

La adecuación de las escalas para peces para salvar obstáculos de distintas dimensiones: el caso de la presa de Los Melonares y el azud de Gargantafría (río Viar, Sevilla)

José Prenda

Centro Internacional de Estudios y Convenciones Ecológicas y Medioambientales (CIECEMA)
Universidad de Huelva
Parque Dunar s/n
21760 Matalascañas (Huelva)

Palabras Clave: embalses, peces continentales, migración íctica, dispositivos de paso, ciprínidos, ríos mediterráneos, biología de la conservación, gestión fluvial.

Keywords: reservoirs, freshwater fishes, fish migration, fishways, cyprinids, Mediterranean streams, conservation biology, river management.

La adecuación de las escalas para peces para salvar obstáculos de distintas dimensiones: los casos de Los Melonares y Gargantafría

Fishway design for large vs small dams in the Sierra Norte of Sevilla Natural Park

RESUMEN

En este trabajo se realiza un análisis pormenorizado de la adecuación de una escala para peces que les permita salvar el obstáculo de la presa de Los Melonares (río Viar, Sevilla). Se realiza un análisis desde una doble vertiente: la capacidad fisiológica de los peces de la cuenca del Viar y de las propiedades hidráulicas de un diseño que en su día fue desestimado. Finalmente se comenta la situación de la escala del azud de Gargantafría que si se considera viable para el paso de ciprínidos ibéricos.



ABSTRACT

In this work a detailed analysis of the utility of a fishway for the stream fish to pass the large dam of Los Melonares is made. This analysis is done from the physiological capacity of the fishes point of view and from the hydraulic properties of a fishway design, finally rejected. The situation of an alternative project, the Gargantafría fishway, is finally commented.

CAPACIDAD DE NATACIÓN DE LOS PECES

La capacidad de natación de los peces, entendida como la combinación de las velocidades que pueden alcanzar y su resistencia para mantener dichas velocidades durante periodos de tiempo más o menos largos, es la que les permite superar los obstáculos que se encuentran en sus desplazamientos a lo largo de los cursos fluviales (García de Jalón *et al.*, 1993).

Los peces para salvar un obstáculo del tipo de una escala en una presa pueden combinar tres modalidades de natación: (1) sostenida, con la que consiguen bajas velocidades y emplea esencialmente musculatura roja dependiente de metabolismo aerobio (puede ser mantenida durante largos periodos de tiempo, al menos de 200 minutos, sin causar cansancio); (2) de *sprint*, alcanzándose una velocidad muy elevada pero de muy corta duración –normalmente menos de 15-20 segundos- y se utiliza para salvar los mayores obstáculos con participación de musculatura blanca o anaerobia; (3) prolongada, que cubre un espectro de velocidades entre sostenida y de *sprint* empleando musculatura roja (aerobia) y blanca (anaerobia) (Peake *et al.*, 1997).

Las velocidades específicas punta o de *sprint* que pueden desarrollar los peces, aquellas que verdaderamente les permiten salvar obstáculos importantes, varían de unas especies a otras. Para los ciprínidos se considera que varían entre 4 y 9 L s⁻¹, donde L es la longitud del pez (Webb, 1975). Esto significa que para tallas de entre 10 cm y 50 cm, las velocidades que se pueden alcanzar en esta familia serán del orden de entre 0,4-4,5 m s⁻¹. Asimismo, las velocidades sostenidas y de cruce que pueden desarrollar los peces en condiciones óptimas varían entre 2-3 L s⁻¹ (Tabla 1).

La velocidad de natación es sin embargo un parámetro muy variable entre especies y entre distintos estados

Talla del pez (mm)	Rango de velocidad punta (m s ⁻¹)	Rango de velocidad sostenida (m s ⁻¹)
100	0,4-0,9	0,2-0,3
200	0,8-1,8	0,4-0,6
300	1,2-2,7	0,6-0,9
400	1,6-3,6	0,8-1,2
500	2,0-4,5	1,0-1,5

Tabla 1. Cuadro de velocidades de *sprint* o punta y sostenida (valores máximo y mínimo) que pueden desarrollar los ciprínidos de distintas tallas en condiciones óptimas.

fisiológicos. En general, los salmónidos alcanzan velocidades muy superiores a los ciprínidos y éstas son mucho más elevadas en condiciones óptimas que en condiciones de estrés. Distintos autores han estimado la velocidad punta de diferentes especies pertenecientes a estas familias en condiciones fisiológicas variables (Tabla 2).

Como se puede comprobar, las aptitudes de nado –entendidas como la facultad de saltar cuando sea necesario, así como la acomodación a las distintas posibilidades que los pasos les puedan

Especies	Velocidad punta (m s ⁻¹)	
	Condiciones Óptimas	Condiciones de estrés
<i>Oncorhynchus mykiss</i>	4	
<i>Salmo trutta</i>	-	4,4
<i>Leuciscus cephalus</i>	-	2,7
<i>Barbus barbus</i>	-	2,4
<i>Cyprinus carpio</i>	2,5	0,4

Tabla 2. Velocidades de *sprint* o punta que pueden alcanzar distintas especies de ciprínidos y salmónidos, en condiciones óptimas y/o de estrés.

ofrecer (García de Jalón *et al.*, 1993)- de las diferentes especies de peces son muy variables. Y ello necesariamente habrá de ser tenido en cuenta a la hora de evaluar la idoneidad de distintos dispositivos de paso para la ictiofauna.

