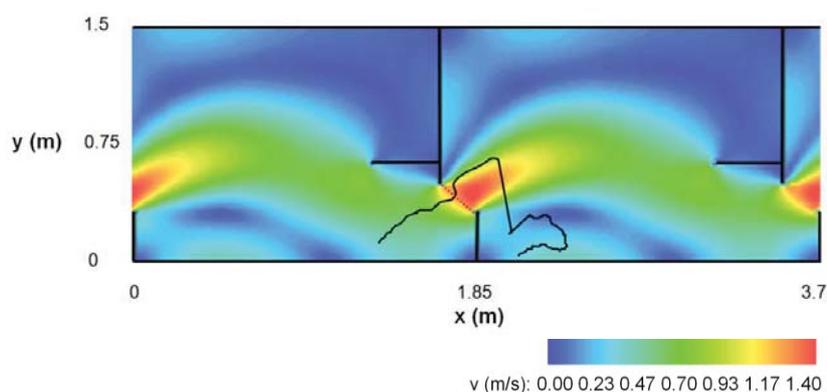


Figura 19 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de trucha común nº 20

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Salmo trutta	Fecha y hora	03/02/2010, 14:55 h
Procedencia	Piscifactoría de Uña	Tª agua (°C)	14.3
Talla (cm)	24.4	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	6 - 7	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: descanso de 165 s en zona A
- Modo de ascenso: 1
- Velocidad de natación máxima: 1.44 m/s
- Aceleración máxima: 0.13 m/s²

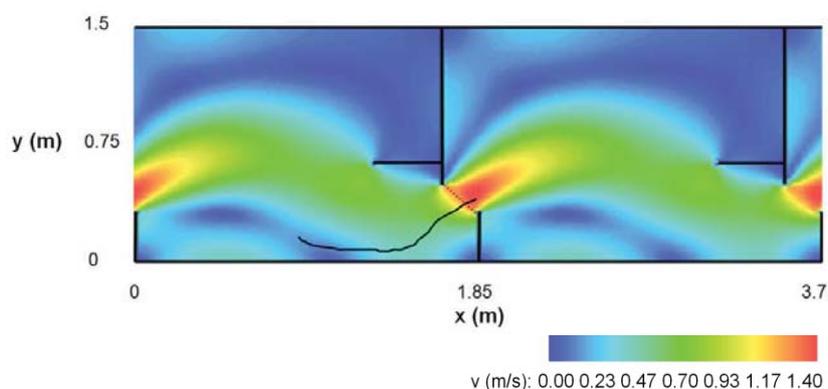


Figura 20 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de trucha común nº 21

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Salmo trutta	Fecha y hora	03/02/2010, 10:34 h
Procedencia	Piscifactoría de Uña	Tª agua (°C)	14.3
Talla (cm)	19.0	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	4 - 5	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: descanso de 325 s en zona B
- Modo de ascenso: 2
- Velocidad de natación máxima: 1.11 m/s
- Aceleración máxima: 0.2 m/s²

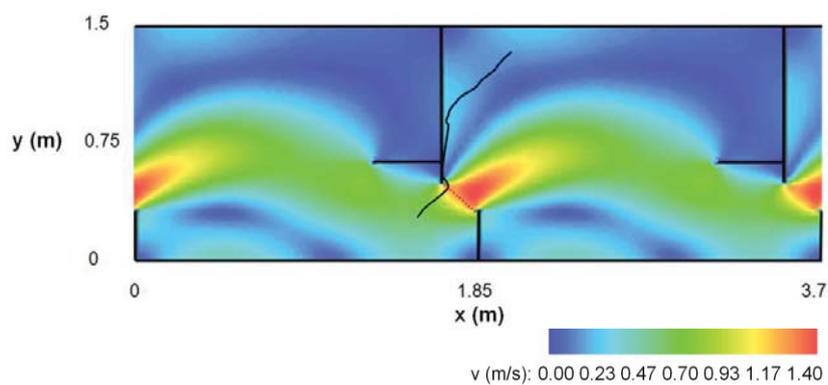


Figura 21 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de trucha común nº 22

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Salmo trutta	Fecha y hora	03/02/2010, 11:12 h
Procedencia	Piscifactoría de Uña	Tª agua (°C)	14.3
Talla (cm)	19.6	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	1 - 2	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: sin descanso
- Modo de ascenso: 1
- Velocidad de natación máxima: 1.63 m/s
- Aceleración máxima: 2.00 m/s²

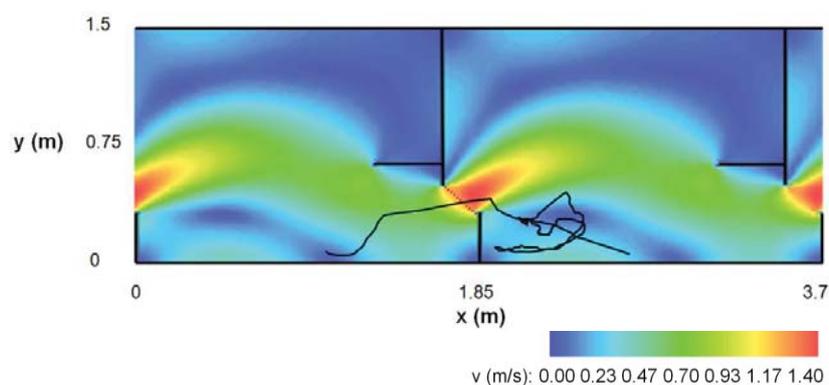


Figura 22 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de trucha común nº 23

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Salmo trutta	Fecha y hora	03/02/2010, 11:27 h
Procedencia	Piscifactoría de Uña	Tª agua (°C)	14.3
Talla (cm)	19.6	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	5 - 6	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: descanso de 193 s en zona B
- Modo de ascenso: 2
- Velocidad de natación máxima: 1.45 m/s
- Aceleración máxima: 1.73 m/s²

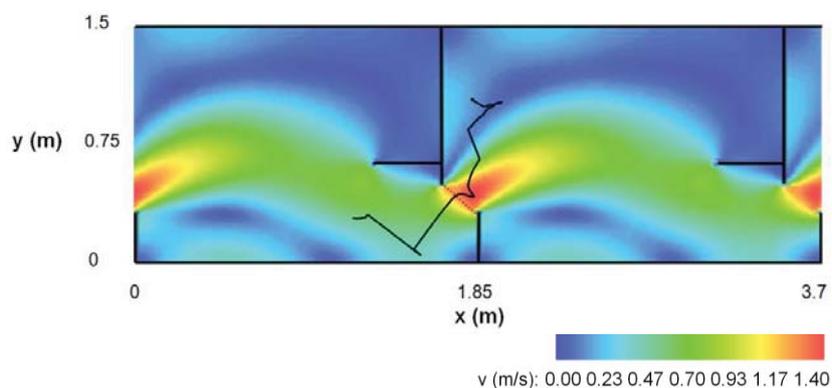


Figura 23 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de trucha común n° 24

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Salmo trutta	Fecha y hora	03/02/2010, 11:27 h
Procedencia	Piscifactoría de Uña	Tª agua (°C)	14.3
Talla (cm)	19.6	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	6 - 7	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: sin descanso
- Modo de ascenso: 1
- Velocidad de natación máxima: 1.69 m/s
- Aceleración máxima: 0.09 m/s²

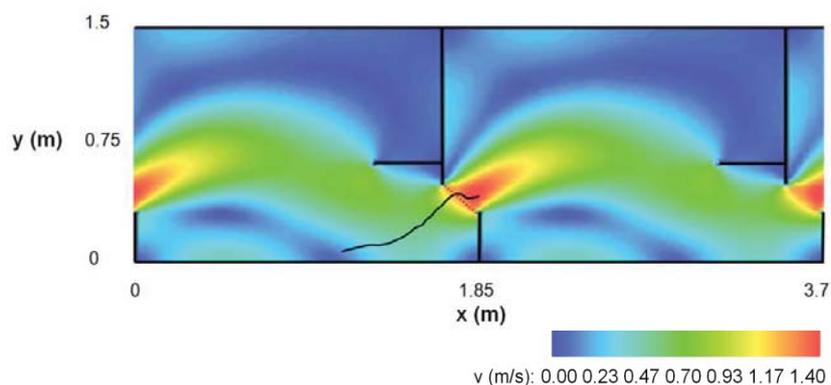


Figura 24 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

1.2 Boga del Tajo

1.2.1 Ensayo del 6 de mayo de 2010

La duración total del ensayo es de 24 horas y se ensayan un total de 21 ejemplares.

1.2.1.1 Zonas de recirculación

En este ensayo no ha sido posible identificar de forma inequívoca qué ejemplar realiza cada uno de los descansos grabados, por lo que se presentan únicamente los valores de tiempo medio de descanso en cada zona (Tabla 4).

Tabla 4 Tiempo medio de permanencia de los ejemplares de boga en las zonas de descanso (ensayo 06/05/2010).

		T total (s)	N descansos	T medio (s)
Piscina 1	A	4307	10	431
	B			
	C			
Piscina 2	A	2594	7	371
	B			
	C			
Piscina 3	A	893	6	149
	B			
	C			
Piscina 4	A	2769	5	554
	B			
	C			
Piscina 5	A	931	4	233
	B			
	C			
Piscina 6	A	1198	4	300
	B			
	C			
Piscina 7	A	221	2	111
	B			
	C			
TOTAL	A	12913	38	340
	B			
	C			

1.2.1.2 Velocidades y aceleraciones en los pasos de hendidura

Valores medios

Tabla 5 Velocidad de natación y aceleración media de los ejemplares de boga (ensayo del 06/05/2010).

Velocidad de natación (m/s)		Aceleración (m/s ²)	
Máximo promedio	Desviación típica	Máximo promedio	Desviación típica
1.43	0.23	1.22	0.87

Modo de ascenso

Tipo 1 en todos los pasos

Paso de hendidura de boga del Tajo nº 1

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Pseudochondrostoma polylepis	Fecha y hora	06/05/2010
Procedencia	Piscifactoría Escuela de Montes, UPM	Tª agua (°C)	18.4
Talla (cm)	13.9 – 15.8	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	1 - 2	Q (m ³ /s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: descanso de 121 s en zona A
- Modo de ascenso: 1
- Velocidad de natación máxima: 1.19 m/s
- Aceleración máxima: 0 m/s²

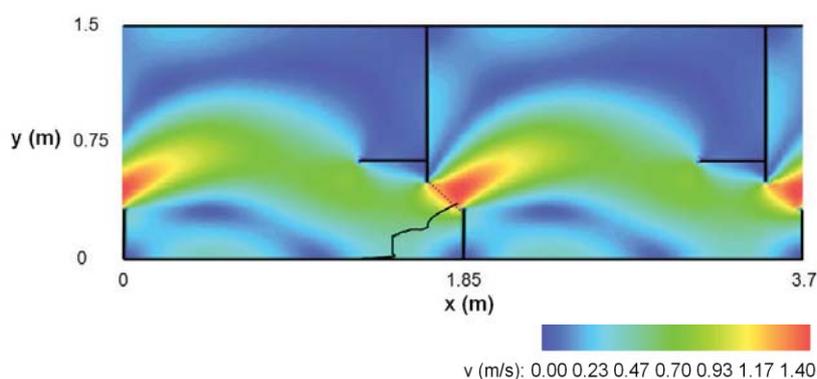


Figura 25 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de boga del Tajo n° 2

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Pseudochondrostoma polylepis	Fecha y hora	06/05/2010
Procedencia	Piscifactoría Escuela de Montes, UPM	Tª agua (°C)	18.4
Talla (cm)	13.9 – 15.8	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	2 - 3	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: descanso de 690 s en zona A
- Modo de ascenso: 1
- Velocidad de natación máxima: 1.15 m/s
- Aceleración máxima: 0.54 m/s²

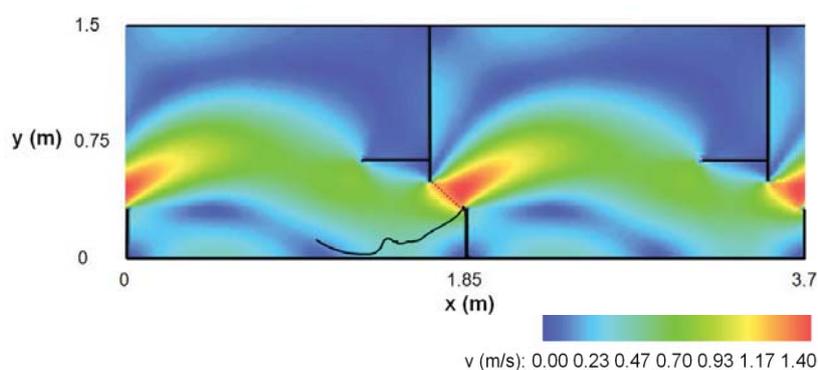


Figura 26 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de boga del Tajo n° 3

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Pseudochondrostoma polylepis	Fecha y hora	06/05/2010
Procedencia	Piscifactoría Escuela de Montes, UPM	Tª agua (°C)	18.4
Talla (cm)	13.9 – 15.8	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	3 - 4	Q (m3/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: descanso de 134 s en zona A
- Modo de ascenso: 1
- Velocidad de natación máxima: 1.34 m/s
- Aceleración máxima: 1.04 m/s²

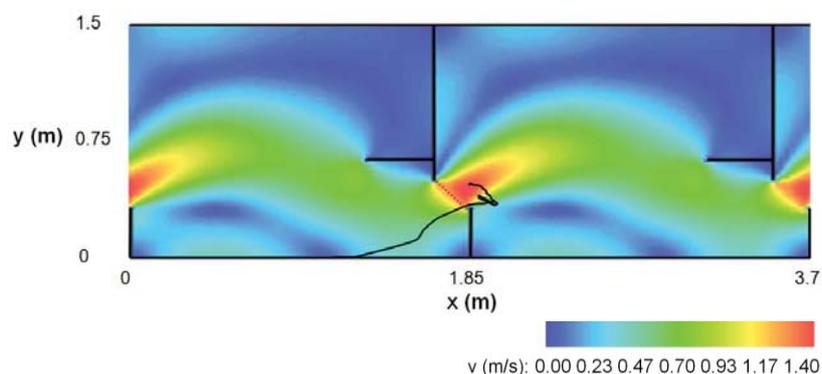


Figura 27 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de boga del Tajo nº 4

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Pseudochondrostoma polylepis	Fecha y hora	06/05/2010
Procedencia	Piscifactoría Escuela de Montes, UPM	Tª agua (°C)	18.4
Talla (cm)	13.9 – 15.8	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	4 - 5	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: descanso de 255 s en zona A
- Modo de ascenso: 1
- Velocidad de natación máxima: 1.78 m/s
- Aceleración máxima: 2.66 m/s²

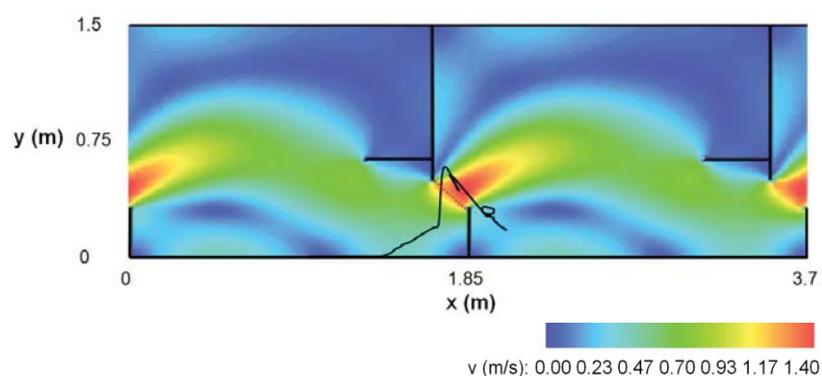


Figura 28 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de boga del Tajo n° 5

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Pseudochondrostoma polylepis	Fecha y hora	06/05/2010
Procedencia	Piscifactoría Escuela de Montes, UPM	Tª agua (°C)	18.4
Talla (cm)	13.9 – 15.8	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	5 - 6	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: descanso de 134 s en zona A
- Modo de ascenso: 1
- Velocidad de natación máxima: 1.43 m/s
- Aceleración máxima: 1.59 m/s²

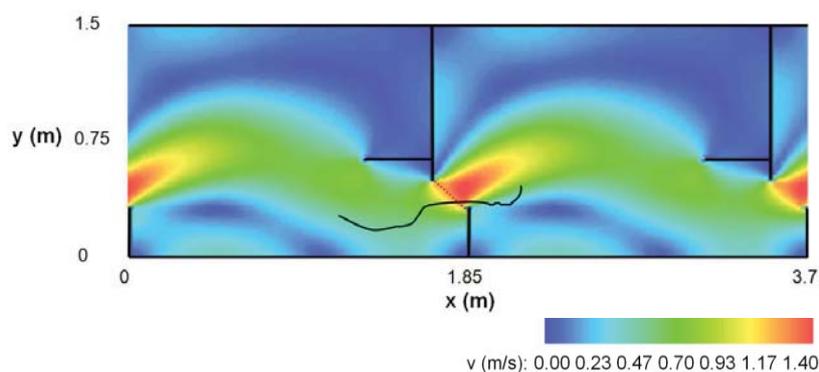


Figura 29 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de boga del Tajo n° 6

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Pseudochondrostoma polylepis	Fecha y hora	06/05/2010
Procedencia	Piscifactoría Escuela de Montes, UPM	Tª agua (°C)	18.4
Talla (cm)	13.9 – 15.8	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	6 - 7	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: descanso de 258 s en zona A
- Modo de ascenso: 1
- Velocidad de natación máxima: 1.47 m/s
- Aceleración máxima: 0.98 m/s²

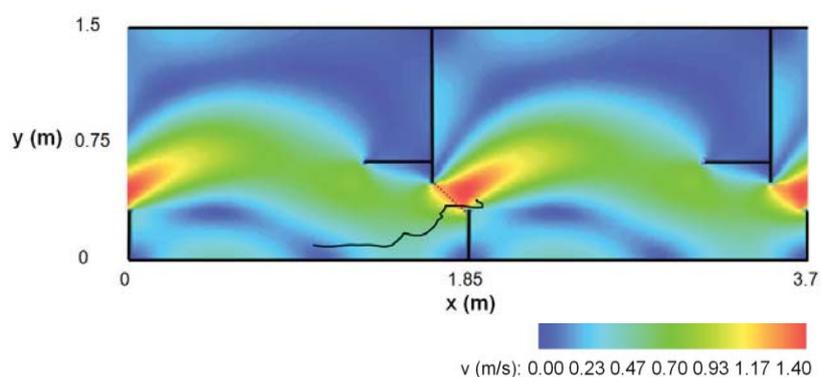


Figura 30 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de boga del Tajo nº 7

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Pseudochondrostoma polylepis	Fecha y hora	06/05/2010
Procedencia	Piscifactoría Escuela de Montes, UPM	Tª agua (°C)	18.4
Talla (cm)	13.9 – 15.8	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	1 - 2	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: descanso de 1322 s en zona A
- Modo de ascenso: 1
- Velocidad de natación máxima: 1.65 m/s
- Aceleración máxima: 1.72 m/s²

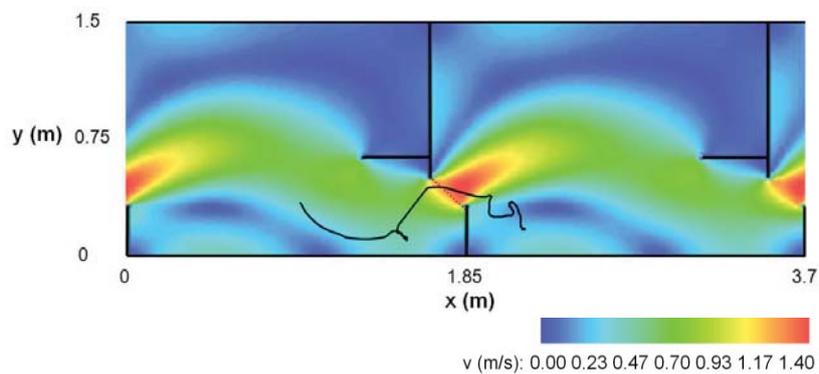


Figura 31 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

1.2.2 Ensayo del 14 de abril de 2011

La duración total del ensayo es de 24 horas y se ensayan 25 ejemplares.

1.2.2.1 Zonas de recirculación

Tabla 6 Tiempo de permanencia de los ejemplares de boga en cada una de las zonas de descanso (ensayo del 14/04/2011).

T(s) Zona/Ejemplar	Boga 1	Boga 2	Boga 3	Boga 4	Boga 5
Piscina 1 A B C	514	253	177		
Piscina 2 A B C			10	11 52	
Piscina 3 A B C			461	170 + 190	
Piscina 4 A B C					
Piscina 5 A B C			421	1207	1136 + 2084
Piscina 6 A B C					
Piscina 7 A B C			398	306	
Ttotal (s) A B C	514 0 0	253 0 0	1467 0 0	1873 11 52	3220 0 0

Tabla 7 Tiempo medio de permanencia de los ejemplares de boga en cada una de las zonas de descanso (ensayo del 14/04/2011).

		T total (s)	N descansos	T medio (s)
Piscina 1	A	944	3	315
	B			
	C			
Piscina 2	A	10	1	10
	B	11	1	11
	C	52	1	52
Piscina 3	A	821	3	274
	B			
	C			
Piscina 4	A			
	B			
	C			
Piscina 5	A	4848	4	1212
	B			
	C			
Piscina 6	A			
	B			
	C			
Piscina 7	A	704	2	352
	B			
	C			
TOTAL	A	7327	13	564
	B	11	1	11
	C	52	1	52

1.2.2.2 Velocidades y aceleraciones en los pasos de hendidura

Valores medios

Tabla 8 Velocidad de natación y aceleración media de los ejemplares de boga (ensayo del 14/04/2011).

Velocidad de natación (m/s)		Aceleración (m/s ²)	
Máximo promedio	Desviación típica	Máximo promedio	Desviación típica
1.55	0.11	0.71	0.67

Modo de ascenso

Tipo 1 en todos los pasos

Paso de hendidura de boga del Tajo nº 8

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Pseudochondrostoma polylepis	Fecha y hora	14/04/2011
Procedencia	Piscifactoría Escuela de Montes, UPM	Tª agua (°C)	19.2
Talla (cm)	15 – 20	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	1 - 2	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: descanso de 514 s en zona A
- Modo de ascenso: 1
- Velocidad de natación máxima: 1.43 m/s
- Aceleración máxima: 0.81 m/s²

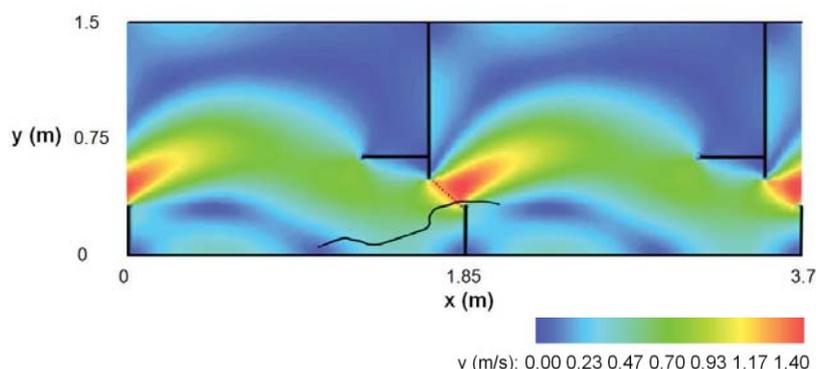


Figura 32 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de boga del Tajo nº 9

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Pseudochondrostoma polylepis	Fecha y hora	14/04/2011
Procedencia	Piscifactoría Escuela de Montes, UPM	Tª agua (°C)	19.2
Talla (cm)	15 – 20	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	2 - 3	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: -
- Modo de ascenso: 1
- Velocidad de natación máxima: 1.60 m/s

- Aceleración máxima: 0 m/s^2

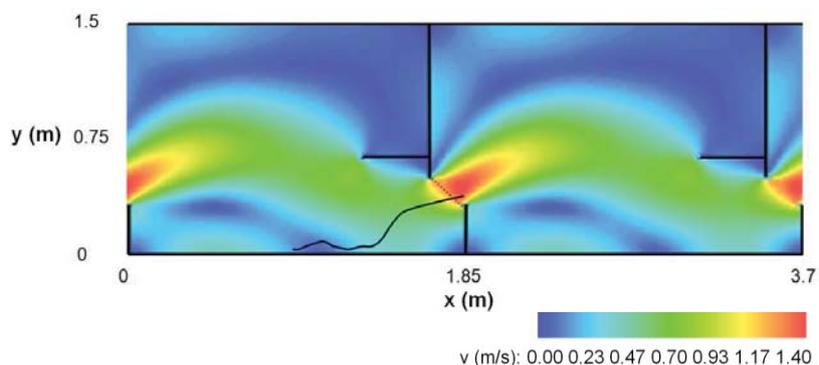


Figura 33 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de boga del Tajo nº 10

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Pseudochondrostoma polylepis	Fecha y hora	14/04/2011
Procedencia	Piscifactoría Escuela de Montes, UPM	Tª agua (°C)	19.2
Talla (cm)	15 – 20	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	1 - 2	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: descanso de 177 s en zona A
- Modo de ascenso: 1
- Velocidad de natación máxima: 1.63 m/s
- Aceleración máxima: 1.32 m/s^2

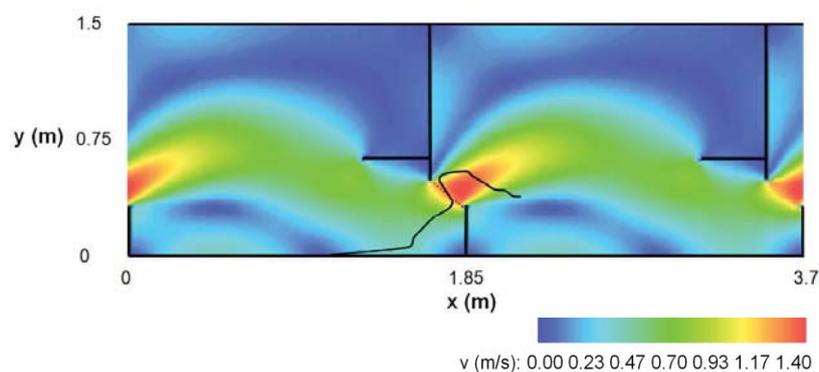


Figura 34 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

1.3 Barbo común

1.3.1 Ensayo del 20 de mayo de 2010

La duración total del ensayo es de 24 horas y se ensayan 16 ejemplares.

1.3.1.1 Zonas de recirculación

Tabla 9 Tiempo de permanencia de los ejemplares de barbo en cada una de las zonas de descanso (ensayo del 20/05/2010).

T(s) Zona/Ejemplar	Barbo 1	Barbo 2	Barbo 3	Barbo 4
Piscina 1 A				13
B		130		
C				
Piscina 2 A				
B		24		620
C				
Piscina 3 A		30	746	
B				
C				
Piscina 4 A	232	859	26	23
B				16
C				
Piscina 5 A	338		755	
B			172	
C				
Piscina 6 A				
B				1668
C				
Piscina 7 A	517		16	
B				109
C				
Ttotal (s) A	1087	889	1543	36
B	0	154	172	2413
C	0	0	0	0

Tabla 10 Tiempo medio de permanencia de los ejemplares de barbo en cada una de las zonas de descanso (ensayo del 20/05/2010).

		T total (s)	N descansos	T medio (s)
Piscina 1	A	13	1	13
	B	130	1	130
	C			
Piscina 2	A			
	B	644	2	322
	C			
Piscina 3	A	776	2	388
	B			
	C			
Piscina 4	A	1140	4	285
	B	16	1	16
	C			
Piscina 5	A	1093	2	547
	B	172	1	172
	C			
Piscina 6	A			
	B	1668	1	1668
	C			
Piscina 7	A	533	2	267
	B	109	1	109
	C			
TOTAL	A	3555	11	323
	B	2739	7	391
	C			

1.3.1.2 Velocidades y aceleraciones en los pasos de hendidura**Valores medios****Tabla 11 Velocidad de natación y aceleración media de los ejemplares de barbo (ensayo del 20/05/2010).**

Velocidad de natación (m/s)		Aceleración (m/s ²)	
Máximo promedio	Desviación típica	Máximo promedio	Desviación típica
1.51	0.27	1.04	0.60

Modo de ascenso

- Tipo 1: 81.3% de los pasos
- Tipo 2: 18.7 % de los pasos

Paso de hendidura de barbo común n° 1

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Luciobarbus bocagei	Fecha y hora	20/05/2010
Procedencia	Río Cofio	Tª agua (°C)	18.9
Talla (cm)	32.4	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	1 - 2	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: sin descanso
- Modo de ascenso: 1
- Velocidad de natación máxima: 0.97 m/s
- Aceleración máxima: 0.56 m/s²

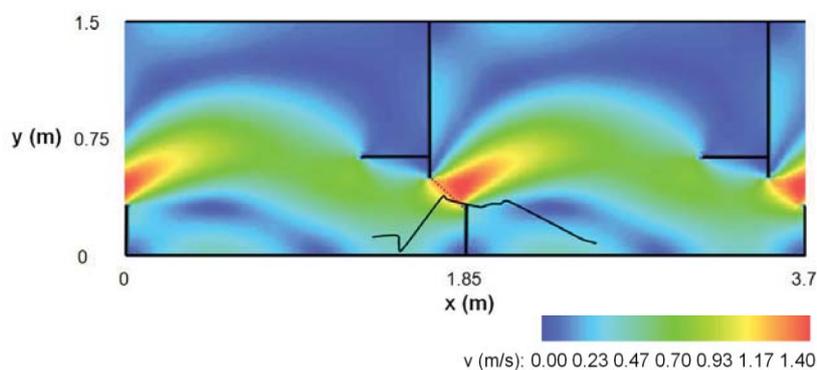


Figura 35 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de barbo común n° 2

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Luciobarbus bocagei	Fecha y hora	20/05/2010
Procedencia	Río Cofio	Tª agua (°C)	18.9
Talla (cm)	32.4	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	2 - 3	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: sin descanso
- Modo de ascenso: 1

- Velocidad de natación máxima: 1.33 m/s
- Aceleración máxima: 1.48 m/s²

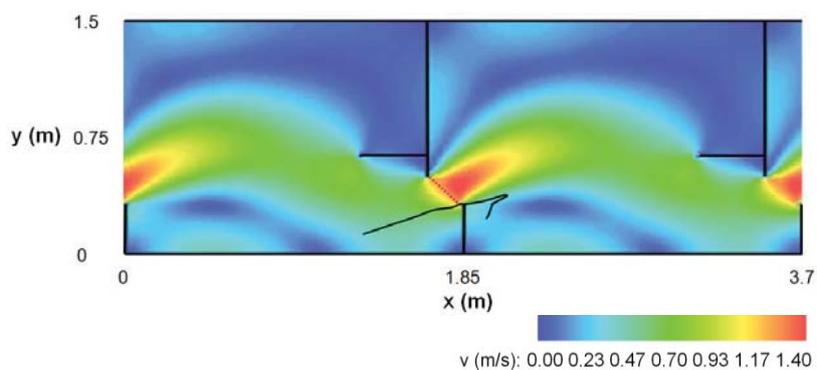


Figura 36 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de barbo común nº 3

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Luciobarbus bocagei	Fecha y hora	20/05/2010
Procedencia	Río Cofio	Tª agua (°C)	18.9
Talla (cm)	32.4	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	4 - 5	Q (m ³ /s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: descanso de 232 s en zona A
- Modo de ascenso: 1
- Velocidad de natación máxima: 1.48 m/s
- Aceleración máxima: 0.58 m/s²

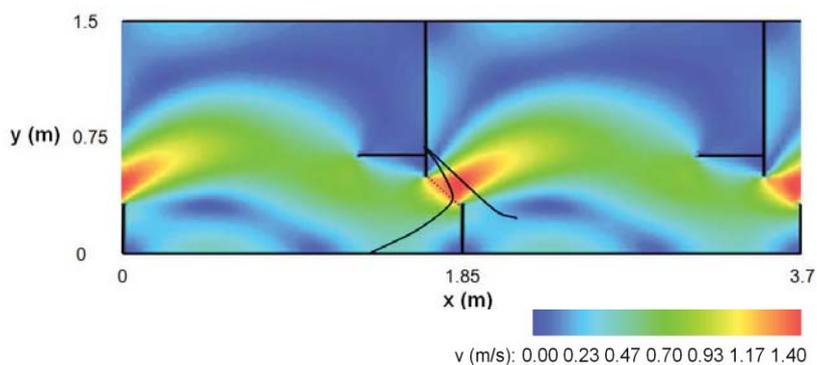


Figura 37 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de barbo común nº 4

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Luciobarbus bocagei	Fecha y hora	20/05/2010
Procedencia	Río Cofio	Tª agua (°C)	18.9
Talla (cm)	32.4	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	5 - 6	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: descanso de 338 s en zona A
- Modo de ascenso: 1
- Velocidad de natación máxima: 1.90 m/s
- Aceleración máxima: 1.66 m/s²

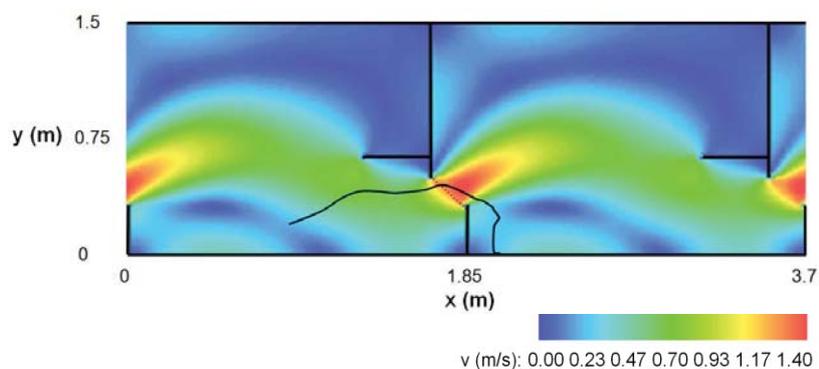


Figura 38 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de barbo común nº 5

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Luciobarbus bocagei	Fecha y hora	20/05/2010
Procedencia	Río Cofio	Tª agua (°C)	18.9
Talla (cm)	32.4	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	6 - 7	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: sin descanso
- Modo de ascenso: 1
- Velocidad de natación máxima: 1.70 m/s
- Aceleración máxima: 1.62 m/s²

