Investigación sobre el comportamiento de escalas de peces en laboratorio. Campaña de ensayos 2009–2010

ÁNGEL LARA DOMÍNGUEZ (*), ENRIQUE ARAMBURU GODÍNEZ (**), JUAN ANTONIO BERGES ACEDO (***), FELIPE MORCILLO ALONSO (****) y MIRIAM CASTILLO BLANCO (*****)

RESUMEN El Laboratorio de Hidráulica del Centro de Estudios Hidrográficos (CEDEX) está llevando a cabo un estudio del comportamiento de salmónidos y ciprínidos en una escala de hendidura vertical construida en el Laboratorio, para conocer la relación entre los parámetros hidráulicos y biológicos y obtener criterios de diseño válidos. Es la primera vez que en nuestro país se hace un seguimiento de peces en una escala utilizando el sistema RFD y cámaras sumergidas y cenitales. En primer lugar se ha caracterizado la hidráulica de esta tipología de escalas. Se ha establecido un protocolo de experimentos para optimizar los resultados. Con relación al movimiento de los peces en la escala hemos encontrado, por un lado, que los peces siempre descansan durante el ascenso y, por otro, que el caudal influye en el porcentaje de peces que ascienden la escala completa. Además, se ha contrastado una herramienta para analizar la eficiencia de una escala de peces teniendo en cuenta criterios biológicos, pero necesita ser calibrada con variables biológicas obtenidas de peces autóctonos. Con relación a la fatiga y al esfuerzo de los peces, se han estudiado parámetros fisiológicos en plasma (hematocrito, glucosa, cortisol y lactato) y los resultados apuntan a la necesidad de ampliar los estudios con parámetros fisiológicos en músculo.

STUDY ABOUT THE BEHAVIOUR OF FISHWAYS IN LABORATORY. EXPERIMENTS 2009-2010

ABSTRACT *The Hydraulic Laboratory of the Center for Hydrographic Studies (CEDEX) is carrying out a study about the behaviour of some salmonid and cyprinid fish species in a vertical slot fishway built in the Laboratory, in order to know the relationship between hydraulic and biological parameters and to obtain valid design criteria. It's the first time in our country that fish are been monitored in a fishway using a RFD system, underwater and cenital cameras. First at all, the hydraulic of this typology has been characterised. An experiment protocol has been established to optimize the results. Regarding fish movements in the fishway, on the one hand we have found that fish always rest ascending the pass and, on the other, an influence of the flow on the percentage of fish that ascend the whole pass. Moreover, a tool to analyze the efficiency of a fishway model according to biological criteria has been contrasted but it needs to be calibrated with biological variables obtained from native fish species. Concerning fish fatigue and effort, studies about physiological parameters in plasma (hematocrit, glucose, cortisol and lactate) have been implemented and the results point out the need to increase the studies with physiological parameters in muscle.*

Palabras clave: Pasos para peces, Escalas de peces, Escalas de hendidura vertical, Salmónidos, Ciprínidos, Migración de peces.

Keywords: Fish passes, Fishways, Vertical slot fishway, Salmonids, Cyprinids, Fish migration.

(*) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Consejero Técnico. Laboratorio de Hidráulica. CEDEX. Email: Angel.Lara@cedex.es

(**) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Coordinador Programa Técnico Científico. Laboratorio de Hidráulica. CEDEX. Email: Enrique.Aramburu@cedex.es

(***) Ingeniero Técnico de Obras Públicas. Director de Programa. Laboratorio de Hidráulica. CEDEX. Email: Juan.A.Berges@cedex.es

(****) Doctor en Ciencias Biológicas. Contratado I + D + i. Laboratorio de Hidráulica. CEDEX. Email: Felipe.Morcillo@cedex.es

(*****) Licenciada en Biología. Becaria de Formación de Personal Investigador. Laboratorio de Hidráulica. CEDEX. Email: Miriam.Castillo@cedex.es

1. INTRODUCCIÓN

Desde el año 2.003 en el Laboratorio de Hidráulica del CEDEX se vienen realizando diversos trabajos para la Dirección General del Agua del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino en el ámbito de la Hidráulica Ambiental. Dentro de este marco se han llevado a cabo varios trabajos referentes a "Escalas de peces en presas y azudes" que se han materializado en los respectivos Informes presentados a la consideración de la Dirección General del Agua. Una de las principales actuaciones de dichos trabajos ha consistido en la construcción de una escala para peces en la nave del Labora-

FIGURA 1. Escala construida en el Laboratorio de Hidráulica.

torio de Hidráulica para la experimentación con diversas especies piscícolas (salmónidos y ciprínidos) así como para el estudio de diferentes tipologías de escalas.

La conservación de la biodiversidad de la ictiofauna dulceacuícola es uno de los principales retos de la Directiva Marco del Agua. Los ecosistemas de agua dulce han sufrido en los últimos 100 años muchas alteraciones como consecuencia del impacto de las infraestructuras hidráulicas (presas y azudes). Dichas infraestructuras suponen barreras transversales en los cauces hídricos que suponen obstáculos para el movimiento de diferentes especies piscícolas.

La medida generalmente aplicada para corregir dicha problemática es la construcción de pasos para peces, siendo las escalas de peces el paso más extendido. El diseño de escalas de peces y la evaluación de su eficiencia requieren un conocimiento detallado de la hidrodinámica de dichas escalas así como de un análisis profundo de las capacidades natatorias de los peces.

La mayor parte de los estudios realizados hasta el momento sobre la eficiencia de las escalas de peces se han basado fundamentalmente en analizar los parámetros hidráulicos de dichas infraestructuras, pero en muy contadas ocasiones han incluido ensayos con peces. Además si han sido utilizados peces lo hacen por lo general en cámaras de natación o canal, cuyo funcionamiento hidráulico tiene muy poco que ver con el que se da en una escala de peces.

Por otra parte el esfuerzo científico y técnico se ha centrado en la familia de los salmónidos por lo que es necesario evaluar la eficiencia de las escalas para otras familias de peces como los ciprínidos muy importante en nuestros ríos.

En resumen lo que persigue la experimentación llevada a cabo en el Laboratorio de Hidráulica es poder dar unos criterios de diseño para dichas infraestructuras que tengan en cuenta las capacidades natatorias de los peces presentes en los ríos españoles.

2. LA ESCALA DE PECES DEL LABORATORIO DE HIDRÁULICA

Como se ha dicho anteriormente una de las principales actuaciones realizadas dentro de los trabajos ha sido la construcción de una escala de peces a tamaño real (1:1) en la nave de ensayos del Laboratorio de Hidráulica con el objetivo de poder ensayar con distintas especies autóctonas de salmónidos y ciprínidos así como con distintas tipologías de escalas. Dicha escala tiene una longitud de 20 m, 1,5 m de ancho y 1,0 m de alto, con una pendiente longitudinal del 7,5%. En la Figura 1 se ve la escala construida en el Laboratorio.

La tipología de escala ensayada corresponde a la de hendidura vertical que consiste en un cierto número de estanques separados por paredes transversales donde el paso del agua de un estanque a otro se realiza a través de una abertura vertical a lo largo de toda la altura de la escala, desde la solera hasta la superficie libre del agua. Dicha tipología ha sido ampliamente estudiada en la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de la Coruña, en donde se llevaron a cabo diversos ensayos hidráulicos para la caracterización del flujo en dichas escalas (Puertas and Pena, 2008 a y 2008b; Teijeiro et al, 2006).

El depósito de agua que alimenta la escala ocupa una superficie en la nave de ensayos del Laboratorio de 27 m de longitud por 4,5 m de ancho y almacena un volumen de unos 135.000 litros, agua que es totalmente independiente del suministro del resto de los modelos de la nave. Se dispone de un circuito de recirculación del agua constituido por dos bombas hidráulicas de 250 l/s cada una de ellas y teniendo un sistema de filtración mecánica y biológica que asegura una calidad del agua según los requerimientos de la Directiva 2006/44/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 6 de septiembre de 2006, relativa a la calidad de las aguas continentales que requieren protección o mejora para ser aptas para la vida de los peces.