El coste energético del desplazamiento de los peces es función de la talla del pez, de la velocidad de la corriente, de la velocidad de natación y de la dis-

tancia recorrida (Nøttestad *et al.*, 1999). En general, la velocidad de la corriente en un paso debe ser tal que la velocidad máxima de nado y la resistencia del pez no sean sobrepasados. Dichos límites vendrán impuestos por la especie, la talla del pez y la temperatura del agua. Lo mismo se puede argumentar para la longitud de los pasos. La velocidad de la corriente en el paso puede ser susceptible de ser superada por el pez, sin embargo la distancia a recorrer ser tal que se supere la resistencia del pez (Herskin y Steffensen, 1998).

ANÁLISIS PORMENORIZADO DE LA PROPUESTA DE ESCALA PARA PECES DE LA PRESA DE "LOS MELONARES"

La instalación de dispositivos de paso que permiten a los peces salvar obstáculos fluviales es una práctica habitual en países templados. Normalmente, la mayoría de estos dispositivos ha sido concebida 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 unas capacidades locomotoras muy elevadas. Ello supone que el diseño de los mismos ha tenido en cuenta estas circunstancias.

En zonas climáticas distintas a las templadas-frías, donde no existen de forma natural salmónidos, la creciente instalación de dispositivos de paso para peces se ha basado en la mayoría de los casos en diseños adaptados a las necesidades de los salmónidos (Granado y Prenda, 1991). La principal consecuencia de ello ha sido la baja eficacia mostrada por los mismos con la ictiofauna nativa de estas áreas (Stuart y Mallen-Cooper, 1999). La clave de esta discrepancia salmónidos-no salmónidos reside en las velocidades máximas alcanzadas por el agua en las escalas

y en la energía disipada en las mismas en forma de turbulencias. Las escalas para no salmónidos han de posibilitar velocidades máximas inferiores a las de salmónidos y han de reducir drásticamente las turbulencias. Stuart y Mallen-Cooper (1999) sustituyen una escala de estanques sucesivos por otra de escotaduras verticales y logran reducciones en la velocidad de 2,5 a 1,4 m s⁻¹ y en energía disipada en forma de turbulencias de 250 a 41 W m⁻³. Con ello consiguen incrementar extraordinariamente la eficacia de una escala, que inicialmente solo permitía el paso de unos cuantos *Mugil cephalus* y que con las modificaciones referidas registran pasos de hasta de 3.400 individuos día⁻¹, pertenecientes a un total de 29 especies con tallas comprendidas entre 25 y 640 mm de longitud total.

Como ya se comentó, la velocidad de la corriente en la escala no debe sobrepasar nunca las capacidades natatorias de los peces que han de atravesarla. La velocidad crítica puede ser definida como la velocidad máxima que puede ser remontada por un pez sin ser arrastrado aguas abajo (Kim, 2001). Lucas *et al.* (1999) observan una eficiencia muy baja en un paso tipo Denil que supera un obstáculo de un metro por la elevada velocidad que se alcanza en el mismo en relación a las capacidades natatoria de los peces que podrían utilizarlo, mayoritariamente ciprínidos. Contrariamente, Schmutz *et al.* (1998) observan una eficacia muy elevada en un paso que salva un desnivel de 2 m con una pendiente media del 0,5%, permitiendo la ascensión de numerosas especies de peces, principalmente ciprínidos y periódicos de muy escasa capacidad natatoria.

Las mejoras hidráulicas logradas por Stuart y Mallen-Cooper (1999) en una escala originalmente diseñada para salmónidos las consiguen incrementando el volumen de los estanques, disminuyendo la caída entre estanques y reduciendo el caudal de la escala.