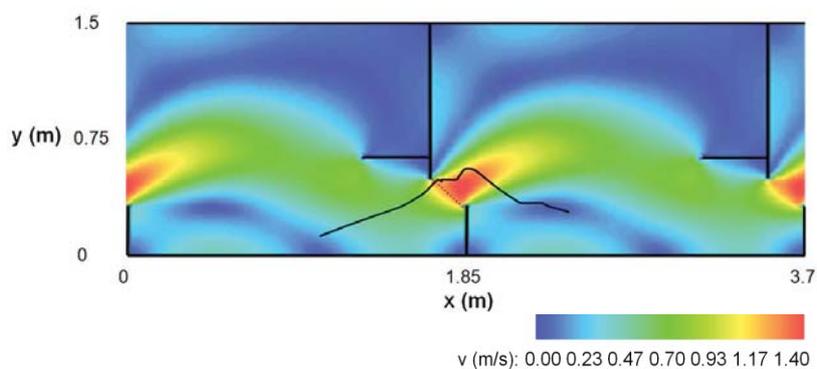


Figura 39 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de barbo común nº 6

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Luciobarbus bocagei	Fecha y hora	20/05/2010
Procedencia	Río Cofio	Tª agua (°C)	18.9
Talla (cm)	31.4	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	4 - 5	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: descanso de 30 s en zona A
- Modo de ascenso: 1
- Velocidad de natación máxima: 1.07 m/s
- Aceleración máxima: 0.49 m/s²

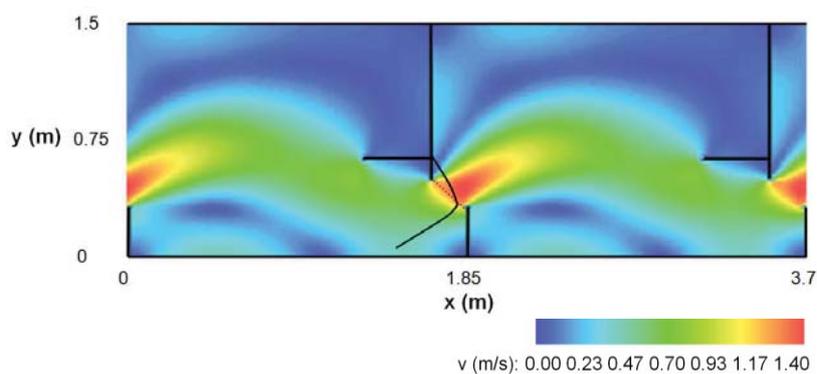


Figura 40 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de barbo común n° 7

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Luciobarbus bocagei	Fecha y hora	20/05/2010
Procedencia	Río Cofio	Tª agua (°C)	18.9
Talla (cm)	32.0	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	1 - 2	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: sin descanso
- Modo de ascenso: 1
- Velocidad de natación máxima: 1.68 m/s
- Aceleración máxima: 0.53 m/s²

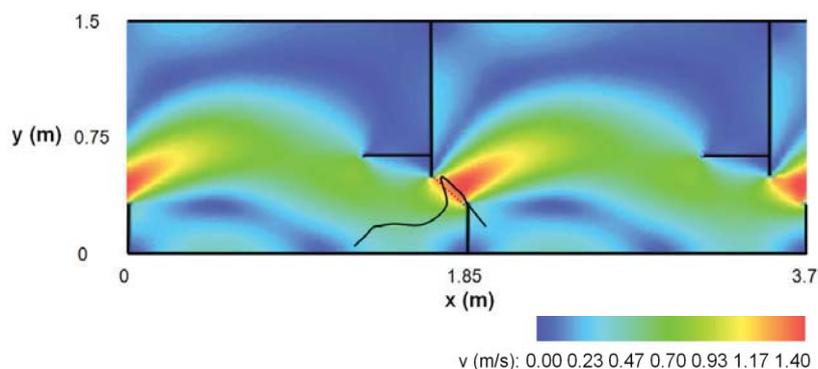


Figura 41 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de barbo común n° 8

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Luciobarbus bocagei	Fecha y hora	20/05/2010
Procedencia	Río Cofio	Tª agua (°C)	18.9
Talla (cm)	32.0	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	2 - 3	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: sin descanso
- Modo de ascenso: 1
- Velocidad de natación máxima: 1.63 m/s
- Aceleración máxima: 1.23 m/s²

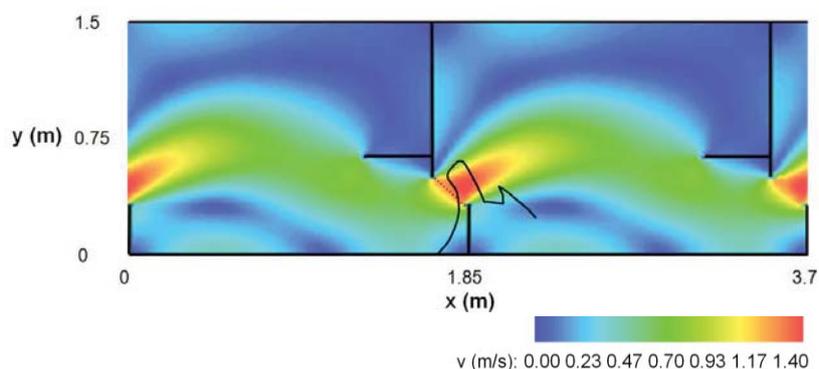


Figura 42 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de barbo común nº 9

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Luciobarbus bocagei	Fecha y hora	20/05/2010
Procedencia	Río Cofio	Tª agua (°C)	18.9
Talla (cm)	32.0	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	4 - 5	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: descanso de 26 s en zona A
- Modo de ascenso: 1
- Velocidad de natación máxima: 1.69 m/s
- Aceleración máxima: 1.06 m/s²

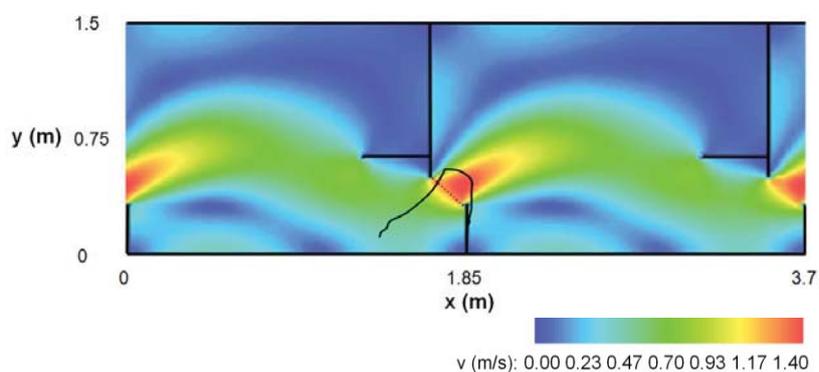


Figura 43 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de barbo común nº 10

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Luciobarbus bocagei	Fecha y hora	20/05/2010
Procedencia	Río Cofio	Tª agua (°C)	18.9
Talla (cm)	32.0	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	6 - 7	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: sin descanso
- Modo de ascenso: 1
- Velocidad de natación máxima: 1.82 m/s
- Aceleración máxima: 1.40 m/s²

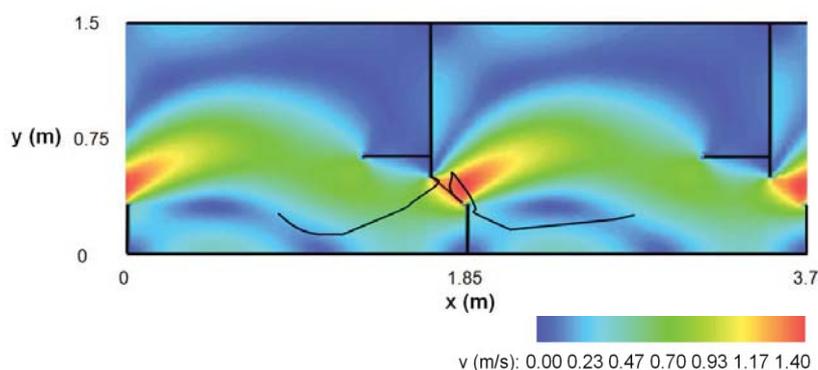


Figura 44 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de barbo común nº 11

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Luciobarbus bocagei	Fecha y hora	20/05/2010
Procedencia	Río Cofio	Tª agua (°C)	18.9
Talla (cm)	33.2	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	1 - 2	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: descanso de 13 s en zona A
- Modo de ascenso: 1
- Velocidad de natación máxima: 1.32 m/s
- Aceleración máxima: 0.90 m/s²

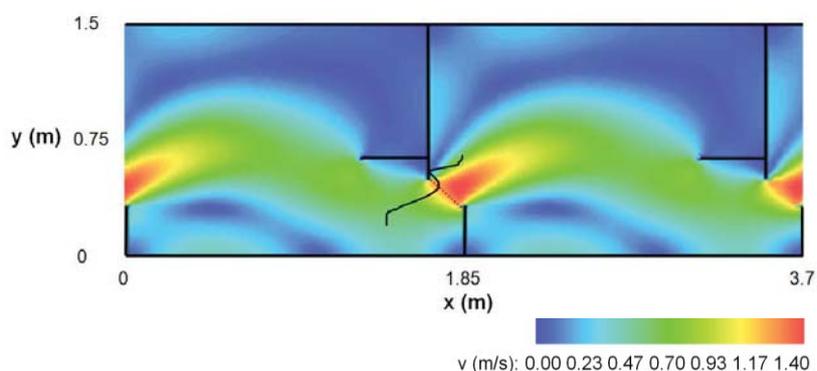


Figura 45 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de barbo común nº 12

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Luciobarbus bocagei	Fecha y hora	20/05/2010
Procedencia	Río Cofio	Tª agua (°C)	18.9
Talla (cm)	33.2	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	2 - 3	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: descanso de 620 s en zona B
- Modo de ascenso: 2
- Velocidad de natación máxima: 1.44 m/s
- Aceleración máxima: 0.83 m/s²

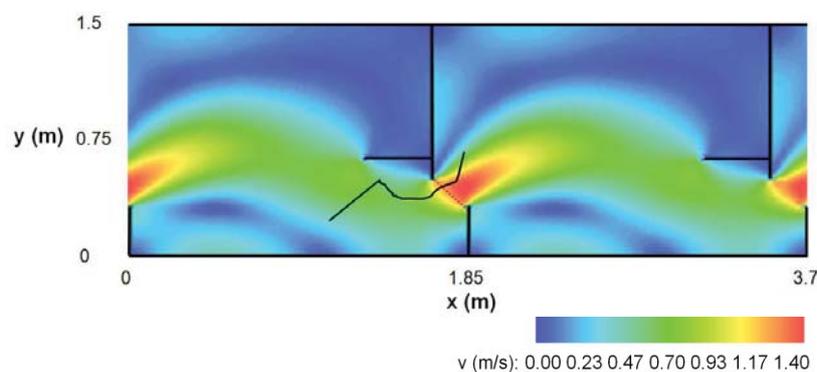


Figura 46 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de barbo común nº 13

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Luciobarbus bocagei	Fecha y hora	20/05/2010
Procedencia	Río Cofio	Tª agua (°C)	18.9
Talla (cm)	33.2	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	3 - 4	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: sin descanso
- Modo de ascenso: 1
- Velocidad de natación máxima: 1.59 m/s
- Aceleración máxima: 0.71 m/s²

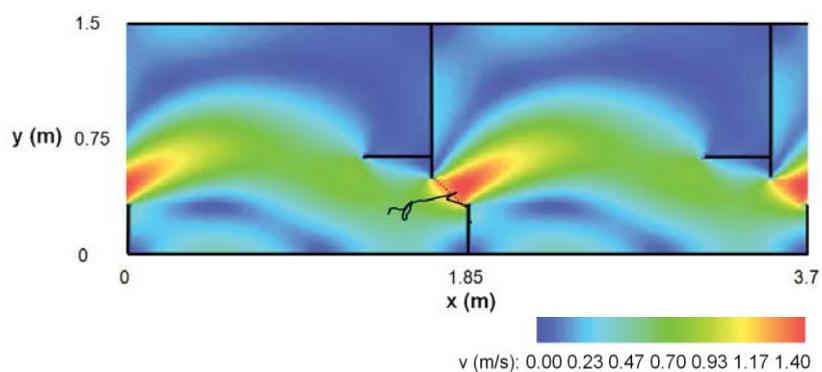


Figura 47 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de barbo común nº 14

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Luciobarbus bocagei	Fecha y hora	20/05/2010
Procedencia	Río Cofio	Tª agua (°C)	18.9
Talla (cm)	33.2	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	5 - 6	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: sin descanso
- Modo de ascenso: 1
- Velocidad de natación máxima: 1.88 m/s
- Aceleración máxima: 2.50 m/s²

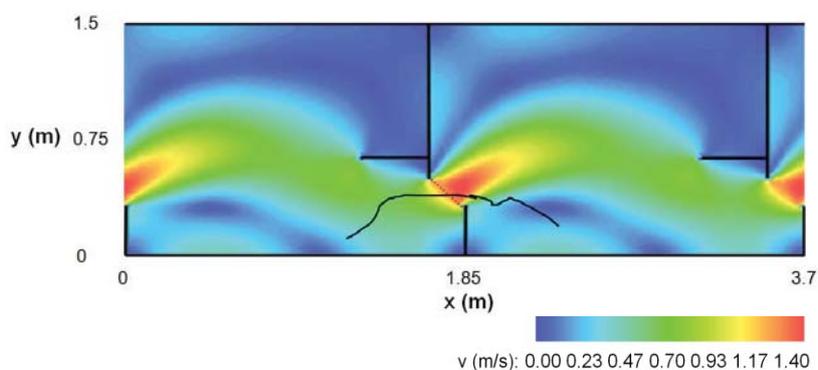


Figura 48 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de barbo común nº 15

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Luciobarbus bocagei	Fecha y hora	20/05/2010
Procedencia	Río Cofio	Tª agua (°C)	18.9
Talla (cm)	33.2	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	6 - 7	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: descanso de 1668 s en zona B
- Modo de ascenso: 2
- Velocidad de natación máxima: 1.32 m/s
- Aceleración máxima: 1.02 m/s²

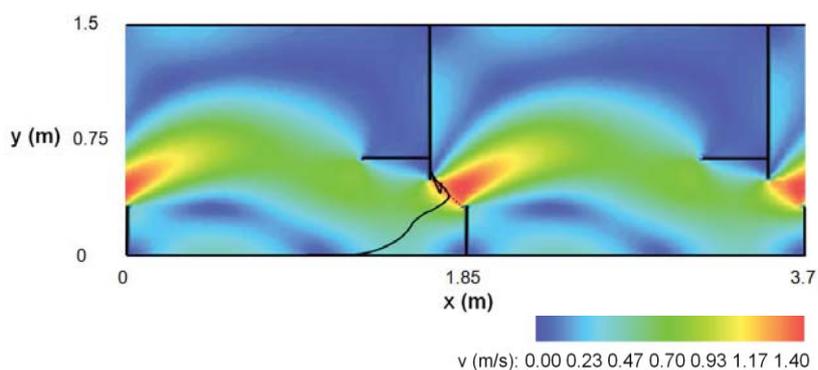


Figura 49 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de barbo común nº 16

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Luciobarbus bocagei	Fecha y hora	20/05/2010
Procedencia	Río Cofio	Tª agua (°C)	18.9
Talla (cm)	34.9	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	3 - 4	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: sin descanso
- Modo de ascenso: 2
- Velocidad de natación máxima: 1.35 m/s
- Aceleración máxima: 0.02 m/s²

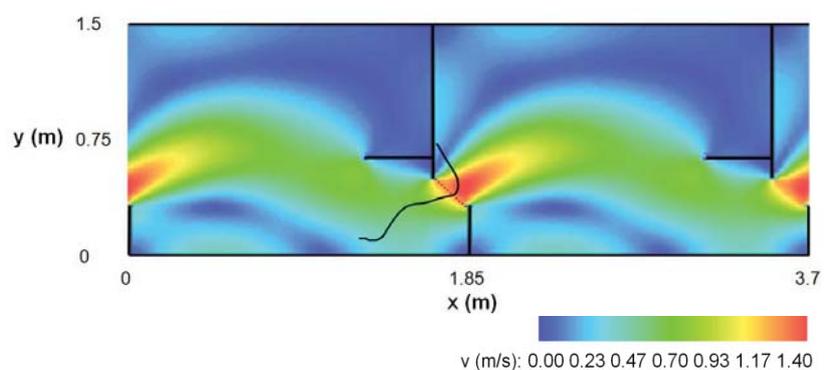


Figura 50 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

1.3.2 Ensayo del 19 de mayo de 2011

La duración total del ensayo es de 24 horas y se ensayan un total de 12 ejemplares.

1.3.2.1 Zonas de recirculación

Tabla 12 Tiempo de permanencia de los ejemplares de barbo en cada una de las zonas de descanso (ensayo del 19/05/2011).

T(s) Zona/Ejemplar	Barbo 1	Barbo 2	Barbo 3	Barbo 4	Barbo 5	Barbo 6	Barbo 7
Piscina 1 A B C	163	52	10	62 116	11	12	
Piscina 2 A B C		114 39	12				41
Piscina 3 A B C	30 298	63	11	24	162	93	126
Piscina 4 A B C		164 37			12		
Piscina 5 A B C			52	103			
Piscina 6 A B C	33	12	16			98	
Piscina 7 A B C	196	14 273	139	11 308	136	154 68	99
Ttotal (s) A B C	422 298	255 607 69	191 49	176 448	11 310	357 68	99 126 41

Tabla 13 Tiempo medio de permanencia de los ejemplares de barbo en cada una de las zonas de descanso (ensayo del 19/05/2011).

		T total (s)	N descansos	T medio (s)
Piscina 1	A	300	5	60
	B	126	2	63
	C			
Piscina 2	A	114	1	114
	B	51	2	26
	C	41	1	41
Piscina 3	A	186	3	62
	B	621	5	124
	C			
Piscina 4	A			
	B	176	2	88
	C	37	1	37
Piscina 5	A	155	2	78
	B	131	1	131
	C	32	1	32
Piscina 6	A	143	3	48
	B	16	1	16
	C			
Piscina 7	A	613	6	102
	B	785	4	196
	C			
TOTAL	A	1511	20	76
	B	1906	17	112
	C	110	3	37

1.3.2.2 Velocidades y aceleraciones en los pasos de hendidura

Valores medios

Tabla 14 Velocidad de natación y aceleración media de los ejemplares de barbo (ensayo del 19/05/2011).

Velocidad de natación (m/s)		Aceleración (m/s ²)	
Máximo promedio	Desviación típica	Máximo promedio	Desviación típica
1.56	0.18	1.02	0.54

Modo de ascenso

- Tipo 1: 48.4% de los pasos
- Tipo 2: 51.6 % de los pasos

Paso de hendidura de barbo común n° 17

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Luciobarbus bocagei	Fecha y hora	19/05/2011
Procedencia	Río Cofio	Tª agua (°C)	20.8
Talla (cm)	30-35	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	1 - 2	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: descanso de 163 s en zona A
- Modo de ascenso: 1
- Velocidad de natación máxima: 1.77 m/s
- Aceleración máxima: 1.64 m/s²

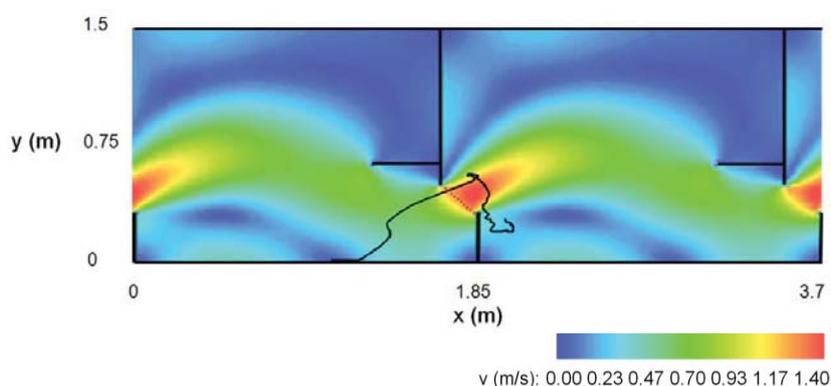


Figura 51 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de barbo común n° 18

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Luciobarbus bocagei	Fecha y hora	19/05/2011
Procedencia	Río Cofio	Tª agua (°C)	20.8
Talla (cm)	30-35	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	2 - 3	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: sin descanso
- Modo de ascenso: 1

- Velocidad de natación máxima: 1.66 m/s
- Aceleración máxima: 1.61 m/s²

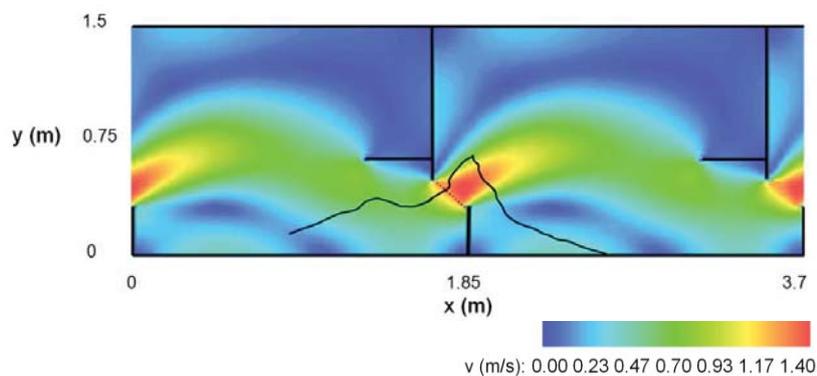


Figura 52 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de barbo común nº 19

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Luciobarbus bocagei	Fecha y hora	19/05/2011
Procedencia	Río Cofio	Tª agua (°C)	20.8
Talla (cm)	30-35	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	3 - 4	Q (m ³ /s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: descanso de 298 s en zona B
- Modo de ascenso: 2
- Velocidad de natación máxima: 1.64 m/s
- Aceleración máxima: 0.11 m/s²

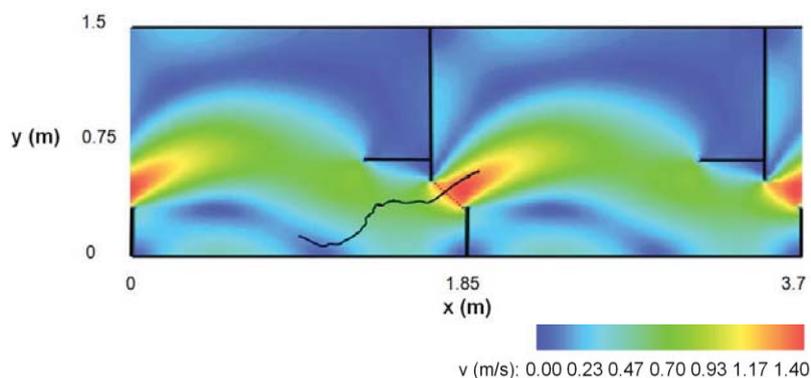


Figura 53 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de barbo común n° 20

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Luciobarbus bocagei	Fecha y hora	19/05/2011
Procedencia	Río Cofio	Tª agua (°C)	20.8
Talla (cm)	30-35	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	4 - 5	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: sin descanso
- Modo de ascenso: 1
- Velocidad de natación máxima: 1.77 m/s
- Aceleración máxima: 0.69 m/s²

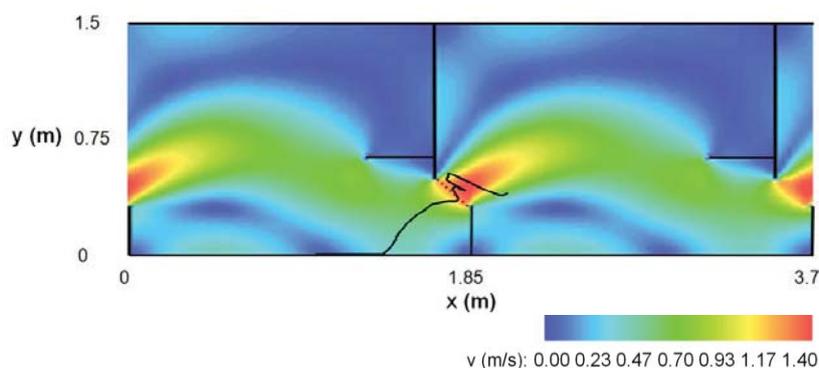


Figura 54 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de barbo común n° 21

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Luciobarbus bocagei	Fecha y hora	19/05/2011
Procedencia	Río Cofio	Tª agua (°C)	20.8
Talla (cm)	30-35	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	5 - 6	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: sin descanso
- Modo de ascenso: 1
- Velocidad de natación máxima: 1.56 m/s
- Aceleración máxima: 1.50 m/s²

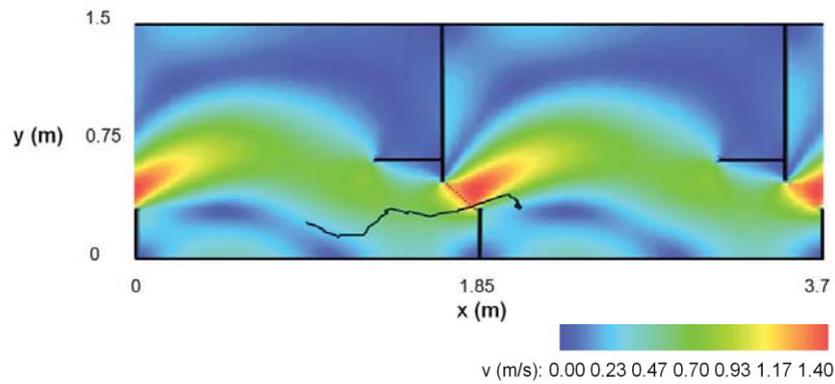


Figura 55 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de barbo común nº 22

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Luciobarbus bocagei	Fecha y hora	19/05/2011
Procedencia	Río Cofio	Tª agua (°C)	20.8
Talla (cm)	30-35	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	6 - 7	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: descanso de 33 s en zona A
- Modo de ascenso: 1
- Velocidad de natación máxima: 1.47 m/s
- Aceleración máxima: 0.87 m/s²

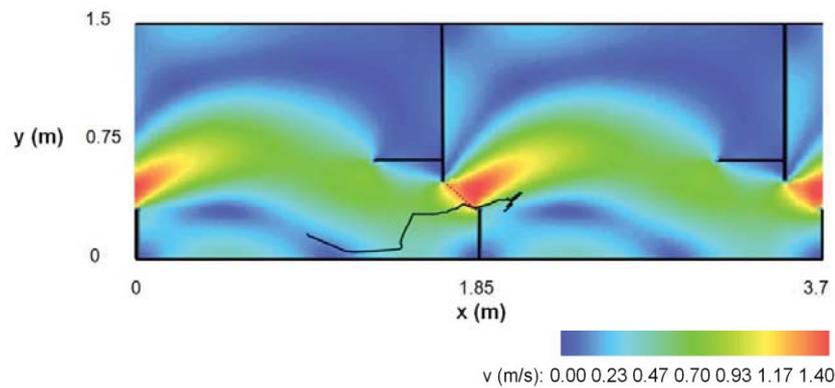


Figura 56 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de barbo común n° 23

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Luciobarbus bocagei	Fecha y hora	19/05/2011
Procedencia	Río Cofio	Tª agua (°C)	20.8
Talla (cm)	30-35	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	1 - 2	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: sin descanso
- Modo de ascenso: 1
- Velocidad de natación máxima: 1.80 m/s
- Aceleración máxima: 1.42 m/s²

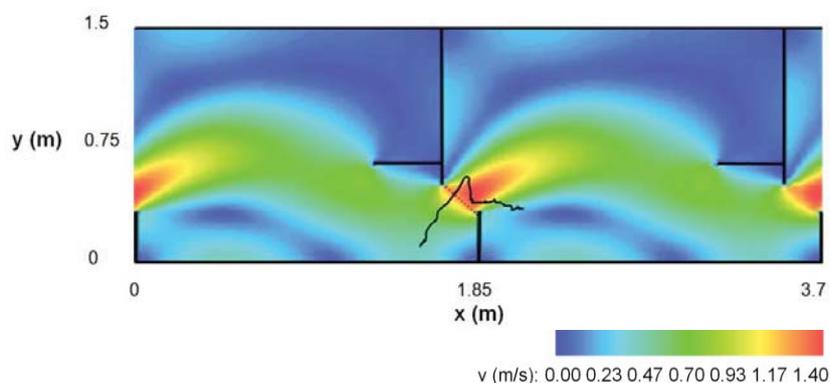


Figura 57 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de barbo común n° 24

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Luciobarbus bocagei	Fecha y hora	19/05/2011
Procedencia	Río Cofio	Tª agua (°C)	20.8
Talla (cm)	30-35	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	3 - 4	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: descanso de 63 s en zona A
- Modo de ascenso: 1
- Velocidad de natación máxima: 1.86 m/s
- Aceleración máxima: 1.15 m/s²

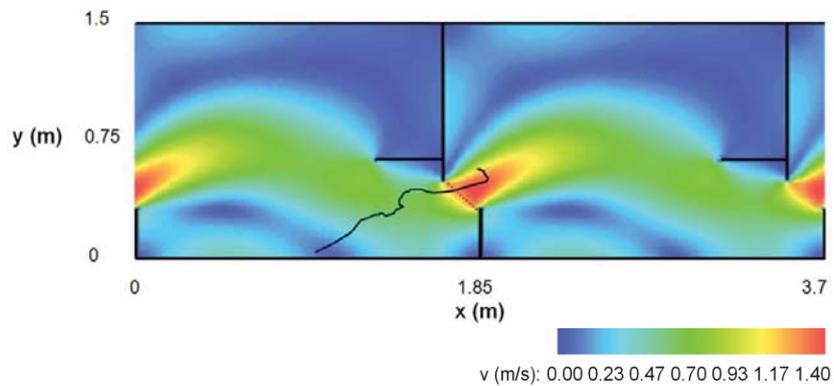


Figura 58 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de barbo común nº 25

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Luciobarbus bocagei	Fecha y hora	19/05/2011
Procedencia	Río Cofio	Tª agua (°C)	20.8
Talla (cm)	30-35	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	4 - 5	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: descanso de 164 s en zona B
- Modo de ascenso: 2
- Velocidad de natación máxima: 1.72 m/s
- Aceleración máxima: 1.50 m/s²

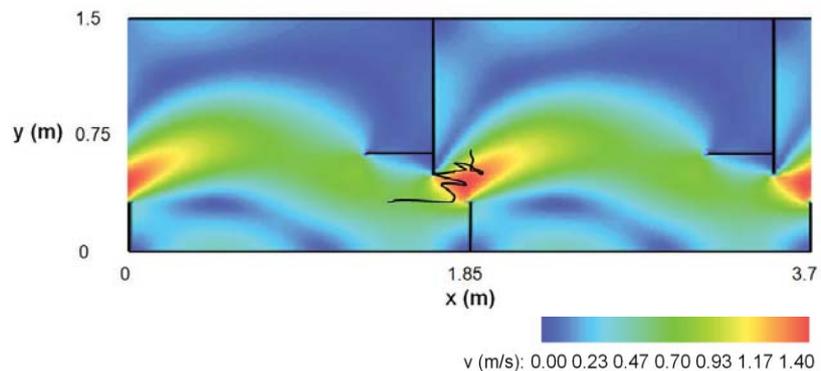


Figura 59 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de barbo común n° 26

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Luciobarbus bocagei	Fecha y hora	19/05/2011
Procedencia	Río Cofio	Tª agua (°C)	20.8
Talla (cm)	30-35	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	6 - 7	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: descanso de 12 s en zona A
- Modo de ascenso: 1
- Velocidad de natación máxima: 1.51 m/s
- Aceleración máxima: 0.50 m/s²

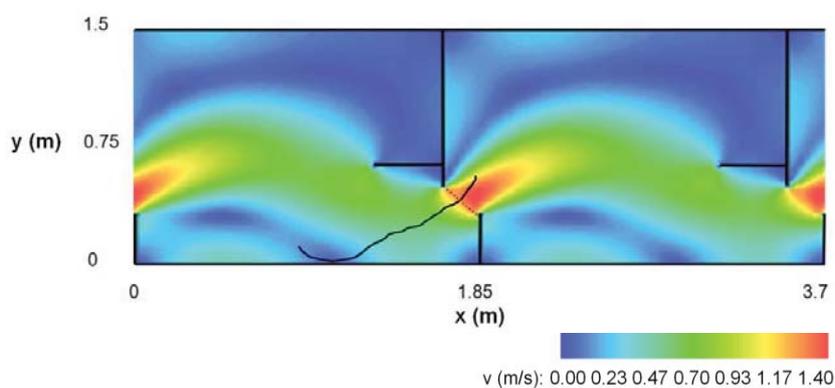


Figura 60 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de barbo común n° 27

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Luciobarbus bocagei	Fecha y hora	19/05/2011
Procedencia	Río Cofio	Tª agua (°C)	20.8
Talla (cm)	30-35	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	2 - 3	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: descanso de 12 s en zona B
- Modo de ascenso: 2
- Velocidad de natación máxima: 1.37 m/s
- Aceleración máxima: 1.39 m/s²

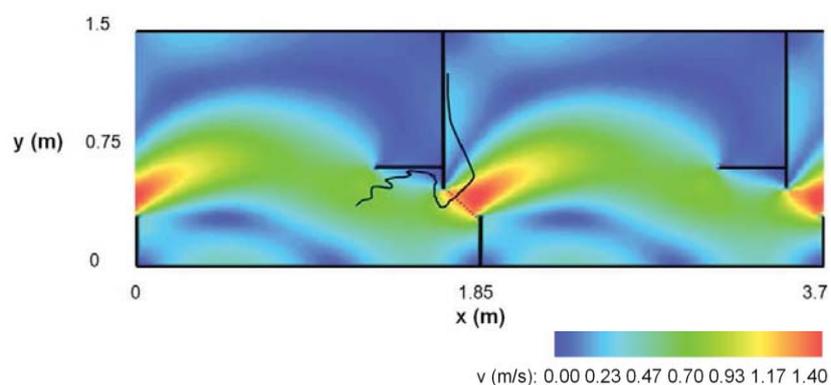


Figura 61 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de barbo común nº 28

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Luciobarbus bocagei	Fecha y hora	19/05/2011
Procedencia	Río Cofio	Tª agua (°C)	20.8
Talla (cm)	30-35	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	5 - 6	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: descanso de 52 s en zona A
- Modo de ascenso: 1
- Velocidad de natación máxima: 1.78 m/s
- Aceleración máxima: 0.0 m/s²