3. LA INSTRUMENTACIÓN

La instrumentación disponible en la escala para la experimentación y el seguimiento de los movimientos de los peces consiste básicamente en:

- Un sistema de radiofrecuencia para la localización e identificación de los peces durante la experimentación en la escala. Dicho sistema consiste en implantar un microchip (transponder) en cada pez, de manera que al paso de los mismos por las proximidades de cuatro antenas colocadas a lo largo

FIGURA 2. Antena y colocación de un microchip en un pez.

de la escala, el microchip interacciona electromagnéticamente con ellas, recibiendo el circuito lector asociado a cada antena el código único de identificación asignado a cada pez.

El microchip implantado en los peces mide 11 mm (Allflex, modelo FDX-B) y se inserta en la cavidad abdominal del ejemplar, previamente anestesiado con tricaína metansulfonato (MS-222), mediante ayuda de jeringas y agujas específicas.

Con este sistema se obtiene la información en tiempo real en un ordenador de los movimientos de los peces durante los ensayos.

- Un sistema de 29 cámaras de video cenitales instaladas en los siete últimos estanques de la escala, así como sus respectivos videograbadores, que recogen las imágenes de los movimientos de los peces en dichos estanques. Este sistema permite, mediante un tratamiento digital de las imágenes captadas, determinar la trayectoria que han seguido los peces (x,y,t), así como sus velocidades y aceleraciones, en su ascenso por la escala.

El Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente de la Universidad de la Coruña, que colabora en este trabajo con el CEDEX, ha desarrollado un sistema de visión artificial, mediante el uso de redes de neuronas artificiales (RNA), para el análisis y el tratamiento de las imágenes obtenidas en los ensayos (Rodríguez et al, 2011). El proceso resumido que se sigue desde las imágenes reales hasta obtener las imágenes digitalizadas es el siguiente:

- Calibración de las cámaras y creación de un modelo proyectivo para la integración de las grabaciones en un espacio de coordenadas común.
- Separación del área ocupada por el pez del resto de la imagen.
- Determinación del centro de masas del pez (ver figura 4).
- Filtrado de los datos
- Extracción de la información sobre el comportamiento del pez en la escala a lo largo del tiempo.

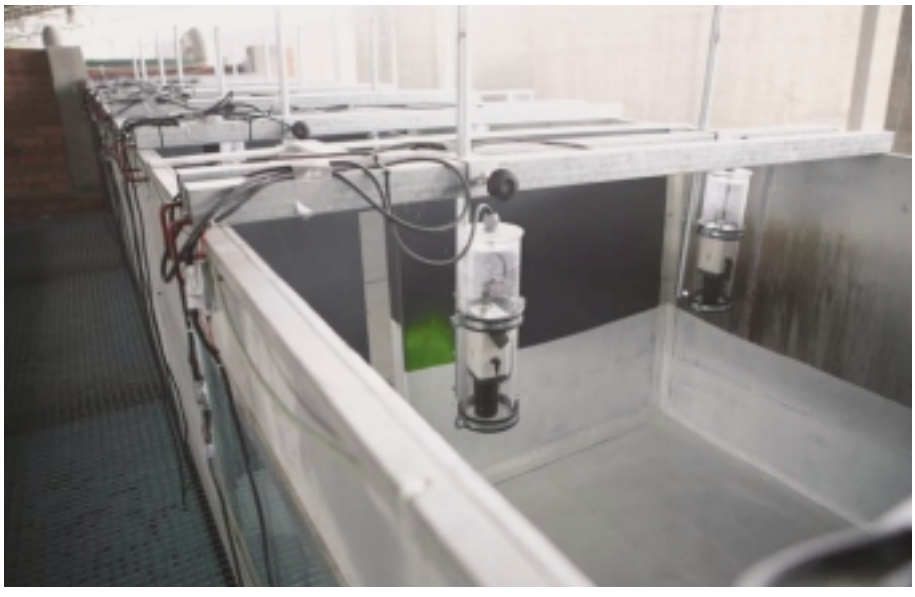

FIGURA 3. Cámaras cenitales instaladas en la escala.

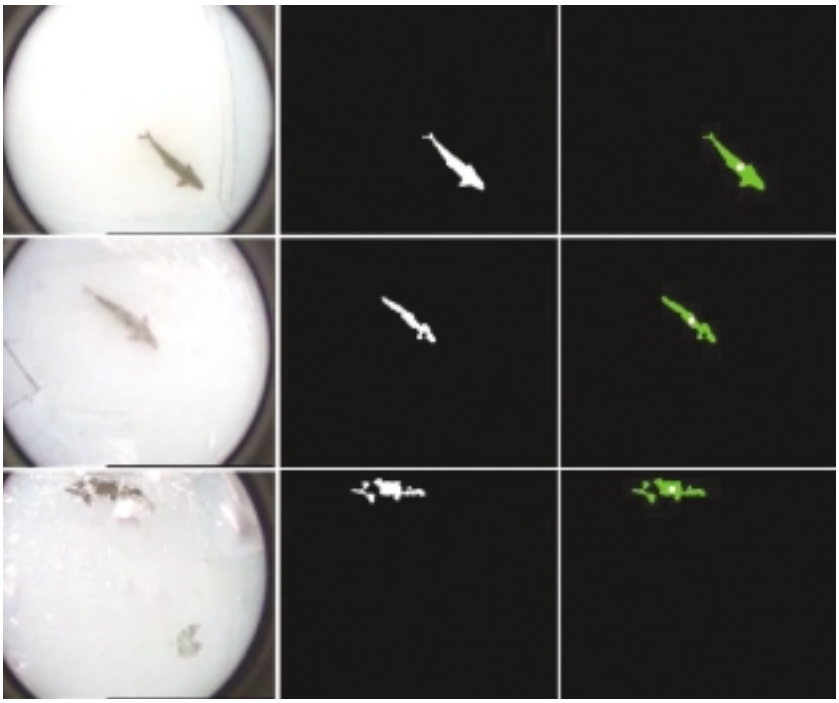

FIGURA 4. Tratamiento digital de las imágenes. Ejemplos del procesado de diferentes imágenes de un ensayo desde la real hasta el centro de masa calculado en el pez.

El resultado del proceso es el conocimiento de la trayectoria del pez en la escala a lo largo del tiempo que permite obtener datos tales como velocidades instantáneas, velocidades medias, aceleraciones medias e instantáneas, tiempos de ascenso, distancias recorridas, etc.

- Un sistema de 4 cámaras subacuáticas de pequeño tamaño y alta resolución colocadas en cuatro estanques a lo largo de la escala con el fin de captar imágenes del comportamiento de los peces en los estanques. Además el sistema comprende una estación de grabación de video para cuatro señales de video simultáneas.

Dada la perspectiva que ofrecen estas cámaras subacuáticas se analizan las imágenes grabadas en los ensayos para deducir tendencias y pautas de comportamiento, especialmente en el momento en el que un pez asciende de un estanque al siguiente. Se analizan los intentos que hacen los peces, las zonas desde donde pasan, la altura de paso (fondo, medio o en superficie), o si pasan por el centro de la hendidura o bien a qué lado de la misma. Asimismo se realizan observaciones generales de comportamiento de los peces en cada estanque, posibles comportamientos gregarios, etc.

FIGURA 5. Peces en un estanque de la escala.

4. LAS ESPECIES ENSAYADAS

Dentro de la primera fase de los trabajos realizados se llevó a cabo un Inventario de las especies de peces presentes en los ríos españoles, tanto autóctonas como exóticas, con una descripción de aquellos aspectos relacionados con los movimientos de los peces en el hábitat fluvial, así como la caracterización de las diferentes especies en relación con sus hábitos migratorios.