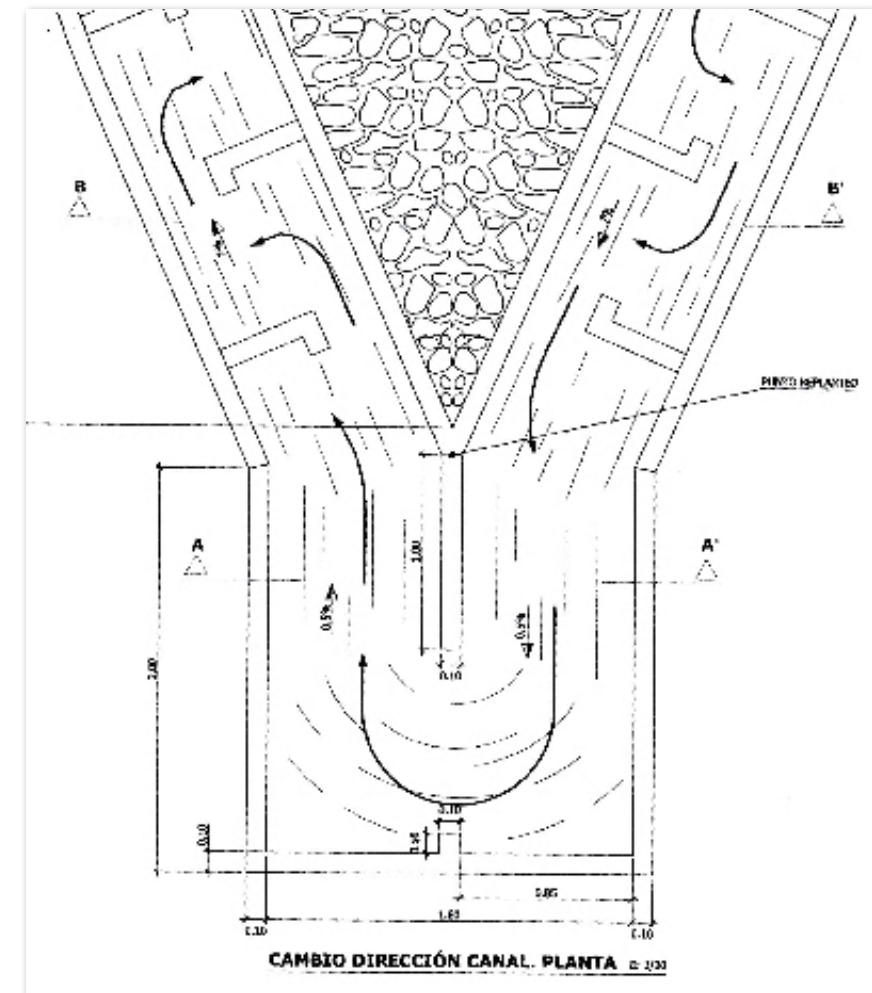


Fig. 1. Detalle de la escala para peces de la presa de Los Melonares. Planta

SOBRE EL TIPO Y DISEÑO DE LA ESCALA

El tipo de escala propuesto para superar el obstáculo que representa la presa de Los Melonares se corresponde con un paso de escotaduras verticales sin deflectores laterales (Elvira *et al.*, 1998) (Fig. 1). Kim (2001) analiza cuatro modelos de escala de estanques sucesivos con escotaduras laterales y orificios de fondo distribuidos en diferentes posiciones y concluye que el diseño óptimo es el que sitúa las escotaduras y los orificios

enfrentados, frente a otros modelos en los que orificios y escotaduras se disponen en zigzag. En este último caso el flujo es inestable y no queda espacio para el descanso de los peces en el estanque. Algo similar puede ocurrir con el diseño de escala que se analiza en este estudio, con escotaduras verticales de gran anchura (40 cm) alternas.

En este tipo de pasos el coeficiente de caudal suele variar entre 0,65 y 0,85. Es importante que la inclinación del paso no

sea excesiva ya que el caudal que pasa por la escotadura puede chocar violentamente contra la pared contraria y producir así perturbaciones en el comportamiento de los peces.

Este diseño es previsible que genere fuertes turbulencias y posea poca capacidad de aminorar la velocidad de la corriente media. En lo que se puede considerar un diseño óptimo (ver por ejemplo Stuart y Mallen-Cooper, 1999) éste debe incorporar deflectores laterales, con una escotadura de entre 15 y 20 cm de anchura.

SOBRE EL DESNIVEL QUE HA DE SALVAR LA ESCALA

Elvira *et al.* (1995) reconocen que las escalas para peces tienen una aplicabilidad limitada según la altura del obstáculo. Por ejemplo, estos autores recogen la existencia de pasos de estanques sucesivos en presas de hasta cerca de 30 m de altura, si bien mostraron una eficacia muy baja. En general, este tipo de pasos pueden resultar eficaces para obstáculos de hasta unos 10 m de altura (Elvira *et al.*, 1995).

La escala de Los Melonares debe salvar una altura de 45,5 m. Un análisis detallado de varias escalas con diferentes niveles de eficacia pone claramente de manifiesto la seria limitación que representa la altura para facilitar el paso de los peces, independientemente de la solución de diseño adoptada (Tabla 3). Teniendo en cuenta los datos recogidos en la literatura, este desnivel de 45,5 m representa un obstáculo, *a priori* insalvable para los peces que habitan en el río Viar.

SOBRE EL CAUDAL DE LA ESCALA

El caudal en el dispositivo de franqueo debe estar a escala del caudal del curso de agua en periodo de migración. De manera general, el caudal en el paso debe ser del orden del 1 al 5 % del caudal circulante. La atracción será mayor cuanto mayor sea el caudal que transita por el paso, de modo que, en general, un aumento del caudal

de atracción se traducirá en una mejora de la eficacia del dispositivo de paso (Elvira *et al.*, 1998)

Si partimos de la base de que el caudal que está previsto que circule por la escala en Los Melonares sea del orden de 15 l s⁻¹ (teniendo en cuenta la solución técnica prevista para el remate de la escala, de los 30 l s⁻¹ que se prevé bombear desde el embalse, la mitad de ellos circulará aguas abajo -15 l s⁻¹ y la otra mitad retornará al embalse), tenemos que la regla anteriormente expuesta del 1-5% no se cumplirá al menos durante los meses de noviembre, diciembre, enero, febrero y abril (Figura 2), época en la que se producen los desplazamientos reproductivos en los peces (Rodríguez y Granado, 1992; Granado *et al.*, 2000). El resto del año, por el contrario, se superan estos valores.