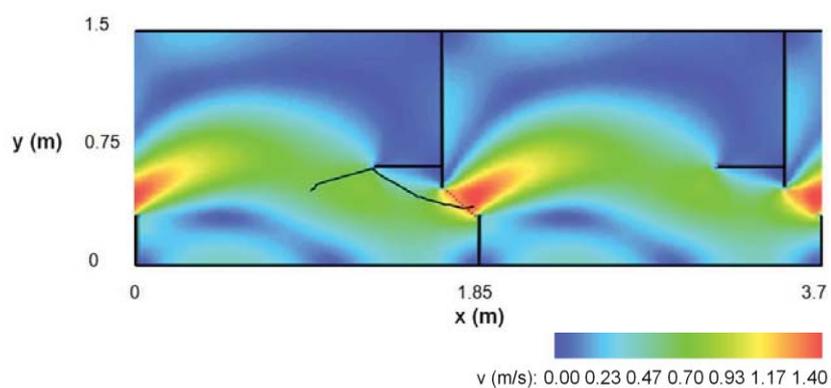


Figura 62 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de barbo común n° 29

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Luciobarbus bocagei	Fecha y hora	19/05/2011
Procedencia	Río Cofio	Tª agua (°C)	20.8
Talla (cm)	30-35	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	1 - 2	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: descanso de 62 s en zona A
- Modo de ascenso: 1
- Velocidad de natación máxima: 1.68 m/s
- Aceleración máxima: 1.88 m/s²

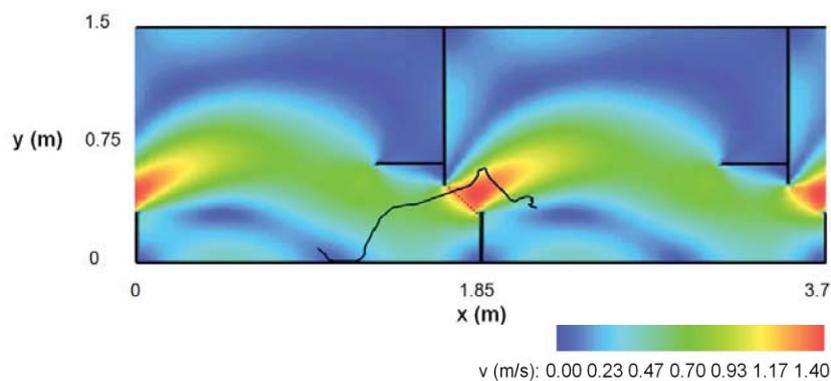


Figura 63 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de barbo común n° 30

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Luciobarbus bocagei	Fecha y hora	19/05/2011
Procedencia	Río Cofio	Tª agua (°C)	20.8
Talla (cm)	30-35	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	2 - 3	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: sin descanso
- Modo de ascenso: 2
- Velocidad de natación máxima: 1.25 m/s
- Aceleración máxima: 0.46 m/s²

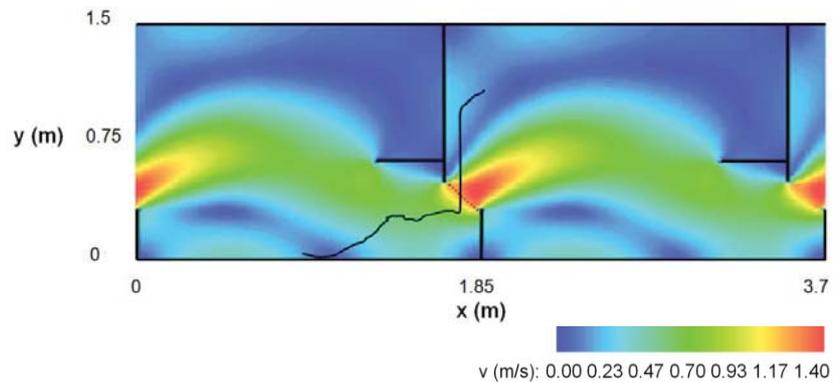


Figura 64 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de barbo común n° 31

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Luciobarbus bocagei	Fecha y hora	19/05/2011
Procedencia	Río Cofio	Tª agua (°C)	20.8
Talla (cm)	30-35	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	4 - 5	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: sin descanso
- Modo de ascenso: 2
- Velocidad de natación máxima: 1.33 m/s
- Aceleración máxima: 0.58 m/s²

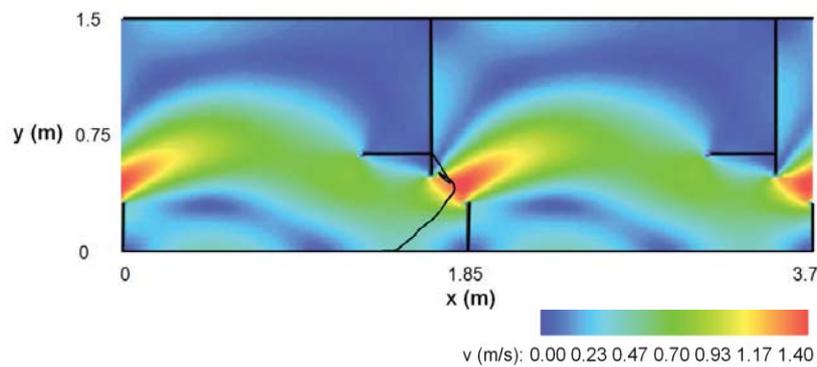


Figura 65 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de barbo común n° 32

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Luciobarbus bocagei	Fecha y hora	19/05/2011
Procedencia	Río Cofio	Tª agua (°C)	20.8
Talla (cm)	30-35	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	5 - 6	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: descanso de 103 s en zona A
- Modo de ascenso: 1
- Velocidad de natación máxima: 1.64 m/s
- Aceleración máxima: 1.12 m/s²

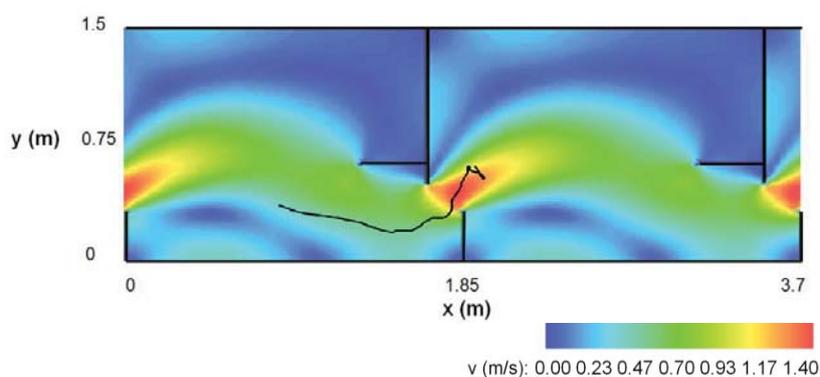


Figura 66 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de barbo común n° 33

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Luciobarbus bocagei	Fecha y hora	19/05/2011
Procedencia	Río Cofio	Tª agua (°C)	20.8
Talla (cm)	30-35	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	6 - 7	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: sin descanso
- Modo de ascenso: 2
- Velocidad de natación máxima: 1.51 m/s
- Aceleración máxima: 1.38 m/s²

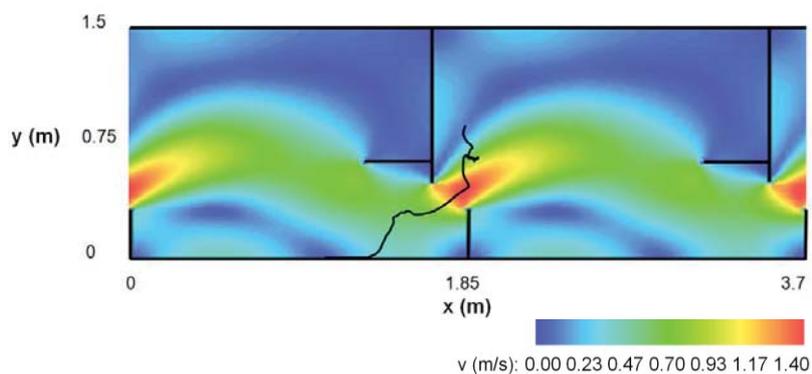


Figura 67 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de barbo común nº 34

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Luciobarbus bocagei	Fecha y hora	19/05/2011
Procedencia	Río Cofio	Tª agua (°C)	20.8
Talla (cm)	30-35	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	1 - 2	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: descanso de 11 s en zona A
- Modo de ascenso: 1
- Velocidad de natación máxima: 1.70 m/s
- Aceleración máxima: 0.0 m/s²

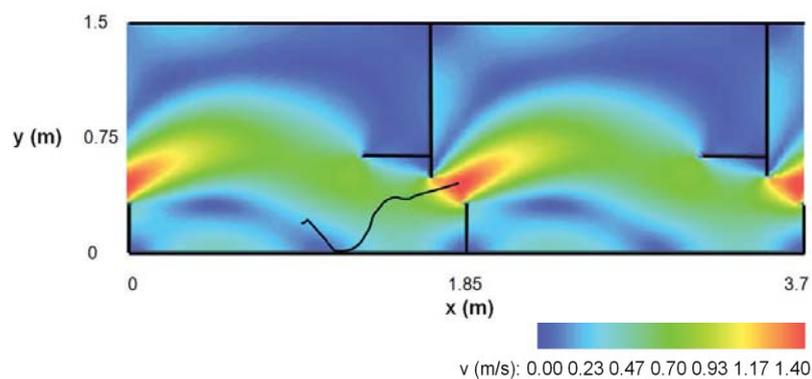


Figura 68 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de barbo común n° 35

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Luciobarbus bocagei	Fecha y hora	19/05/2011
Procedencia	Río Cofio	Tª agua (°C)	20.8
Talla (cm)	30-35	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	2 - 3	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: sin descanso
- Modo de ascenso: 2
- Velocidad de natación máxima: 1.31 m/s
- Aceleración máxima: 0.65 m/s²

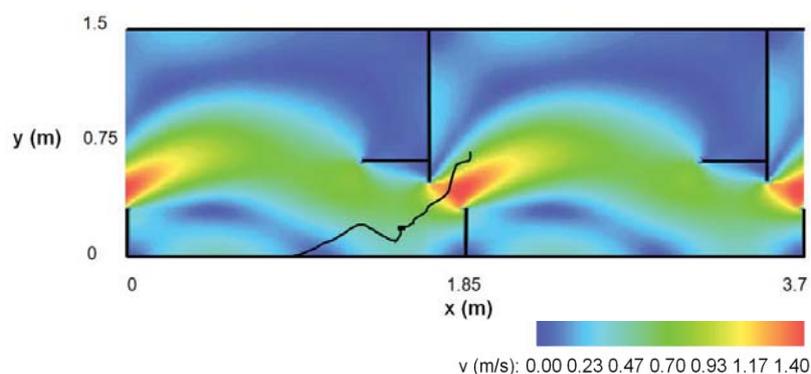


Figura 69 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de barbo común n° 36

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Luciobarbus bocagei	Fecha y hora	19/05/2011
Procedencia	Río Cofio	Tª agua (°C)	20.8
Talla (cm)	30-35	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	3 - 4	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: descanso de 162 s en zona B
- Modo de ascenso: 2
- Velocidad de natación máxima: 1.45 m/s
- Aceleración máxima: 0.34 m/s²

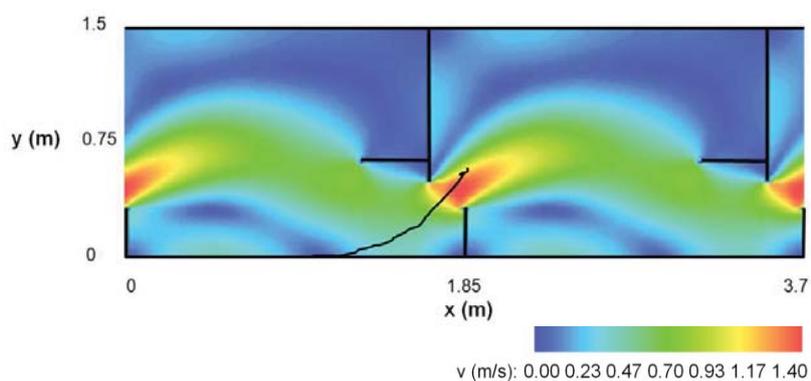


Figura 70 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de barbo común nº 37

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Luciobarbus bocagei	Fecha y hora	19/05/2011
Procedencia	Río Cofío	Tª agua (°C)	20.8
Talla (cm)	30-35	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	4 - 5	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: descanso de 12 s en zona B
- Modo de ascenso: 2
- Velocidad de natación máxima: 1.49 m/s
- Aceleración máxima: 1.12 m/s²

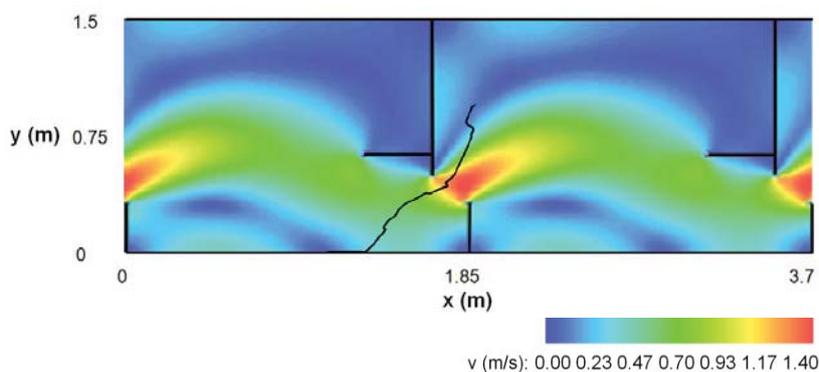


Figura 71 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de barbo común n° 38

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Luciobarbus bocagei	Fecha y hora	19/05/2011
Procedencia	Río Cofio	Tª agua (°C)	20.8
Talla (cm)	30-35	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	5 - 6	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: sin descanso
- Modo de ascenso: 2
- Velocidad de natación máxima: 1.54 m/s
- Aceleración máxima: 0.27 m/s²

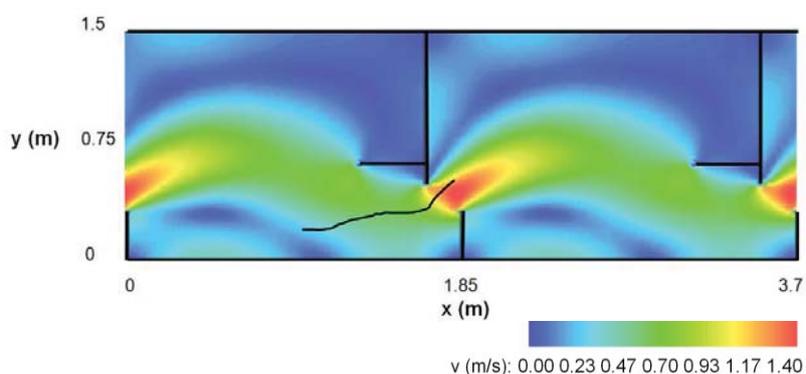


Figura 72 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de barbo común n° 39

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Luciobarbus bocagei	Fecha y hora	19/05/2011
Procedencia	Río Cofio	Tª agua (°C)	20.8
Talla (cm)	30-35	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	6 - 7	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: sin descanso
- Modo de ascenso: 2
- Velocidad de natación máxima: 1.39 m/s
- Aceleración máxima: 1.59 m/s²

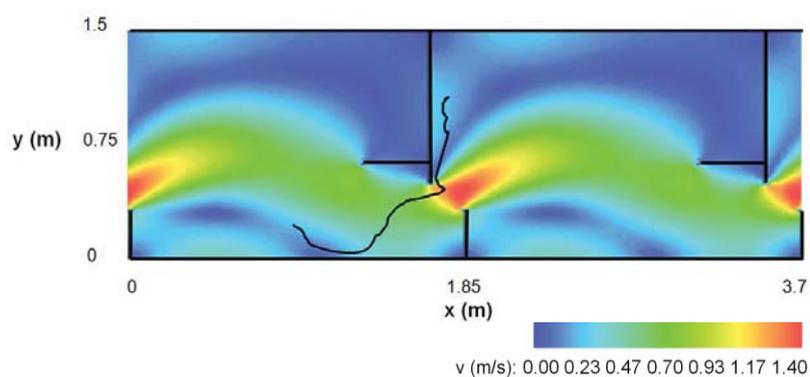


Figura 73 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de barbo común nº 40

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Luciobarbus bocagei	Fecha y hora	19/05/2011
Procedencia	Río Cofio	Tª agua (°C)	20.8
Talla (cm)	30-35	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	2 - 3	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: sin descanso
- Modo de ascenso: 2
- Velocidad de natación máxima: 1.41 m/s
- Aceleración máxima: 1.71 m/s²

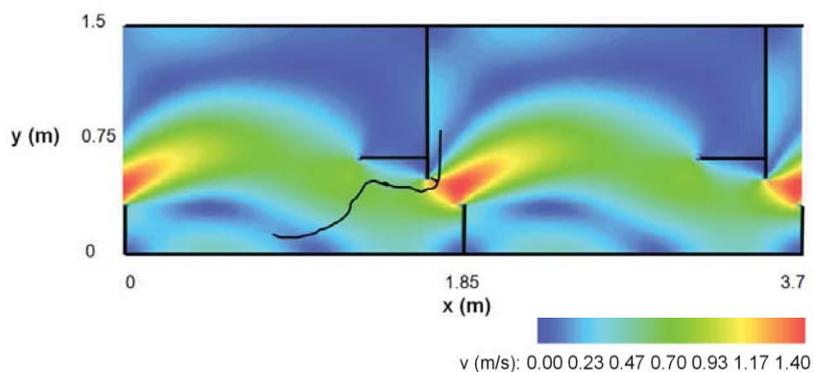


Figura 74 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de barbo común n° 41

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Luciobarbus bocagei	Fecha y hora	19/05/2011
Procedencia	Río Cofio	Tª agua (°C)	20.8
Talla (cm)	30-35	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	3 - 4	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: descanso de 93 s en zona A
- Modo de ascenso: 1
- Velocidad de natación máxima: 1.66 m/s
- Aceleración máxima: 1.55 m/s²

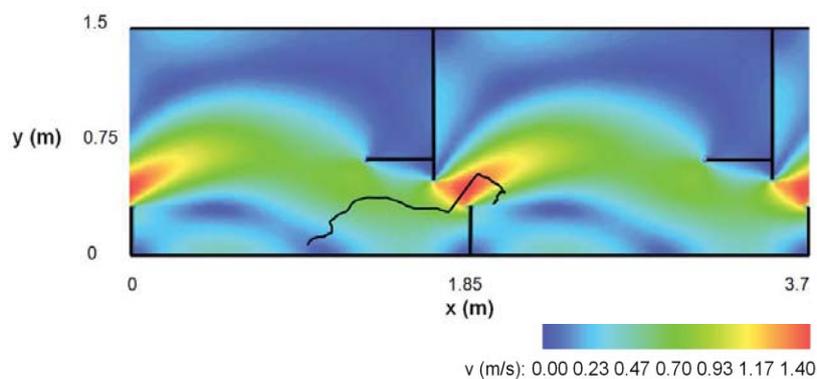


Figura 75 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de barbo común n° 42

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Luciobarbus bocagei	Fecha y hora	19/05/2011
Procedencia	Río Cofio	Tª agua (°C)	20.8
Talla (cm)	30-35	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	4 - 5	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: sin descanso
- Modo de ascenso: 1
- Velocidad de natación máxima: 1.72 m/s
- Aceleración máxima: 1.48 m/s²

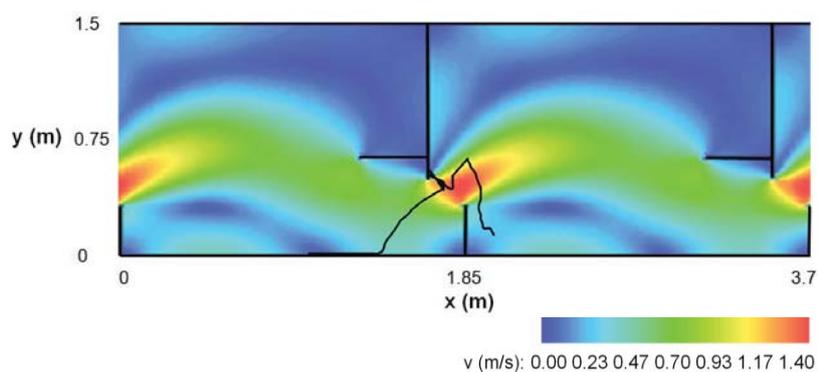


Figura 76 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de barbo común nº 43

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Luciobarbus bocagei	Fecha y hora	19/05/2011
Procedencia	Río Cofio	T ^a agua (°C)	20.8
Talla (cm)	30-35	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	5 - 6	Q (m ³ /s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: sin descanso
- Modo de ascenso: 2
- Velocidad de natación máxima: 1.54 m/s
- Aceleración máxima: 1.00 m/s²

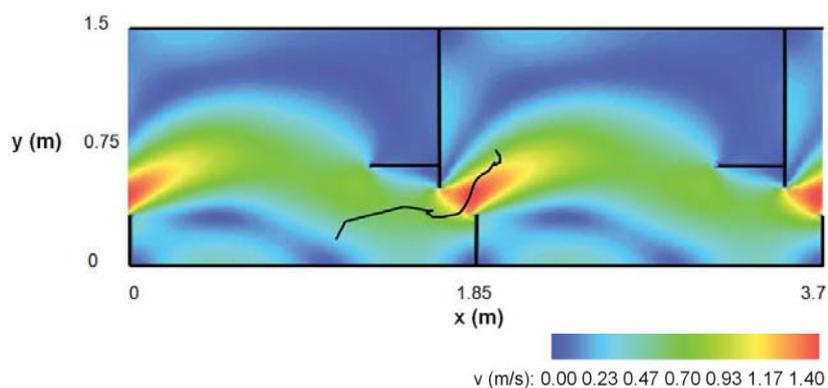


Figura 77 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de barbo común n° 44

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Luciobarbus bocagei	Fecha y hora	19/05/2011
Procedencia	Río Cofio	Tª agua (°C)	20.8
Talla (cm)	30-35	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	2 - 3	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: descanso de 41 s en zona C
- Modo de ascenso: 2
- Velocidad de natación máxima: 1.05 m/s
- Aceleración máxima: 0.63 m/s²

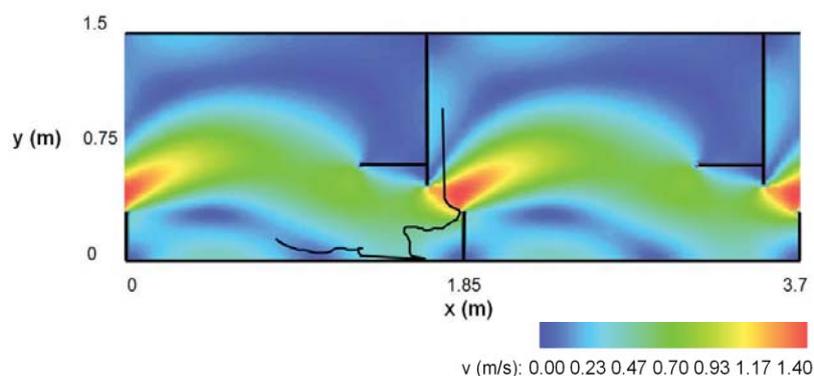


Figura 78 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de barbo común n° 45

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Luciobarbus bocagei	Fecha y hora	19/05/2011
Procedencia	Río Cofio	Tª agua (°C)	20.8
Talla (cm)	30-35	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	2 - 3	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: sin descanso
- Modo de ascenso: 2
- Velocidad de natación máxima: 1.68 m/s
- Aceleración máxima: 1.10 m/s²

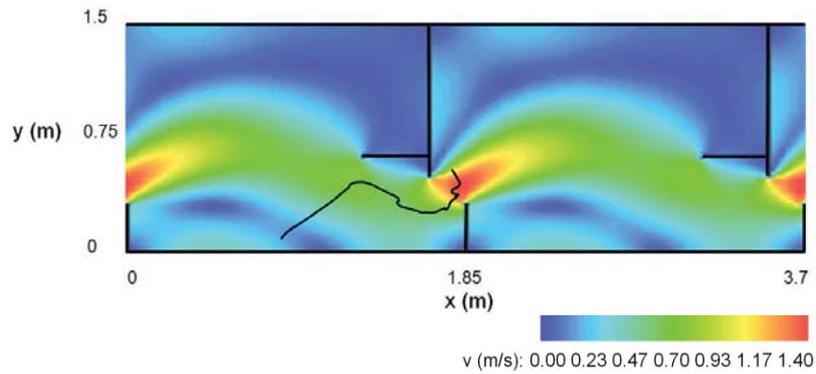


Figura 79 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de barbo común nº 46

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Luciobarbus bocagei	Fecha y hora	19/05/2011
Procedencia	Río Cofio	Tª agua (°C)	20.8
Talla (cm)	30-35	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	4 - 5	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: sin descanso
- Modo de ascenso: 2
- Velocidad de natación máxima: 1.60 m/s
- Aceleración máxima: 1.16 m/s²

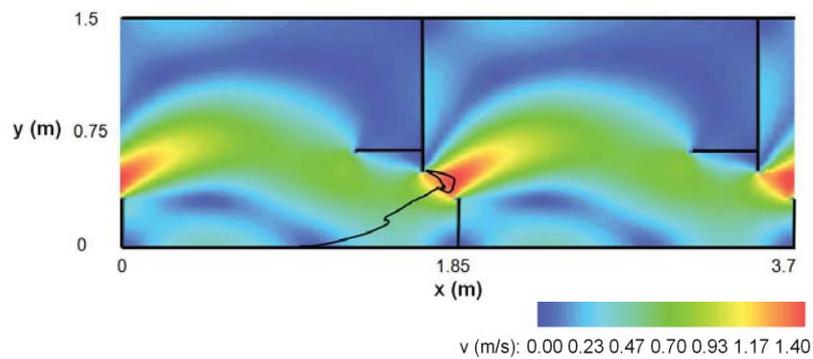


Figura 80 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Paso de hendidura de barbo común n° 47

Ejemplar		Ensayo	
Especie	Luciobarbus bocagei	Fecha y hora	19/05/2011
Procedencia	Río Cofio	Tª agua (°C)	20.8
Talla (cm)	30-35	S (%)	7.5
Piscina inicial y final	5 - 6	Q (m³/s)	0.25

- Situación previa al paso de hendidura: sin descanso
- Modo de ascenso: 1
- Velocidad de natación máxima: 1.52 m/s
- Aceleración máxima: 1.10 m/s²

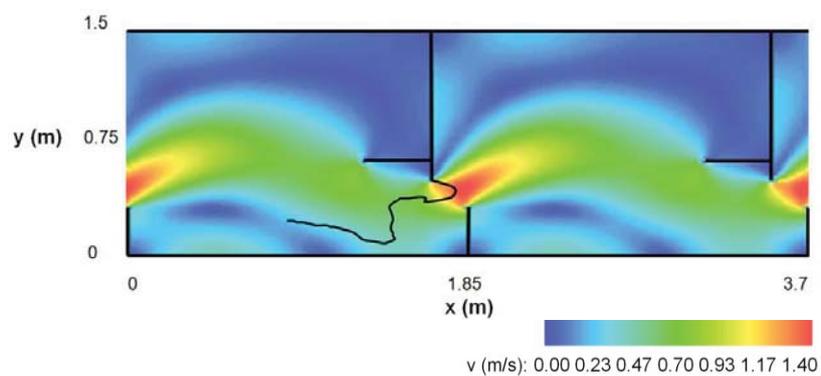


Figura 81 Trayectoria seguida por el individuo durante el ascenso proyectada sobre el mapa de velocidad de agua.

Apéndice 2

En este apéndice se presenta una compilación de cuatro artículos con los que se publica gran parte de los resultados de esta tesis. El listado de publicaciones es el siguiente:

- **Publicación I**

Influence of pool geometry on the biological efficiency of vertical slot fishways

María Bermúdez, Jerónimo Puertas, Luis Cea, Luís Pena, Luis Balairón

Ecological Engineering, 2010. 36(10): 1355-1364

- **Publicación II**

Optical Fish Trajectory Measurement in Fishways through Computer Vision and Artificial Neural Networks

Álvaro Rodríguez, María Bermúdez, Juan R. Rabuñal, Jerónimo Puertas, Julián Dorado, Luís Pena, Luis Balairón

Journal of Computing in Civil Engineering, 2011. 25(4): 291-301

- **Publicación III**

Implications of fish behavior for vertical slot fishways design

María Bermúdez, Álvaro Rodríguez, Luis Cea, Felipe Morcillo, Miriam Castillo, Enrique Aramburu

Comunicación del 9th International Symposium on Ecohydraulics, 2012. Viena, Austria.

- **Publicación IV**

Computer application for the analysis and design of vertical slot fishways in accordance with the requirements of the target species

Jerónimo Puertas, Luis Cea, María Bermúdez, Luís Pena, Álvaro Rodríguez, Juan R. Rabuñal, Luis Balairón, Ángel Lara, Enrique Aramburu

Ecological Engineering, 2012. 48: 51-60



Contents lists available at ScienceDirect

Ecological Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/ecoleng

Influence of pool geometry on the biological efficiency of vertical slot fishways

María Bermúdez^{a,*}, Jerónimo Puertas^a, Luis Cea^a, Luís Pena^a, Luis Balairón^b

^a Civil Engineering School, A Coruña University, Campus de Elviña, s/n, 15071 A Coruña, Spain

^b Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX (CEH-CEDEX), Paseo Bajo de la Virgen del Puerto 3, 28005 Madrid, Spain

ARTICLE INFO

Article history:

Received 3 December 2009

Received in revised form 29 April 2010

Accepted 5 June 2010

Keywords:

Vertical slot fishway

Hydraulic design

2D free surface modelling

Turbulent flow

ABSTRACT

The characteristics of the flow in vertical slot fishways depend mainly on the specific pool design, i.e., the geometry of the pool. This paper presents the results of a study on sixteen different designs of vertical slot fishways with two different slopes. The flow field is studied using both a physical-scale model and a numerical model which solves the 2D depth-averaged shallow water equations coupled with a $k-\epsilon$ turbulence model. Several hydraulic parameters, such as the average velocity in the slot or the water depth, are considered in order to evaluate their biological efficiency. Based on the results, it appears that the length of the pool is the main geometric dimension that affects the flow in the fishway. The numerical and experimental agreement is very satisfactory.

© 2010 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

Fishways are hydraulic structures which allow the upstream migration of fish through obstructions in rivers. One of the most common types of fishway is the vertical slot fishway, in which baffles are installed at regular intervals along the length of a flume, creating a series of pools. The requirements of the fish species for which the fishway is intended will dictate its appropriate design. An effective fishway must attract fish readily and allow them to enter, pass through, and exit safely with minimum cost to the fish in time and energy. If the velocity and turbulence energy in the pools are too high, or if the water depth is too small, the fish will not be able to swim through the fishway. Therefore, the biological efficiency of a fishway design is determined by hydrodynamic variables such as the velocity, water depth or turbulence fields in the pools.

Fish movement can be divided into three categories based on speed and muscle use: sustained, prolonged and burst speeds (Bell, 1986). A fish swimming at sustained speed uses the red muscle system (aerobic) exclusively, allowing extended periods of travel at low speeds. Prolonged speed involves the use of both red and white (anaerobic) muscle tissue, and allows the fish to reach quicker speeds for minutes at a time. Burst speed allows the fish to reach top speeds for a few seconds by exclusive utilization of white muscle

tissue, requiring a significant rest period afterwards. At the same time, fish require a minimum depth of flow in order to allow them to reach swimming potential (Dane, 1978). Total submergence eliminates a fish's risk of oxygen starvation, allows the fish to create maximum thrust, and lowers the risk of bodily injury through contact with the fishway bottom. Consequently, the different physical and hydraulic characteristics of a fishway design may make it suitable for some fish species and not suitable for others. The flow velocity in the fishway must match the swimming capabilities of the fish species for which the system is intended (Teijeiro et al., 2006), and the discharge must be high enough in order to provide fish-acceptable depths.

The flow field in several designs of vertical slot fishways was studied experimentally by Rajaratman et al. (1992), Wu et al. (1999), Puertas et al. (2004) and Pena (2004). These studies show that the velocity field in the pools is relatively insensitive to variations on the discharge, and that the water depth is proportional to the discharge with an almost linear relation. Moreover, the mean velocity field in the pools is almost two-dimensional in the horizontal plane, the vertical velocity being much lower than the horizontal one.

Previous numerical studies (Cea et al., 2007a; Chorda et al., 2010) suggest that two-dimensional depth-averaged models are suitable for computing the flow field in vertical slot fishways rather accurately. This is because, as mentioned before, the velocity field in vertical slot fishways is mainly two-dimensional, the vertical velocity being nearly zero in all the pool except in the slot region. At the same time, the turbulence level in the pools is extremely

* Corresponding author.

E-mail address: mbermudez@udc.es (M. Bermúdez).

Table 1

Geometric dimensions of the sixteen designs which were tested in the physical model. Pool dimensions are expressed in terms of the slot width, b (m). Note: N = number of pools.

Width B	Length L			
	$2.5b$	$5b$	$10b$	$15b$
$2b$	D2.2.5 $b=0.150$ $N=10$	D2.5 $b=0.150$ $N=9$	D2.10 $b=0.150$ $N=4$	D2.15 $b=0.150$ $N=3$
$2.67b$	D2.67.2.5 $b=0.113$ $N=10$	D2.67.5 $b=0.113$ $N=10$	D2.67.10 $b=0.113$ $N=6$	D2.67.15 $b=0.113$ $N=4$
$4b$	D4.2.5 $b=0.075$ $N=10$	D4.5 $b=0.075$ $N=10$	D4.10 $b=0.075$ $N=9$	D4.15 $b=0.075$ $N=6$
$8b$	D8.2.5 $b=0.038$ $N=10$	D8.5 $b=0.038$ $N=10$	D8.10 $b=0.038$ $N=10$	D8.15 $b=0.038$ $N=10$

high, playing an important role in the development of the flow. In addition, turbulence is in itself important for evaluating the biological efficiency of a fishway design, as several studies have pointed out (Katopodis, 2005; Silva et al., 2010). High turbulence levels will confuse the fish in finding its way up through the pools, and at the same time it will increase the fish fatigue. For these reasons it is important to use an adequate turbulence model in order to predict correctly both the velocity and the turbulence fields.

In this paper we study the hydraulic efficiency of sixteen vertical slot fishway designs using both physical and numerical modelling. The experimental results are used to evaluate the discharge coefficients for each design, and also to validate the numerical model. Once the numerical model is validated with the experimental data, it is used to analyze in more detail the flow pattern in the fishway pools, as well as to evaluate the hydraulic characteristics of the fishway designs. The experimental–numerical agreement confirms that 2D depth-averaged shallow water models are adequate for modelling the flow in vertical slot fishways.