En sucesivas fases se llevó a cabo una selección de especies a estudiar en la escala del Laboratorio de Hidráulica que finalmente comprendió dos especies de ciprínidos: el barbo común (*Luciobarbus bocagei*) y la boga común (*Pseudochondrostoma polylepis*); y una especie de salmónidos: la trucha común (*Salmo trutta*).

Por su facilidad de obtención y para poner a punto la experimentación e instrumentación de la escala se ha ensayado también con una especie introducida en los ríos españoles que es la trucha arcoiris (*Oncorhynchus mykiss*).

En cuanto a la procedencia de los ejemplares de las especies ensayadas ésta ha sido en la mayoría de los casos de piscifactoría, siendo en el caso de la trucha común su origen procedente de la piscifactoría de Uña, en la provincia de Cuenca, y en el caso de la trucha arcoiris y boga común, de la piscifactoría de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes de Madrid, cuyo Departamento de Ingeniería Forestal también colabora en los trabajos.

Únicamente en el caso del barbo común su origen ha sido de río mediante pesca eléctrica en el río Cofio, dentro de la provincia de Madrid.

Se ha intentado traer al Laboratorio para los ensayos unas muestras de ejemplares de cada especie que sean lo suficientemente representativas tanto en número de ejemplares, como en su distribución por tamaños y sexo, no siendo en todos los casos esto finalmente posible tal y como se hubiera deseado.

5. EL PROTOCOLO DE ENSAYOS

Inicialmente se fijó un protocolo de ensayos que se siguió con las truchas arcoiris y comunes, cuyos ensayos se realizaron durante los meses de diciembre de 2009 a febrero de 2010. Dicho protocolo pretende una sistematización de los ensayos a realizar para alcanzar por una parte los objetivos que se persiguen con la experimentación y, por otra parte, obtener unos resultados que permitan un análisis homogéneo entre ellos.

En líneas generales este protocolo tiene por finalidad:

- Ensayar con un número suficiente de ejemplares, de una diversidad de tamaños de individuos de los dos sexos de las diferentes especies.
- Ensayar con diferentes caudales.
- Compatibilizar el estudio de los parámetros fisiológicos indicadores del esfuerzo y fatiga de los peces con los del conocimiento del posicionamiento y comportamiento de los peces a lo largo de la escala.
- Permitir a los peces su movimiento voluntario desde el estanque aguas abajo dejándoles un tiempo suficiente (fijándose éste en 24 horas).

Las dificultades que se tuvieron siguiendo este protocolo en los ensayos con las truchas, en particular con las truchas comunes, por problemas durante la estabulación de las mismas en este Laboratorio de Hidráulica, fijada en principio en dos semanas, así como la conveniencia de no reutilizar ejemplares en distintos ensayos para poder comparar los resultados de cada ensayo en unas condiciones homogéneas, aconsejó la modificación de este protocolo de ensayos durante la experimentación con las bogas y barbos comunes, durante los meses de abril a julio de 2010. Básicamente el cronograma asociado a este nuevo protocolo de ensayos consiste en cada semana de ensayos en lo siguiente:

- El lunes se transportan los ejemplares desde la piscifactoría de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes de Madrid, donde se encuentran previamente estabulados los mismos, a las instalaciones de la escala de peces del Laboratorio de Hidráulica. El procedimiento de transporte se realiza mediante bidones preparados al efecto con aireadores. Se realiza un control de los parámetros físico-químicos del agua para reducir los cambios bruscos en parámetros tales como la temperatura del agua.
- El martes se identifican todos los ejemplares del ensayo con la toma de sus datos, como la longitud furcal y el peso, y si es posible, el sexo de cada individuo. Previamente se les anestesia y se les implanta además el microchip que los identifica individualmente. Además se anotan en algunos casos observaciones como el estado reproductor o bien la presencia de patologías. Finalmente en algunos individuos se les extrae una muestra de sangre basal en la que se obtienen una serie de parámetros (lactato, glucosa, hematocrito y cortisol) para conocer su estado fisiológico previo al ejercicio.
- El miércoles se les deja en reposo.
- El jueves se lleva a cabo el ensayo poniendo los ejemplares al pie de la escala y permitiendo que el ascenso se lleve a cabo de forma voluntaria. La duración del ensayo es de 24 horas seguidas. En cada semana se alterna el caudal circulante por la escala: una semana se ensaya con un caudal bajo (de 100 l/s) y a la siguiente con un caudal alto (de 250 l/s). Previamente se han encendido todos los equipos de instrumentación (antenas, cámaras subacuáticas y cámaras cenitales) para el seguimiento de los movimientos de los peces. Cuando los ejemplares llegan al final de la escala, y siempre que esto se haya producido dentro de las horas del día, se les captura mediante un dispositivo especial situado al final de la escala, y se les extrae una muestra de sangre para obtener los mismos parámetros (lactato, glucosa, hematocrito y cortisol) que permitan conocer su estado fisiológico después del esfuerzo.
- El viernes finaliza el ensayo por la mañana, habiendo transcurrido 24 horas, capturando los individuos que no hayan remontado. En el caso de aquellos ejemplares que bien al finalizar el ensayo hayan ascendido por la noche la totalidad de la escala, o bien hayan remontado parcialmente la escala (a los que se les intenta capturar en el estanque alcanzado), se les extrae también una muestra de sangre para conocer, en el primer caso, el tiempo de recuperación del estado fisiológico del pez y, en el segundo caso, la evolución de dichos parámetros fisiológicos con la distancia recorrida por el pez. Finalmente los ejemplares se devuelven ese mismo viernes a la piscifactoría de la Escuela de Montes de Madrid.

Con relación a la alimentación de los peces durante la semana de estancia en el Laboratorio, y dado el corto tiempo que van a permanecer, no se les alimenta en ninguno de los días para conseguir el mismo estado de repleción gástrica al comienzo del ensayo del jueves.

6. RESULTADOS OBTENIDOS DE LA CAMPAÑA DE ENSAYOS

6.1. ENSAYOS REALIZADOS

Los ensayos que aquí se exponen se han llevado a cabo entre los meses de diciembre de 2009 y julio de 2010, respetando las épocas de reproducción de las distintas especies ensayadas: trucha común (diciembre 2009-febrero 2010), boga común (abril-mayo 2010) y barbo común (mayo 2010). Por problemas surgidos con la mortandad de los barbos en las instalaciones de la Piscifactoría de Montes, y dado que solamente se pudieron realizar dos ensayos en el mes de mayo (uno para cada caudal) y además sin que se pudiera tomar en los ejemplares datos fisiológicos relacionados con el esfuerzo y fatiga, se llevó a cabo posteriormente en el mes de julio un ensayo complementario con barbos fuera del periodo habitual de reproducción de esta especie. En las Tablas 1, 2, 3 y 4 se presentan resumidos los principales resultados obtenidos en los ensayos con estas especies.

		ENSAYOS de 24 HORAS con TRUCHAS ARCOIRIS														
		Nº EJEMPLARES COMIENZO ENSAYO					Nº EJEMPLARES SUBEN TODA ESCALA					% SUBIDA TODA ESCALA			TIEMPO DE SUBIDA	
		TALLAS (cm)					TALLAS (cm)					TALLAS (cm)				
FECHA	CAUDAL (l/s)	15-20	20-25	25-30	Media	Rango	15-20	20-25	25-30	Media	Rango	15-20	20-25	25-30	Media	Rango
14/12/09	100	9	1	–	18,8	17,9 - 20,1	7	0	–	18,8	17,9 - 19,7	78	0	–	2 h 26 m	1h 15 m - 4 h 13 m
17/12/09	250	9	1	–	18.9	17,9 - 20,1	2	0	–	18,2	17,9 - 18,6	22	0	–	NA	2 h 20 m - 6 h 42,5 m

TABLA 1. Ensayos de 24 horas con truchas arcoiris.