Por tanto, según los presupuestos del 1-5%, el caudal mínimo exigido para que la escala funciones debiera ser el que aparece en la Tabla 4. Se considera el 2% del caudal por la razón aludida con

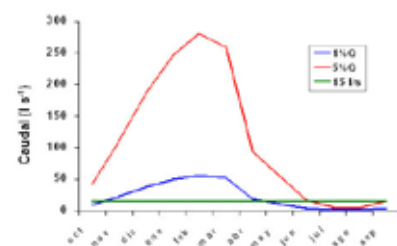


Fig. 2. Evolución mensual del 1% (línea azul) y el 5% (línea roja) del caudal medio del río Viar en Melonares (1942-1985). La línea verde representa el valor 15 l s⁻¹, caudal que está previsto que circule por la escala para peces.

anterioridad de que la mitad del caudal bombeado retornará al embalse. En estas condiciones, en total el gasto anual de la escala sería aproximadamente de 0,688 Hm³. En caso de liberar un caudal fijo de 30 l s⁻¹, el gasto anual ascendería a 0,467 Hm³.

Hasta ahora se han manejado datos exclusivamente teóricos, basados en experiencias desarrolladas en otras latitudes. Si se consideran, por el contrario, datos reales de caudales circulantes en escalas con elevado grado de eficiencia, la situación puede ser muy diferente (Tabla 3). Entre 0,25 m³ s⁻¹ y 3,33 m³ s⁻¹ se encuentran los caudales de tres escalas que facilitan el franqueo de obstáculos a un número muy elevado de peces, pertenecientes a especies muy

distintas. Los valores de 0,015 m³ s⁻¹ propuestos para la escala de Los Melonares son insuficientes comparados con estos. Además, en estos casos el gasto anual de la escala oscilaría entre 8 y 104 Hm³, aproximadamente.

SOBRE LAS DIMENSIONES DE LOS ESTANQUES Y EL VOLUMEN OCUPADO POR EL AGUA CIRCULANTE POR LOS MISMOS

Un aspecto fundamental a la hora de valorar la adecuación de una escala es

Obstáculo	Fitzroy Presa mareal	Stamford Bridge Presa en curso bajo	Marchfeldkanal dique en curso bajo	Pitlochry Dam Presa Hiroeléctrica	Tailfer Dam (Mosa) Presa
Tipo de dispositivo	Escala de escotaduras verticales con deflectores laterales	paso tipo Denil	estanques sucesivos	estanques sucesivos con orificios sumergidos	
Desnivel (m)	3,6	1	2	15	
Dimensiones del dispositivo	16 estanques; (1,95*1,83*1,7) 40,85 m longitud	10 m longitud * 0,9 m anchura	12 estanques de 33 m longitud; 400 m long. total	34 estanques en 310 m de longitud (típico: 7,9 long* 4,3 ancho*, 2,1 prof*) 0,84 m diámetro orificios	
Pendiente (%)	5	20	0,5	4,8	
Caudal circulante por el dispositivo (m ³ s ⁻¹)	3,3306		0,25	1,4	
Velocidad máxima (m s ⁻¹)	1,4			2,4	
Profundidad (m)	1,3	0,8		2,1	
Eficacia*	máx. 3,400 peces/día	16,7% de los que entran suben; 3,8% de los intentos de subir lo logran	35.000 individuos de 34 especies pasan entre abril y julio (>57.000 ind/año)	5.072 ind/año (2.374-11.977)	máximo 4.155 ind/día
Especies	peces subtropicales no salmónidos	ciprínidos	ciprínidos-pércidos	salmón	<i>Rutilus</i>
Rango de tallas	25-640 mm				160-269
Tiempo de ascensión	31%-2h, 50%-4h; 13%-16h; resto 28 h			20,7 h (5,25 h -7,5 días)	
Referencia	Suart & Mallen Cooper (1999)	Lucas <i>et al.</i> (1999)	Schmutz <i>et al.</i> (1998)	Gowans <i>et al.</i> (1999)	Kestemont <i>et al.</i> (1999)

Tabla 3. Características generales de cinco escalas para peces con distinto grado de eficacia.

2%Q (l s ⁻¹)	Velocidad punta (m s ⁻¹)											
	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep
	17	45	75	98	112	103	37	22	7	2	2	7

el referido a sus dimensiones. En el caso concreto de una escala de estanques sucesivos, como el que nos ocupa, es especialmente importante, porque de sus dimensiones y del volumen de agua que contenga en un instante t (esencialmente de la profundidad que alcance) va a depender el que pueda ser utilizada por los peces.

La escala proyectada en Los Melonares posee estanques de 0,9 m de longitud, 0,8 m de anchura y 0,5 m de profundidad, lo que representa un volumen de 0,36 m³. Este valor es muy inferior a los de otras escalas que han demostrado una alta eficacia (Tabla 3). Las tres escalas de la Tabla 3 para las que se cuenta con datos poseen estanques con volúmenes comprendidos entre 6,4 m³ y 71,3 m³.

Teniendo en cuenta la pendiente de la escala podemos estimar la velocidad máxima entre estanques a partir de la fórmula $V=(2*g*h)^{1/2}$, donde g es la aceleración de la gravedad y h la diferencia de altura entre estanques (0,056 m para una pendiente del 7%). La velocidad estimada es de 1,11 m s⁻¹. A continuación podemos calcular la profundidad que alcanzará el agua circulando a esa velocidad por la escala, a partir de la fórmula $Q=S*V$, siendo Q el caudal (m³ s⁻¹), S la superficie de la sección del agua circulante (en m²; $S=profundidad*anchura$) y V la velocidad (en m s⁻¹). Despejando, tenemos que la profundidad alcanzada por los 15 l s⁻¹ de agua que bajan por la escala serán del orden de 1,7 cm (Figura 3).