2. Methodology

2.1. Experimental setup

Sixteen different pool designs were tested in a laboratory physical model. The experimental setup consisted of a 7 m long, 0.3 m width and 0.35 m deep stainless steel flume. The bed of the flume was covered in a fluted methacrylate sheet, where the crosswalls were inserted according to the different configurations. The geometric dimensions and the number of pools are detailed in Table 1 and Figs. 1 and 2 for each design. The bed slope of the flume was 5%. Seven of these designs (namely D2.15, D2.67.5, D4.5, D4.15, D8.5, D8.10 and D8.15 in this study) were previously studied experimentally by Rajaratman et al. (1992), with a larger slope of 10%.

The water discharge was fixed as an upstream boundary condition and, at the end of the flume, the water depth was fixed with a tailgate in order to reach uniform flow (i.e., identical depth at equivalent points within every pool). Three flow discharges were studied for each design.

Water depth in the center of the pools (Fig. 2) was measured with a DHI Type 202 wave gauge. In addition, a 30 s video was recorded for each pool design in order to experimentally define the flow pattern from visual observation (Fig. 3). The markers that were used were seeds of approximately a diameter of 1 cm and a density similar to water.

2.2. Numerical model

2.2.1. Equations

The flow field in the sixteen fishway designs defined in Table 1 was computed with a numerical model based on the 2D depth-averaged shallow water equations. These equations assume a hydrostatic pressure distribution and a uniform velocity over the vertical direction. The 2D depth-averaged shallow water equations can be written in conservative form as:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{q_i q_j}{h} + g \frac{h^2}{2} \delta_{ij} \right) &= -gh \frac{\partial z_b}{\partial x_i} - \frac{\tau_{b,i}}{\rho} \\ &+ \frac{\partial}{\partial x_j} \left((v + \nu_t) h \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \quad i = 1, 2 \end{aligned} \quad (2)$$

where h is the water depth, U_i are the depth-averaged horizontal components of the water velocity, $q_i = hU_i$ are the two components of the unit water discharge, $\tau_{b,i}$ are the two horizontal components of the bed friction stress, ρ is the water density, g is the gravity acceleration, ν is the laminar kinematic viscosity of water ($\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$), and ν_t is the eddy viscosity, which must be computed with a depth-averaged turbulence model. Bed friction is computed with Manning's formula as:

$$\frac{\tau_{b,i}}{\rho} = g \frac{n^2 |U|}{h^{4/3}} \cdot U_i \quad i = 1, 2 \quad (3)$$

Experimental results in vertical slot fishways show that the vertical velocities are much smaller than the horizontal ones except in the vertical slot region and that the velocity field is quite uniform along the vertical direction (Puertas et al., 2004). Accordingly, a depth-averaged model is expected to give satisfactory results. Nevertheless, the high turbulence levels and velocity gradients in the pools require special attention for turbulence modelling. Cea et al. (2007a) compared the numerical and experimental results in two designs of vertical slot fishways using a 2D shallow water model coupled with three different turbulence models: a mixing length model, a $k-\epsilon$ model and an algebraic stress model. The agreement between the numerical and experimental data was very

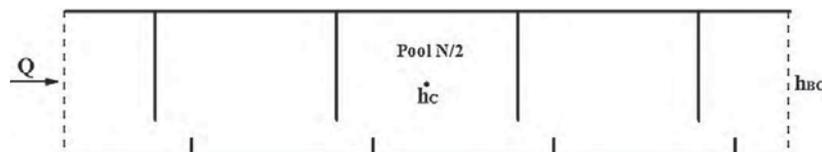


Fig. 1. Global plan view of the experiments. The number of pools N for each experiment is detailed in Table 1.

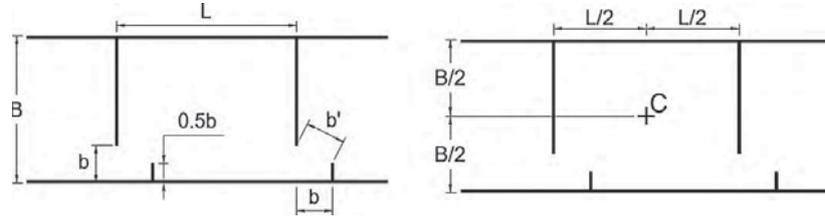


Fig. 2. Geometric characteristics of a pool. The water depth was measured in point C.

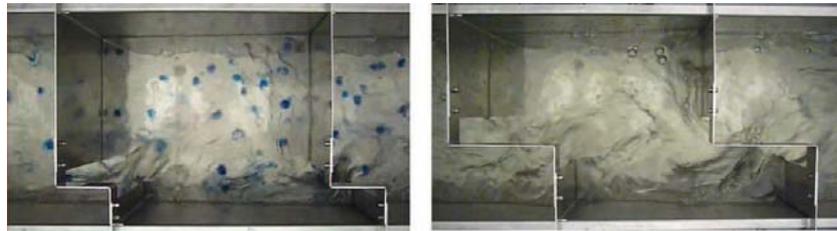


Fig. 3. Plan view of D4.5 with the seeds that were used to define the flow pattern from visual observation (left), and plan view of D2.2.5 (right).

satisfactory for both the $k-\varepsilon$ and the algebraic stress model. In this study, the depth-averaged $k-\varepsilon$ turbulence model of Rastogi and Rodi (1978) was used to compute the eddy viscosity.

The depth-averaged $k-\varepsilon$ model takes into account the convective transport of turbulence by the mean flow, the production of turbulence due to bed friction and velocity gradients, the turbulent diffusion, and the dissipation of turbulence. It is well known that the $k-\varepsilon$ model overpredicts the production of turbulent kinetic energy when turbulence is non-isotropic, as it happens in strongly swirling flows and near stagnation points. In these cases, the model predicts much larger values of turbulent kinetic energy than the observed ones. This can lead to excessively large values of the turbulent energy near stagnation regions, which might propagate and affect the solution in the whole numerical domain. In order to improve this situation, two limiters have been used in the numerical model. The first one is a realizability condition over the eddy viscosity which was proposed by Durbin (1996) for linear eddy viscosity models. Durbin's realizability condition limits the maximum value of the eddy viscosity in order to avoid the normal Reynolds stresses computed with the Boussinesq assumption to become negative. The second limiter was proposed by Menter (1993). Menter's limiter is a rough estimation based on empirical observations which limits the ratio between the horizontal production of turbulence and the dissipation rate. Both Durbin's and Menter's limiters do not imply an accurate turbulence modelling of stagnation regions, but they can improve the numerical results, avoiding extremely large turbulence levels.

Considering the limiters of Menter and Durbin, the equations of the depth-averaged $k-\varepsilon$ model are given by:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial U_j k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \min(2\nu_t S_{ij} S_{ij}, 10 \cdot \varepsilon) + c_k \frac{u_*^3}{h} - \varepsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial U_j \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + c_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2\nu_t S_{ij} S_{ij} + c_\varepsilon \frac{u_*^4}{h^2} - c_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

$$c_k = c_f^{-1/2} \quad c_\varepsilon = 3.6 c_k^{3/2} c_{\varepsilon 2} c_\mu^{1/2} \quad c_f = \frac{\tau_b}{\rho} \frac{1}{|U|^2} \quad (6)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad \nu_t = \min \left(c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \frac{k}{3} \left(\frac{2}{S_{ij} S_{ij}} \right)^{1/2} \right) \quad (7)$$

with the constants:

$$c_\mu = 0.09 \quad c_{\varepsilon 1} = 1.44 \quad c_{\varepsilon 2} = 1.92 \quad \sigma_k = 1.0 \quad \sigma_\varepsilon = 1.31$$

2.2.2. Wall boundaries

Wall functions have been used in all the wall boundaries. The wall friction velocity u_* is computed from the logarithmic law of the wall, which is given by:

$$U_t = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left(9.0 \cdot \frac{y_n u_*}{\nu} \right) \quad (8)$$

where U_t is the velocity component parallel to the wall, y_n is the normal distance to the nearest wall, and $\kappa=0.41$ is von Karman's constant. From the wall friction velocity, the wall shear stress, as well as the turbulent kinetic energy k and its dissipation rate ε at the first inner node of the mesh, are computed as (Lauder et al., 1975):

$$\tau_w = \rho \cdot u_*^2 \quad k_1 = \frac{u_*^2}{\sqrt{c_\mu}} \quad \varepsilon_1 = \frac{u_*^3}{\kappa \cdot y_{n,1}} \quad (9)$$

2.2.3. Solver

An unstructured finite volume solver has been used to solve all the transport equations of the model. The convective flux in the momentum equations is discretized with the hybrid scheme proposed in Cea et al. (2007b), which is based on the upwind scheme of Roe (1986). The hybrid scheme uses a MUSCL-type (Monotone Upstream Scheme for Conservation Laws) reconstruction (Toro, 2001) of the conservative variables q_x and q_y , whilst keeping a first order reconstruction for the water depth h . In such a way the numerical diffusion in the momentum equations is reduced considerably, without a significant reduction on the numerical stability of the scheme. The Minmod slope limiter (Toro, 2001) is used in

Table 2

Geometric dimensions of the sixteen designs which were tested with the numerical model. Pool dimensions are expressed in terms of slot width, b (m).

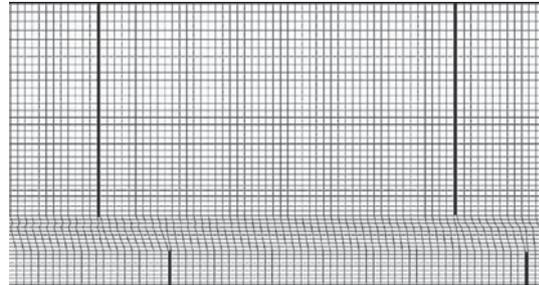
Width B	Length L			
	$2.5b$	$5b$	$10b$	$15b$
$2b$	D2.2.5 $b=0.500$	D2.5 $b=0.500$	D2.10 $b=0.500$	D2.15 $b=0.500$
$2.67b$	D2.67.2.5 $b=0.375$	D2.67.5 $b=0.375$	D2.67.10 $b=0.375$	D2.67.15 $b=0.375$
$4b$	D4.2.5 $b=0.250$	D4.5 $b=0.250$	D4.10 $b=0.250$	D4.15 $b=0.250$
$8b$	D8.2.5 $b=0.125$	D8.5 $b=0.125$	D8.10 $b=0.125$	D8.15 $b=0.125$

order to avoid under and overshoots in regions with steep gradients. When computing the flow in vertical slot fishways, the hybrid scheme produces similar results to a fully second order scheme (Cea et al., 2007b). The bed slope source term is discretized with an upwind scheme based on the ideas of Bermúdez and Vázquez-Cendón (1994). The bed friction and turbulent diffusion terms are discretized with a centered scheme at the cell nodes. The convective flux in the $k-\epsilon$ model is also discretized with a second order upwind scheme. All the source terms in the $k-\epsilon$ equations are discretized at the cell nodes using a centered scheme. A more exhaustive description of the numerical schemes and solvers used in this paper can be found in Cea et al. (2007b).

2.2.4. Mesh and boundary conditions

The flow field on each fishway design was computed using a block-structured numerical mesh which contains an inlet pool, three active pools and an outlet pool. The second active pool was used to compare the numerical and experimental data. The dimensions of the pool designs in which the flow field was computed with the numerical model (Table 2) keep the same aspect ratios B/b and L/b as in the physical model (Table 1). The simulations were made with two different slopes of 5% and 10%.

In all the designs the mesh size is rather uniform over each entire pool, with a slightly higher mesh density in the slot region (Fig. 5). In order to obtain a mesh independent solution, a mesh convergence analysis was done on the design D4.5, for the discharge of 100 l/s and the slope of 5%. Three block-structured meshes with different spatial resolution were tested, namely M1, M2 and M3. The number of elements in each mesh was 4438, 9561 and 14755 (Table 3). No significant differences were found in the results obtained with the two finest meshes (meshes M2 and M3) (Table 3 and Fig. 4). Thus,

**Fig. 5.** Detail of the selected numerical mesh for design D4.5.**Table 3**

Characteristics of the numerical meshes M1, M2 and M3 and V_x max (m/s) for the design D4.5 with the discharge of 100 l/s and 5% slope.

	Mesh		
	M1	M2	M3
Number of elements	4438	9561	14755
Average element size (cm ²)	11.27	5.23	3.39
V_x max, cross-section $x = 2.5$ m (m/s)	0.591	0.570	0.577
V_x max, cross-section $x = 3.3$ m (m/s)	0.600	0.592	0.584

it was decided to work with an average element size of 5 cm², with a slightly higher mesh density in the slot region (Fig. 5).

At the inlet boundary the flow is distributed over a uniform discharge profile normal to the boundary. At the outlet boundary, the free surface elevation was fixed iteratively for each discharge in order to obtain the same water depth at the middle section of all the pools (uniform flow condition). In order to fix the outlet boundary condition, several simulations were made for each design varying the free surface elevation. For each test, the depth in the center of the second active pool was compared to the boundary condition. It should be noted that following the previous procedure, no experimental data were used in order to define the outlet boundary condition in the numerical model. An example of this iterative process used to fix the outlet boundary condition is shown in Table 4. In this example, the selected outlet boundary condition was $h_{BC} = 0.52$ m.

In the $k-\epsilon$ model, the turbulent kinetic energy and its dissipation rate must be imposed at the inlet boundary. The actual value of these two variables at the boundary is difficult to estimate. A too high turbulence level is not desirable since it would take too much

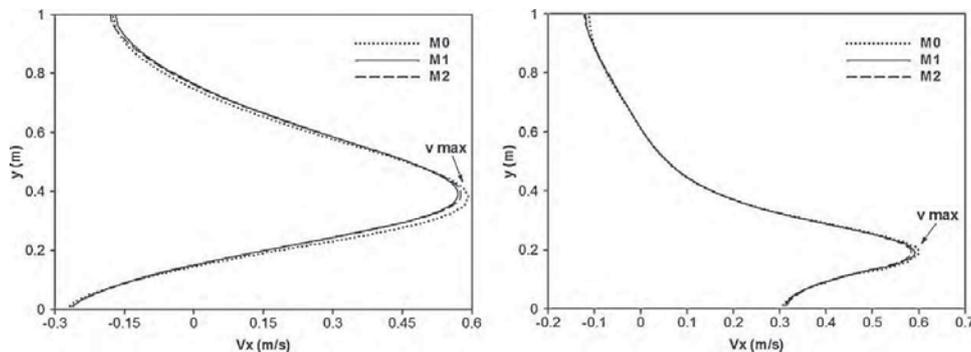
**Fig. 4.** Longitudinal velocity V_x (m/s). Cross-section $x = 2.5$ m (left), $x = 3.3$ m (right), $Q = 100$ l/s, $S = 5\%$.

Table 4
Comparison between the water depth in the center of the pools (h_c) and the water depth in the outlet boundary (h_{BC}) for the design D4.2.5, $Q=50$ l/s and $S=5\%$, varying the outlet boundary condition. Note: $D=h_{BC}-h_c$.

h_{BC} (m)	h_c (m)	D (m)
0.444	0.464	-0.020
0.480	0.490	-0.010
0.520	0.520	0
0.540	0.536	0.004
0.650	0.629	0.021

time to dissipate and therefore, it would strongly affect the results in the downstream pools. It is more adequate to let turbulence develop as it passes through the first pool. For this reason, in all the simulations the turbulent variables at the inlet boundary were fixed to $k_{in}=0.05$ m²/s² and $\epsilon_{in}=0.1$ m²/s³, which are rather low values compared to those achieved in the pools. In all cases, it was verified that similar values of the eddy viscosity were computed by the model in the second and third pools (Fig. 6).

3. Results and discussion

3.1. Flow patterns

Depending on the geometric dimensions of the pools, two different flow patterns have been observed, namely FP1 and FP2 (Figs. 7 and 8). In both flow patterns three different regions can be distinguished: a main flow region defined by a high velocity jet, where the maximum velocities in the pool occur, and two low velocity recirculation regions.

In the first pattern (Fig. 7), the jet flow crosses straight from one slot to another creating a large recirculation eddy between the crosswalls. On the right side of the main flow, a small swirling zone, rotating clockwise, is developed between the small lateral deflectors.

In the second pattern (Fig. 8), the main flow follows a curved path as it crosses the slot, and directly hits the opposite wall. The large recirculation area which appears in the first pattern is reduced and moved towards the upstream corner of the pool. On the other side of the jet, the vortex tends to occupy the space left in the convex part of the curved jet.

Table 5
Flow patterns (FP) observed in the sixteen designs. L/B is the ratio between the length and the width of the pools.

Width B	Length L			
	$2.5b$	$5b$	$10b$	$15b$
$2b$	D2.2.5	D2.5	D2.10	D2.15
	FP1	FP2	FP2	FP2
	$L/B=1.25$	$L/B=2.5$	$L/B=5$	$L/B=7.5$
$2.67b$	D2.67.2.5	D2.67.5	D2.67.10	D2.67.15
	FP1	FP2	FP2	FP2
	$L/B=0.94$	$L/B=1.88$	$L/B=3.75$	$L/B=5.63$
$4b$	D4.2.5	D4.5	D4.10	D4.15
	FP1	FP1	FP2	FP2
	$L/B=0.63$	$L/B=1.25$	$L/B=2.5$	$L/B=3.75$
$8b$	D8.2.5	D8.5	D8.10	D8.15
	FP1	FP1	FP1	FP2
	$L/B=0.31$	$L/B=0.63$	$L/B=1.25$	$L/B=1.88$

According to Table 5, the first flow pattern is observed in the designs where the ratio between the length and the width of the pool L/B is less than 1.25. This is observed in both the numerical simulations (with slope of 5% and 10%) and the laboratory experiments. The second pattern appears in the designs where L/B is greater than 1.88. Thus, according to our numerical and physical models, the transition between the two flow patterns can be established within the range (1.25, 1.88) of the ratio L/B .

3.2. Average velocity in the slot

One of the critical factors that determine the efficiency of a vertical slot fishway design is the velocity in the slot, as travel between pools requires a burst effort by the fish. An average velocity in the slot (v_s) can be defined from the average water depth in the slot (h_s) applying the continuity equation as:

$$v_s = \frac{Q}{h_s \cdot b'} \tag{10}$$

where b' is the slot width (Fig. 2).

The numerical results show that the water depth in the slot is linearly related to the water depth in the center of the pool, following the relation $h_s=0.97h_c$ for $S=5\%$ (Fig. 9). This relationship



Fig. 6. Eddy viscosity (m²/s) computed by the numerical model in the design D4.10 with $S=5\%$.

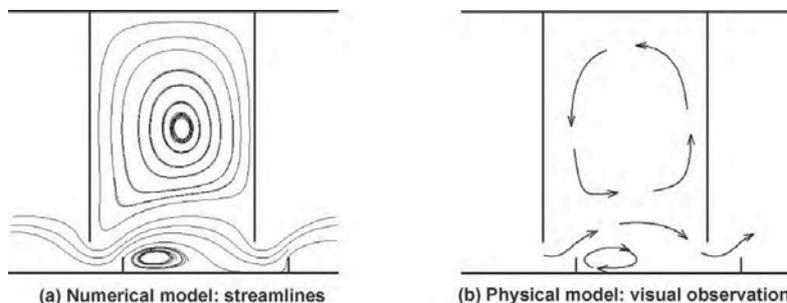


Fig. 7. Schematic representation of the flow pattern1 from visual observation and numerical streamlines in the design D8.5.

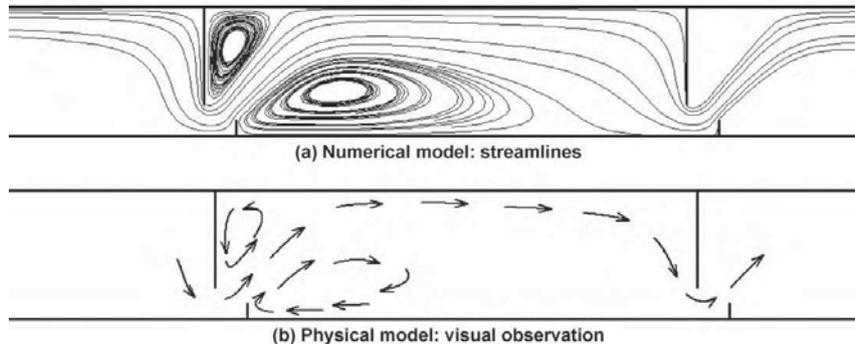


Fig. 8. Schematic representation of the flow pattern 2 from visual observation and numerical streamlines in the design D4.15.

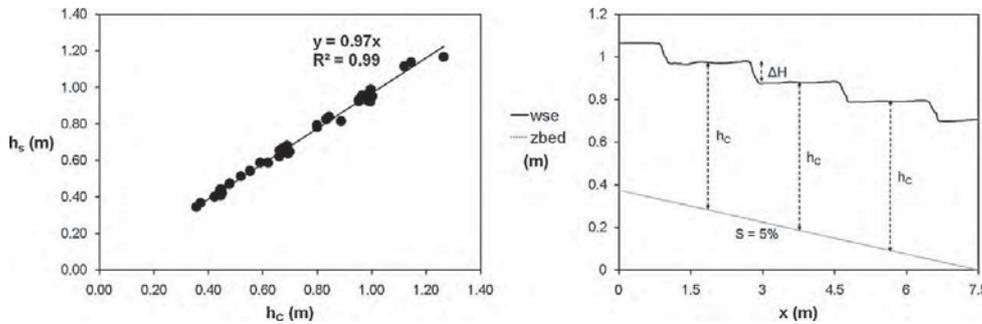


Fig. 9. Relation between the depth in the center of the pool (h_c) and the average depth in the next downstream slot (h_s) for $S=5\%$ (left). Water surface elevation following a streamline in the design D8.15, $Q=65\text{ l/s}$, $S=5\%$ (right). Numerical results. Note: x =longitudinal direction of the fishway.

has been used in the experimental results in order to evaluate the depth in the slot, as the depth is only measured in the center of the pool (Fig. 9).

In order to compare the numerical and experimental velocities in the slot, the experimental velocity was also scaled as follows:

$$v_s^* = v_s \cdot \sqrt{\lambda_L} = v_s \cdot \sqrt{\frac{1}{0.3}} \quad (11)$$

where v_s^* is the scaled experimental velocity in the slot and λ_L is the length scale.

Table 6 shows the average velocity in the slot obtained from the experimental and numerical results using Eqs. (10) and (11). As the length of the pool increases, higher velocities in the slot are observed.

3.3. Discharge curves

The head loss in a slot of a vertical slot fishway is proportional to $v^2/2g$, as the flow is highly turbulent. Thus, the velocity in each slot can be expressed as a function of the head loss between pools, ΔE , and is approximated by $\sqrt{2g \Delta H}$ if the velocity in the upstream pool is neglected. As we are considering uniform flow in the fishway, the drop between pools is proportional to the length of the pool L ($\Delta H=SL$) (Fig. 9), and the velocity in the slot is given by:

$$v_s = C_{vs} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta E} \approx C_{vs} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta H} = C_{vs} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot S \cdot L} \quad (12)$$

where C_{vs} is a discharge coefficient which depends on the geometry of the pool.

Considering Eqs. (10) and (12), the discharge can be expressed as a function of the length of the pool L , the bed slope S , the slot width b' and the depth in the slot h_s , as:

$$Q = C_{vs} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot L \cdot S} \cdot b' \cdot h_s = C_q \cdot \sqrt{g \cdot L \cdot S} \cdot b \cdot h_c \quad (13)$$

where $C_q = C_{vs} \cdot \sqrt{2} \cdot b' \cdot h_s / (b \cdot h_c)$ is a new discharge coefficient.

Table 6

Numerical average velocity in the slot v_s (m/s) and scaled experimental velocity in the slot v_s^* (m/s) for the sixteen designs with $S=5\%$ (experimental results in italics). Note: d_r = relative difference (%).

Width B	Length L			
	2.5b	5b	10b	15b
2b	0.48	0.81	1.24	1.55
	<i>0.47</i>	<i>0.69</i>	<i>1.19</i>	<i>1.61</i>
	$d_r=2.1$	$d_r=17.4$	$d_r=4.2$	$d_r=3.7$
2.67b	0.39	0.69	1.03	1.30
	<i>0.38</i>	<i>0.55</i>	<i>0.95</i>	<i>1.26</i>
	$d_r=2.6$	$d_r=25.4$	$d_r=8.4$	$d_r=3.2$
4b	0.35	0.54	0.81	1.05
	<i>0.35</i>	<i>0.53</i>	<i>0.75</i>	<i>0.97</i>
	$d_r=0.0$	$d_r=1.9$	$d_r=8.0$	$d_r=8.2$
8b	0.23	0.38	0.59	0.70
	<i>0.26</i>	<i>0.40</i>	<i>0.66</i>	<i>0.69</i>
	$d_r=11.5$	$d_r=5.0$	$d_r=10.6$	$d_r=1.4$

Table 7
Water discharge Q (l/s) and water depth in the center of the pools h_c (m) in each numerical simulation. $S = 5\%$.

Width B	Length L			
	2.5b	5b	10b	15b
2b	$Q_1 = 120/h_{c1} = 0.45$ $Q_2 = 175/h_{c2} = 0.66$ $Q_3 = 265/h_{c3} = 1.00$	$Q_1 = 200/h_{c1} = 0.47$ $Q_2 = 310/h_{c2} = 0.73$ $Q_3 = 450/h_{c3} = 1.05$	$Q_1 = 295/h_{c1} = 0.45$ $Q_2 = 435/h_{c2} = 0.66$ $Q_3 = 660/h_{c3} = 1.00$	$Q_1 = 500/h_{c1} = 0.62$ $Q_2 = 715/h_{c2} = 0.89$ $Q_3 = 1025/h_{c3} = 1.26$
2.67b	$Q_1 = 60/h_{c1} = 0.37$ $Q_2 = 95/h_{c2} = 0.59$ $Q_3 = 135/h_{c3} = 0.84$	$Q_1 = 100/h_{c1} = 0.37$ $Q_2 = 155/h_{c2} = 0.60$ $Q_3 = 225/h_{c3} = 0.85$	$Q_1 = 180/h_{c1} = 0.44$ $Q_2 = 280/h_{c2} = 0.69$ $Q_3 = 405/h_{c3} = 0.99$	$Q_1 = 225/h_{c1} = 0.44$ $Q_2 = 350/h_{c2} = 0.69$ $Q_3 = 505/h_{c3} = 1.00$
4b	$Q_1 = 50/h_{c1} = 0.52$ $Q_2 = 80/h_{c2} = 0.83$ $Q_3 = 110/h_{c3} = 1.15$	$Q_1 = 65/h_{c1} = 0.44$ $Q_2 = 100/h_{c2} = 0.68$ $Q_3 = 145/h_{c3} = 0.99$	$Q_1 = 95/h_{c1} = 0.45$ $Q_2 = 145/h_{c2} = 0.67$ $Q_3 = 210/h_{c3} = 0.95$	$Q_1 = 120/h_{c1} = 0.45$ $Q_2 = 190/h_{c2} = 0.70$ $Q_3 = 270/h_{c3} = 0.98$
8b	$Q_1 = 15/h_{c1} = 0.48$ $Q_2 = 25/h_{c2} = 0.80$ $Q_3 = 35/h_{c3} = 1.12$	$Q_1 = 25/h_{c1} = 0.48$ $Q_2 = 35/h_{c2} = 0.67$ $Q_3 = 50/h_{c3} = 0.97$	$Q_1 = 35/h_{c1} = 0.45$ $Q_2 = 55/h_{c2} = 0.68$ $Q_3 = 80/h_{c3} = 0.97$	$Q_1 = 40/h_{c1} = 0.42$ $Q_2 = 65/h_{c2} = 0.69$ $Q_3 = 90/h_{c3} = 0.95$

Table 8
Water discharge Q (l/s) and water depth in the center of the pools h_c (m) in each numerical simulation. $S = 10\%$.

Width B	Length L			
	2.5b	5b	10b	15b
2b	$Q_1 = 170/h_{c1} = 0.45$ $Q_2 = 230/h_{c2} = 0.61$ $Q_3 = 370/h_{c3} = 1.00$	$Q_1 = 270/h_{c1} = 0.44$ $Q_2 = 350/h_{c2} = 0.58$ $Q_3 = 550/h_{c3} = 0.93$	$Q_1 = 610/h_{c1} = 0.63$ $Q_2 = 800/h_{c2} = 0.85$ $Q_3 = 1000/h_{c3} = 1.07$	$Q_1 = 1400/h_{c1} = 1.23$ $Q_2 = 1700/h_{c2} = 1.50$ $Q_3 = 1900/h_{c3} = 1.67$
2.67b	$Q_1 = 105/h_{c1} = 0.46$ $Q_2 = 150/h_{c2} = 0.64$ $Q_3 = 230/h_{c3} = 0.98$	$Q_1 = 170/h_{c1} = 0.44$ $Q_2 = 220/h_{c2} = 0.58$ $Q_3 = 380/h_{c3} = 1.02$	$Q_1 = 260/h_{c1} = 0.43$ $Q_2 = 330/h_{c2} = 0.56$ $Q_3 = 560/h_{c3} = 0.97$	$Q_1 = 600/h_{c1} = 0.82$ $Q_2 = 800/h_{c2} = 1.11$ $Q_3 = 1000/h_{c3} = 1.40$
4b	$Q_1 = 60/h_{c1} = 0.46$ $Q_2 = 85/h_{c2} = 0.65$ $Q_3 = 125/h_{c3} = 0.95$	$Q_1 = 95/h_{c1} = 0.46$ $Q_2 = 135/h_{c2} = 0.63$ $Q_3 = 200/h_{c3} = 0.94$	$Q_1 = 145/h_{c1} = 0.46$ $Q_2 = 190/h_{c2} = 0.60$ $Q_3 = 310/h_{c3} = 1.00$	$Q_1 = 175/h_{c1} = 0.44$ $Q_2 = 230/h_{c2} = 0.59$ $Q_3 = 360/h_{c3} = 0.93$
8b	$Q_1 = 20/h_{c1} = 0.44$ $Q_2 = 30/h_{c2} = 0.66$ $Q_3 = 45/h_{c3} = 1.00$	$Q_1 = 35/h_{c1} = 0.45$ $Q_2 = 50/h_{c2} = 0.65$ $Q_3 = 75/h_{c3} = 0.96$	$Q_1 = 55/h_{c1} = 0.46$ $Q_2 = 65/h_{c2} = 0.54$ $Q_3 = 115/h_{c3} = 0.95$	$Q_1 = 65/h_{c1} = 0.46$ $Q_2 = 75/h_{c2} = 0.53$ $Q_3 = 140/h_{c3} = 1.01$

Following Eq. (13), both an experimental and numerical rating curve was evaluated for each design. The numerical rating curve is calculated by linear interpolation of the results obtained for three different discharges and two different slopes (Tables 7 and 8), whilst the experimental rating curve is calculated starting from the results for three different discharges (Table 9).

According to Table 10, the discharge coefficients are not very sensitive to the ratio B/b , whilst they increase slightly with the ratio L/b . These results suggest that the sixteen designs can be defined by only 4 discharge curves, depending on the length of the pools (Table 11 and Fig. 10). In this case, each numerical coefficient C_d has been obtained by linear interpolation of 24 data points (each

coefficient describes 4 designs, and 3 discharges and 2 slopes are tested on each design) and each experimental coefficient by 12 data points (each coefficient describes 4 designs, and 3 discharges are tested on each design).

On the other hand, in the study carried out by Rajaratman et al. (1992), a different formulation for the discharge curve was used. The rating curve was evaluated for each design in terms of the dimensionless discharge and the relative depth of the flow in the center of the pool, as follows:

$$\frac{Q}{\sqrt{g \cdot S \cdot b^5}} = C_d \cdot \frac{h_c}{b} \tag{14}$$

Table 9
Water discharge Q (l/s) and water depth in the center of the pools h_c (m) in each experimental test.

Width B	Length L			
	2.5b	5b	10b	15b
2b	$Q_1 = 5.5/h_{c1} = 0.13$ $Q_2 = 6.9/h_{c2} = 0.16$ $Q_3 = 10.5/h_{c3} = 0.26$	$Q_1 = 8.0/h_{c1} = 0.12$ $Q_2 = 10.3/h_{c2} = 0.17$ $Q_3 = 12.8/h_{c3} = 0.21$	$Q_1 = 12.3/h_{c1} = 0.11$ $Q_2 = 17.8/h_{c2} = 0.17$ $Q_3 = 21.0/h_{c3} = 0.20$	$Q_1 = 22.1/h_{c1} = 0.15$ $Q_2 = 24.2/h_{c2} = 0.17$ $Q_3 = 27.0/h_{c3} = 0.19$
2.67b	$Q_1 = 3.4/h_{c1} = 0.14$ $Q_2 = 4.9/h_{c2} = 0.19$ $Q_3 = 6.3/h_{c3} = 0.25$	$Q_1 = 5.3/h_{c1} = 0.14$ $Q_2 = 7.4/h_{c2} = 0.20$ $Q_3 = 9.6/h_{c3} = 0.26$	$Q_1 = 8.7/h_{c1} = 0.14$ $Q_2 = 11.5/h_{c2} = 0.18$ $Q_3 = 13.3/h_{c3} = 0.21$	$Q_1 = 10.5/h_{c1} = 0.13$ $Q_2 = 13.3/h_{c2} = 0.16$ $Q_3 = 16.5/h_{c3} = 0.19$
4b	$Q_1 = 4.1/h_{c1} = 0.24$ $Q_2 = 2.4/h_{c2} = 0.17$ $Q_3 = 3.2/h_{c3} = 0.20$	$Q_1 = 3.9/h_{c1} = 0.17$ $Q_2 = 4.8/h_{c2} = 0.20$ $Q_3 = 5.7/h_{c3} = 0.23$	$Q_1 = 4.7/h_{c1} = 0.14$ $Q_2 = 6.9/h_{c2} = 0.21$ $Q_3 = 9.1/h_{c3} = 0.28$	$Q_1 = 5.7/h_{c1} = 0.13$ $Q_2 = 7.0/h_{c2} = 0.17$ $Q_3 = 9.1/h_{c3} = 0.22$
8b	$Q_1 = 0.9/h_{c1} = 0.17$ $Q_2 = 1.4/h_{c2} = 0.25$ $Q_3 = 1.9/h_{c3} = 0.33$	$Q_1 = 1.4/h_{c1} = 0.17$ $Q_2 = 1.9/h_{c2} = 0.21$ $Q_3 = 2.8/h_{c3} = 0.31$	$Q_1 = 2.8/h_{c1} = 0.19$ $Q_2 = 3.1/h_{c2} = 0.21$ $Q_3 = 3.7/h_{c3} = 0.25$	$Q_1 = 3.0/h_{c1} = 0.20$ $Q_2 = 3.8/h_{c2} = 0.25$ $Q_3 = 4.2/h_{c3} = 0.28$

Table 10

Numerical and experimental values of the discharge coefficient C_d (experimental results in italics) d_r = relative difference (%). Note: Numerical results include both 5% and 10% slopes.