		ENSAYOS de 24 HORAS con TRUCHAS COMUNES														
		Nº EJEMPLARES COMIENZO ENSAYO					Nº EJEMPLARES SUBEN TODA ESCALA					% SUBIDA TODA ESCALA			TIEMPO DE SUBIDA	
		TALLAS (cm)					TALLAS (cm)					TALLAS (cm)				
FECHA	CAUDAL (l/s)	15-20	20-25	25-30	Media	Rango	15-20	20-25	25-30	Media	Rango	15-20	20-25	25-30	Media	Rango
28/01/10	100	5	3	2	21,0	19,0 - 26,4	4	3	2	21,2	19,0 - 26,4	80	100	100	54 m	25 m - 2 h 7,5 m
03/02/10	250	11	8	1	20,5	18,1 - 26,4	4	5	1	20,8	18,1 - 26,4	36	63	100	1h 47m	31 m - 4 h 7 m

TABLA 2. Ensayos de 24 horas con truchas comunes.

		ENSAYOS de 24 HORAS con BOGAS COMUNES														
		Nº EJEMPLARES COMIENZO ENSAYO					Nº EJEMPLARES SUBEN TODA ESCALA					% SUBIDA TODA ESCALA			TIEMPO DE SUBIDA	
		TALLAS (cm)					TALLAS (cm)					TALLAS (cm)				
FECHA	CAUDAL (l/s)	10-15	15-20	20-25	Media	Rango	10-15	15-20	20-25	Media	Rango	10-15	15-20	20-25	Media	Rango
08/04/10	100	4	9	1	17,1	14,4 - 24,2	0	5	1	19,1	16,3 - 24,2	0	56	100	1h 43m	36 m - 3 h 40,5 m
15/04/10	250	5	9	3	17,0	13,8 - 25,0	0	1	1	NA	16,5 - 25,0	0	11	33	2h 56m	2 h 30 m - 3 h 22 m
29/04/10	100	1	20	1	17,2	12,7 - 21,0	0	14	0	16,9	15,4 - 19,6	0	70	0	1h 41m	23 m - 6 h 52 m
06/05/10	250	12	9	–	14,9	13,6 - 16,9	2	3	–	15,0	13,9 - 15,8	17	33	–	1h 12m	32 m - 2 h 26 m

TABLA 3. Ensayos de 24 horas con bogas comunes.

		ENSAYOS de 24 HORAS con BARBOS COMUNES														
		Nº EJEMPLARES COMIENZO ENSAYO					Nº EJEMPLARES SUBEN TODA ESCALA					% SUBIDA TODA ESCALA			TIEMPO DE SUBIDA	
		TALLAS (cm)					TALLAS (cm)					TALLAS (cm)				
FECHA	CAUDAL (l/s)	15-30	30-35	35-45	Media	Rango	15-30	30-35	35-45	Media	Rango	15-30	30-35	35-45	Media	Rango
13/05/10	100	3	11	6	33,5	16,3 - 41,6	0	9	6	35,6	31,9 - 41,6	0	82	100	16 m	7 m - 35 m
20/05/10	250	–	15	1	33,1	31,0 - 38,8	–	7	0	33,0	31,0 - 34,4	–	47	0	43 m	21 m - 1h 23 m

		Nº EJEMPLARES COMIENZO ENSAYO					Nº EJEMPLARES SUBEN TODA ESCALA					% SUBIDA TODA ESCALA			TIEMPO DE SUBIDA	
		TALLAS (cm)					TALLAS (cm)					TALLAS (cm)				
FECHA	CAUDAL (l/s)	10-15	15-20	20-25	Media	Rango	10-15	15-20	20-25	Media	Rango	10-15	15-20	20-25	Media	Rango
22/07/10	100	12	2	–	13,4	10,6 - 19,3	6	1	–	13,3	10,6 - 15,4	50	50	–	22,5 m	10m - 54 m

TABLA 4. Ensayos de 24 horas con barbos comunes.

Además de los ensayos reflejados en las Tablas 1, 2, 3 y 4 se han realizado también unos ensayos específicos destinados a extracciones de sangre a diferentes distancias recorridas por los peces, para la valoración en cuanto al esfuerzo y fatiga de los mismos en el ascenso por la escala. Los parámetros fisiológicos que se miden, como se ha comentado anteriormente en el protocolo de ensayos, han sido el nivel de lactato, glucosa, cortisol y hematocrito en sangre.

Estos ensayos se llevaron a cabo el 16 de diciembre de 2009 con ejemplares de trucha arcoiris, el 1 de febrero de 2010 con trucha común y el 22 de abril de 2010 con ejemplares de boga común. El caudal por la escala en estos ensayos ha sido de 100 l/s.

Asimismo se tomaron muestras de sangre a algunos ejemplares de trucha arcoris antes, después y al día siguiente del transporte desde las instalaciones de la Piscifactoría de Montes al Laboratorio de Hidráulica para conocer el efecto de dicho transporte en los peces. Además en todos los periodos de ensayos respectivos de cada especie se analizaron dichos parámetros fisiológicos en varios individuos en situación de reposo (denominada condición basal) para su comparación con los valores medidos después de un esfuerzo determinado.

Finalmente indicar que también durante los ensayos de 24 horas que se han llevado a cabo para las distintas especies se tomaron muestras de sangre a algunos peces que remontaron la totalidad de la escala, unos inmediatamente a la llegada y a otros 2 horas después, para conocer la evolución de estos parámetros después del esfuerzo.

6.2. MOVIMIENTOS DE LOS PECES EN LA ESCALA

En el apartado anterior figuran resumidos en las Tablas 1, 2, 3 y 4 los principales resultados obtenidos durante la experimentación llevada a cabo entre diciembre de 2009 y julio de 2010 en la escala de peces del Laboratorio de Hidráulica del CEDEX.

Uno de los resultados que ya se obtuvieron durante la experimentación con las truchas arcoiris y comunes es que el caudal parecía influir en la ascensión de los peces por la escala, dadas las diferencias observadas en las proporciones de ejemplares que subían con un caudal y con otro.

En este sentido cabe señalar que la tipología de escala ensayada en el Laboratorio de Hidráulica del CEDEX de hendidura vertical tiene como característica fundamental (Puertas and Pena, 2008a y 2008b) el que los incrementos de caudal no implican incrementos apreciables de velocidad en los estanques de la escala, sino básicamente un incremento correspondiente del calado.

Sin embargo durante la experimentación llevada a cabo con las truchas arcoiris y comunes se comprobó que los porcentajes de ascenso eran mucho más bajos con el caudal más alto de 250 l/s frente a los que se daban con el caudal más bajo de 100 l/s. Es importante señalar que en los ensayos con caudal de 250 l/s se tuvieron que reutilizar algunos ejemplares que ya habían sido ensayados previamente con el caudal de 100 l/s. Además en algunos casos también habían sido empleados para la obtención de parámetros fisiológicos relacionados con el esfuerzo y la fatiga (condiciones basales y después de esfuerzo) mediante extracciones de sangre. Por tanto ambos motivos podrían explicar las diferencias observadas en el ascenso, debido a que los peces no se pudieran encontrar en las mismas condiciones al comienzo de los ensayos.

Por lo anterior se modificó el protocolo de ensayos y por otra parte se estableció el no reutilizar ejemplares en varios ensayos. Sin embargo con el nuevo protocolo aplicado ya con las bogas primero y después con los barbos, seguían obteniéndose unas diferencias significativas en la proporción de ejemplares que subían con uno y otro caudal, siendo ésta menor para el mayor caudal.

Otro importante resultado a destacar también de la experimentación llevada a cabo es que en ningún caso los peces ascienden por la escala sin descanso, sino que van remontando la escala poco a poco y descansando un tiempo variable, para lo cual utilizan las zonas de recirculación que se producen a cada lado del flujo principal. En la Figura 6 se indican dichas zonas de descanso.