Esta profundidad es insuficiente. Otras escalas de probada eficacia poseen profundidades comprendidas entre 0,8 y 2,2 m (Tabla 3). Atendiendo a la las características de la escala diseñada para Melonares, la profundidad máxima posi-

ble sería de 40 cm, que es la altura del tabique interior. Este valor está muy por debajo de los mencionados antes y es con toda probabilidad insuficiente para

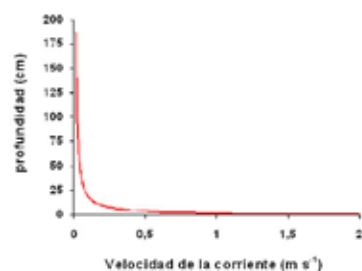


Fig. 3. Relación entre la velocidad de la corriente y la profundidad de la misma en la escala de Los Melonares, para un caudal de 15 l s⁻¹.

la ictiofauna del Viar. En cualquier caso, para alcanzar esa profundidad, dado el caudal de 15 l s⁻¹, el agua debería bajar a una velocidad en torno a 0,05 m s⁻¹, lo que significa que la pendiente media de la escala habría de ser del 1,25% y su longitud total de 3.653 m, aproximadamente.

Sin embargo, el planteamiento correcto pasaría por estimar el caudal mínimo necesario para generar una determinada corriente con la profundidad requerida, que en este caso sería de 40 cm. Suponiendo una velocidad máxima de 1,11 m s⁻¹ entre estanques, haría falta un caudal de unos 356 l s⁻¹ para que el agua circulando por la escala alcance esta profundidad (Figura 4). Con el diseño propuesto de escala haría falta bombear el doble de caudal. El gasto anual de la escala sería de 11,06 Hm³.

SOBRE LA PENDIENTE Y LA VELOCIDAD DE LA CORRIENTE EN LA ESCALA

La pendiente media estimada de la escala de Los Melonares es algo superior al 6%, muy por encima de los valores registrados

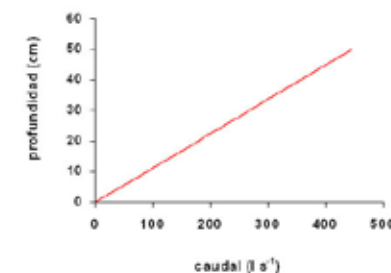


Fig. 4. Relación entre el caudal y la profundidad de la corriente en la escala de Los Melonares.

para otras escalas (Tabla 3), normalmente por debajo del 5% (con la excepción de los pasos tipo Denil, que salvan obstáculos pequeños con una fuerte pendiente y que, en principio, solo son aptos para salmónidos). A efectos comparativos se puede citar que el límite superior de la distribución de los peces -ciprínidos, como la mayoría de la ictiofauna del Viar- en la cuenca del Guadalete (Cádiz), lo marca una pendiente del 1,60% (Pren- da, 1993). En este sentido, una pendiente media adecuada para ciprínidos podría estar en torno al 2%. Para alcanzar este valor habría que construir una escala en Los Melonares de 2.275 m de longitud (Figura 5).

Aparte de la elevada pendiente, el problema se agrava por la longitud de la escala, que es excesiva (Figura 6). Esta dificultad añadida convierte al dispositivo de paso en un sistema prácticamente infranqueable para la mayoría de los peces.

Respecto a las velocidades de la corriente que se alcanzarían en la escala

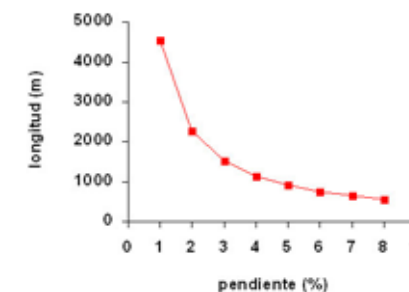


Fig. 5. Relación entre la pendiente y la longitud que debería tener una escala para superar el desnivel de 45,5 m de la presa de Los Melonares.

no parecen ser excesivamente elevadas. La velocidad máxima en cada estanque ya se ha referido como se ha estimado. Para el cálculo de la velocidad media en cada tramo de la escala se ha utilizado la siguiente expresión (Gordon *et al.*, 1992):

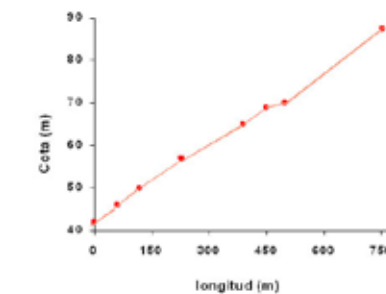


Fig. 6. Perfil lateral de la escala de Los Melonares.

$V=(n^{-1})*R^{2/3}*S^{1/2}$, donde V es la velocidad media, n es el coeficiente de Manning para un cauce rectilíneo de sustrato liso ($n=0,025$), R es el radio hidráulico y S la pendiente.

Si comparamos la evolución de ambos valores de la velocidad a lo largo de los distintos tramos que conforman la escala se puede comprobar que, en principio, no se alcanzan velocidades que

sean insalvables, al menos para los peces de más talla (Figura 7).