Width B	Length L			
	2.5b	5b	10b	15b
2b	0.68	0.77	0.85	0.84
	<i>0.65</i>	<i>0.67</i>	<i>0.82</i>	<i>0.90</i>
	$d_r = 4.6$	$d_r = 14.9$	$d_r = 3.7$	$d_r = 6.7$
2.67b	0.65	0.73	0.81	0.82
	<i>0.61</i>	<i>0.62</i>	<i>0.75</i>	<i>0.83</i>
	$d_r = 6.6$	$d_r = 17.7$	$d_r = 8.0$	$d_r = 1.2$
4b	0.68	0.76	0.79	0.81
	<i>0.70</i>	<i>0.74</i>	<i>0.73</i>	<i>0.76</i>
	$d_r = 2.9$	$d_r = 2.7$	$d_r = 8.2$	$d_r = 6.6$
8b	0.65	0.78	0.85	0.81
	<i>0.71</i>	<i>0.79</i>	<i>0.91</i>	<i>0.77</i>
	$d_r = 8.4$	$d_r = 1.3$	$d_r = 6.6$	$d_r = 5.2$

Table 11

Numerical and experimental values of the discharge coefficient C_d (experimental results in italics), considering only 4 discharge curves for the sixteen designs. Note: Numerical results include both 5% and 10% slopes, d_r = relative difference (%).

Length L			
2.5b	5b	10b	15b
0.67	0.76	0.83	0.83
<i>0.64</i>	<i>0.66</i>	<i>0.79</i>	<i>0.87</i>
$d_r = 4.7$	$d_r = 15.1$	$d_r = 5.1$	$d_r = 4.6$

where C_d is a discharge coefficient which depends on the geometry of the pool.

Following Eq. (14) and considering only 4 discharge curves (depending on the ratio L/b), the values of the discharge coefficient C_d are shown in Fig. 11. As expected, a shorter pool gives a lower value of the coefficient and, hence, a larger depth in the pool.

As noted above, designs D2.15, D2.67.5, D4.5, D4.15, D8.5, D8.10 and D8.15 were previously studied experimentally by

Rajaratman et al. (1992), with a larger slope of 10%. The comparison between the experimental and numerical values of the discharge coefficient is shown in Table 12. The largest differences appear in the design D2.15, probably because this is the design with the higher drop between pools ($\Delta H = SL$) and thus, the 3D effects near the slot become more important. The numerical and experimental agreement in the rest of the designs is satisfactory.

3.4. Turbulence

Excessive turbulence will make it difficult for the fishes to orientate themselves correctly, whilst abundance of large air bubbles may hinder respiration. An indicator of the average turbulent kinetic energy in the pools, which is often used to characterize turbulence in vertical slot fishways, is given by the power dissipation per unit mass, as follows:

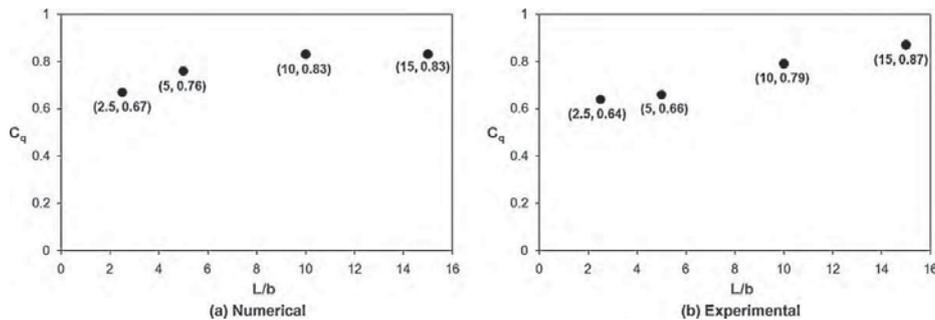
$$\varepsilon = \frac{\Delta H \cdot Q \cdot g}{h_c \cdot B \cdot L} \quad (15)$$

Assuming uniform flow conditions and using Eq. (13), the power dissipation per unit mass can be expressed as:

$$\varepsilon = C_q \cdot \sqrt{S^3 \cdot g^3 \cdot L} \cdot \frac{b}{B} \quad (16)$$

Thus, power dissipation per unit mass can be seen to depend on fishway slope and baffle geometry, and is independent of the discharge.

The spatial distribution of the turbulent kinetic energy, and its dissipation rate, computed with the $k-\varepsilon$ model, is shown in Figs. 12 and 13. The results confirm that both the dissipation rate and the turbulent kinetic energy increase with higher values of the length of the pools. Their spatial distribution depends on the flow pattern that is developed in the pools, although the maximum values are always observed in the pool inlets. In the first flow pattern (Figs. 7 and 12), very low turbulence and dissipation levels are observed in the upper part of the pools. In the second flow pattern (Figs. 8 and 13), the turbulence and dissipation levels spread farther

**Fig. 10.** Variation of the coefficient C_d with L/b .**Table 12**

Numerical and experimental values of the discharge coefficient C_d with $S = 10\%$ (experimental results in italics). Note: Experimental results from Rajaratman et al. (1992), d_r = relative difference (%).

Design	D2.15	D2.67.5	D4.5	D4.15	D8.5	D8.10	D8.15
	3.24	1.64	1.71	3.16	1.78	2.75	3.19
	<i>4.30</i>	<i>1.44</i>	<i>1.77</i>	<i>3.01</i>	<i>1.68</i>	<i>2.64</i>	<i>3.01</i>
	$d_r = 24.6$	$d_r = 13.9$	$d_r = 3.4$	$d_r = 5.0$	$d_r = 5.9$	$d_r = 4.2$	$d_r = 6.0$

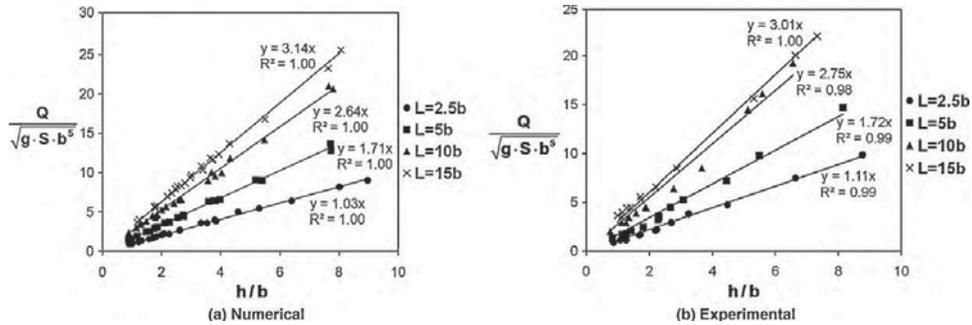


Fig. 11. Discharge curves for the sixteen designs following Eq. (14). Numerical results include both 5% and 10% slopes.

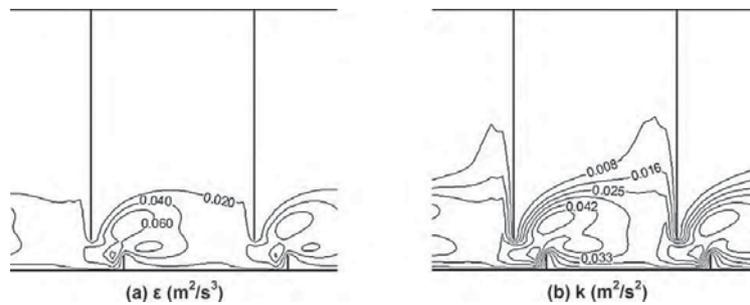


Fig. 12. Spatial distribution of the dissipation rate ϵ (m^2/s^3) and the turbulent kinetic energy k (m^2/s^2) in the design D8.5. Numerical model.

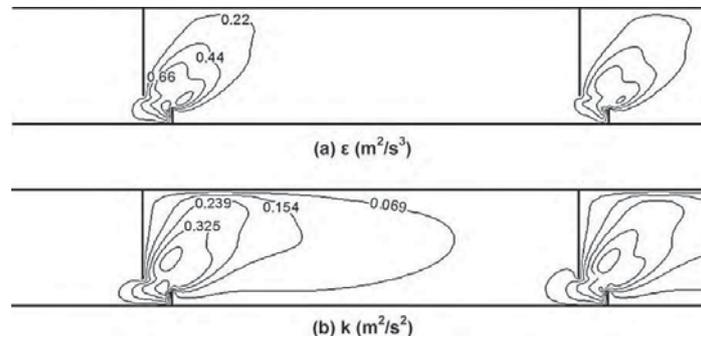


Fig. 13. Spatial distribution of the dissipation rate ϵ (m^2/s^3) and the turbulent kinetic energy k (m^2/s^2) in the design D4.15. Numerical model.

in the upper part of the pool, whilst the decay is more pronounced in the lower part.

4. Conclusions

The biological efficiency of a vertical slot fishway design is determined by the agreement between its hydraulic characteristics and the requirements and swimming performance of the target species. The hydraulic parameters that are usually considered in order to evaluate the fishway efficiency are the average velocity in the slot, the water depth, the flow pattern and the power dissipation per unit mass. The real validity of these parameters as indicators of the vertical slot fishway efficiency is currently being studied in the Cen-

ter for Studies and Experimentation on Public Works (CEDEX), in which a system for fish trajectory tracking has been implemented in a full-scale fishway model.

Sixteen fishway designs were studied in this paper with two different slopes. They can be characterized by four discharge coefficients, depending on the ratio L/b . Their flow pattern depends mainly on the geometry of the pool and it is possible to include all the designs considering only two different flow patterns. Nevertheless, further research is needed in order to define the fish preferences in regard to the flow pattern and thus include it in the evaluation of the fishway efficiency.

The analysis of the results suggests that the length of the pool is the main geometric dimension that affects the flow in the fishway.

The increase of L involves increased circulating velocities, because of the higher value of the drop between pools. Both the width of the slot and the width of the pool have less impact on the characteristics of the flow.

Finally, the agreement between the numerical and experimental results indicates that the 2D shallow water equations reproduce properly the flow field in vertical slots fishways within the usual range of slopes.

Acknowledgments

The writers would like to thank the Center for Studies and Experimentation on Public Works (CEDEX) for their economical support and project 113/SGTB/2007/1.4.

References

- Bell, M.C., 1986. Fisheries Handbook of Engineering Requirements and Biological Criteria. U.S. Army Corps of Engineers, Fish Passage Development and Evaluation Program, Portland, OR.
- Bermúdez, A., Vázquez-Cendón, M.E., 1994. Upwind methods for hyperbolic conservation laws with source terms. *Comput. Fluids* 23 (8), 1049.
- Cea, L., Pena, L., Puertas, J., Vázquez-Cendón, M.E., Peña, E., 2007a. Application of several depth-averaged turbulence models to simulate flow in vertical slot fishways. *J. Hydraulic Eng.* 133 (2), 160–172.
- Cea, L., Puertas, J., Vázquez-Cendón, M.E., 2007b. Depth averaged modelling of turbulent shallow water flow with wet-dry fronts. *Arch. Comput. Methods Eng., State Art Rev.* 14 (3).
- Chorda, J., Maubourguet, M.M., Roux, H., George, J., Larinier, M., Tarrade, L., David, L., 2010. Two-dimensional free surface flow numerical model for vertical slot fishways. *J. Hydraulic Res.* 48 (2), 141–151.
- Dane, B.G., 1978. A Review & Resolution of Fish Passage Problems at Culvert Sites in British Columbia. Fisheries and Marine Service Technical Report No. 810, Department of Fisheries and Environment.
- Durbin, P., 1996. On the $k-\epsilon$ stagnation point anomaly. *Int. J. Heat Fluid Flow* 17, 89–90.
- Katopodis, C., 2005. Developing a toolkit for fish passage, ecological flow management and fish habitat works. *IAHR J. Hydraulic Res.* 43 (5), 451–467.
- Lauder, B., Reece, G., Rodi, W., 1975. Progress in the development of a Reynolds-stress turbulence closure. *J. Fluid Mech.* 68, 537–566.
- Menter, F.R., 1993. Zonal two-equation $k-\omega$ turbulence models for aerodynamic flows. AIAA paper 93-2906. In: 24th Fluid Dynamics Conf., Orlando, FL.
- 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. PhD Thesis, University of A Coruña.
- Puertas, J., Pena, L., Teijeiro, T., 2004. An experimental approach to the hydraulics of vertical slot fishways. *J. Hydraulic Eng.* 130 (1), 10–23.
- Rajaratman, N., Katopodis, C., Solanki, S., 1992. New designs for vertical slot fishways. *Can. J. Civil Eng.* 19 (3), 402–414.
- Rastogi, A.K., Rodi, W., 1978. Predictions of heat and mass transfer in open channels. *J. Hydraulic Div.* 104 (3), 397–420.
- Roe, P.L., 1986. Discrete models for the numerical analysis of time-dependent multidimensional gas dynamics. *J. Comput. Phys.* 63, 458–476.
- Silva, A.T., Santos, J.M., Ferreira, M.T., Pinheiro, A.N., Katopodis, C., 2010. Effects of water velocity and turbulence on the behaviour of Iberian barbel (*Luciobarbus bocagei* Steindachner 1865) in an experimental pool-type fishway. *River Res. Appl.* 1363, doi:10.1002/rra, Published online in Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com).
- Teijeiro, T., Puertas, J., Pena, L., Peña, E., 2006. Evaluating vertical-slot fishway designs in terms of fish swimming capabilities. *Ecol. Eng.* 27 (1), 37–48.
- Toro, E.F., 2001. Shock-Capturing Methods for Free-Surface Shallow Flows. Wiley, Chichester, West Sussex PO19 1UD, England.
- Wu, S., Rajaratman, N., Katopodis, C., 1999. Structure of flow in vertical slot fishways. *J. Hydraulic Eng.* 125 (4), 351–360.

Glossary

- b : slot width following the large crosswall direction (m)
 b' : slot width (m)
 B : width of a pool (m)
 C_d : dimensionless coefficient that relates $Q/\sqrt{gSb^5}$ to h_c/b for each design
 C_q : dimensionless coefficient that relates Q to $bh_c\sqrt{gL}$
 C_{w0} : dimensionless coefficient that relates v_s to $\sqrt{2g\Delta H}$
 g : gravity acceleration (m/s^2)
 h_c : water depth in the center of a pool (m)
 h_s : water depth in the slot (m)
 ΔH : vertical drop of the free surface from one pool to the next (m)
 L : length of a pool (m)
 Q : discharge (m^3/s)
 S : bed slope
 v_s : average flow velocity in the slot (m/s)
 ϵ : energy dissipation per unit mass (m^2/s^3)

Optical Fish Trajectory Measurement in Fishways through Computer Vision and Artificial Neural Networks

Álvaro Rodríguez¹; María Bermúdez²; Juan R. Rabuñal, A.M.ASCE³; Jerónimo Puertas⁴; Julián Dorado⁵; Luís Pena⁶; and Luis Balairón⁷

Abstract: Vertical slot fishways are hydraulic structures that allow the upstream migration of fish through obstructions in rivers. The appropriate design of a vertical slot fishway depends on the interplay between hydraulic and biological variables because the hydrodynamic properties of the fishway must match the requirements of the fish species for which it is intended. One of the primary difficulties associated with studies of real fish behavior in fishway models is that the existing mechanisms to measure the behavior of the fish in these assays, such as direct observation or placement of sensors on the specimens, are impractical or unduly affect the animal behavior. This paper proposes a new procedure for measuring the behavior of the fish. The proposed technique uses artificial neural networks and computer vision techniques to analyze images obtained from the assays by means of a camera system designed for fishway integration. It is expected that this technique will provide detailed information about the fish behavior, and it will help to improve fish passage devices, which is currently a subject of interest in the area of civil engineering. A series of assays has been performed to validate this new approach in a full-scale fishway model with living fish. We have obtained very promising results that allow accurate reconstruction of the movements of the fish within the fishway. DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000092. © 2011 American Society of Civil Engineers.

CE Database subject headings: Fish management; Neural networks; Computer applications; Measurement.

Author keywords: Computer vision; Neural network; Fishway; Fish trajectory.

Introduction

The construction of engineering works in rivers, such as dams or weirs, alters the ecosystem of rivers, causing changes in the fauna and flora. One of the most important effects is the obstruction of fish migration because many species swim long distances along the river to find spawning areas, food, refuge, or new territories.

Of the various solutions employed to restore fish passages, some of the most versatile are known as vertical slot fishways. This type of fishway is basically a channel divided into several pools separated by slots. Its primary advantage is its ability to handle large

variations in water levels because the velocity and turbulence fields in the pools are independent of the discharge. Moreover, it allows fish to swim at their preferred depth and to rest in low-velocity areas, in contrast to other types of fishways.

An effective vertical slot fishway must allow fish to enter, pass through, and exit safely, with minimum cost to the fish in time and energy. Thus, biological requirements, such as fish preferences, should drive design and construction criteria for this type of structure. However, although some writers have characterized the flow in vertical slot fishways (Wu et al. 1999; Puertas et al. 2004; Tarrade et al. 2008), and others have studied fish swimming performance (Dewar and Graham 1994; Blake 2004), analysis of real fish behavior in full-scale physical fishway models is scarce in the literature. At present, very few quantitative studies in real fishways can be found, and fish stress assays are performed in channels, so the actual behavior of the fish within a fishway is practically unknown.

Consequently, knowledge of fish behavior when confronted with this type of structure is limited, and these biological requirements usually rely on the designer's experience, rather than on rational approaches.

To address this deficit, it is necessary to complete the fishway design methodology with results from experimental assays with living fish. In these tests, fish are introduced into full-scale fishway models such as that shown in Fig. 1, and their movements and behavior are analyzed. In the tests described in this paper, the passage success (the proportion of individuals that pass through the fishway) is evaluated, and the fish effort is measured by means of blood tests. These techniques should be used in combination with another technique that permits detailed characterization of the animal behavior during the assay, determining parameters such as resting areas, resting times, fish velocities and accelerations, and time spent for full ascent and in each pool. Subsequently, these parameters can be linked to the hydraulic data and the results of

¹Faculty of Informatics, Dept. of Information and Communications Technologies, Univ. of A Coruña, Campus Elviña s/n 15071, A Coruña, Spain. E-mail: arodriguezta@udc.es

²Dept. of Hydraulic Engineering, ETSEC, Univ. of A Coruña, Campus Elviña s/n 15071, A Coruña, Spain. E-mail: mbermudez@udc.es

³Center of Technological Innovation in Construction and Civil Engineering (CITEEC), Univ. of A Coruña, Campus Elviña s/n 15071, A Coruña, Spain (corresponding author). E-mail: juanra@udc.es

⁴Dept. of Hydraulic Engineering, ETSEC, Univ. of A Coruña, Campus Elviña s/n 15071, A Coruña, Spain. E-mail: jpuertas@udc.es

⁵Faculty of Informatics, Dept. of Information and Communications Technologies, Univ. of A Coruña, Campus Elviña s/n 15071, A Coruña, Spain. E-mail: julian@udc.es

⁶Dept. of Hydraulic Engineering, ETSEC, Univ. of A Coruña, Campus Elviña s/n 15071, A Coruña, Spain. E-mail: lpena@udc.es

⁷Center for Hydrographic Studies (CEH-CEDEX), Paseo Bajo de la Virgen del Puerto 3, 28005, Madrid, Spain. E-mail: luis.balairon@cedex.es

Note. This manuscript was submitted on March 4, 2010; approved on September 3, 2010; published online on September 27, 2010. Discussion period open until December 1, 2011; separate discussions must be submitted for individual papers. This paper is part of the *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol. 25, No. 4, July 1, 2011. ©ASCE, ISSN 0887-3801/2011/4-291-301/\$25.00.



Fig. 1. Indoor full-scale (1:1 scale) vertical slot fishway model used in this study; photo taken at CEDEX (Center for Studies and Experimentation of Public Works, Madrid, Spain), by the authors

the blood tests to define fish preferences and requirements. The results can be immediately applied to the design methodology of these devices, establishing hydraulic conditions in the fishways such that the target swimmers can negotiate it. Consequently, the vertical slot fishways designed by civil engineering experts with this new methodology will be more efficient, and fish passage will be enhanced.

Monitoring of the fish in the fishway during the assay with the current methods gives rise to many difficulties. Current methods include the following:

- *Direct observation:* This technique is impractical because of water turbulence and the limited validity of the information collected.
- *Placement of sensors on the specimens:* This technique uses antennas placed in key positions to record the passage of the fish, which will be equipped with a transmitter (Castro-Santos et al. 1996). Although this technique may be a good alternative when the tests are carried out with a large number of individuals, it provides no information on the full fish trajectory. Also, sensors placed externally tend to fall off, and surgically implanted sensors significantly affect the animal behavior.

Therefore, it is necessary to develop a new technique to measure the behavior of the fish within the fishway, in a way that is less intrusive and capable of obtaining more accurate information than direct observation and placement of sensors. To this end, an approach using optical or acoustic monitoring is the best alternative. Some early examples of these applications are the use of acoustic transmitters and a video camera for observing the behavior of various species (Armstrong et al. 1992), or the utilization of acoustic scanners for monitoring fish stocks (Steig and Iverson 1998). More recently, computer vision techniques for the study of fish behavior have been used; some examples are imaging techniques on the basis of color contrast and fluorescent marks for the identification and tracking of fish in a tank (Duarte et al. 2004), the study of swimming performance by analyzing the water with particle image velocimetry (Deng et al. 2004) or a new technique for fish counting in a tank (Morais et al. 2005).

In this work, an image-based approach has been selected, taking into account the recent success of such systems in the measurement of nondeterministic processes in the field of civil engineering (Chang and Ji 2007; Raffel et al. 2007).

Although several works (such as those previously described) have been focused on the analysis of fish behavior by using image processing (fish counting, determining fish size, and others) most of these techniques are carried out in calm and low turbulent water, which may not be appropriate for conditions inside the fishway. Additionally, the procedures to obtain the fish position in many cases involve the use of marks or light sources, which may influence fish behavior.

Consequently, because none of the current techniques would be appropriate in the context of this work, a new technique is proposed to study fish behavior in vertical slot fishways. It gathers information at every instant on the position, velocity, and acceleration of the fish. To this end, images obtained through a network of video cameras are analyzed by using computer vision techniques and artificial neural networks.

As a part of the technique proposed, this paper presents a new algorithm to extract the mass center of the fish in the images segmented by the neural network and a procedure to integrate the cameras used in the assays.

Proposed Technique

The proposed technique calculates the position of the fish in the fishway at every instant from the recorded images of the assay.

To this end, a camera system equipped with fisheye lenses that provide a 180° viewing angle was installed. The cameras were placed in an overhead perspective and partially submerged so that the entire fishway is covered, and turbulence and surface reflections are avoided.

Figs. 2(a) and 2(b) show real images taken during the assays, including the location of the cameras with water protection structure, the support structure, and the recording conditions. Fig. 2(c) illustrates the operation of the camera and shows the visual angle of the camera slightly reduced by the protection structure.

A total of 28 cameras were used, four per pool. The cameras were integrated into the monitoring and data acquisition system, so that each camera was connected to a hard disk, and the recording of all disks was synchronized. In addition, each hard disk was connected to a central computer and a monitor to facilitate the control of the process. The data acquisition system is shown in the schematic of Fig. 3.

From the images taken by the data acquisition system, the position of the fish in the fishway was obtained at every instant, allowing calculation of the velocity and acceleration of the fish. The technique can be summarized as follows:

1. Camera calibration and design of a projective model for the integration of measurements into a common coordinate space of a real scale.
2. Image segmentation, or separating the background from the regions in which the fish can be found [an artificial neural network (ANN) will be used to this end].
3. Fish detection by using computer vision techniques, namely,
 - Identification of the ANN-segmented areas corresponding to a fish in the image, calculating the fish mass and ruling out the noise; and
 - Estimation of the mass center of the fish.
4. Data analysis and filtering.

Camera Calibration

For a real measurement of the fish position from the images recorded by different cameras, the transformation between pixel coordinates of each image and the global coordinates on a real scale should be calculated.

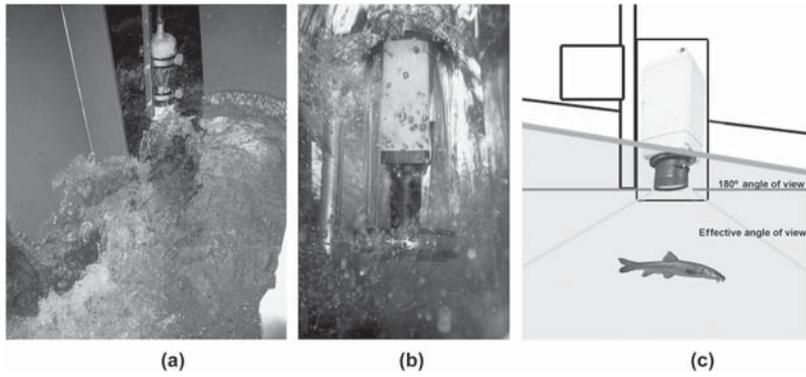


Fig. 2. Recording conditions

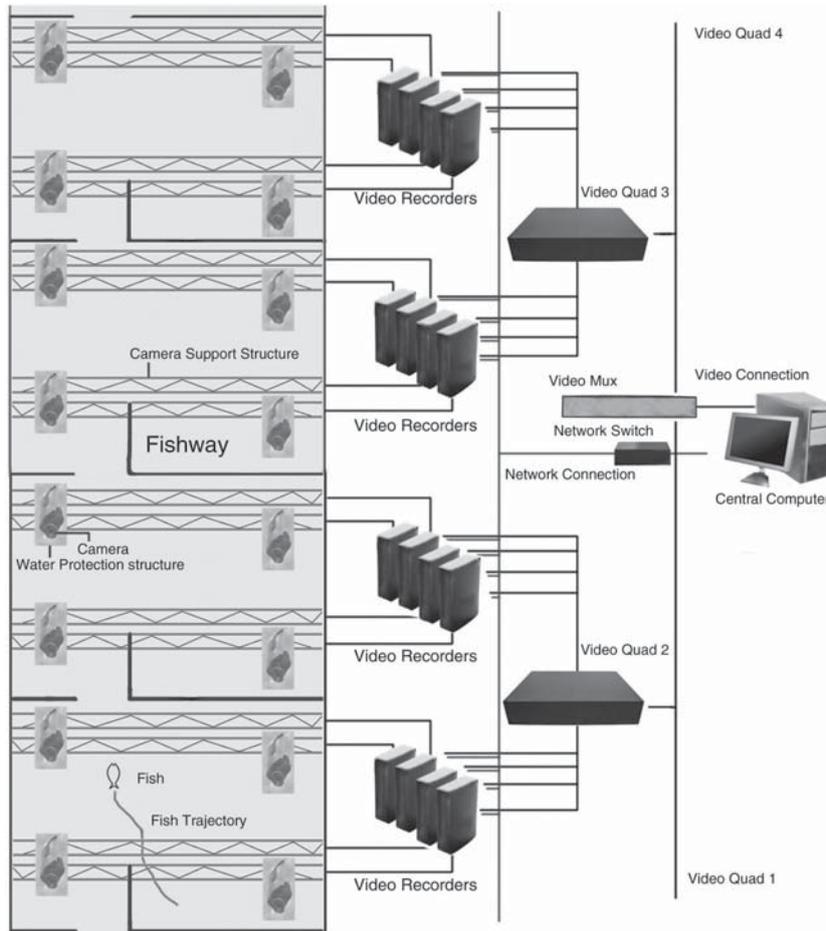


Fig. 3. Overview of the data acquisition system

This calculation is carried out in two steps: first, the parameters necessary to correct and scale the image are obtained separately for each camera; and second, the transformation of each camera into a common coordinate system is calculated.

For the first step, we use the pin-hole projective model (Subhashis 2008), which describes how a point from the real space is projected into the image plane. Pin-hole equations are shown in Eq. (1):

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ 1 \end{bmatrix} = M \times \begin{bmatrix} X_c/Z_c \\ Y_c/Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad M = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

where (X_c, Y_c, Z_c) = coordinates of a point in the real space, and (x_c, y_c) = coordinates of the point in the image. M is called the transformation matrix. It is defined by the focal length (f_x, f_y) and the position of the point that is projected through the center of the lens or optical center (c_x, c_y) .

However, in practice, the real position of the point differs from this model because of the angle of 180° and the imperfections of the lenses, phenomena that cause distortions in the image. In this case, the most important distortions are radial distortion dr and tangential distortion dt , whose influence can be modeled by using the equations shown in Eq. (2) (Weng et al. 1992):

$$\begin{aligned} dr_x &= xk_1r^2 + xk_2r^4 & dr_y &= yk_1r^2 + yk_2r^4 \\ dt_x &= k_3(r^2 + 2x^2) + 2k_4xy & dt_y &= 2k_3xy + k_4(r^2 + 2y^2) \end{aligned} \quad (2)$$

where x and y = spatial coordinates in the respective dimensions; r = distance pick point corresponding to the optical center; and k_i = distortion coefficients to be calculated.

To obtain the matrix M and the distortion coefficients, we compare the real geometry of a calibration pattern with the geometry observable in the images taken of it.

In a second process, the measurements obtained by each camera are connected to a common coordinate system covering the entire pool.

Thus, applying an equation of general projective geometry can lead us to the M_2 transformation between the global coordinate space a and the coordinate space of an image b , given by Eq. (3).

$$\begin{bmatrix} x_a \\ y_a \\ 1 \end{bmatrix} = M_2 \times \begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ 1 \end{bmatrix} \quad M_2 = \begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

To solve the preceding equation, a number of marks have been recorded in the areas in which the vision fields of the cameras overlap.

Fig. 4 shows the result of integrating the images of the four cameras in a fishway pool and the different overlapping fields of the cameras.

This implies that when the fish is located in areas in which the fields of the cameras overlap, it will be observed simultaneously by different cameras and from different perspectives.

Fig. 5 shows a schematic representation of how several cameras are combined to cover the bottom of the pool and record the fish. If the fish enters the overlapping area of multiple cameras, different perspectives of the fish will be obtained. This phenomenon, used to reduce the undesired variability of this process, is discussed subsequently.



Fig. 4. Camera overlapping shown as fishway pool formed from the projected images of the four cameras covering the pool; each polygon represents the field of a different camera

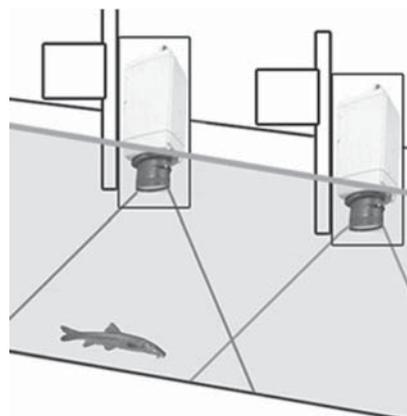


Fig. 5. Differences in camera perspectives

Segmentation

To study the behavior of the fish from the sequence of images acquired, the area occupied by the fish should be separated from the rest of the image or background. This process is known as image segmentation.

The two conventional approaches to this problem are the edge-based classification by means of analyzing the discontinuities in the image and the region-based classification by analyzing the similarity of pixels (Pujol 2003). More complex approaches to segmentation have been performed through fuzzy logic or artificial neural networks (Cheng et al. 2001).

Preliminary assays have been conducted to determine the effectiveness of classical techniques to execute fish segmentation. Thus, a set of images with different light and camera conditions was chosen and analyzed.

In this assay, the images were equalized to normalize the luminosity and analyzed with several algorithms. Some of the best classic techniques in this task are the Otsu method, which performs a

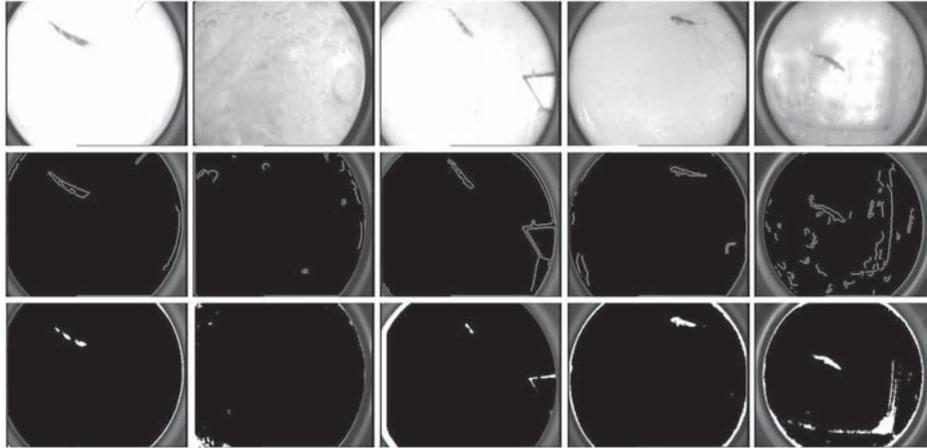


Fig. 6. Analysis by classic techniques; from top to bottom the following information is shown: original images, results by using an edge-detection technique, and results obtained by using a region-based classification—all image borders have been manually excluded from analysis by using masks

region-based classification by automatically thresholding the histogram, and the Canny edge detector with a threshold for strong edges in the range (0.2–0.3), which resulted in less noise than other edge-finding methods, such as the Sobel or the Prewitt operators. The results obtained by using these techniques are shown in Fig. 6.

Analyzing the obtained results, it may be seen that the edge-detection technique presents several artifacts because of changes in light conditions that affect the intensity gradients in the images. Furthermore, this technique must be used with a complex algorithm for edge filtering, labeling, and linking to separate the different objects.

On the other hand, the region-based classification technique simply cannot overcome the variability in experimental conditions and it results in several noise levels.

The preliminary images have been also analyzed by using a more complex technique: a type of ANN known as a self-organizing map (SOM) (Kohonen 1982). The SOM model is aimed

at establishing a correlation between the numerical patterns supplied as an input and a two-dimensional output space (topological map); thus, the input data with similar features will activate nearby areas of the map. This technique can be applied to image segmentation, with the following advantages: adaptive learning (its behavior is determined through an automatic training phase with illustrative examples), generalization ability, error tolerance, ease of operation in parallel modes, and capability to integrate into the existing technology (Moya et al. 1998).

SOM networks have been widely used in the image analysis field in several works (Verikas et al. 1997; Dong and Xie 2005), and their importance in this field was pointed out by Egmont-Petersen et al. (2002).