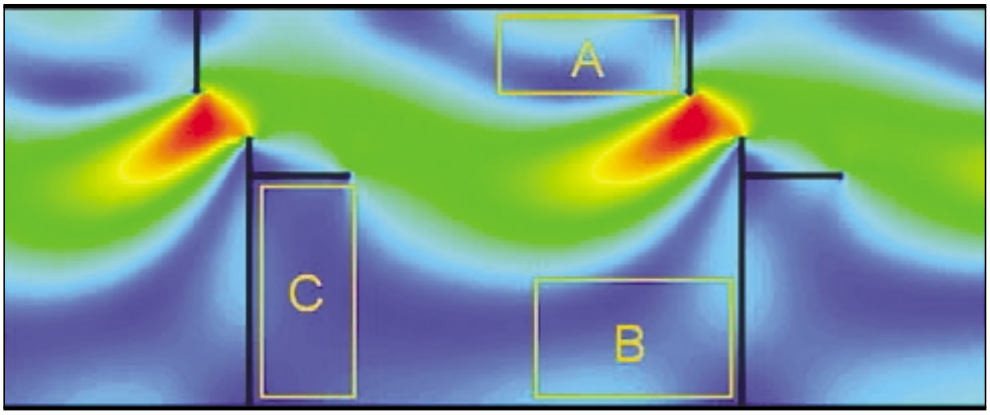

FIGURA 6. Localización de las tres posibles zonas de descanso.

	Utilización zonas de descanso (%)			Tiempo medio por descanso (s)
	A	B	C	
Trucha común	57.4	42.6	0.0	423
Barbo	57.9	42.1	0.0	332

TABLA 5. Utilización de las tres posibles zonas de descanso.

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

TABLA 6. Velocidades de natación y aceleraciones de las especies ensayadas.

Mediante el sistema de cámaras cenitales instalado en la escala del Laboratorio para el seguimiento de la trayectoria de los peces se obtuvieron la utilización de estas zonas de descanso, que quedan reflejadas en la Tabla 5.

Los valores medios de las velocidades de natación y aceleraciones desarrolladas por los peces, que se han obtenido a partir de las trayectorias seguidas por los peces al paso por las hendiduras, se resumen en la Tabla 6.

La Escuela de Ingenieros de Caminos de la Universidad de la Coruña, que como ya se ha indicado anteriormente colabora en este trabajo con el CEDEX, ha desarrollado una aplicación informática basada en los resultados del estudio hidrodinámico de las escalas de hendidura vertical para diferentes pendientes, que obtuvieron mediante una serie de ensayos llevados a cabo en una escala semejante a la del Laboratorio de Hidráulica del CEDEX, definiendo unos primeros criterios de diseño para dicha tipología de escalas (Puertas and Pena, 2008c; Pena et al, 2009; Puertas et al, 2011). Estos criterios se basan en dos condicionantes:

1. El pez tiene que tener la capacidad de atravesar la sección de mayor velocidad, que se produce en la zona de la hendidura. Esta primera limitación es absoluta, pues si el pez no logra pasar por la hendidura, no podrá remontar.
2. Por otra parte el pez, suponiendo que no descanse en su ascenso por la escala, debe mantener una velocidad media que le permita recorrer el flujo principal que se produce a lo largo de los distintos estanques.

En la Figura 7 aparecen los resultados que se obtienen en la mencionada aplicación para el caso de la escala de peces construida en el Laboratorio de Hidráulica del CEDEX, con una pendiente del 7,5%, una longitud de 20 m (por tanto 1,5 m de desnivel), una anchura de 26 cm en la hendidura, una tipología tipo T1 y un caudal máximo de 250 l/s. El calado resulta de 0,8 m, la velocidad máxima en la hendidura de 1,1 m/s y la velocidad en el flujo principal de 1 m/s. Todos estos valores son independientes del caudal y de la especie seleccionada (ciprínidos o salmónidos).

En la Figura 8 se representan gráficamente estos dos condicionantes para una escala con estanques tipo T1.

Por otra parte ambos criterios se relacionan en dicha aplicación con las capacidades natatorias de los peces mediante las llamadas curvas "*velocidad del agua – autonomía del pez*". Estas curvas han sido determinadas por algunos investigadores mediante unos ensayos realizados al efecto en canales o cámaras de natación y que representan la máxima distancia deducida del tiempo que el pez aguanta sin dejarse arrastrar por una determinada velocidad de la corriente.

Hasta la fecha no se han obtenido todavía estas curvas velocidad del agua-autonomía del pez para las especies autóctonas presentes en los ríos españoles, existiendo únicamente algunos trabajos de investigadores extranjeros fundamentalmente realizados con especies de salmónidos y muy raramente con ciprínidos. No obstante mediante un trabajo de recopilación bibliográfico llevado a cabo por un equipo del Departamento de Zoología y Antropología Física de la Universidad Complutense de Madrid se obtuvieron unas primeras aproximaciones de estas curvas para salmónidos y ciprínidos (Elvira et al, 2008a y 2008b).

Estas curvas son las que recoge finalmente la aplicación informática citada anteriormente para el diseño de escalas de hendidura vertical. En la aplicación se relacionan las variables hidráulicas con las capacidades natatorias de los peces mediante la representación en dichas curvas de dos puntos:

- Uno (en los gráficos representados por un punto en azul) que supone el 1° condicionante sobre el paso del pez por la hendidura. Se representa dicho punto mediante la pareja de valores velocidad-distancia (1,2 v_b , 4b), que son la velocidad del agua y la longitud que

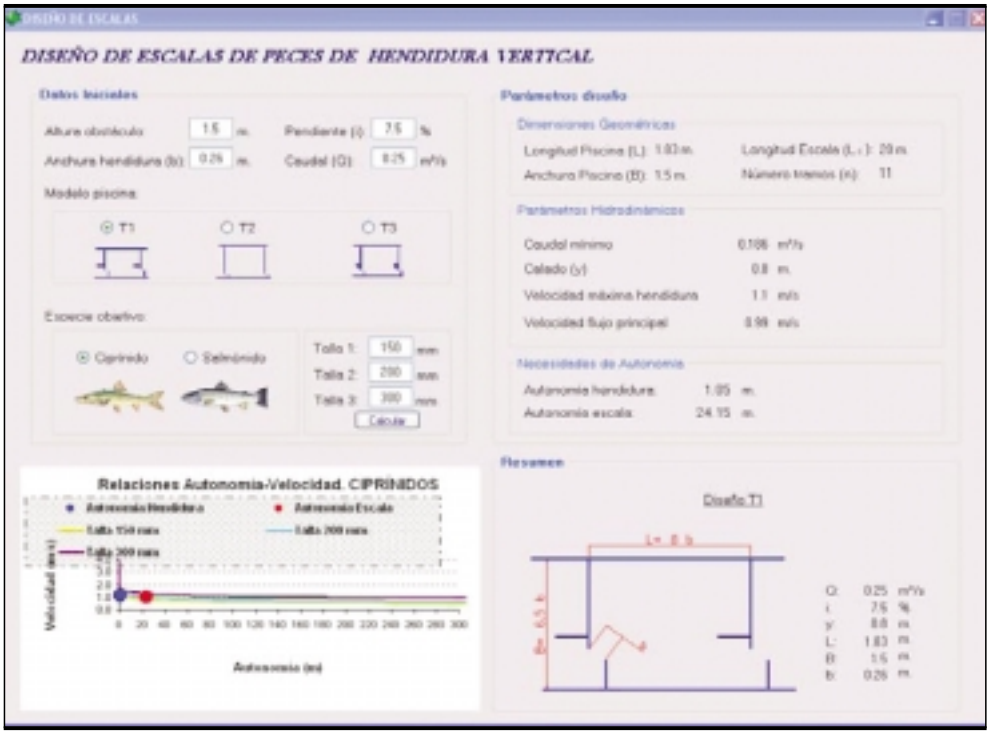

FIGURA 7. Aplicación para el diseño de escalas de hendidura vertical.

debe recorrer el pez en el entorno de la hendidura para superarla, lo cual lograría si este punto queda por debajo de la curva correspondiente a una especie y talla determinada.