Es, sin embargo, destacable la similitud existente entre las velocidades máximas y medias en los tramos de más pendiente, lo que apunta a la ausencia de refugios hidráulicos adecuados en los mismos (Figura 7). En conjunto, la combinación de pendientes, longitud y velocidad de la corriente resulta en un dispositivo de paso prácticamente infranqueable, incluso

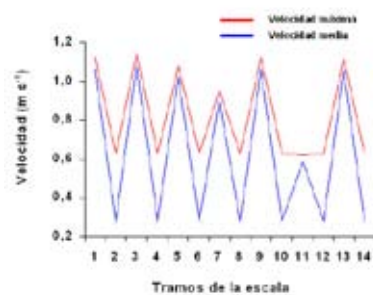


Fig. 7. Rango de velocidad de la corriente (media-máxima) estimado para cada uno de los tramos de la escala de Los Melonares

para peces con elevadas habilidades nataatorias, como podrían ser los salmónidos.

Se puede adoptar como índice de dificultad de ascenso por la escala el producto de la velocidad máxima de la corriente en cada tramo por su longitud correspondiente. La representación acumulada del valor de este índice pone de manifiesto una cierta regularidad en la dificultad de ascenso entre los tramos 1 y 12, que se rompe en el tramo 13 (Figura 8). Es precisamente al final de la escala cuando potencialmente pueden los peces encontrar la máxima dificultad para franquearla.

SOBRE LA ENERGÍA DISIPADA POR LA ESCALA

Tan importante o quizás más que la velocidad de la corriente es la energía disipada

por la escala. La velocidad de paso recomendada para salmónidos es de $2,4 \text{ m s}^{-1}$ y la energía disipada en forma de turbulencias recomendada para salmónidos es de 200 W m^{-3} y para no salmónidos de 150 W m^{-3} .

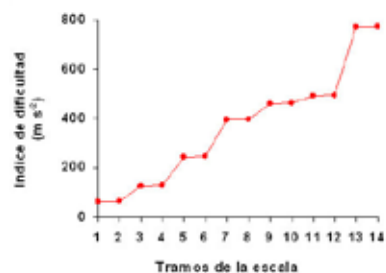


Fig. 8. Representación del Índice de dificultad acumulado de la escala de Los Melonares a lo largo de los 14 tramos que la conforman.

Aunque la velocidad de sprint de un pez sea superior a la velocidad máxima registrada en una escala es necesario tener en cuenta las turbulencias del agua y las posibilidades de descanso que ofrece una escala. Estas deben permitir la recuperación del déficit de oxígeno que se produce durante el ascenso súbito en sprint en el que participa básicamente musculatura blanca (Gowans *et al.*, 1999).

La potencia disipada por la escala (P) podemos estimarla a partir de la ecuación $P=(p \cdot g \cdot Q \cdot C)/V$, donde p es la masa del agua, g la aceleración de la gravedad, Q el caudal, C la caída entre estanques y V el volumen del estanque. La escala diseñada para Los Melonares disiparía del orden de 809 W m^{-3} , muy por encima del tope de 150 W m^{-3} reconocido para no salmónidos (incluso muy superior a los 200 W m^{-3} para salmónidos).

La potencia disipada es por tanto función del caudal y de la pendiente de la escala. Para los valores de caudal pre-

vistos para la escala de Los Melonares de 15 l s^{-1} , solo se conseguiría disipar menos de 150 W m^{-3} para pendientes inferiores al 1,2% (Figura 9). La utilización de caudales superiores, especialmente del óptimo de 356 l s^{-1} , cumpliría holgadamente la regla de los 150 W m^{-3} (Figura 9).

SOBRE LA LLAMADA Y LA ENTRADA A LA ESCALA

La situación de la entrada de la escala, un tanto desfavorable en Los Melonares por su alejamiento aguas abajo del obstáculo, ha de ser compensada aumentando notablemente el caudal en la escala, que deberá representar una fracción aún mayor del caudal del curso de agua en periodo de migración (Elvira *et al.*, 1998). Linnik *et al.* (1998) observan que las truchas raramen-

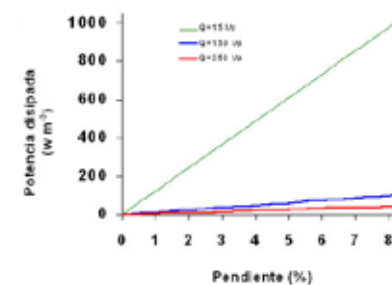


Fig. 9. Relación entre pendiente de una escala para peces y potencia disipada en forma de turbulencias para tres valores de caudal: 15 l s^{-1} , 150 l s^{-1} y 356 l s^{-1} , valor este considerado óptimo para la escala de Los Melonares.

te inician el ascenso de una escala cuando los caudales circulantes en la entrada son bajos. Es necesario recordar en este punto que conviene instalar las entradas de los pasos lo más cerca posible del obstáculo a salvar, que es donde tienden a concentrarse los peces en sus desplazamientos aguas arriba (Elvira *et al.*, 1998).

Al mismo tiempo, es indispensable que la velocidad de la corriente sea ele-

vada a la entrada del paso, pero a la vez compatible con las capacidades de desplazamiento de las especies implicadas. Se puede adoptar como velocidad mínima en la entrada un valor del orden de 1 m s^{-1} (la velocidad óptima para salmónidos y otros grandes migradores está en torno a $2-2,4 \text{ m s}^{-1}$).

Es necesario tener en cuenta que en una obra o proyecto donde se carece de información sobre la conducta migratoria de la ictiofauna, el comportamiento del pez ante el obstáculo –la presa, en este caso- es una incógnita sobre la que solo cabe emitir hipótesis (Elvira *et al.*, 1998).