Although SOM classification on the basis of pixel levels has been used successfully in several works (Ahmed and Farag 1997; Waldemark 1997; Ngan and Hu 1999), it has not significantly

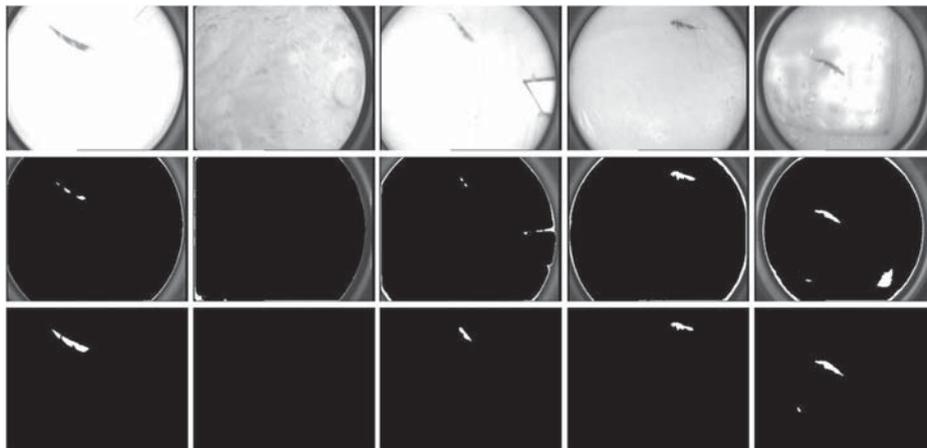


Fig. 7. ANN comparative results; from top to bottom the following information is shown: original images, results by using an SOM with pixel values, and results by using the SOM proposed in this work—neither preprocessing nor masking borders is required with the proposed SOM

improved the results obtained previously through the region classification technique. Fig. 7 shows the results obtained with a three-layer topology with three processing elements (neurons) in each layer. The input data for the pixel (i, j) were the three 3×3 vectors with the red/green/blue (RGB) values around the pixel.

The results suggest that, because of the huge amount of noise, the variability in camera conditions, and the luminosity changes (emphasized by the complex interaction between light and water), neither a traditional approach nor SOM classification on the basis of pixel levels is effective.

Thus, a technique robust in different light conditions must be used, and additional background knowledge must be introduced, to avoid the detection of background objects present in the pool. Segmentation by features is a very robust technique, and it was used with success in numerous works (Haring et al. 1994; Koh et al. 1995; Glass and Reddick 1998; Egmont-Petersen and Pelikan 1999).

In this work, an SOM network using statistical features extracted from the RGB color space of the image was used. In this way, numerical values less sensitive to factors such as changes in light or the specific conditions of each camera can be used. Furthermore, background knowledge can be input to the network by using information about the same scene with no fish.

The results obtained with the proposed technique and with the SOM on the basis of pixel values are compared in Fig. 7.

Analyzing the results obtained with the different techniques (Figs. 6 and 7), the advantages of SOM segmentation on the basis of features compared with classical techniques and SOM segmentation on the basis of pixel values are clearly observed.

Hence, we have chosen a three-layer topology with three processing elements in each layer, and the input data for the pixel (i, j) are two vectors of N^2 parameters defined in Eq. (4).

$$E_{i,j} = \{V_{a,b}V_{a,b} - W_{a,b}\}_{(a,b)=\{[i-(N/2),j-(N/2)], [i+(N/2),j+(N/2)]\}}$$

$$V_{a,b} = \frac{\mu_{a,b}}{\mu_I} \quad W_{a,b} = \frac{\mu'_{a,b}}{\mu'_I} \quad \mu_{i,j} = \frac{\sum_{x,y}^{N_2} I(x,y)}{N_2} \quad (4)$$

$$\mu'_{i,j} = \frac{\sum_{x,y}^{N_2} I'(x,y)}{N_2}$$

$$(x,y) = \left[\left(i - \frac{N_2}{2}, j - \frac{N_2}{2} \right), \left(i + \frac{N_2}{2}, j + \frac{N_2}{2} \right) \right]$$

The N^2 pixels (a, b) adjoining pixel (i, j) are used in Eq. (4). For each pixel (a, b) , two measures ($V_{a,b}$ and $W_{a,b}$) are used. These two measures are calculated on the basis of the average local intensity and the average global intensity of the image I , where the analysis

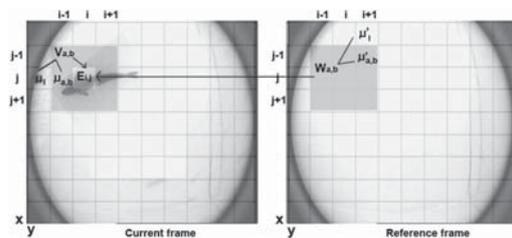


Fig. 8. Computation scheme of the features to be supplied to the ANN; input V and W values used to classify the pixel (i, j) are the normalized local averages of the neighboring pixels of (i, j) in the actual frame and in the reference frame, respectively

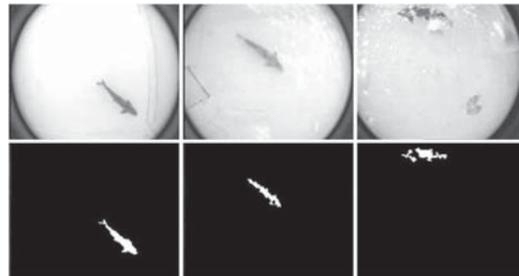


Fig. 9. Output of the SOM network

is performed, and of a reference image I' , from the same camera with no fish.

Fig. 8 shows schematically how these parameters are calculated to classify the pixel (i, j) of the current image.

Thus, for classifying the pixel (i, j) , the ANN uses local average information extracted from the actual frame ($\mu_{a,b}$) and from reference frame ($\mu'_{a,b}$), normalized with global average values (μ_I and μ'_I) from the actual and reference frames, respectively.

In the performed assays, the analysis was conducted by using the three RGB color channels of the image (the local average value uses $N_2^2 \times 3$ elements), with an image size of 360×288 pixels, and using $N = N_2 = 3$.

Fig. 9 shows examples of real images obtained during the assays and the result of the analysis of these images by the SOM network.

Fish Detection

Once the image segmentation is performed by using the SOM network, the trajectory and velocity of the fish are calculated by using the fish-detected area in each image, and the point corresponding to its mass center.

Because of the characteristics of the image (fish are often partially hidden, and a certain level of noise is expected because of the presence of shadows, bubbles, and reflections), the algorithm should respond well to partial or abnormal detections; this is a fundamental aspect of the analysis regarding the quality of the results obtained.

A simple algorithm has been built to simplify the computational burden of the entire process. The algorithm requires the connected-body vector from the segmented image. Each body will be characterized by the vector of pixels that make it up and by a set of descriptive parameters: its area, its centroid (calculated as the average position of the body pixels), and the minimum ellipse containing the body. Moreover, a procedure has been defined to replace two unconnected bodies with a new one, which will be formed by the points from the two previous bodies (*fusion operation*). Then, its descriptive parameters will be updated according to its new characteristics (*update operation*).

In its first stage, the algorithm classifies each body into *selected bodies* or *small bodies*, or discards it according to its properties. In its second stage, each pair of selected bodies is analyzed, and, if they are enough close to one another (this distance can be defined by user), they are joined to form a new selected body (fusion and update operations). This process is performed for each pair of selected bodies until no changes are produced. In the final stage, each selected body is joined to the small bodies close to it, and its properties are updated.

Thus, the algorithm for determining the mass centers of the fish puts together those connected bodies whose characteristics can be

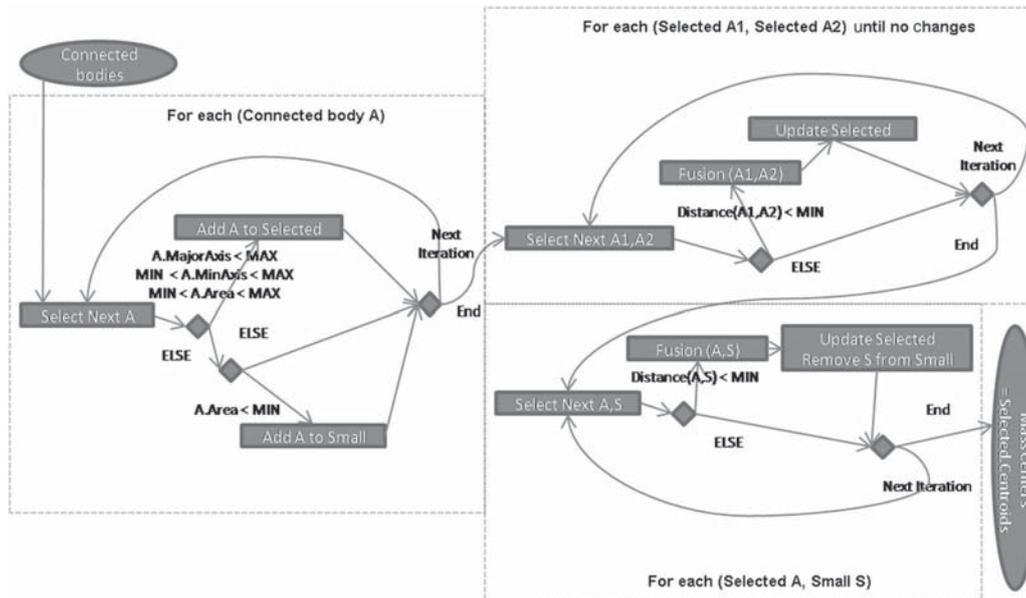


Fig. 10. Diagram of the algorithm used to calculate the mass centers; the three stages of the algorithm are marked with discontinuous squares

matched to a fish or a part of a fish, and discards those bodies that, because of their size or shape, are regarded as noise. Subsequently, the mass center of each detected fish is obtained.

The operation of this algorithm is described in detail in the schematic of Fig. 10, and Fig. 11 shows the mass center provided by the algorithm with different ANN-segmented images.

At this point, we have obtained the position of the fish in the pool at every instant of time t .

It is expected that these results will show certain undesirable phenomena, caused by the small variability of the calculated position of the centroid because of differences in the parts of fish that are hidden by bubbles, and variability because of errors in perspective and alignment of planes, when the fish moves from the field of view of one camera to another.

To solve these problems and to remove some of the noise still present in the results, a complex filtering process is required. To this end, a Gaussian spatial filtering process has been applied (Univ. of Murcia 2003) on the temporally close observations, ruling out those that are temporally or spatially isolated as noise.

Additionally, the relative position of the cameras has been taken into account to solve differences among simultaneous observations, so that when the fish is detected simultaneously by two or more cameras, its position is the average of all the observed positions.

Multiple Fish

Although the application field of this work is the detailed analysis of fish behavior in assays with one single fish, situations with multiple fish within the fishway can be managed. However, if two or more individuals are very close to one another in the same camera, the detection algorithm will consider them as the same body, as shown in Fig. 12(b). Subsequently, when they have separated, the system will differentiate successfully between the two fish, as illustrated in Figs. 12(a) and 12(c).

The distance at which the system will consider two objects as parts of a single body can be adjusted, and this characteristic can be deactivated. However, in extreme situations, when fish are overlapped in the images, or when separate parts of the same fish are detected, the system may not properly manage a situation with multiple fish, even if the detection parameters are set up carefully. In these cases, choosing an average coordinate or removing the anomalous detections is a good solution for the purposes of this work.

Additionally, a specific model to manage uncertainty should be introduced to separate detections of different fish. This is because of the difficulties in separating or recognizing different individual fish in an image. This task is at present performed manually.

Thus, although the system may be impractical in situations with a large number of fish, assays with several fish in the fishway (up to two or three fish in the same camera at the same time) have already been conducted. Fig. 12 shows an example of the results obtained in this situation with two fish in the same camera.

Data Analysis

The result of the previous process is information on the fish position in the fishway over time; consequently, we have a position vector as follows in Eq. (5):

$$[(x_{t_0}, y_{t_0}), (x_{t_1}, y_{t_1}), \dots, (x_{t_i}, y_{t_i}), \dots, (x_{t_N}, y_{t_N})]_{\min(\Delta t)=0.04s} \quad (5)$$

Starting from these data, instantaneous velocities (V_i) and mean velocities (V_M) will be obtained, according to Eq. (6).

$$V_i = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta l}{\Delta t} = \frac{dl}{dt} = \frac{\sqrt{(x_{t_i} - x_{t_{i-1}})^2 + (y_{t_i} - y_{t_{i-1}})^2}}{t_i - t_{i-1}} \quad (6)$$

$$V_M = \frac{\sum_{i=1}^N V_i}{N}$$

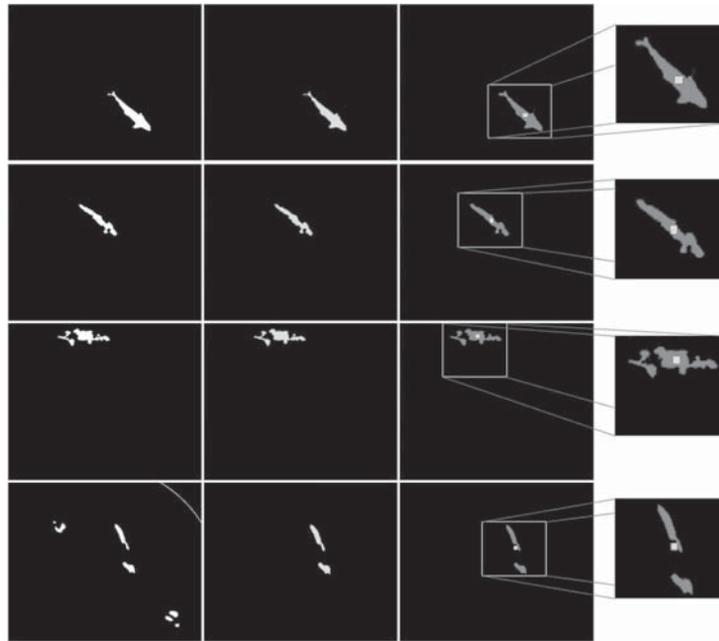


Fig. 11. ANN-segmented images (left column), fish detection (middle column), and mass center determination results (right column); the last ANN-segmented image includes different types of artificially added noise

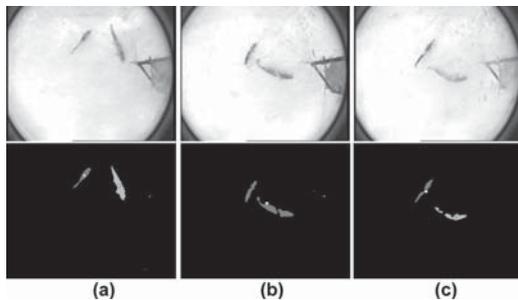


Fig. 12. Output with two fish; each detection of the system is marked with a small rectangle representing its mass center

However, the observed velocities (V_{observed}) are not really those that quantify the real effort made by fish to swim; the actual swimming velocities (V_{swimming}) can be obtained by relating them to the flow velocity in the fishway (V_{flow}) by means of Eq. (7):

$$V_{\text{swimming}} = V_{\text{observed}} - V_{\text{flow}} \quad (7)$$

The water velocity in the fishway can be calculated by using experimental studies or numerical models. Extensive experimental measurements of the velocity fields in single pools were performed in several works (Wu et al. 1999; Puertas et al. 2004; Pena 2004; Tarrade et al. 2008), and in others (Heimerl et al. 2008; Cea et al. 2007; Chorda et al. 2010) numerical models on the basis of the

two-dimensional (2D) depth-averaged shallow water equations were used for computing the flow field in vertical slot fishways. Thus, the detailed characterization of flow velocities, which is needed to obtain V_{swimming} , can be obtained either experimentally or numerically. Fig. 13 shows the velocity field computed with a 2D depth-averaged numerical model in the vertical slot fishway model used in this study.

Once the fish's swimming velocities are known, its instantaneous acceleration (A_i) and mean acceleration (A_M) can be calculated according to the expression in Eq. (8).

$$A_i = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{dv}{dt} = \frac{V_i - V_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \quad A_M = \frac{\sum_{i=1}^N A_i}{N} \quad (8)$$

Knowing the acceleration, an estimate of the effort is possible, given that the acceleration of a body is related to the force applied through its mass according to Newton's second law, as shown in Eq. (9). This implies that acceleration is directly proportional to the effort.

$$A = F/m \quad (9)$$

In addition to these indicators, further information can be obtained, such as ascending and resting times, distance covered, resting areas, and other more complex measurements such as distribution analysis of the transit time versus turbulence or velocity. All these parameters are highly useful in studying the interaction between fish and fishways.

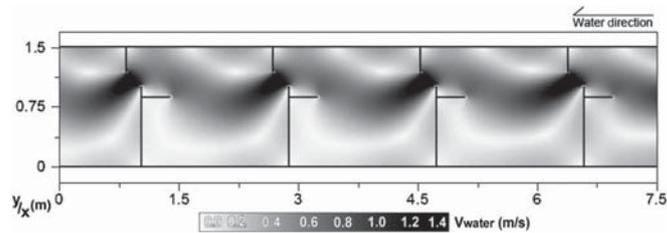


Fig. 13. Velocity field in three pools of the vertical slot fishway used in this study

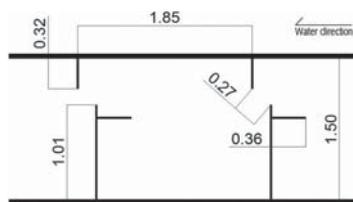


Fig. 14. Geometric dimensions of a pool of the physical model (in meters)

Experimental Results

Several preliminary assays were carried out in a full-scale vertical slot fishway model, located in the Center for Studies and Experimentation of Public Works (Madrid), where the data acquisition system was set up.

The fishway model consisted of a 20 m long, 1.5 m wide, and 1 m deep flume. The fishway contained 11 pools with the geometric dimensions that are detailed in Fig. 14. The slope of the fishway during the tests was 7.5%, but it could be varied by raising or lowering its upper end. The whole structure is included in a water circuit supplying up to 500 L/s, entering the fishway at a minimal velocity.

The recordings of the assays lasted approximately 2 h, and a measurement was performed every 0.04 s (recording frequency 25 Hz).

The trajectory of each individual fish was divided in two periods: resting period, when the fish remained almost still in a low-velocity area, and ascent period, when the fish moved from one pool to the next one. The following information was obtained for each individual that swam up the fishway: resting areas, preferred swimming zone, total ascent time, total resting time, average resting time per pool, and ascending average velocities. The system output for two individuals, with the trajectory projected onto the

map of flow velocities, is shown in Fig. 15, and the values of the several parameters are shown in Tables 1 and 2.

Following this procedure, a database with different fish species and fish lengths is in development.

System Performance

To measure the performance of the system, a data set of 1,000 images from 10 different cameras selected from different pool and fishway regions was analyzed. The data set includes five sequences of 150 frames each in which the fish is in resting areas, and five sequences of 50 frames each in which the fish is crossing between two pools.

To measure the performance, no filtering process was applied to the data, and the precision and recall metrics shown in Eq. (10) were used.

$$\begin{aligned} \text{Precision} &= \frac{\text{True Positive}}{\text{True Positive} + \text{False Positive}} \\ \text{Recall} &= \frac{\text{True Positive}}{\text{True Positive} + \text{False Negative}} \quad (10) \\ \text{False Positive Rate} &= 1 - \text{Precision} \\ \text{False Negative Rate} &= 1 - \text{Recall} \end{aligned}$$

The obtained results are shown in Table 3.

Analyzing the results, it may be observed that a very low false positive rate is achieved, so obtained results are very reliable, and they will represent true positions of the fish with a high probability. Furthermore, precision is the most important factor in a detection system because a high rate of false positives would make the results useless.

However, the false negative rate is much greater. In more than a 30% of the measurements, the system will not provide information about the fish's position. This is because the fish will be frequently occluded by the turbulence of water.

Nevertheless, the system can execute up to 25 measurements per second, so it will provide a correct position more than 15 times per

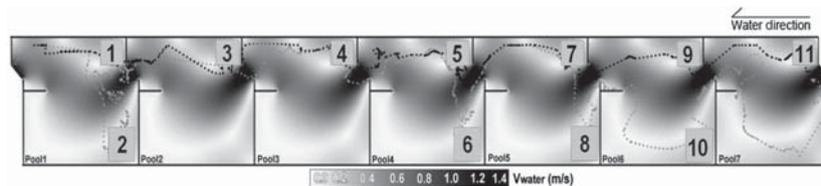


Fig. 15. Trajectory of two individuals within the fishway, projected onto the map of flow velocities; resting areas numbered 1–11

Table 1. Parameters Measured for Fish A (Trajectory in Fig. 15); Ascending Average Velocity Calculated from Averaged Water Speeds

Fish A	Pool1	Pool2	Pool3	Pool4	Pool5	Pool6	Pool7	Total	Avg.
Resting time (s)	2,053	1,109	27	880	278	366	316	5,029	718
Resting zone	1	3	4	5	7	9	11	—	—
Ascending time (s)	6	17	3	14	10	3	5	58	8.3
Ascending average velocity (m/s)	1.1	0.8	1.5	0.9	1	1.5	1.2	—	1.01
Assay	Family: salmonid; specie: trout; size: 19.1 cm; weight: 70 g								
Fishway	Slope: 7.5 %; fishway length: 20 m; width: 1.5 m; pool length: 1.85 m; slot: 0.27 m; pool type: T4 slot; water velocity: 1.25 m/s								

Table 2. Parameters Measured for Fish B (Trajectory in Fig. 15); Ascending Average Velocity Calculated from Averaged Water Speeds

Fish B	Pool1	Pool2	Pool3	Pool4	Pool5	Pool6	Pool7	Total	Avg.	
Resting time (s)	892	53	—	887	136	1,472	335	—	3,775	629
Resting zone	1	2	—	4	6	8	10	—	—	
Ascending time (s)	17	4	4	14	9	4	7	60	8.8	
Ascending average velocity (m/s)	0.8	1.2	1.3	0.9	1	1.3	1.1	—	1.00	
Assay	Family: salmonid; specie: trout; size: 20.2 cm; weight: 79.5 g									
Fishway	Slope: 7.5 %; fishway length: 20 m; width: 1.5 m; pool length: 1.85 m; slot: 0.27 m; pool type: T4 slot; water velocity: 1.25 m/s									

Table 3. System Performance

Performance metric	Achieved performance
Precision	0.99
Recall	0.69
False positive rate	0.01
False negative rate	0.31

second on average, which is far beyond any detection system used at present in this field.

Conclusions and Future Work

We have designed a data acquisition system with video monitoring to record experiments on a full-scale fishway model. This system allows the observation and monitoring of fish in an accurate and effective way.

A system for automatic analysis of these assays has been designed, implemented, and tested with preliminary data. It uses combined techniques of computer vision and artificial neural networks to determine the position of the fish in the fishway at every instant, starting from the images taken by the data acquisition system. A key advantage of the new analysis method is the assessment of the fish response in a noninvasive way, i.e., without altering the fish behavior.

The results obtained with this system have been very promising because they allowed us to reconstruct the fish trajectory during the assay, with a low error rate. All the results are collected in a database, differentiating between the fish species and size, and including parameters that reflect the fish behavior in these devices.

In future stages of this work, further assays will be carried out and will be included in the database, and more parameters will also

be analyzed. Additionally, the system will be revised and developed to improve results in multiple-fish situations.

Although further research is needed, the results obtained can contribute to developing robust guidelines for future fishway designs and to establish more realistic criteria for the evaluation of biological performance of the current designs.

Acknowledgments

This work was partially supported by the General Directorate of Research, Development and Innovation (Dirección Xeral de Investigación, Desenvolvemento e Innovación) of the Xunta de Galicia (Ref. 08TMT005CT, Ref. 10MDS014CT, and Ref. 08MDS003CT). The writers would also like to thank the Center for Studies and Experimentation on Public Works (CEDEX).

References

- Ahmed, M. N., and Farag, A. A. (1997). "Two-stage neural network for volume segmentation of medical images." *Pattern Recognition Letters*, 18(11–13), 1143–1151.
- Armstrong, J. D., Bagley, P. M., and Priede, I. G. (1992). "Photographic and acoustic tracking observations of the behavior of the grenadier *Coryphaenoides (Nematonorus) armatus*, the eel *Synaphobranchus bathybius*, and other abyssal demersal fish in the North Atlantic Ocean." *Mar. Biol.*, 112(4), 1432–1793.
- Blake, R. W. (2004). "Fish functional design and swimming performance." *J. Fish Biol.*, 65(5), 1193–1222.
- Castro-Santos, T., Haro, A., and Walk, S. (1996). "A passive integrated transponder (PIT) tag system for monitoring fishways." *Fisheries Research*, 28(3), 253–261.
- Cea, L., Pena, L., Puertas, J., Vázquez-Cendón, M. E., and Peña, E. (2007). "Application of several depth-averaged turbulence models to simulate flow in vertical slot fishways." *J. Hydraul. Eng.*, 133(2), 160–172.

- Chang, C. C., and Ji, Y. F. (2007). "Flexible videogrammetric technique for three dimensional vibration measurement." *J. Eng. Mech.*, 133(6), 654–664.
- Cheng, H. D., Jiang, X. H., Sun, Y., and Wang, J. (2001). "Color image segmentation: advances and prospects." *Pattern Recognition*, 34(12), 2259–2281.
- Chorda, J., Maubourguet, M. M., Roux, H., Larinier, M., Tarrade, L., and David, L. (2010). "Two-dimensional free surface flow numerical model for vertical slot fishways." *J. Hydraul. Res.*, 48(2), 141–151.
- Deng, Z., Richmond, M. C., Guensch, G. R., and Mueller, R. P. (2004). "Study of fish response using particle image velocimetry and high-speed, high-resolution imaging." *Technical Rep. PNNL-14819*, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA.
- Dewar, H., and Graham, J. (1994). "Studies of tropical tuna swimming performance in a large water tunnel—energetics." *J. Exp. Biol.*, 192(1), 13–31.
- Dong, G., and Xie, M. (2005). "Color clustering and learning for image segmentation based on neural networks." *IEEE Transactions on Neural Networks*, 16(4), 925–936.
- Duarte, S., Reig, L., Oca, J., and Flos, R. (2004). "Computerized imaging techniques for fish tracking in behavioral studies." European Aquaculture Society, 310.
- Egmont-Petersen, M., de Ridder, D., and Handels, H. (2002). "Image processing with neural networks—A review." *Pattern Recognition*, 35(10), 2279–2301.
- Egmont-Petersen, M., and Pelikan, E. (1999). "Detection of bone tumours in radiographic images using neural networks." *Pattern Anal. Appl.*, 2(2), 172–183.
- Glass, J. O., and Reddick, W. E. (1998). "Hybrid artificial neural network segmentation and classification of dynamic contrast-enhanced MR imaging (DEMRI) of osteosarcoma." *Magn. Reson. Imaging*, 16(9), 1075–1083.
- Haring, S., Viergever, M. A., and Kok, J. N. (1994). "Kohonen networks for multiscale image segmentation." *Image Vision Comput.*, 12(6), 339–344.
- Heimerl, S., Hagemeyer, M., and Ehteler, C. (2008). "Numerical flow simulation of pool-type fishways: New ways with well-known tools." *Hydrobiologia*, 609(1), 189–196.
- Koh, J., Suk, M. S., and Bhandarkar, S. M. (1995). "A multilayer self organizing feature map for range image segmentation." *Neural Networks*, 8(1), 67–86.
- Kohonen, T. (1982). "Self-organized formation of topologically correct feature maps." *Biol. Cybern.*, 43(1), 59–69.
- Moraís, E. F., Campos, M. F. M., Pádua, F. L. C., and Carceroni, R. L. (2005). "Particle filter-based predictive tracking for robust fish count." *XVIII Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing*, IEEE Computer Society, Natal, RN, Brazil, 367–374.
- Moya, F., Herrero, V., and Guerrero, G. (1998). "La aplicación de redes neuronales artificiales (RNA): a la recuperación de la información." *Anuario SOCADI de Documentación e Información [SOCADI Yearbook of Information and Documentation]*, 147–164 (in Spanish).
- Ngan, S. C., and Hu, X. (1999). "Analysis of functional magnetic resonance imaging data using self-organizing mapping with spatial connectivity." *Magn. Reson. Med.*, 41(5), 939–946.
- Pena, L. (2004). "Hydraulic study in vertical slots and deep slots fishways aligned. An approximation to experimental evaluation of turbulent kinetic energy." Ph.D. thesis, Univ. of A Coruña.
- Puertas, J., Pena, L., and Teijeiro, T. (2004). "Experimental approach to the hydraulics of vertical slot fishways." *J. Hydraul. Eng.*, 130(1), 10–23.
- Pujol, X. M. (2003). "Image segmentation integrating color, texture and boundary information." Ph.D. thesis, Univ. of Girona.
- Raffel, M., Willert, C., and Kompenhans, J. (2007). *Particle image velocimetry, a practical guide*, 2nd Ed., Springer, Berlin.
- Steig, T. W., and Iverson, T. K. (1998). "Acoustic monitoring of salmonid density, target strength, and trajectories at two dams on the Columbia River, using a split-beam scanning system." *Fisheries Research*, 35(1-2), 43–53.
- Subhashis, B. (2008). "Projective geometry, camera models and calibration." IIT Delhi. (<http://www.cse.iitd.ernet.in/~suban/vision/geometry/index.html>) (Feb. 2, 2010).
- Tarrade, L., Texier, A., David, L., and Larinier, M. (2008). "Topologies and measurements of turbulent flow in vertical slot fishways." *Hydrobiologia*, 609(1), 177–188.
- Univ. of Murcia. (2003). Filtering techniques. Geography degree. Tele detection. (<http://www.um.es/geograf/sigmur/teledet/tema06.pdf>) (Feb. 2, 2010).
- Verikas, A., Malmqvist, K., and Bergman, L. (1997). "Color image segmentation by modular neural networks." *Pattern Recognition Letters*, 18(1997), 173–185.
- Waldemark, J. (1997). "An automated procedure for cluster analysis of multivariate satellite data." *Int. J. Neural Syst.*, 8(1), 3–15.
- Weng, J., Cohen, P., and Herniou, M. (1992). "Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation." *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 14(10), 965–980.
- Wu, S., Rajaratman, N., and Katopodis, C. (1999). "Structure of flow in vertical slot fishways." *J. Hydraul. Eng.*, 125(4), 351–360.

IMPLICATIONS OF FISH BEHAVIOR FOR VERTICAL SLOT FISHWAYS DESIGN

M. BERMÚDEZ, A. RODRÍGUEZ, L. CEA
Civil Engineering School, University of A Coruña
A Coruña, 15071, Spain

F. MORCILLO, M. CASTILLO, E. ARAMBURU
Hydraulic Laboratory of the Center for Studies and Experimentation of Public Works (CEDEX)
Madrid, 28005, Spain

Fish are confronted to a challenging hydrodynamic environment when they swim upstream vertical slot fishways. Nevertheless, the knowledge of fish behavior in these conditions is limited, particularly for coarse species such as cyprinids. The goal of the present study is to analyze fish swimming behavior in these artificial environments and to explore its implications in the development of new fishway designs. To this end, a set of experiments has been conducted in an indoor full-scale vertical slot fishway model with different cyprinid and salmonid species. Their upstream movements have been recorded with a video camera system and their trajectory has been extracted using computer vision techniques and an artificial neural network. The results emphasize the value of achieving a deeper understanding of fish requirements in these devices and show the potential of the methodology developed to fulfill this objective. Although further research is needed, the results obtained can contribute to develop robust guidelines for future fishway designs.

1 INTRODUCTION

Fish passage over engineering constructions such as dams or weirs is an important consideration in order to maintain healthy fish populations. Well-designed vertical slot fishways can enable fish to overcome these obstructions, restoring the stream continuity and whole fish communities. As several studies have pointed out (Mallen-Cooper and Stuart [10], Silva et al. [16]), the biological objectives of building a fish pass are developing towards the accommodation of all movements of a wide range of species and sizes of fishes. Accordingly, a significant challenge of this objective is designing vertical slot fishways in accordance with the requirements of small fishes or fish species with poor swimming abilities.

Both experimental (Rajaratnam et al. [14], Wu et al. [19], Puertas et al. [13]) and numerical studies (Barton et al. [2], Chorda et al. [5]) have provided a detailed knowledge of the hydrodynamic characteristics in vertical slot fishways. Typically, these devices are characterized by varying flow velocities, with low velocity recirculation regions in contrast to high velocity main flow regions. Besides, these studies have shown that the flow field is highly turbulent with vortices of various sizes and aerated, which constitutes a challenging hydrodynamic environment for fish. Nevertheless, little is known about fish behavior in these conditions, particularly for coarse species such as cyprinids.

One of the main issues is that the fishway may form a velocity barrier to fish migrants. In these devices, fish are generally confronted to zones of high velocity flow that exceed their maximum sustainable swim speeds. Accordingly, fatigue time models are generally used to define performance and to predict passage success. Nevertheless, these models typically include the unrealistic assumption that fish swim at a constant speed regardless of the speed of flow (Castro Santos [4]). Thus, further research is needed in order to verify if poor

passage in these devices can be attributed to limits of swimming capacity. Several other hydraulic characteristics such as velocity distributions, eddy size and strength, or turbulence are suspected to be important for effective fish passage, but fish response to variations of these parameters is not well documented (Katopodis [7]).

Another major concern is the large recirculation zones in the pools, characterized by low velocities and reversed flow directions. Visual observations made in large vertical slot fish passes have shown that recirculation regions, which in principle are designed to be resting areas, can become traps for small fish, by drastically increasing the transit times in each pool and thus compromising the clearing of the fish pass (Tarrade et al. [17]). Very few quantitative studies regarding this issue can be found in the literature.

The goal of the present study is to analyze fish swimming behavior in these artificial environments and to explore its implications in the development of new fishway designs. As several authors have pointed out (Silva et al. [16], Kempt et al. [8]), laboratory studies conducted on controlled conditions offer excellent opportunities to gain generic insights into fish behavior. In this case, a set of experiments has been conducted in an indoor full-scale vertical slot fishway model, with three different fish species: brown trout (*Salmo trutta*), iberian straight-mouth nase (*Pseudochondrostoma polylepis*) and iberian barbel (*Luciobarbus bocagei*). One of the main challenges is to fully track the individuals during their ascent in a non-intrusive way. In order to do so, a new technique based on an artificial neural network and computer vision techniques has been developed. With this technique, the path chosen by fish moving from one pool to another and the specific resting zones actually exploited by the fish have been identified. Besides, variables such as swimming velocities, accelerations or transit times have been evaluated for the different individuals.