- Otro (en rojo) que supone el 2° condicionante sobre el recorrido del pez sin descanso por el flujo principal de la escala. Se representa en las curvas mediante la pareja de valores (0,9 v_b, 1,2 x L x n), en los diseños tipo T1 y T3, y (0,9 v_b , 1,1 x L x n) en el diseño tipo T2, que como en el caso anterior son unos valores medios ponderados de la velocidad del agua y la longitud que debe recorrer el pez para ascender sin descanso toda la escala. Esto también lo lograría si el punto queda por debajo de la curva correspondiente a una especie y talla determinada.

Para el caso de la escala del Laboratorio de Hidráulica y teniendo en cuenta las tallas de los ejemplares utilizados en los ensayos llevados a cabo con las especies de salmónidos (truchas arcoiris y comunes) y ciprínidos (bogas y barbos comunes), los resultados figuran en los siguientes gráficos.

De estos gráficos se deduce que las truchas de talla superior a 200 mm podrían pasar la hendidura y remontar toda la escala puesto que ambos puntos se encuentran por debajo de la curva correspondiente a dicha talla. En cambio las truchas menores de 150 mm, que si podrían pasar por la hendidura, no tendrían capacidad natatoria suficiente para ascender la longitud total de la escala. Respecto de las bogas y los barbos, únicamente los ejemplares de talla superior a 300 mm no tendrían problemas para poder ascender la escala.

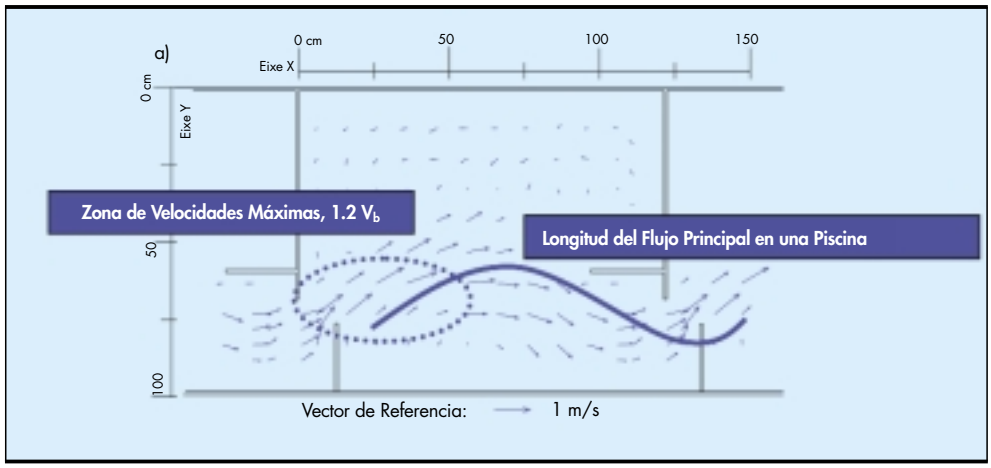

FIGURA 8. Condicionantes al diseño. Detalles sobre las velocidades a remontar.

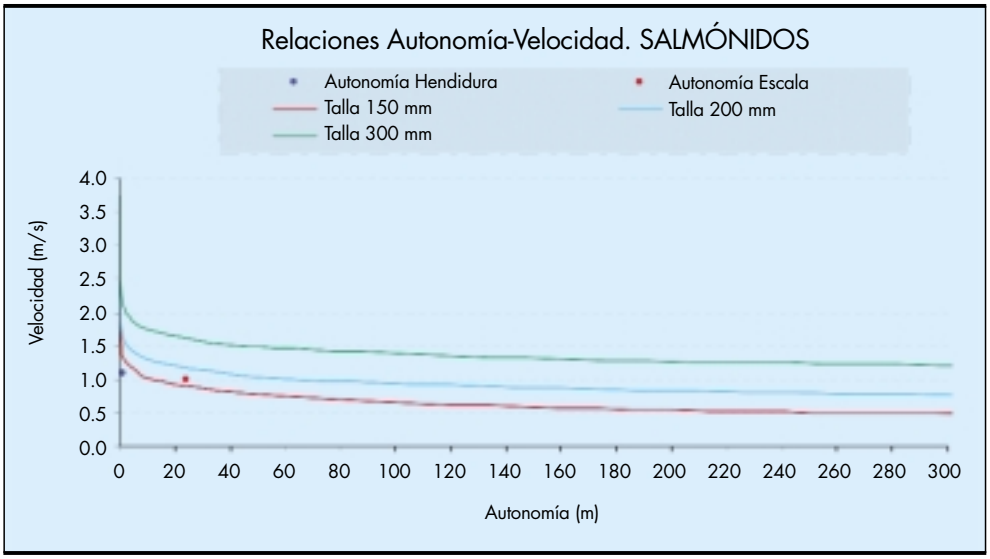

FIGURA 9. Salmónidos. Relaciones Autonomía-Velocidad.

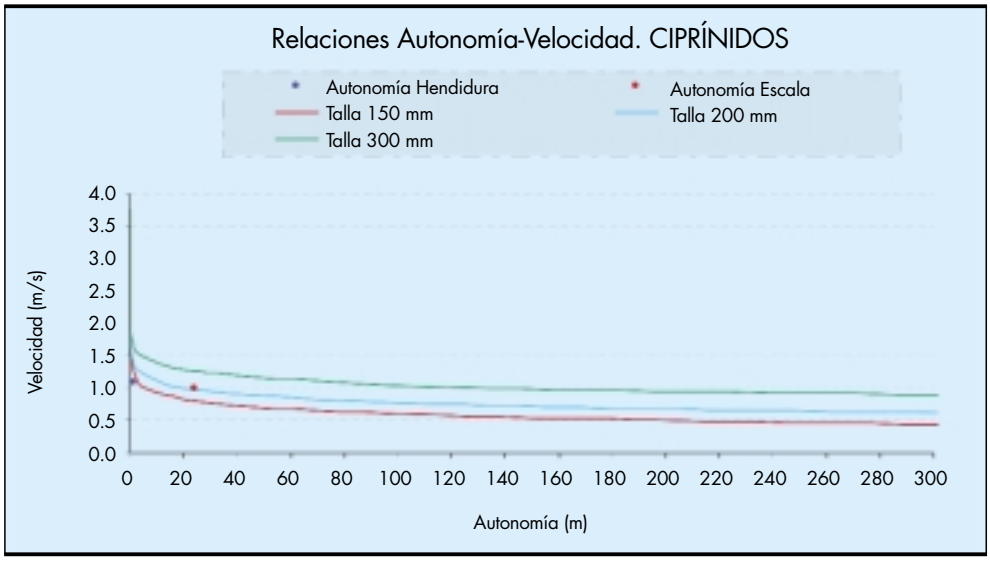

FIGURA 10. Ciprínidos. Relaciones Autonomía-Velocidad.

Una conclusión importante de la campaña de ensayos realizada con las distintas especies analizadas en la escala del Laboratorio de Hidráulica es que el segundo condicionante puede ser bastante conservador en el diseño de la escala al suponer que los peces remontan la misma sin realizar descansos en los estanques. Al contrario, salvo contadas excepciones en los que un ejemplar ha subido dos estanques seguidos, o a lo sumo tres, siempre van pasando de un estanque al siguiente descansando un tiempo en las zonas de recirculación que se producen a cada lado del flujo principal para poderse recuperar en parte del esfuerzo realizado. Esto podría explicar el que algunos ejemplares de ciertas tallas que no habrían podido remontar la totalidad de la escala lo han hecho finalmente y además en proporciones superiores al 50%.