SOBRE EL ACCESO AL EMBALSE DESDE LA ESCALA

Otro aspecto a destacar es la solución planteada al final de la escala para permitir el acceso de los peces al embalse. El dispositivo de paso finaliza en un estanque con doble salida, aguas abajo y aguas arriba de la presa. El agua bombeada desde el embalse es soltada en el estanque a través de una tubería de manera que cuando éste se llena se desborda hacia ambos lados. Se supone que los peces que alcanzan el estanque tras ascender por la escala deben continuar su marcha, ahora a favor de corriente, para alcanzar la lámina de agua del embalse. Esta solución de diseño no tiene en cuenta el comportamiento de la ictiofauna y puede favorecer el bloqueo de los ejemplares en el estanque terminal. Los peces son sensibles a caídas importantes, como las que se pueden dar entre el final de la escala y la lámina de agua del embalse, así como a zonas de recirculación o turbulencia del tipo de las que se generarán en el estanque final. Ambos factores pueden generar desorientación y confusión general en los peces, que hagan que retornen por la escala. Esto ha sido analizado en estudios previos que ponen de manifiesto que el inicio de la acumulación de los peces en un determinado estanque fuerza la marcha atrás de los

ejemplares que van alcanzándolo (Karisch, 1994). Lógicamente, estas circunstancias redundarán en una pérdida neta de eficacia del dispositivo de paso.

La altura del salto entre el punto de desagüe y el plano de agua no debe ser mayor a 5 m, para evitar que los peces se hieran o choquen de manera violenta contra el agua. Diversos estudios han puesto en evidencia la aparición de daños significativos (lesiones en las branquias, ojos y órganos internos) si la velocidad de impacto del pez sobre el plano de agua supera los $15-16 \text{ m s}^{-1}$, sea cual sea su talla. Esta velocidad crítica es alcanzada después de un salto variable según la talla del pez (Elvira *et al.*, 1998). Los peces mayores no mueren si la velocidad de impacto se mantiene por debajo de la velocidad crítica de 16 m s^{-1} .

A estos riesgos directos se deben añadir otros indirectos. Por ejemplo los traumatismos y/o la desorientación de los peces después del salto les hacen más vulnerables a la depredación por aves o por peces ictiófagos (30% de muertes en algunos lugares) (Elvira *et al.*, 1998).



Es recomendable instalar mallas protectoras para evitar que los peces puedan saltar fuera de la escala.

detectados en el actual proyecto. Para ello se han seguido las indicaciones, sugerencias y recomendaciones contenidas en uno de los principales manuales para el diseño de escalas para peces, el *Design of fishways and other fish facilities*, obra clásica del ingeniero Charles H. Clay (1995).

¿Cuáles deben ser las dimensiones óptimas de la escala? La respuesta a esta pregunta es compleja y debe basarse en un adecuado conocimiento de la biología y el comportamiento de las especies a las que va destinada. Por ejemplo, ¿Cuál es el volumen mínimo de agua requerido por un pez? Según algunos autores, este debe ser de 4 l por kg de peso. A partir de esta información y conociendo la tasa y los tiempos de paso y el tamaño

de los individuos se podrían estimar las dimensiones de la escala. Pero esto, hoy por hoy, para el caso de Gargantafría (así como para la mayoría de los cursos de agua ibéricos) es poco menos que imposible. A pesar de ello, se considera que el tamaño mínimo de los estanques que conforman una escala para salmónidos grandes (de tamaño superior a 1,8 kg) ha de ser aproximadamente de 2,5 m de ancho, por 3 m de largo y algo más de 0,5 m de profundidad. Para peces de tallas inferiores pueden ser perfectamente útiles estanques menores. En cualquier caso la escala debe tener una profundidad mínima asegurada de 0,6 m durante la época reproductora, que es en la que se llevan acabo los principales movimientos dispersivos en busca de frezaderos adecuados. Clay (1991) sugiere que la pro-

fundidad ideal para grandes salmónidos durante el pico de la migración reproductora es de 2 m.

En el caso de Gargantafría, en la situación actual, la comunidad de peces está dominada por ejemplares pequeños (Figura 10). Solo el 12% de los peces

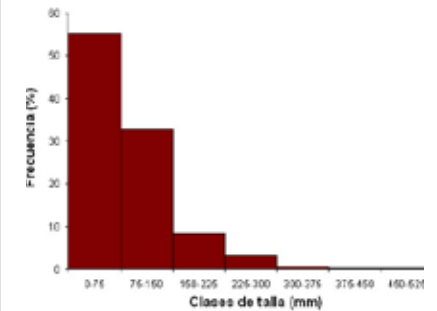


Fig. 10. Distribución de frecuencias de las tallas (longitud total) de los peces susceptibles de usar la escala del azud de Gargantafría en las condiciones actuales (barbos, bogas y calandinos; $n=1383$).

de las especies presentes en el área de estudio con alguna potencialidad para remontar (barbos, bogas y calandinos) posee una talla que le confiere capacidad nadadora adecuada para superar obstáculos importantes (talla superior a 150 mm de longitud total), todos barbos y bogas. Por tanto, las dimensiones de los estanques de la actual escala parecen ajustados al espectro de tallas de los peces del Gargantafría y del Viar aguas abajo de su unión con este arroyo. No obstante, esta situación cambiará previsiblemente con el llenado del embalse de Los Melonares. La composición de la comunidad se alterará en detrimento de las especies pequeñas (calandinos especialmente), aumentará la proporción de exóticas, así como la talla media de los ciprínidos nativos, sobre todo la de los barbos. Es decir que en el futuro la escala debería ser útil a unas tallas marcadamente superiores a las existentes hoy en día, probablemente dominadas por grandes barbos.