2 MATERIALS AND METHODS

2.1 Fishway facility

The experiments were conducted in an indoor full-scale vertical slot fishway model at the Hydraulic Laboratory of the Center for Studies and Experimentation of Public Works (Madrid, Spain) (Figure 1). The fishway model consisted of a 20 m long, 1.5 m wide and 1 m deep flume, which contains 11 pools, with the geometric dimensions that are detailed in Figure 2. At the downstream end of the flume, a chamber was designed to introduce the individuals prior to experimentation. The slope of the fishway during the tests was 7.5 % and the water discharge was fixed to 250 l/s.



Figure 1. Indoor full-scale vertical slot fishway model used in this study (left) and detail of the network of video cameras which was installed in the model (right).

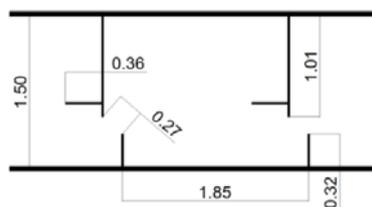


Figure 2. Geometric dimensions of a pool.

In order to continuously track the fish movements in the eight upper pools, the fishway was equipped with a video camera system. A total of 28 cameras (4 per pool) with fisheye lenses that provide a 180° viewing angle were installed. They have been placed in an overhead perspective and partially submerged (for the flow discharge of 250 l/s) so that the entire fishway is covered and turbulence and surface reflections are avoided. The location of the cameras and the structures used to fix them to the fishway are shown in Figure 1.

2.2 Experiments

Three different fish species have been tested: brown trout (*Salmo trutta*), iberian straight-mouth nase (*Pseudochondrostoma polylepis*) and iberian barbel (*Luciobarbus bocagei*) Both the trouts and nases were hatchery-reared individuals, whilst the barbels were captured at the River Cofio (tributary of Alberche River, Tagus basin, Spain).

Experiments are carried out only during the natural reproductive period of these species, i.e., December-February for trout, April-May for nase and May-June for barbel. Accordingly, fish experiments took place the 3rd of February 2010 (brown trout), the 6th of May 2010 and the 14th April 2011 (nase) and the 20th of May 2010 and 19th of May 2011 (barbel). Water temperature during the experiments was 14.4°C (02/03/2010), 18.4°C (05/06/2010), 19.2°C (04/14/2011), 18.9°C (05/20/2010) and 20.8 °C (05/19/2011), respectively.

In each test, groups of 12-25 fish were introduced in the downstream chamber and were allowed to ascend the fishway of their own volition during 24 h, at least 6 h of which were recorded with the video camera system. The length of the fish ranged from 15 to 25 cm for trout, from 10 to 20 cm for nase, and from 30 to 35 cm for barbel. Two size-classes were considered for trout (small specimens between 15 and 20 cm, large specimens between 20 and 25 cm) and nase (small specimens between 10 and 15 cm, large specimens between 15 and 20 cm), and approximately half of the individuals corresponded to each class in the tests.

2.3 Fish behavior analysis

This section examines the method to extract the fish trajectory from the images taken by the recording system. The technique is summarized below, although a complete description can be found in Rodriguez et al. [15]. Subsequently, the procedure for obtaining other variables of interest to assess behavior, such as fish velocities or accelerations, is also explained.

The first step of the technique is the design of a projective model for the integration of the images recorded by different cameras into the global coordinate system of the fishway. Once this transformation has been defined, the images are segmented, i. e., the area occupied by the fish is separated from the rest of the image or background using a type of artificial neural network (ANN) known as Self-Organizing Map. Finally, these ANN-segmented areas corresponding to a fish in the image are identified and the fish mass center is estimated using computer vision techniques.

As a result of this process, the fish position on the fishway over time is obtained, which leads to the definition of a position vector, as follows:

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

Where x_{t_N} is the x coordinate of the fish in the global coordinate system in time t_N and y_{t_N} is the y coordinate of the fish in the global coordinate system in time t_N . The minimum time increment between two consecutive fish positions is established in 0.04 s due to the selected recording frequency (25 Hz).

From the fish position vector, the observed instantaneous velocities are obtained, considering the direction vector defined by two consecutive fish positions and calculating its norm according to the following expression:

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

Where V_{obs} is the fish observed speed vector norm.

However, the observed velocities are not really those which quantify the real effort made by fish to swim. In order to calculate the actual swimming velocities, the water velocity in the pools must be taken into account, as follows:

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

Where V_{nat} is the fish swimming speed, V_{obs} is the fish observed speed and V_a is the flow velocity. It should be noted that the velocity field in the pools was computed with a numerical model based on the 2D depth averaged shallow water equations. The experimental validation of this model in 16 different fishway designs can be found in Bermúdez et al. [3].

Once the fish swimming velocities are known, their instantaneous acceleration (A_i) is calculated according to the following expression:

$$\bar{A}_i = \frac{(\bar{V}_{\text{nat}})_{t_i} - (\bar{V}_{\text{nat}})_{t_{i-1}}}{t_i - t_{i-1}} \quad (4)$$

Finally, the way fish use the different zones in the pools is discussed, focusing on the specific resting areas actually exploited by the fish during the experiments. The analysis relates the position vector of each individual (defined by Equation (1)) to the kinematic characteristics of the pools, and determines whether fish use particular zones in pools more than any other. The frequency of use and the average resting times of the different zones are evaluated.

3 RESULTS AND DISCUSSION

3.1 General performance

This section provides a general description of the behavior of the different individuals in the fishway. On the whole, both trout and barbel exhibited a high capacity to negotiate the fishway. The individuals avoided high-velocity areas and used recirculation regions, in which velocity and turbulence levels are lower, to move within the pool and for resting before ascending through the higher velocity area of the slot. Despite the high transit times observed in these recirculation regions for some individuals, no signs of disorientation and no fall back movements were detected in the recordings.

In the case of nase, however, the individuals appear to experience greater difficulties to traverse the fishway. Like trout and barbel, nases spent most of the time in recirculation areas. Nevertheless, a high rate of fall back movements, which carried them down to a previous pool, was observed for this species. This can be a response to fatigue, due to their limits of swimming performance, or other factors such as disorientation in the recirculation areas.

Overall, larger trout individuals presented a higher rate of success in ascending the entire fishway, relative to small specimens of this species (63% vs. 36%). The same is observed for nase, although the values of the success rate are much lower (8% for small specimens and 24% for large specimens). Finally, the passage success for barbel between 30 and 35 cm stands at 41%. Nevertheless, these results should be taken with caution due to the limited number of specimens and the specific conditions of the tests. In particular, Lara et al. [9], after conducting similar tests with lower flow discharges, found a higher passage success rate and contemplate the possibility that the flow discharge might have a significant influence on the results. Further research is needed to verify this point.

As explained above, the methodology is focused on identifying the path chosen by fish to move from one pool to the next one, and the use of the different zones within the pools. In the experiments with trout, a total of 24 pool ascents and 54 resting periods, corresponding to 8 different individuals, were selected from the recordings and subsequently analyzed. On the other hand, 11 pool ascents and 54 resting periods of 14 different nases, as well as 50 pool ascents and 70 resting periods of 11 barbels, were examined.

3.2 Recirculation regions

Recirculation regions are characterized by low velocity and turbulence levels, which implies that energy expenditures to maintain fish position are typically lower in these areas (Pavlov et al. [12]). Accordingly, the more limited fish swimming abilities, the higher transit times are expected in these areas. Nevertheless, it is believed that residence in an area of large scale turbulence (in this case, several times the size of the fish) for

enough time will cause the fish to become disoriented, lose equilibrium and have a reduced swimming capacity (Odeh et al. [11]).

In order to evaluate fish transit time in these zones, it is necessary to define exactly the area that they cover. The separation between the main flow and the recirculation regions has been defined coincident with the 0.40 m/s contour, and it has been verified that the turbulence levels in these areas are also very low (Figure 3). Subsequently, the recirculation areas have been divided into three regions (namely A, B and C), depending on the location within the pool (Figure 4). Regions A and B are located in the upstream part of the pools, whilst region C is situated in the downstream part. An individual is assumed to be exploiting a resting zone when it remains in one of these areas for more than 5 seconds, so shorter fish displacements through these areas are not considered.

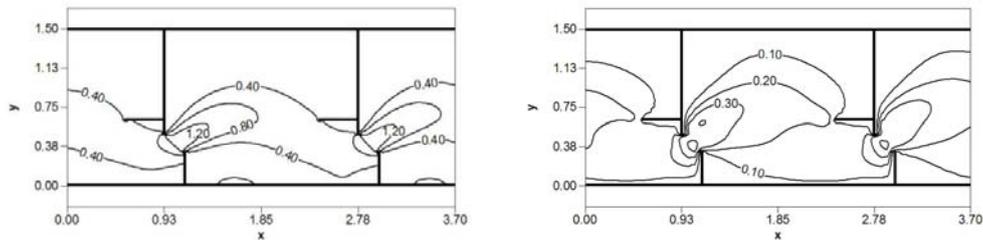


Figure 3. Velocity field (in m/s, left) and turbulent kinetic energy field (in m^2/s^2 , right) in the pools computed by the 2D numerical model

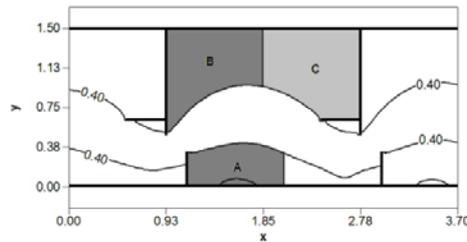


Figure 4. Definition of the recirculation regions. Dark grey areas are the upstream regions A and B, while the light grey area is the downstream region C

Low-velocity areas were not frequented uniformly by fish, which stayed most frequently in the zone located just downstream from the slot and behind the small side baffle (zone A). The frequency of brown trout using zones A and B was 57.4 % and 42.6%, respectively, with an average residence time of 411 s and 413 s. The individuals of trout do not remain in the zone C for more than 5 seconds, so it is assumed that they are not using this zone as a resting area. In the experiments with nase, resting periods were mainly only observed in zone A, with an average residence time of 389 s, and zones B and C were rarely used (only one resting period was analyzed in each area). Finally, the frequency of barbel using zones A and B was 51.4 % and 44.3 %, respectively, with an average residence time of 118 s and 179 s. As in the case of trout and nase, the individuals almost never remain in the zone C for more than 5 seconds.

Table 1. Exploitation of resting areas for the three species. Note: σ is the standard deviation.

	Frequency of use (%)			Resting time (s)							
	Zone A	Zone B	Zone C	Zone A		Zone B		Zone C		Global	
				Average	σ	Average	σ	Average	σ	Average	σ
Trout	57.4	42.6	0	411	424	413	406	0	-	412	412
Nase	96.3	1.9	1.9	389	419	11	-	52	-	376	417
Barbel	51.4	44.3	4.3	118	188	179	334	36	5	141	261

As shown in Table 1, the standard deviation values for the resting times are high, regardless of the species. In the experiments, the resting times for trout vary from only 23 s up to 2053 s. Similarly, resting times in the range 6 s - 2084 s and 5 s - 1668 s have been analyzed for nase and barbel, respectively. Despite these high transit times, no signs of disorientation were observed in the recordings for trout and barbel, which continue their ascent without significant problems once they leave these areas. However, in the case of nase, several fall back movements were observed, which could be attributed to this cause.

Both the trout and barbel showed an almost identical frequency of use of zones A and B. In the case of trout, the distribution of resting times between both areas was very similar. Although barbel also used more frequently zone A, their average resting time was slightly lower in this zone than in zone B. Finally, the individuals of nase used almost exclusively zone A to rest, with an average resting time in accordance to the values obtained for trout.

Consequently, the recirculation regions located in the upstream part of the pools seem to play an important role in fish passage. More precisely, the area located downstream the small lateral baffle shows a very high frequency of use for the three species. By contrast, fish transit times in the recirculation regions located in the downstream area are minimal and, in general, these areas are barely used by the individuals.

3.3 Pool ascents

In this section, the pool ascents of the three species have been analyzed. It should be noted that, given the limited number of pool ascents and the complexity of the phenomenon which is being studied, the main objective of this section is to show the potential of the proposed methodology. Thus, the values and parameters obtained must be taken with caution.

In general, two modes of successful ascents were observed, depending on the location of the individual within the pool before traversing the slot (Figure 5). In mode 1, fish are located in the resting area A before passing through the slot to the next pool upstream. In some of these cases, fish remain stationary in zone A during a short period, while in the remaining cases they just use this area to approach the slot. In mode 2, fish are located in the recirculation area B, in which they usually have spent several seconds or minutes before moving closer to the water jet and passing through the slot.

In the case of brown trout, mode 1 is the most frequent (it is observed in 66.7 % of the pool ascents which are analyzed), generally with a previous resting period (in 75% of the cases). The same applies in the case of nases, which only rest in recirculation zone A. Finally, the preferred option for barbel is also mode 1 (it is observed in 56.0% of the pool ascents which are analyzed), with a resting period before traversing the slot in 60.0 % of the cases.

Once the trajectory followed by the individuals has been identified, their observed speed, swimming speed and acceleration have been calculated as described in section 2.3. Figure 6 shows an example of results, in which velocities and accelerations (in modulus) are represented as a function of the traveled distance and time spent.

Table 2 shows the average values for the maximum swimming velocities and accelerations, as well as their standard deviation. The maximum swimming velocities are obtained in the slot region, due to the high water velocities that the fish is confronted to in this area. In the case of trout, the average maximum swimming velocity is 1.51 m/s, with a standard deviation of 0.21 m/s. If the maximum swimming velocity is expressed as a function of the fish body length (BL), a range between 10.0 BL/s and 6.0 BL/s is obtained. For nases, the average maximum swimming velocity is 1.47 m/s, with a standard deviation of 0.20 m/s, and the maximum swimming velocities vary from 7.4 to 14.7 BL/s. In the case of barbel, the average maximum swimming velocity is 1.53 m/s, with a standard deviation of 0.29 m/s. If the maximum velocities are expressed as a function of fish body length, the range of variation obtained is 4.4 - 5.1 BL/s.

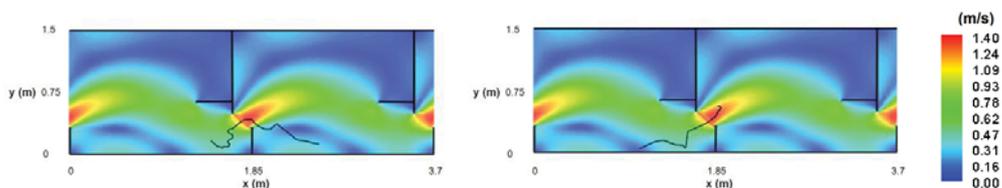


Figure 5. Two examples of successful pool ascents of the tested brown trout, projected onto the map of flow velocities: mode 1 (left) and mode 2 (right).

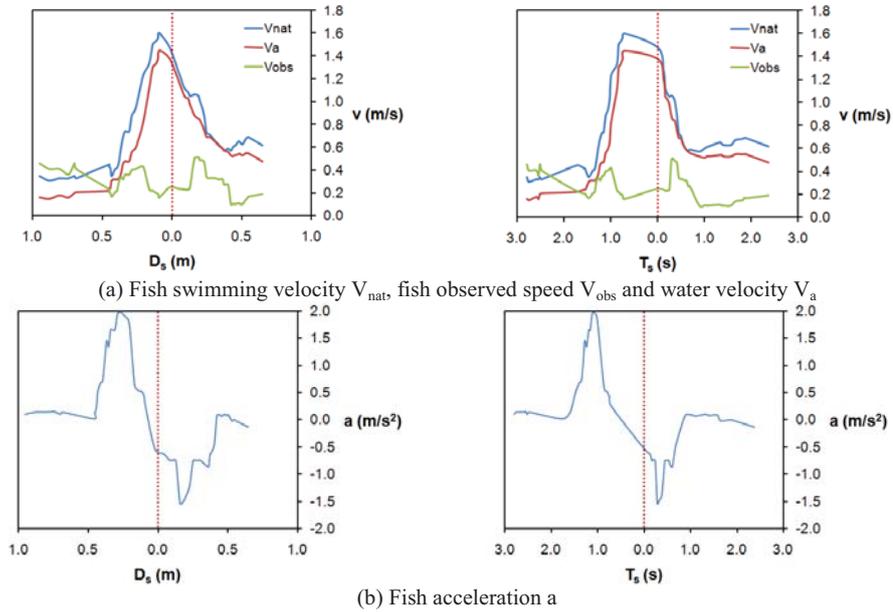


Figure 6. Velocities and accelerations calculated for the fish which followed mode 1 trajectory in Figure 5. Note: D_s is the traveled length from the slot section and T_s is the time since the fish traverses the slot.

Table 2. Average maximum swimming velocities and accelerations for the three species.

	Swimming velocity (m/s)		Acceleration (m/s^2)	
	Average maximum	Standard deviation	Average maximum	Standard deviation
Trout	1.51	0.21	1.11	0.68
Nase	1.47	0.20	1.33	0.66
Barbel	1.53	0.29	1.05	0.53

These results are consistent with observations made by other authors on burst speed of salmonids and cyprinids. In the tests with trout and barbel, the value of 10 BL/s proposed by Bainbridge [1] or Cowx [6] as a general rule for fish burst capacity is not exceeded (6.0 – 10.0 BL/s is obtained for trout and 4.4 – 5.1 BL/s for barbel). On the contrary, in the case of nase, the high velocity values that are needed to traverse the slot in relation to their body length (up to 14.7 BL/s, well above the burst speed range between 4 and 9 BL/s proposed by Webb [18] for cyprinids) could explain their difficulties in negotiating the fishway.

4 CONCLUSIONS

In this study, we propose a methodology to analyze fish swimming performance in an experimental full-scale vertical slot fishway model. The methodology, which uses an artificial neural network and computer vision techniques, is applied to five different experiments with brown trout, iberian straight-mouth nase and iberian barbel, respectively. In the tests, the methodology allowed reconstructing the fish trajectory and identifying the zones actually exploited by the fish. Additionally, it was possible to calculate fish velocity and acceleration when moving from one pool to the next one.

Thus, the results show the potential of the methodology to explore the implications of fish swimming behavior in the development of new fishway designs. Although further research is needed (larger number of fish and species, variations in flow discharges, etc.), this approach can contribute to the evaluation of fish response to different hydraulic characteristics, the definition of key factors on fish movements, and the improvement of the existing models used to predict passage success. Essentially, the results provided by this methodology can facilitate development of biological response curves between fluid properties such as velocity or turbulence shear

stress and possible biological effects such as disorientation or passage success. Consequently, they can contribute to develop robust guidelines for future vertical slot fishway designs.

ACKNOWLEDGEMENTS

The writers would like to thank the Center for Studies and Experimentation on Public Works, the Spanish Ministry of Education and Ministry of Public Works (FPU grant Ref. AP2009-2070, FPI grant Ref. A2010-9171), the Dirección Xeral de Investigación, Desenvolvemento e Innovación of the Xunta de Galicia (Ref. 10MDS014CT) and the Complementary Action CGL2009-07420-E of VI National Plan for Scientific Research, Development and Technology Innovation (in collaboration with School of Forestry, University of Madrid).

REFERENCES

- [1] Bainbridge, R., "Speed and stamina in three fish", *J. Exp. Biol.*, Vol. 37, (1960), pp 129-153.
- [2] Barton, A. F., R. J. Keller, and C. Katopodis, "Verification of a numerical model for the prediction of low slope vertical slot fishway hydraulics", *Australian Journal of Water Resources*, Vol. 13, (2009) pp 53-60.
- [3] Bermúdez, M., J. Puertas, L. Cea, L. Pena and L. Balairón, "Influence of pool geometry on the biological efficiency of vertical slot fishways", *Ecological Engineering*, Vol 36, (2010), pp. 1355-1364
- [4] Castro-Santos, T., "Modeling the Effect of Varying Swim Speeds on Fish Passage through Velocity Barriers", *Transactions of the American Fisheries Society*, Vol 135, (2006), pp. 1230-1237.
- [5] Chorda, J., M. M. Maubourguet, H. Roux, M. Larinier, L. Tarrade, and L. David, "Two-dimensional free surface flow numerical model for vertical slot fishways", *J. Hydr. Res.*, Vol. 48, (2010), 141-151.
- [6] Cowx, I. G. "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, (1998).
- [7] Katopodis, C., "Developing a toolkit for fish passage, ecological flow management and fish habitat works", *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 43, (2005), pp. 451-467.
- [8] Kemp, P. S., M. H. Gessel, B. P. Sandford, and J. G. Williams, "The behaviour of Pacific salmonid smolts during passage over two experimental weirs under light and dark conditions", *River Research and Applications*, Vol. 22, (2006), pp. 429-440.
- [9] Lara, A., Aramburu, E., Berges, J.A., Morcillo, F. and Castillo, M., "Investigación sobre el comportamiento de escalas de peces en laboratorio. Campaña de ensayos 2009-2010.", *Ingeniería Civil*, Vol. 164, (2011), pp. 101-113 (in Spanish)
- [10] Mullen-Cooper, M. and I. G. Stuart, "Optimising Denil fishways for passage of small and large fishes", *Fisheries Management and Ecology*, Vol. 14, (2007), pp. 61-71.
- [11] Odeh, M., J. F. Noreika, A. Haro, A. Maynard, T. Castro-Santos, and G. F. Cada., "Evaluation of the effects of turbulence on the behavior of migratory fish" (2002)
- [12] Pavlov, D.S., Lupandin, A.I., and Skorobogatov, M.A., "The effects of flow turbulence on the behavior and distribution of fish", *J. Ichthyology*, Vol. 40, (2000), pp. S232-S261.
- [13] Puertas, J., L. Pena, and T. Teijeiro, "Experimental approach to the hydraulics of vertical slot fishways", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 130, (2004), pp. 10-23.
- [14] Rajaratnam, N., C. Katopodis, and S. Solanki, "New designs for vertical slot fishways", *Canadian Journal Civil Engineering*, Vol. 19, (1992), pp. 402-414.
- [15] Rodríguez, A., M. Bermúdez, J.R. Rabuñal, J. Puertas, J. Dorado, L. Pena and L. Balairón, "Optical fish trajectory measurement in fishways through computer vision and artificial neural networks", *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol. 25, (2011), pp. 291-301.
- [16] Silva, A. T., J. M. Santos, A. C. Franco, M. T. Ferreira, and A. N. Pinheiro, "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*, Vol. 25, (2009), pp. 173-177.
- [17] Tarrade, L., A. Texier, L. David, and M. Larinier, "Topologies and measurements of turbulent flow in vertical slot fishways", *Hydrobiologia*, Vol. 609, (2008), pp. 177-188.
- [18] Webb, P. W., "Hydrodynamics and energetics of fish propulsion" *Bulletins of the Fisheries Research Board of Canada*, 190, (1975), 158 pp.
- [19] Wu, S., N. Rajaratnam, and C. Katopodis, "Structure of flow in vertical slot fishway", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol 125, (1999), pp.351-359



Contents lists available at ScienceDirect

Ecological Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/ecoleng

Computer application for the analysis and design of vertical slot fishways in accordance with the requirements of the target species

Jerónimo Puertas^a, Luis Cea^a, María Bermúdez^{a,*}, Luís Pena^a, Álvaro Rodríguez^b, Juan R. Rabuñal^b, Luis Balairón^c, Ángel Lara^c, Enrique Aramburu^c

^a Civil Engineering School, A Coruña University, Campus de Elviña, s/n, 15071 A Coruña, Spain

^b Department of Information and Communications Technologies, A Coruña University, Campus de Elviña, s/n, 15071 A Coruña, Spain

^c Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX (CEH-CEDEX), Paseo Bajo de la Virgen del Puerto 3, 28005 Madrid, Spain

ARTICLE INFO

Article history:

Received 11 November 2010

Received in revised form 5 May 2011

Accepted 5 May 2011

Available online 30 July 2011

Keywords:

Vertical slot fishway

Hydraulic design

2D free surface modeling

Turbulent flow

Fish swimming performance

ABSTRACT

Vertical slot fishways are widely used and are generally very effective in ensuring fish passage. The appropriate design of a vertical slot fishway 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 tool designed to analyze the efficiency of a fishway model according to biological criteria. The application can be used either in the analysis of an existing fishway or in the design process of a new one. It allows the user to choose between a wide range of geometric dimensions of the pools and the slot, and between different fish species. If it is being used as a design tool, it provides feasible fishway models sorted according to their biological efficiency.

Considering the complexity of the hydraulic and biological phenomena involved in the process of swimming through a fishway, the tool presented here does not intend to determine an optimum design, but rather to establish an objective way for comparing different fishway designs, considering not only hydraulic aspects but also trying to quantify biological aspects of the target fish species.

© 2011 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

A fishway is a waterway designed to allow the passage of fish species over a particular obstruction. Pool and weir fishways are probably the most commonly used throughout the world (Clay, 1995) and consist of a channel with a sloping floor that is divided by baffles into a series of pools. A particular version of the pool and weir fishways is known as the vertical slot fishway, in which water travels from one pool to the next through a vertical slot in the baffle that extends from the top to the bottom of the flume. This specific characteristic permits the fish to move from one pool to the next without jumping and to swim through the slot at any desired depth.

The hydraulic characteristics of these facilities vary according to the pool dimensions, configuration and dimensions of the slot and the baffles, slope and discharge. Since the first vertical slot fishways were constructed at Hell's Gate on the Fraser River in Canada, several designs have been developed in order to adapt the hydraulic characteristics to the fish needs. The main modifications include

variations of the length and the width of the pools, variations of the slot geometry and the insertion of additional baffles. A number of experimental (Puertas et al., 2004; Rajaratnam et al., 1992 or Wu et al., 1999) and numerical (Cea et al., 2007a; Chorda et al., 2010 or Heimerl et al., 2008) studies have addressed the flow field in several of these configurations, providing basic flow properties, such as depth, discharge and characteristic velocities. Besides, field studies such as the ones developed by Stuart and Mallen-Cooper (1999) or Baumgartner et al. (2010) have assessed the effectiveness of several designs at passing different fish species and sizes.

In these hydraulic structures, the velocity field in the pools is relatively insensitive to variations on the discharge, the water depth is proportional to the discharge with an almost linear relation and the mean velocity field in the pools is practically two dimensional in the horizontal plane. Moreover, the turbulent flow field with vortices of various sizes represents an additional difficulty for fish passage, especially for small individuals with limited swimming ability. Accordingly, swimming upstream through these facilities involves an additional energetic cost for fish migration, which is in itself energetically expensive. In order to determine if these increased energy demands may result in a significant reduction of fish passage, the hydraulic behavior of the fishway must be related to the biological characteristics of the target

* Corresponding author.

E-mail address: mbermudez@udc.es (M. Bermúdez).

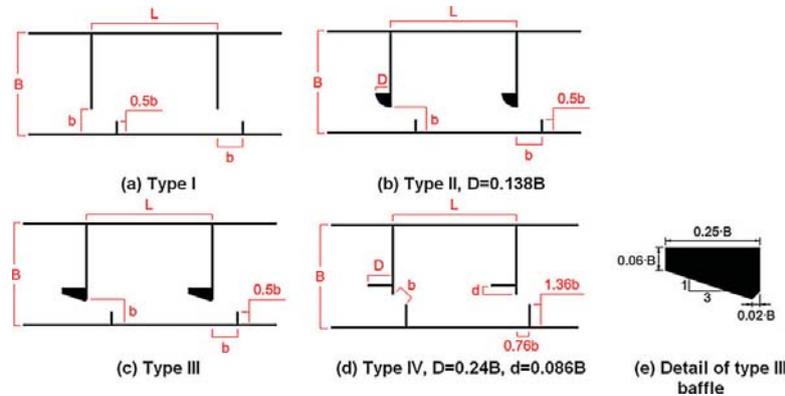


Fig. 1. Geometric characteristics of the different pool designs.

species. To this end, it is necessary to define an analysis method that can be used to compare the biological performance of the different designs.

Several hydraulic characteristics and biological factors are suspected to be important for effective fish passage. One of the main biological factors to be taken into account is the swimming capacity of the migrants concerned. The hydraulic conditions in the fishway must be such that the weakest swimmers can negotiate it. Fish speeds range widely, both in relation to biological and physical factors. Fish swimming velocities depend on the body length (Beamish, 1978; Hammer, 1995) and vary with water temperature (Booth et al., 1997; Myrick and Cech, 2000; Tudorache et al., 2008). Furthermore, important differences in the fish swimming performance can be observed among different species (Wolter and Arlinghaus, 2003), due to the different body morphology. Water velocities which exceed their swimming capabilities will fish fatigue and preclude their upstream migration through the pools. Additionally, fish require a minimum depth of flow in order to allow them to reach their swimming potential (Dane, 1978).

In order to provide and facilitate access to this multidisciplinary knowledge, it is possible to develop computer tools based on the experimental data obtained in several fishway designs under different flow conditions. In this paper, we present one such tool designed to analyze the efficiency of vertical slot fishway models according to the requirements of the target species. With this aim in mind, the hydraulic characteristics of several common pool designs are studied with a two-dimensional depth-averaged numerical model, which has been calibrated and validated with experimental data (Bermúdez et al., 2010). Another approach that is different from the one developed in this paper is the use of expert systems based on correlations between the fishway designs and the flow field. As pointed out by Bender et al. (1992), the multidisciplinary knowledge and the practical experience required to produce a good fishway design provides opportunities for using expert system concepts to aid in the process. Both approaches can be applied not only to vertical slot fishways, but also to other types of fish-passes, such as pool and weir, culvert or Denil.

Considering that fish responses to fishway hydraulic characteristics are yet poorly understood, the tool presented here does not intend to determine an optimum design, but rather to establish an objective way for comparing different fishway designs, considering not only hydraulic aspects but also trying to quantify biological aspects of the target fish species.

2. Methodology

2.1. Vertical slot fishway models

The flow field was calculated in four different generic fishway designs (Fig. 1) and, for each generic fishway design, different geometric pool dimensions were tested. Specifically, 12 different pool dimensions were studied for design type I, 6 for type II and type III and 5 for design IV. The geometric dimensions are detailed in Table 1 for each design. The bed slope of the fishway was 5%.

Table 1
Geometric pool dimensions of the 29 designs which were tested in the numerical model.

Type	Design	B	L	b (m)
I	D2.5	2b	5b	0.500
	D2.10	2b	10b	0.500
	D2.15	2b	15b	0.500
	D2.67.5	2.67b	5b	0.375
	D2.67.10	2.67b	10b	0.375
	D2.67.15	2.67b	15b	0.375
	D4.5	4b	5b	0.250
	D4.10	4b	10b	0.250
	D4.15	4b	15b	0.250
	D8.5	8b	5b	0.125
	D8.10	8b	10b	0.125
	D8.15	8b	15b	0.125
II	D4.5	4b	5b	0.250
	D4.10	4b	10b	0.250
	D4.15	4b	15b	0.250
	D8.5	8b	5b	0.125
	D8.10	8b	10b	0.125
	D8.15	8b	15b	0.125
III	D4.5	4b	5b	0.250
	D4.10	4b	10b	0.250
	D4.15	4b	15b	0.250
	D8.5	8b	5b	0.125
	D8.10	8b	10b	0.125
	D8.15	8b	15b	0.125
IV	D4.5	4b	5b	0.250
	D4.10	4b	10b	0.250
	D6.25.7.58	6.25b	7.58b	0.160
	D8.5	8b	5b	0.125
	D8.10	8b	10b	0.125

2.2. Flow field

In order to compute the free surface flow in the different fishway designs, a numerical model based on the 2D depth-averaged shallow water equations was used. The experimental validation of this model in 16 different fishway designs for slopes of 5% and 10% can be found in Bermúdez et al. (2010). The 2D depth-averaged shallow water equations assume a hydrostatic pressure distribution and a uniform velocity over the vertical direction, both of these assumptions being reasonably fulfilled in vertical slot fishways (Puertas et al., 2004). The hydrodynamic equations solved by the numerical model can be written as:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial q_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{q_i q_j}{h} + g \frac{h^2}{2} \delta_{ij} \right) = -gh \frac{\partial z_b}{\partial x_i} - \frac{\tau_{b,i}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left((v + \nu_t) h \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right), \quad i = 1, 2 \quad (2)$$

where h is the water depth, U_i are the depth-averaged horizontal components of the water velocity, $q_i = hU_i$ are the two components of the unit water discharge, ρ is the water density, g is the gravity acceleration, ν is the laminar kinematic viscosity of water ($\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$), ν_t is the eddy viscosity and $\tau_{b,i}$ are the two horizontal components of the bed friction stress, which is computed with Manning's formula.

Due to the high turbulence levels in the pools, it is important to use an adequate turbulence model in order to predict correctly both the velocity and the turbulence fields. In accordance with the results of Cea et al. (2007a) the depth-averaged $k-\epsilon$ turbulence model of Rastogi and Rodi (1978), with the limiters of Menter (1993) and Durbin (1996), was used to compute the eddy viscosity. This model takes into account the convective transport of turbulence by the mean flow, the production of turbulence due to bed friction and velocity gradients, the turbulent diffusion, and the dissipation of turbulence. The equations of the model are given by:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial U_j k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \min(2\nu_t S_{ij} S_{ij}, 10 \cdot \epsilon) + c_k \frac{u_j^2}{h} - \epsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial U_j \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + c_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} 2\nu_t S_{ij} S_{ij} + c_{2\epsilon} \frac{u_j^4}{h^2} - c_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (4)$$

$$c_k = c_f^{-1/2}, \quad c_\epsilon = 3.6 c_k^{3/2} c_{\epsilon 2} c_\mu^{1/2}, \quad c_f = \frac{\tau_b}{\rho} \frac{1}{|U|^2} \quad (5)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right), \quad \nu_t = \min \left(c_\mu \frac{k^2}{\epsilon}, \frac{k}{3} \left(\frac{2}{S_{ij} S_{ij}} \right)^{1/2} \right) \quad (6)$$

with the constants:

$$c_\mu = 0.09, \quad c_{\epsilon 1} = 1.44, \quad c_{\epsilon 2} = 1.92, \quad \sigma_k = 1.0, \\ \sigma_\epsilon = 1.31$$

The flow field on each fishway design was computed using a block-structured numerical mesh which contains an inlet pool, three active pools and an outlet pool (Fig. 2). The second and third active pools were used to analyze the hydraulic characteristics such



Fig. 2. Global plan view of the numerical domain for a generic fishway design.

as the velocity and depth field. In all the designs the mesh size is rather uniform (with an average element size of 5 cm^2) over the whole pools, with a slightly higher mesh density in the slot region.