Por otra parte hay una cierta incertidumbre con la curvas "velocidad del agua-autonomía del pez" utilizadas en dicha aplicación al corresponder a resultados obtenidos por investigadores extranjeros, por lo que sería necesario determinar las mismas para los peces presentes en nuestros ríos.

6.3. RESULTADOS FISIOLÓGICOS EN CUANTO A ESFUERZO Y FATIGA DE LOS PECES

La capacidad natatoria de los peces para remontar una escala no puede ser ilimitada pues suponiendo que puedan superar las condiciones hidráulicas que se dan en una hendidura, y que descansen un tiempo en el siguiente estanque, el ascenso a lo largo de la escala implica un esfuerzo y fatiga que va agotando al pez poco a poco. Es por este motivo por el que se consideró necesario determinar algunos parámetros fisiológicos en sangre, como el hematocrito, la glucosa, el cortisol y el lactato, para servir de indicadores del estado de los peces en cuanto a esfuerzo y fatiga.

En esta línea los aspectos que se analizaron con relación a estos parámetros fisiológicos son los siguientes:

- Obtención de estos valores en reposo (basales).
- Análisis de la evolución de estos parámetros ante determinadas situaciones (transporte, estabulación, etc).
- Análisis de su evolución a lo largo del movimiento del pez por la escala.

- Obtención de los valores máximos.
- Obtención de las curvas de variación con el tiempo de estos parámetros desde una situación determinada (una vez realizado el esfuerzo) hacia el estado de reposo.
- Relación de los resultados obtenidos tras el estudio de la posición y del comportamiento de los peces con los valores de los parámetros.

Como principales conclusiones generales que se han obtenido mediante el análisis de estos parámetros fisiológicos en sangre han sido las siguientes:

- Se observan en las tres especies analizadas diferencias en los tres parámetros fisiológicos relacionados con el esfuerzo, en ocasiones significativas, que implican una disminución del hematocrito y un aumento de la glucosa y el lactato. Asimismo se han obtenido incrementos del lactato por efecto del transporte así como que dicho parámetro sigue aumentando 2 horas después de haber llegado los ejemplares al final de la escala, en concordancia con los resultados de diversos investigadores (Kieffer, 2000; Milligan, 1996; Milligan et al, 2000; Tang et al,1989).
- No se ha encontrado sin embargo una correlación significativa entre los parámetros del hematocrito, glucosa y lactato final y la distancia, tiempo o relación distancia/tiempo en ascender la totalidad de la escala por cualquiera de las especies estudiadas. Es necesario profundizar en el conocimiento de los procesos del metabolismo, en particular el lactato, producto final del metabolismo anaeróbico, completando el estudio de su comportamiento en sangre con el estudio de su comportamiento en otros compartimentos de interés como puede ser el músculo.
- De todos modos, hay que tener en cuenta que no sólo es la acumulación de productos finales del metabolismo (como el lactato) la que limita la natación de los peces, hay que tener en cuenta otros aspectos como son el almacenamiento de reservas energéticas (glucógeno, ATP, fosfocreatina) y la tasa de recuperación (tasa aclaramiento de lactato, tasa de recuperación de glucógeno, capacidad tampón). Estos aspectos están influenciados por factores como la alimentación o ayuno, la calidad del agua, el entrenamiento, la temperatura del agua y el tamaño del cuerpo.
- Es necesario completar los resultados y conclusiones incluyendo los datos del cortisol. Por el momento se disponen de los datos de absorbancia aunque aún no se ha encontrado su relación con la concentración del cortisol en sangre. Estos datos proporcionarían información sobre el estrés que los peces están padeciendo.

6.4. COMPORTAMIENTO DE LOS PECES EN LOS ESTANQUES DE LA ESCALA

Las cuatro cámaras subacuáticas situadas en los estanques 1°, 4°, 7° y 11° de la escala estuvieron disponibles solamente durante los ensayos con las bogas y los barbos, pues no se encontraban todavía instaladas cuando comenzaron en diciembre los ensayos con las truchas. Las principales conclusiones del comportamiento observado en las imágenes grabadas durante los ensayos con las bogas y los barbos son las siguientes:

- Los peces al pasar de un estanque al siguiente entran directamente a las zonas de recirculación, no recorriendo prácticamente nada el flujo principal salvo la zona estricta de la hendidura. El flujo principal solo lo recorren cuando van a ascender o intentarlo y cuando se mueven de una zona de recirculación a la otra, por lo que minimizan al máximo el tiempo que están en las zonas de máximas velocidades. Este comportamiento se ha observado en todos los ensayos con independencia del caudal.
- Con las bogas y los barbos se ha comprobado que los peces se mueven mucho más en el 1° estanque que en los otros tres (4°, 7° y 11°). Los ejemplares que entran en el 1º estanque de la escala no están la mayor parte del tiempo bastante quietos en las zonas de recirculación, como se produce en los otros tres estanques observados, sino que se mueven mucho más por todo el estanque. Por otra parte es más apreciable este comportamiento con el caudal más alto de 250 l/s que con el de 100 l/s. Para explicar este comportamiento hay que tener en cuenta que se observa una mayor inestabilidad del flujo principal en este estanque respecto de los otros tres, y tanto mayor cuanto más alto es el caudal.
- Con el caudal más bajo de 100 l/s las bogas que entran en la escala lo hacen en general en grupo, siendo por el contrario más frecuente que entren de una en una con el caudal más alto de 250 l/s. En este 1° estanque suelen permanecer bastante tiempo juntas y cuando pasan al segundo estanque lo hacen por lo general de manera individual en ambos caudales. En los otros tres estanques (4°, 7° y 11°) no suele darse que se junten tantos ejemplares como en el primero, lo que implica que se van separando a lo largo de su ascenso por la escala.
- Los barbos suelen entrar en la escala de uno en uno, aunque también se juntan en el 1° estanque algunos individuos, pero no se forman grupos tan grandes y definidos como sucede con las bogas. El ascenso a los siguientes estanques lo hacen de manera individual y ya no suelen juntarse en el resto de la escala.
- Casi todos los ejemplares de bogas y barbos que ascienden la totalidad de la escala tardan significativamente más tiempo en recorrer la primera mitad de la escala que la segunda. Igualmente habría que analizar si este hecho podría ser debido a la mayor inestabilidad del flujo que se da en los estanques de más aguas abajo de la escala, o bien la posibilidad de un posible aprendizaje por parte de los ejemplares que ascienden, o a ambos factores.
- Las bogas con el caudal más bajo de 100 l/s muestran una alta preferencia por ascender al siguiente estanque pegados al fondo, siendo menos clara dicha preferencia con el caudal más alto de 250 l/s. En el caso de los barbos y con ambos caudales muestran una gran preferencia por ascender al siguiente estanque a una profundidad media.
- Las bogas ascienden al siguiente estanque para los mencionados caudales, en proporciones superiores al 70%, desde la zona de recirculación pequeña (zona A de la Figura 6) que se produce en los estanques. Por el contrario los barbos muestran una mayor preferencia, del orden del 50%, a ascender al siguiente estanque para los caudales de 100 l/s y 250 l/s desde la zona de recirculación grande (zona B de la Figura 6).
- Asimismo una diferencia existente entre bogas y barbos es que las primeras muestran una clara preferencia a pasar por la hendidura cerca del deflector pequeño mientras que los barbos lo hacen por el centro de la hendidura.