LA ESCALA DEL AZUD DE GARGANTAFRÍA

El proyecto de escala para peces del azud de Gargantafría debe permeabilizar este obstáculo y permitir los desplazamientos reproductivos de la ictiofauna aguas arriba a través del arroyo del mismo nombre. En la fase actual este dispositivo de paso para peces está diseñado como de estanques sucesivos con escotaduras verticales y deflectores. En principio este planteamiento es el más apropiado para el tipo de ictiofauna que habita en la zona. En este apartado se profundiza en el diseño de la escala y se plantean algunas posibles soluciones a los principales problemas

BIBLIOGRAFÍA

- AARESTRUP, K y N. JEPSEN. 1998. Spawning migration of sea trout (*Salmo trutta* (L)) in a Danish river. *Hydrobiologia*, 371/372: 275-281.
- CLAY, C. H. 1995. Design of fishways and other fish facilities. 2nd Ed. Lewis Publishers. 248 pp.
- Elvira, B., G. G. NICOLA y A. Almodovar. 1998. *Sistemas de paso para peces en presas*. Monografías CEDEX. Ministerio de Fomento, Madrid.
- ELVIRA, B., G. G. NICOLA, A. ALMODOVAR, I. DOADRIO, A. PERDICES y J. C. VELASCO. 1995. *Impacto de las obras hidráulicas en la ictiofauna y análisis de viabilidad de algunas medidas correctoras*. Convenio ICONA-Universidad Complutense. Madrid.
- GARCÍA DE JALÓN, D., M. MAYO, F. HERVELLA, E. BARCELÓ y T. FERNÁNDEZ. 1993. *Principios y técnicas de gestión de la pesca en aguas continentales*. Ediciones Mundi Prensa, Madrid.
- GORDON, N. D., T. A. MCMAHON y B. L. FINLAYSON. 1992. *Stream hydrology. An introduction for ecologists*. Wiley, Chichester.
- GOWANS, A. R. D., J. D. ARMSTRONG y I. G. PRIEDE. 1999. Movements of adult Atlantic salmon in relation to a hydroelectric dam and fish ladder. *J. Fish Biol.*, 54: 713-726.
- GRANADO, C y J. PRENDA. 1991. La conservación de los ríos y la construcción de embalses. *Quercus*, 64: 30-35.
- GRANADO, C., A. RODRÍGUEZ, L. ENCINA, C. ESCOT, E. MELLADO y J. PRENDA. 2000. *Ecología del alto Guadalete. Bases para su conservación*. COPT, Dirección General de Obras Hidráulicas, Sevilla.
- HERSKIN, J. y J. F. STEFFENSEN. 1998. Energy savings in sea bass swimming in a school: measurements of tail beat frequency and oxygen consumption at different swimming speeds. *J. Fish Biol.*, 53: 366-376.
- KARISCH, S. E. 1994. A simulation study of fishway design: an example of simulation in environmental problem solving. *J. Environ. Manag.*, 41: 67-77.
- KIM, J. H. 2001. Hydraulic characteristics by weir type in a pool-weir fishway. *Ecol. Eng.*, 16: 425-433.
- LINNIK, V. D., L. K. MALININ, M. WOZNIEWSKI, R. SYCH y P. DEMBOWSKI. 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.
- LUCAS, M. C., T. MERCER, J. D. ARMSTRONG, S. MCGINTY y P. RYCROFT. 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. *Fish. Res.*, 44: 183-191.
- NØTTESTAD, L., J. GISKE, J. C. HOLST y G. HUSE. 1999. A length-based hypothesis for feeding migrations in pelagic fish. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 56: 26-34.
- PEAKE, S., R. S. MCKINLEY y D. A. SCRUTON. 1997. Swimming performance of various freshwater salmonids relative to habitat selection and fishway design. *J. Fish Biol.*, 51: 710-723.
- PRENDA, J. 1993. *Uso del hábitat en algunas poblaciones de animales acuáticos de un río del sur de España. Influencia de las interacciones bióticas*. Tesis Doctoral. Universidad de Sevilla.
- RIVINOJA, P. S. MCKINNELL y H. LUNDEVIST. 2001. Hindrances to upstream migration of Atlantic salmon (*Salmo salar*) in a northern Swedish river caused by a hydroelectric power-station. *Regul. Rivers: Res. Mgmt.*, 17: 101-115.
- RODRÍGUEZ, A. y C. GRANADO. 1992. Spawning period and migration of three species of cyprinids in a stream with Mediterranean regimen (SW Spain). *J. Fish Biol.*, 41: 545-556.
- SCHMUTZ, S., C. GIEFING y C. WIESNER. 1998. The efficiency of a nature-like bypass channel for pike-perch (*Stizostedion luciperca*) in the Marchfeldkanalsystem. *Hydrobiologia*, 371/372: 355-360.
- STUART, I. G. y M. MALLEEN-COOPER. 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. *Regul. Rivers: Res. Mgmt.*, 15: 575-590.
- WEBB, P. W. 1975. Hydrodynamics and energetics of fish propulsion. *Bull. Fish. Res. Board Can.*, 190: 1-158.