At the inlet boundary the flow is distributed over a uniform discharge profile normal to the boundary. As noted above, the velocity field in these devices is relatively insensitive to the variation on the discharge. In order to verify that the model reproduced this behavior, three different flow discharges were studied for each design. On the other hand, the free surface elevation at the outlet boundary was fixed iteratively for each discharge in order to obtain the same water depth at the middle section of all the pools (uniform flow condition). A more exhaustive description of the mesh convergence analysis and the procedure used to fix the boundary conditions can be found in Bermúdez et al. (2010), while a complete description of the numerical schemes and solvers can be found in Cea et al. (2007b).

2.3. Biological aspects

2.3.1. Fish swimming performance

One of the main factors that has to be considered in the design of a fishway is the fish swimming performance of the fish species for which it is intended. Fish swimming speeds can be classified as sustained, prolonged and burst (Bell, 1986). A fish swimming at sustained speed uses the red muscle system (aerobic) exclusively, allowing extended periods of travel at low speeds. Prolonged speed involves the use of both red and white (anaerobic) muscle tissues, and allows the fish to reach quicker speeds for minutes at a time. Burst speed allows the fish to reach top speeds for a few seconds by exclusive utilization of white muscle tissue, requiring a significant rest period afterwards.

Bainbridge (1960) studied burst speeds of three different species and concluded that such velocities were largely independent of the species, and were in the range of 10 BL/s, where BL is the fish body length. With reservations, this has since been taken as the "10 BL/s rule for burst capacity" (Hammer, 1995). It has to be taken into account that the burst capacity of fish depends not only on the fish length but also on the duration of the performed burst. The 10 BL/s rule refers only to a particular time frame of a few seconds.

Fishway hydraulics may present a barrier to the fish when flow velocities exceed their swimming capability. Even if the flow velocities are below the range of their burst swimming speeds, the effort required to pass through the fishway may fatigue the fish to the point that it is not able to advance its position and falls back. To prevent this type of barrier a knowledge of the relationship between swimming speed and time to fatigue is required. Thus, the swimming capacity of the different fish species is usually expressed in terms of swimming speed and endurance, i.e., the length of time during which the fish can maintain this swimming speed. Endurance formulae in bibliography (Beamish, 1978; Castro-Santos, 2005; Videler, 1993; Webb, 1994) can be expressed as follows:

$$V = a(\text{BL})^b + c \ln T \quad (7)$$

where V is the maximum velocity (cm/s), BL is the fish body length (mm), T (s) is the time that a fish can maintain the velocity V (cm/s) and a , b and c are coefficients which depend on the fish species and the range of temperature. Considering that the distance D (cm) that a fish can swim along the fishway against a water velocity U (cm/s) is given by $D = (V - U)T$, the fish travelled length can be expressed as follows:

$$D = (a(\text{BL})^b + c \ln T - U)T \quad (8)$$

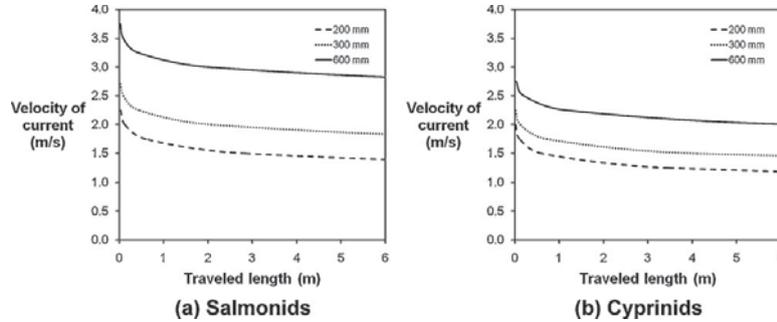


Fig. 3. Swimming distance curves for several lengths (200 mm, 300 mm and 600 mm) of Iberian salmonids and cyprinids. Results from Elvira et al. (2008).

The distance D can be maximized ($dD/dT=0$), if the fish adopts an optimum velocity V during an optimum time to swim against water velocity U , which leads to the following equation:

$$T_{\max} = \exp \left(\frac{U}{c} - \frac{a}{c}(BL)^b - 1 \right) \quad (9)$$

where T_{\max} is the time that maximizes the distance D . Introducing this expression into Eq. (8), the maximum distance D_{\max} (cm) that the fish can swim against a water velocity U is obtained as follows:

$$D_{\max} = -c \cdot \exp \left(\frac{U}{c} - \frac{a}{c}(BL)^b - 1 \right) \quad (10)$$

Following this procedure, a study developed by Elvira et al. (2008), summarized bibliographical sources for several fish species, grouped in salmonid and cyprinid families and for mild water temperatures. The authors suggest the following coefficients for the endurance-velocity formulae: $a = 17.31$, $b = 0.47$ and $c = -16.02$ for salmonids and $a = 30.34$, $b = 0.34$ and $c = -14.29$ for cyprinids (Fig. 3). These values have been adopted in this study, but specific coefficients for each species could be applied, if available, using the same methodology which is described in this section.

In order to assess if the fish can swim upstream the fishway, the fish swimming performance must be analyzed in relation to the velocity field. From all the possible paths that the fish may follow while it swims upstream in the fishway, the most demanding one corresponds to the streamline which passes through the vertical slots. Given this path, the current velocity at each point of the streamline can be obtained from the flow field computed with the numerical model (Fig. 4).

Two fatigue restrictions are considered in this model. The first one analyzes the effort that the fish must exert to traverse the vertical slot. This restriction is evaluated by comparing the maximum velocity of the whole path U_{\max} with the burst velocity of the target fish. Due to the lack of sufficient data on burst swimming speeds

for Iberian salmonids and cyprinids, the 10 BL/s rule noted above is used for this purpose.

The second restriction takes into account the effort that the fish has to make to swim upstream a whole pool without resting. Thus, the model considers not only the burst effort necessary to traverse the slot, but also the energy expenditure required to swim upstream an entire pool. Provided that the fatigue curves are defined for a constant current velocity, while the water velocity along the fish path is variable, an equivalent constant velocity needs to be computed from the variable current velocity profile along the fish path in order to be able to apply Eq. (10). The equivalent velocity must be representative of the whole effort the fish needs to make in order to pass the fishway. The effort made by the fish in order to swim against the variable current velocity profile must be the same as the effort made to swim against a constant equivalent velocity profile.

According to the previous idea, the equivalent velocity might be defined in different ways. In this work we assume that the energy the fish needs to swim a length L against a constant current velocity U is proportional to the square of the velocity and to the length L , so the energy E consumed in a path with variable velocity can be evaluated as:

$$E = K \cdot U_1^2 \cdot L_1 + K \cdot U_2^2 \cdot L_2 + \dots + K \cdot U_n^2 \cdot L_n = K \cdot U_{eq}^2 \cdot L_t \quad (11)$$

where L_i is the length of the path where the water velocity is U_i , U_{eq} is the equivalent velocity, L_t is the total length of the path, K is a constant and n is the number of reaches in which the path is divided.

If the total path is divided in n reaches of equal length L , Eq. (11) reduces to:

$$U_{eq} = \sqrt{\frac{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_n^2}{n}} \quad (12)$$

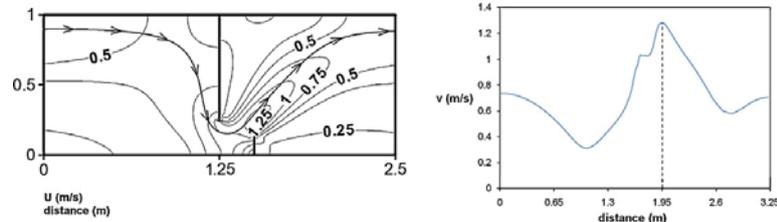


Fig. 4. Velocity field (left) and velocity profile (right) along the fish path in the design D4.10 (type 1) for $Q=95$ l/s.

The selected path must be representative of the effort that the fish has to do to swim upstream a whole pool without resting. Accordingly, the length of this path (L_{12}) is equal to the length of the streamline which passes through the vertical slot in one pool, and its equivalent velocity is named U_{eq} .

2.3.2. Depth requirements

Fish require a minimum depth of flow to allow them to reach their swimming potential (Dane, 1978). Total submergence eliminates a fish's risk of oxygen starvation, allows the fish to create maximum thrust, and lowers the risk of bodily injury through contact with the fishway bottom. Specific depth requirements vary with species and life stage of concern. In the study carried out by Teijeiro et al. (2006), a minimum depth of 40 cm is suggested for trout passage, while 50 cm is considered for salmon. Noting that this is a conservative constraint, a minimum depth of 60 cm is established to define minimum acceptable discharges for each fishway design.

3. Results and discussion

This section examines the procedure for identifying the suitable designs of vertical slot fishway in view of the fish swimming capability and the depth requirements. The model applies three different restrictions, which can be classified between velocity restrictions (two limitations) and depth restrictions (a single limitation).

Further restrictions on other variables could be included in the model, provided that the interplay between these variables and fish behavior is explored. Flow properties such as turbulence or eddy size are suspected to be important for effective fish passage (Katopodis, 2005), although little is known about its influence on fish passage at the present time.

3.1. Velocity field and swimming ability

In this section the two restrictions related to the velocity field are studied. The equivalent velocities which are shown in Table 2 come from the velocity field computations with the 2D hydrodynamic model described above. Given that the model has not been validated for slopes steeper than 10%, the results should be taken with caution for higher slope values.

The first restriction to be analyzed is the one which links fish burst speed and maximum flow velocity. In order to incorporate this limitation into the model, a non-dimensional maximum flow velocity is defined as follows:

$$U_{max}^s = \frac{U_{max}}{\sqrt{2gSL}} \tag{13}$$

where U_{max} is the maximum velocity along the fish path, S is the fishway slope and L is the pool length.

The non-dimensional maximum velocity along the most demanding fish path is shown in Table 2 for each design. This restriction limits the value of $S \times L$ (slope \times pool length) for each design in order to verify that $U_{max} < 10$ BL/s. For example, in a D4.5 type I fishway for cyprinids with a body length of 150 mm, the first restriction limits the product SL (slope \times pool length) to 0.2 m.

Subsequently, the second criterion relates the velocity field to the fish fatigue curves. With the aim of applying these curves, the velocities and distances of the second restriction are shown in Table 2 for each design. Both non-dimensional velocities and lengths are evaluated in order to obtain the flow field in other situations with the same geometry shape, but different global dimensions. The non-dimensional equivalent velocity is defined as follows:

$$U_{eq}^s = \frac{U_{eq}}{\sqrt{2gSL}} \tag{14}$$

Table 2
Velocities U_{max} (m/s), U_{eq} (m/s), non-dimensional velocities U_{max}^s , U_{eq}^s and total length L_{12} (m) for the two velocity restrictions analyzed for each design.

Type	Design	Restriction 1		Restriction 2				
		U_{max}	U_{max}^s	U_{eq}	U_{eq}^s	L_{12}	L_{12}/L	
I	D2.5	1.26	0.81	0.99	0.63	2.93	1.17	
	D2.10	2.01	0.91	1.33	0.60	5.31	1.06	
	D2.15	2.65	0.98	1.61	0.59	7.78	1.04	
	D2.67.5	0.95	0.70	0.67	0.50	2.48	1.32	
	D2.67.10	1.63	0.85	0.98	0.51	4.19	1.12	
	D2.67.15	2.11	0.90	1.16	0.49	6.03	1.07	
	D4.5	0.83	0.75	0.57	0.51	1.48	1.18	
	D4.10	1.28	0.82	0.75	0.48	3.23	1.29	
	D4.15	1.62	0.84	0.84	0.44	4.35	1.16	
	D8.5	0.57	0.72	0.41	0.52	0.70	1.13	
	D8.10	0.89	0.80	0.53	0.48	1.31	1.05	
	D8.15	1.04	0.76	0.51	0.37	2.80	1.49	
	II	D4.5	1.00	0.91	0.78	0.71	1.35	1.08
		D4.10	1.37	0.88	0.84	0.54	3.09	1.23
		D4.15	1.73	0.90	0.94	0.49	4.23	1.13
D8.5		0.75	0.95	0.58	0.74	0.67	1.07	
D8.10		1.12	1.01	0.73	0.66	1.30	1.04	
D8.15		1.13	0.84	0.58	0.42	2.74	1.46	
III	D4.5	1.04	0.94	0.84	0.76	1.35	1.08	
	D4.10	1.32	0.84	0.86	0.55	3.24	1.30	
	D4.15	1.70	0.89	0.98	0.51	4.32	1.15	
	D8.5	0.76	0.96	0.60	0.77	0.67	1.07	
	D8.10	1.03	0.93	0.71	0.64	1.33	1.06	
	D8.15	1.10	0.81	0.59	0.43	3.03	1.61	
IV	D4.5	0.91	0.82	0.65	0.59	1.44	1.15	
	D4.10	1.37	0.87	0.92	0.59	2.93	1.17	
	D6.25.7.58	0.90	0.82	0.53	0.49	1.51	1.24	
	D8.5	0.59	0.75	0.45	0.57	0.66	1.06	
	D8.10	0.94	0.84	0.51	0.46	1.56	1.25	

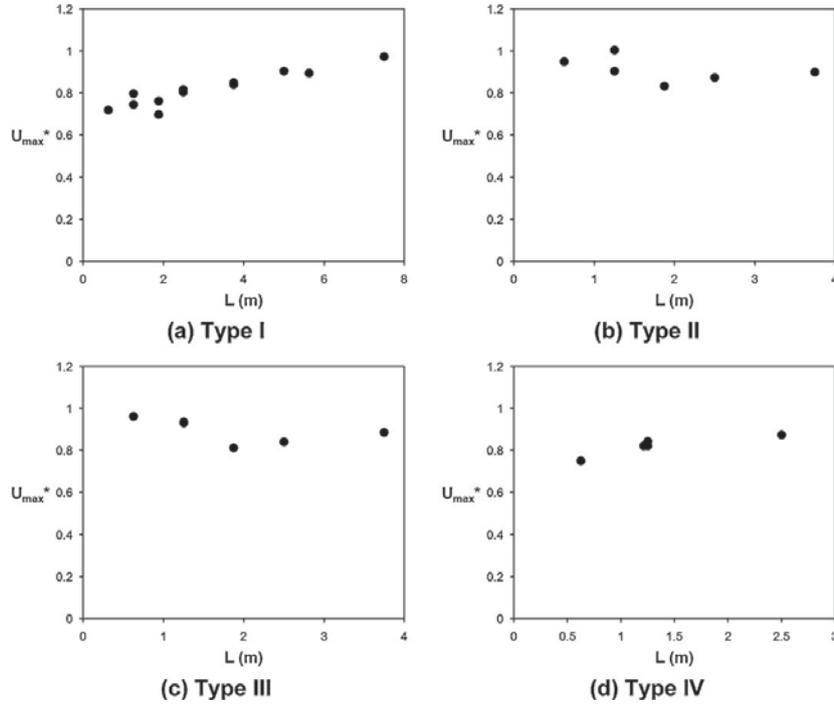


Fig. 5. Variation of the non-dimensional maximum velocity U_{max}^* with the length of the pool L .

where U_{eq} is the equivalent velocity, S is the fishway slope and L is the pool length.

Following the previous example of the D4.5 type I fishway, an equivalent velocity U_{eq} of 1 m/s is obtained from Table 2. This equivalent velocity, introduced in the endurance relationship (Eq. (10)) for cyprinids, gives a value of 4.8 m for D_{max} . In order to verify the second restriction, the value of L_{c2} must be below 4.8 m, which limits the length of the pools L to 4 m.

In the designs Type II and Type III, the non-dimensional maximum velocity U_{max}^* seems almost independent of the geometric dimensions of the pools. On the other hand, in the designs Type I and Type IV, it appears to increase slightly with the pool length L , as can be observed in Fig. 5.

With regard to the non-dimensional equivalent velocity U_{eq}^* , higher values are observed in the designs Type II and Type III, when compared to designs Type I and Type IV. In Fig. 6 the velocity

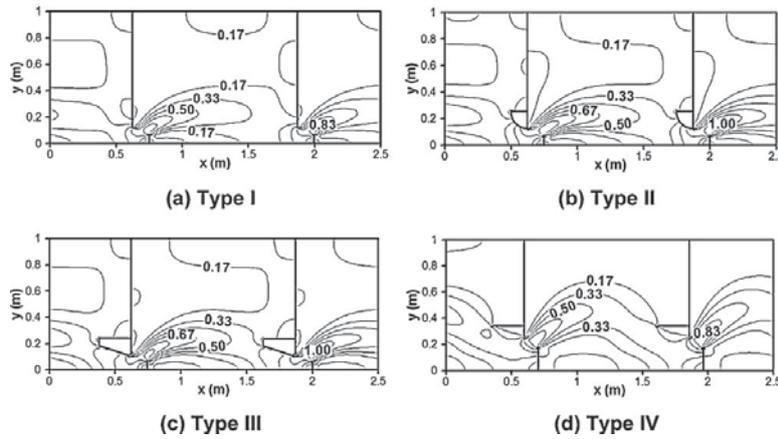


Fig. 6. Velocity field (m/s) for designs D8.10 with the same slot width.

fields of 4 designs with the same length and width of the pools are shown, and higher velocity values can be seen in designs Type II and Type III.

3.2. Discharge curves and depth requirements

In order to apply the depth restriction, the minimum acceptable discharges giving minimum acceptable depth for fish passage are identified. To this end, a rating curve is evaluated for each design, considering that the discharge can be expressed as a function of the length of the pool L , the bed slope S , the slot width b and the depth in the center of the pools h_C , as follows:

$$Q = C_q \cdot \sqrt{g \cdot L \cdot S} \cdot b \cdot h_C \tag{15}$$

where C_q is a discharge coefficient. This coefficient is calculated for each design by linear interpolation of the results obtained for three different discharges with the 2D hydrodynamic model (Table 3).

As noted above, Eq. (15) permits an estimation, for each pool design and slot width, of the minimum discharge required to guarantee a minimum fish-acceptable depth. Generally, this fishway design discharge is a fraction of the river discharge, within the range of 1–5% (Larinier et al., 1998).

3.3. Computer application

The results are included in a design tool, easy to use for engineers and designers. The application can be used either in the analysis of an existing fishway or in the design process of a new one and, accordingly, can be run in two modes: design and verification (Fig. 8).

Table 3
Discharge coefficient C_q for the 29 designs.

Type	Design	C_q
I	D2.5	0.77
	D2.10	0.85
	D2.15	0.84
	D2.67.5	0.73
	D2.67.10	0.81
	D2.67.15	0.82
	D4.5	0.76
	D4.10	0.79
	D4.15	0.81
	D8.5	0.78
	D8.10	0.85
	D8.15	0.81
II	D4.5	0.96
	D4.10	1.00
	D4.15	0.98
	D8.5	1.02
	D8.10	1.09
	D8.15	1.00
III	D4.5	0.95
	D4.10	0.98
	D4.15	0.95
	D8.5	0.88
	D8.10	0.96
	D8.15	0.91
IV	D4.5	1.03
	D4.10	1.11
	D6.25.7.58	1.06
	D8.5	0.88
	D8.10	1.08

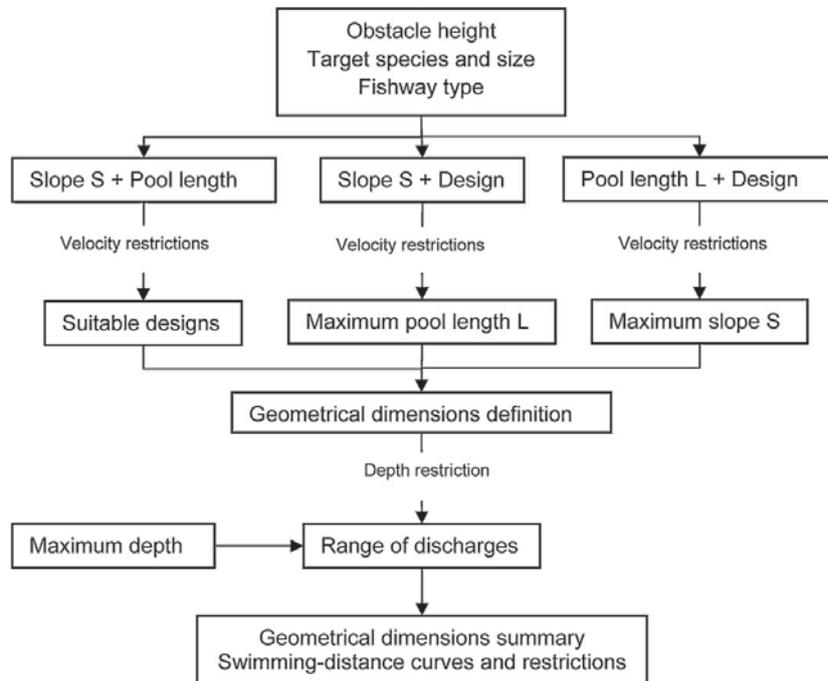


Fig. 7. Application workflow.

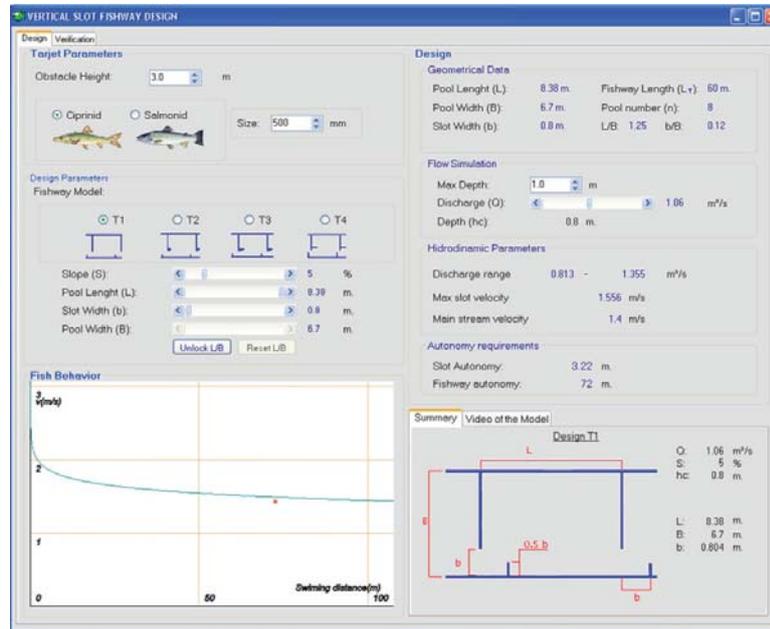


Fig. 8. Screenshot of the design tab of the application.

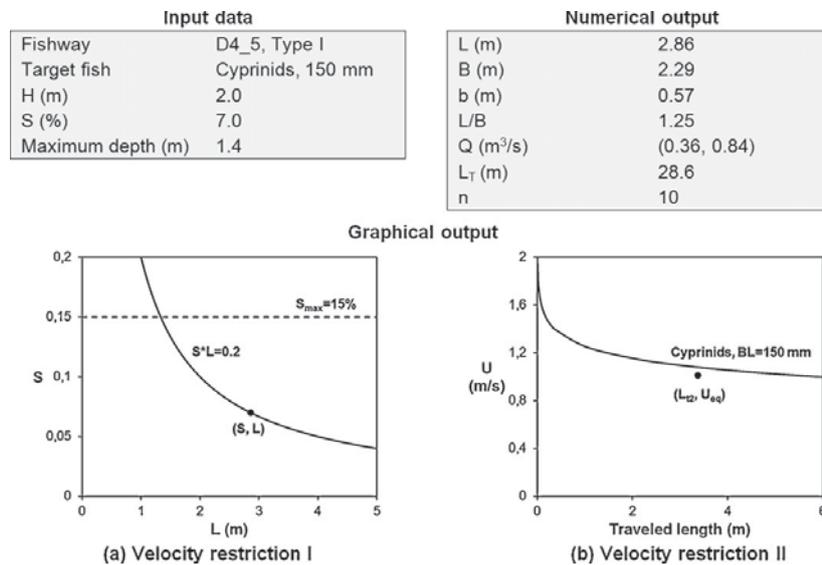


Fig. 9. Example of the model output in the design mode. In the graphical output the solid lines represent the velocity restrictions and the dots represent the flow conditions and characteristics of the fishway.

In the design mode, the input data which must be introduced by the designer are:

- The total height of the obstacle in which the fishway is placed
- The target species (either salmonids or cyprinids)
- The size of the target fish
- Fishway type (to choose among Types I, II, III and IV)

Given these data, the application imposes the maximum velocity restriction and the fatigue condition (velocity of U_{eq}^* with a

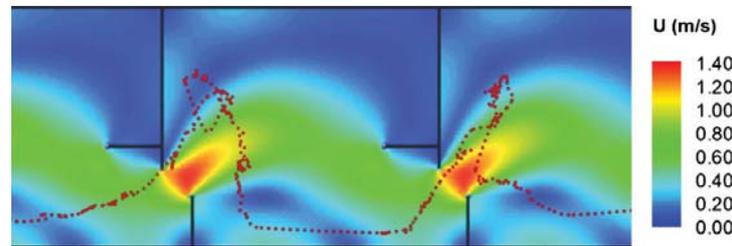


Fig. 10. Trajectory followed by an individual of brown trout in the fishway model projected onto the map of flow velocities U .

distance of L_{12}/L for all the designs of the selected type. It is also possible to use only the maximum velocity restriction, if it is considered a more restrictive condition than the fatigue limitation. Accordingly, a range of possible pool lengths L , pool widths B , fishway slope S and slot width b is provided. Then, the user can fix the specific values for these parameters within their respective ranges. Depending on the parameters that are fixed by the user, the application behavior varies according to the diagram shown in Fig. 7.

Once the application verifies that the selected dimensions meet the fish velocity requirements, the code analyzes the depth requirements. The application shows the minimum acceptable discharge for a depth of 0.6 m and, if a maximum depth is introduced by the user, the acceptable range of discharges.

Besides, the application provides geometrical dimensions such as the total length of the fishway or the ratio L/B of the selected design. The swimming distance curve of the target species and the restriction (U_{eq} , L_{12}) are also represented in a graph. A model output, continuing the example of D4.5 type I fishway discussed throughout the text, is shown in Fig. 9.

In the verification mode the user can introduce directly all the geometric dimensions of the fishway: obstacle height, slope, pool length, slot width, pool width and fishway model. Once the target species and size are entered, the velocity conditions are checked and represented in a graph, in the same way as in Fig. 9. The depth requirements are analyzed just as in the design mode.

3.4. Future developments

The fish paths that were analyzed in this study constitute a conservative constraint, as they are the most demanding ones for fish fatigue. However, fish are capable of perceiving very slight variations in water velocity and generally exploit the most favorable zones to help them make progress. For example, they might use the lower velocity of the boundary layer in the vicinity of a surface (wall or floor) to progress, or they might use a recirculating flow to rest (Lariniér et al., 2002). This fish behavior leads to the definition of real fish trajectories in fishways and, subsequently, to the calculation of more precise equivalent velocities.

To this end, a system for fish trajectory tracking is being implemented in a full scale fishway model. With this system, the trajectory followed by different fish species can be obtained from video images of the biological tests using computer visualization techniques (Fig. 10). A complete description of the technique can be found in Rodríguez et al., 2011. With these new trajectories, more accurate equivalent velocities can be defined and, thus, more appropriate criteria for fishway efficiency evaluation.

4. Conclusions

In this paper, we propose a methodology to analyze the biological performance of different vertical slot fishway designs using both

velocity and depth restrictions. Two velocity criteria are imposed in order to verify that the flow velocities are low enough for the fish to swim upstream. On the one hand, maximum flow velocities are compared to the fish burst speed. On the other hand, the velocity field in the pools is linked to the fatigue curves starting from an equivalent velocity along the fish path and considering the travelled length for the fish. Following this procedure, the maximum pool sizes ensuring flow velocities low enough to be overcome by the fish are obtained for each design. Besides, discharge curves are evaluated for each design in order to determine minimum discharges giving minimum fish-acceptable depths.

Considering the complexity of the hydraulic and biological phenomena involved in the process of swimming through a fishway, it is obvious that the proposed criteria do not intend to establish an accurate value for the minimum fish size which is able to pass the fishway. Many other complex biological factors which are not considered in the present work, and which are difficult to quantify, contribute to the success or the failure of a specific fish along its path through the fishway. Nevertheless, the methodology proposed here is an objective way for comparing different fishway designs, and to determine, given a series of designs, which of them are the most efficient. In any case, further application of hydrobiological criteria and systematic methodologies in order to evaluate the performance and efficiency of fishway designs is needed.

Acknowledgments

The writers would like to thank the Center for Studies and Experimentation on Public Works (CEDEX), the Dirección Xeral de Investigación, Desenvolvemento e Innovación (General Directorate of Research, Development and Innovation) de la Xunta de Galicia (Galicia regional government) (Ref. 10MDS014CT) and the Spanish Ministry of Education (FPU grant reference AP2009-2070).

References

- Bainbridge, R., 1960. Speed and stamina in three fish. *J. Exp. Biol.* 37, 129–153.
- Baumgartner, L.J., Boys, C.A., Stuart, I.G., Zampatti, B.P., 2010. Evaluating migratory fish behavior and fishway performance: testing a combined assessment methodology. *Aust. J. Zool.* 58 (3), 154–164.
- Beamish, F.W.H., 1978. Swimming capacity. In: Hoar, W.S., Randall, D.J. (Eds.), *Fish Physiology*, vol. VII. Academic Press Inc., New York, pp. 101–187.
- Bell, M.C., 1986. *Fisheries Handbook of Engineering Requirements and Biological Criteria*. U.S. Army Corps of Engineers, Fish Passage Development and Evaluation Program, Portland, OR.
- Bender, M.J., Katopodis, C., Simonovic, S.P., 1992. A prototype expert system for fishway design. *Environ. Monit. Assess.* 23 (1–3), 115–127.
- 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 (10), 1355–1364.
- 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. *Aquat. Living Resour.* 10, 213–219.

- 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.
- Cea, L., Pena, L., Puertas, J., Vázquez-Cendón, M.E., Peña, E., 2007a. Application of several depth-averaged turbulence models to simulate flow in vertical slot fishways. *J. Hydraul. Eng.* 133 (2), 160–172.
- Cea, L., Puertas, J., Vázquez-Cendón, M.E., 2007b. Depth averaged modelling of turbulent shallow water flow with wet-dry fronts. *Arch. Comput. Methods Eng.* 14 (3), 303–341 (state of the art reviews).
- Chorda, J., Maubourguet, M.M., Roux, H., Larinier, M., Tarrade, L., David, L., 2010. Two-dimensional free surface flow numerical model for vertical slot fishways. *J. Hydraul. Res.* 48 (2), 141–151.
- Clay, C.H., 1995. *Design of Fishways and Other Fish Facilities*, second ed. Boca Raton, FL.
- Dane, B.G., 1978. A Review & Resolution of Fish Passage Problems at Culvert Sites in British Columbia. Fisheries and Marine Service Technical Report No. 810. Department of Fisheries and Environment.
- Durbin, P., 1996. On the $k-\epsilon$ stagnation point anomaly. *Int. J. Heat Fluid Flow* 17, 89–90.
- 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. Internal report (in Spanish).
- Hammer, C., 1995. Fatigue and exercise tests with fish. *Comp. Biochem. Physiol. A* 112, 1–20.
- Heimerl, S., Hagemeyer, M., Ehteler, C., 2008. Numerical flow simulation of pool-type fishways: new ways with well-known tools. *Hydrobiologia* 609 (1), 189–196.
- Katopodis, C., 2005. Developing a toolkit for fish passage, ecological flow management and fish habitat works. *J. Hydraul. Res.* 43 (5), 451–467.
- Larinier, M., Porcher, J.P., Travade, F., Gosset, C., 1998. *Passes à poissons. Expertise et conception des ouvrages de franchissement*. Conseil Supérieur de la Pêche, Paris.
- Larinier, M., Travade, F., Porcher, J.P., 2002. Fishways: biological basis, design criteria and monitoring. *Bull. Fr. Pêche Piscic.* 364 (Suppl.).
- Menter, F.R., 1993. Zonal two-equation $k-\omega$ turbulence models for aerodynamic flows. AIAA paper 93-2906. In: 24th Fluid Dynamics Conf., Orlando, FL.
- Myrick, C.A., Cech, J.J., 2000. Swimming performances of four California stream fishes: temperature effects. *Environ. Biol. Fish.* 58, 289–295.
- Puertas, J., Pena, L., Teijeiro, T., 2004. An experimental approach to the hydraulics of vertical slot fishways. *J. Hydraul. Eng.* 130 (1), 10–23.
- Rajaratnam, N., Katopodis, C., Solanki, S., 1992. New designs for vertical slot fishways. *Can. J. Civ. Eng.* 19 (3), 402–414.
- Rastogi, A.K., Rodi, W., 1978. Predictions of heat and mass transfer in open channels. *J. Hydraulic. Div.* 104 (3), 397–420.
- Rodríguez, A., Bermúdez, M., Rabuñal, J., Puertas, J., Dorado, J., Pena, L., Balairón, L., 2011. Optical fish trajectory measurement in fishways through computer vision and artificial neural networks. *J. Comput. Civ. Eng.* 25, 291–301.
- 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. *River Res. Appl.* 15 (6), 575–590.
- Teijeiro, T., Puertas, J., Pena, L., Peña, E., 2006. Evaluating vertical-slot fishway designs in terms of fish swimming capabilities. *Ecol. Eng.* 27 (1), 37–48.
- 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. *Ecol. Freshw. Fish.* 17, 284–291.
- Videler, J.J., 1993. *Fish Swimming*. Chapman & Hall, London.
- Webb, P.W., 1994. Exercise performance of fish. In: Jones, J.H. (Ed.), *Comparative Vertebrate Exercise Physiology: Phyletic Adaptations*. Academic Press, San Diego.
- Wolter, C., Arlinghaus, R., 2003. Navigation impacts on freshwater fish assemblages: the ecological relevance of swimming performance. *Rev. Fish Biol. Fish.* 13, 63–89.
- Wu, S., Rajaratman, N., Katopodis, C., 1999. Structure of flow in vertical slot fishways. *J. Hydraul. Eng.* 125 (4), 351–360.

Glossary

- b : slot width
 B : pool width
 BL : fish body length
 C_q : dimensionless coefficient that relates Q to bh_c (gLS)^{0.5}
 D_{max} : maximum distance that a fish can swim against a water velocity
 F : fish length
 H : obstacle height
 h_c : water depth in the center of a pool
 L : length of a pool
 L_{t2} : total length of the path following a streamline which passes through the vertical slots in one pool
 n : number of pools in the fishway
 Q : discharge
 S : fishway slope
 U : water velocity
 U_{eq} : equivalent water velocity considered for restriction II
 U_{eq}^* : non-dimensional equivalent water velocity considered for restriction II
 U_{max} : maximum water velocity considered for restriction I
 U_{max}^* : non-dimensional maximum water velocity considered for restriction I