7. CONCLUSIONES GENERALES

Como conclusiones generales de la campaña de ensayos llevada a cabo en la escala de peces del Laboratorio de Hidráulica del CEDEX, desde diciembre de 2009 a julio de 2010, se pueden extraer las siguientes:

- Es necesario continuar con la experimentación en nuevas campañas de ensayos con salmónidos (truchas comunes) y ciprínidos (bogas y barbos comunes), puesto que sería necesario confirmar los resultados obtenidos durante esta campaña, en particular, respecto de la influencia del caudal en el ascenso de los peces por la escala. Los resultados indican que suben en mayor proporción los peces con los caudales más bajos respecto de los más altos. Indicar en este sentido que los datos que se están analizando en estos momentos sobre la última campaña de ensayos realizada en la escala del Laboratorio de Hidráulica del CEDEX (diciembre de 2010 a junio de 2011) confirman la influencia del caudal en el ascenso de los peces por la escala.
- Una conclusión también obtenida en la experimentación durante la campaña 2009 – 2010 es que los peces suben la escala realizando descansos en los estanques, puesto que se ha comprobado que antes de ascender al siguiente están un tiempo considerable descansando en las dos zonas de recirculación que existen a ambos lados del flujo principal. Este hecho debe tenerse en cuenta en el diseño de estas escalas de hendidura vertical puesto que los peces no suben en ningún caso la totalidad de la escala sin realizar descansos a lo largo de la escala.
- Para comparar las condiciones hidráulicas del flujo hidráulico en la escala con las capacidades natatorias de los peces es imprescindible la utilización de las llamadas curvas "*velocidad del agua-autonomía del pez*" obtenidas en canales o cámaras de natación. Las curvas que se disponen por el momento corresponden a una primera aproximación mediante una revisión bibliográfica de algunos ensayos realizados en el extranjero, particularmente con salmónidos y escasamente con ciprínidos, por lo que resulta necesario obtener dichas curvas con las especies presentes en los ríos españoles, mediante unos ensayos llevados a cabo en una instalación diseñada al efecto.
- Sería necesario continuar con el estudio de las intermitencias observadas en el flujo en algunos estanques de la escala, que se da particularmente en los situados más aguas abajo, midiendo las tres componentes de la velocidad en diferentes puntos de uno o dos estanques de la escala. Asimismo sería conveniente analizar factores tales como la turbulencia, la energía, el calado, etc que pudieran explicar las diferencias observadas en el ascenso de los peces por la escala con los diferentes caudales.
- Los resultados obtenidos durante esta campaña en cuanto a parámetros fisiológicos relacionados con el esfuerzo y la fatiga (hematocrito, glucosa, cortisol y lactato), obtenidos mediante extracciones de sangre a los peces en diferentes momentos del ensayo (previo y después del transporte, valores en reposo y después de hacer distintos recorridos por la escala, así como para la medida de la recuperación después de un esfuerzo), no han sido por el momento lo suficientemente significativos como para poder obtener unas primeras conclusiones de cara a esta investigación. Se considera por otra parte necesario que en futuras campañas, además de seguir con la obtención de estos parámetros en sangre, se determinen los mismos también en músculo, para lo cual habrá que tenerlo en cuenta, tanto en el protocolo de ensayos como en la disposición de los equipos necesarios para obtener dichos parámetros en músculo.
- Han sido muy interesantes los resultados obtenidos mediante el estudio y tratamiento de las imágenes que se han grabado con las cámaras instaladas en la escala durante la campaña, en cuanto al comportamiento de los peces en los diferentes estanques de la escala, las zonas de descanso, el paso de los ejemplares por las hendiduras, la trayectoria, velocidades y aceleraciones que siguen los peces, etc. En consecuencia se considera imprescindible continuar con los mencionados análisis en futuras campañas de ensayo.
- Finalmente indicar que es imprescindible contar para esta experimentación, y en las fechas correspondientes a cada especie ensayada, de un número suficiente de ejemplares, que suponga una variedad de tallas de individuos así como representativa de ambos sexos.

8. AGRADECIMIENTOS

Este proyecto de investigación se enmarca dentro de la colaboración entre la Dirección General del Agua del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino y el CEDEX para la realización de trabajos de "Asistencia técnica, investigación y desarrollo tecnológico en materia de hidráulica continental. Investigación sobre el comportamiento de escalas de peces en laboratorio".

Se agradece la colaboración prestada por los equipos de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de la Coruña, en la puesta a punta y tratamiento de imágenes del sistema de cámaras instalado en la escala para el seguimiento de la trayectoria de los peces, así como la colaboración prestada por el Departamento de Ingeniería Forestal de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes de la Universidad Politécnica de Madrid, en todos los trabajos relacionados con la adecuada estabulación de los peces en su piscifactoría y la aportación de ejemplares de boga común y trucha arcoiris para los ensayos.

Los ejemplares que se han utilizado de trucha común han sido proporcionados por la Consejería de Agricultura y Medio Ambiente de la Junta de Comunidades de Castilla la Mancha a quien se agradece su aportación. Del mismo modo se agradece a la Consejería de Medio Ambiente, Vivienda y Ordenación del Territorio de la Comunidad de Madrid la autorización para la obtención de ejemplares de barbo común en aguas del río Cofio.

Finalmente también agradecer a José Luis García Ramos, encargado de la instrumentación de la escala de peces, a Ángel Gómez Salinas por su inestimable ayuda durante los ensayos, y en general a todo el personal de construcción y talleres del Laboratorio de Hidráulica del CEDEX por su dedicación a este trabajo.

9. REFERENCIAS

Elvira, B., Almodóvar, A., Nicola, G., Ayllón, D., Parra, I., and Almeida, D. 2008a. Modelos de velocidades de natación crítica y curvas de velocidad-autonomía en ciprinidos. Informe interno elaborado para el Centro de Estudios Hidrográficos (CEDEX).

Elvira, B., Almodóvar, A., Nicola, G., Ayllón, D., Parra, I., and Almeida, D. 2008b. Modelos de velocidades de natación crítica y curvas de velocidad-autonomía en salmónidos. Informe interno elaborado para el Centro de Estudios Hidrográficos (CEDEX).

Kieffer, J.D. Limits to exhaustive exercise in fish. 2000. Comparative Biochemistry and Physiology - Part A: Molecular & Integrative Physiology 126(2): 161-179.

Milligan, C.L. 1996. Metabolic recovery from exhaustive exercise in rainbow trout. Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology 113(1): 51-60.

Milligan, C.L., Hooke, G.B., and Johnson, C. 2000. Sustained swimming at low velocity following a bout of exhaustive exercise enhances metabolic recovery in rainbow trout. Journal of Experimental Biology 203: 921–926.

Pena, L., Puertas J., Miguelez, M., Balairon; L., Lara, A., Aramburu, E., 2009. Aplicación informática para el diseño de escalas de peces de hendidura vertical. Comunicación presentada en las Jornadas de Ingeniería del Agua JIA 2.009, Madrid, 27 – 28 Octubre 2.009. International Association for Hydro-Environment Engineering and Research, Madrid.

Puertas, J., and Pena, L. 2008a. Hidráulica de escalas de ranura vertical. Estado del conocimiento. Nota técnica para el Centro de Estudios Hidrográficos (CEDEX).

Puertas, J., and Pena, L. 2008b. Estudio experimental en modelo reducido de escalas de peces de ranura vertical. Nota técnica para el Centro de Estudios Hidrográficos (CEDEX).

Puertas, J. and Pena, L. 2008c. Criterios de diseño de escalas de peces de ranura vertical. Nota técnica para el Centro de Estudios Hidrográficos (CEDEX).

Puertas, J., Cea, L., Bermúdez, M., Pena, L., Rodríguez, A., Rabuñal, J.R., Balairón, L., Lara, A., Aramburu, E. 2011. Computer application for the analysis and design of vertical slot fishways in accordance with the requirements of the target species. Ecological Engineering. En prensa.

Rodriguez, A., Bermúdez, M., Rabuñal, J.R., Puertas, J., Dorado, J., Pena, L. and 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.

Tang, Y., McDonald, D.G. and Boutilier, G. 1989. Acid-base regulation following exhaustive exercise: a comparison between freshwater and seawater-adapted rainbow trout (*Salmo gairdneri*). Journal of Experimental Biology 141: 407-418.

Teijeiro, T., Puertas, J., Pena, Luis., and Peña, E. 2006. Evaluating vertical-slot fishway designs in terms of fish swimming capabilities. Ecological Engineering 27(1):37-48.