



8º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

La **Ciencia forestal** y su contribución a  
los **Objetivos de Desarrollo Sostenible**



8CFE

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales

**Cataluña | Catalunya - 27 junio | juny - 1 julio | juliol 2022**

**ISBN 978-84-941695-6-4**

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

---

Organiza



## Estudio de costes constructivos en escalas de estanques sucesivos: comparativa entre sistemas de hendidura vertical frente a vertederos sumergidos con orificio de fondo

SAIZ ROJO A.<sup>1, 2</sup>, SANZ-RONDA, FCO. JAVIER<sup>2</sup>

<sup>1</sup> E.T.S. Ingenierías Agrarias de Palencia. Dpto. de Ingeniería Agrícola y Forestal (Universidad de Valladolid)

<sup>2</sup> ZENIT Ingeniería y Consultoría SLP

### Resumen

La presencia de obstáculos en los cauces supone un impacto para muchas especies de peces que requieren desplazamientos longitudinales para completar sus ciclos vitales. Estos obstáculos dificultan el movimiento de los peces, impidiendo fases tan importantes de su desarrollo como la reproducción. Como medida correctora para este tipo de impactos, destaca la construcción de pasos para peces que permiten salvar barreras artificiales a distintas especies ictícolas. Entre ellos, las escalas para peces de estanques sucesivos son los sistemas más empleados en la actualidad, destacando dos tipologías: escalas de hendidura vertical (HV) y escalas de vertederos sumergidos con orificio de fondo (VSOF). Ambas soluciones permiten el ascenso de los peces de manera notable y muy similar, y se han empleado de forma indistinta en todas las regiones de España. Sin embargo, actualmente, no se dispone de datos concretos o indicadores que permitan conocer las diferencias técnico-económicas como elemento decisivo en la selección del tipo de paso más eficiente. Este trabajo analiza los costes constructivos o las necesidades de espacio para ambas tipologías de paso para peces, con el propósito de ofrecer una herramienta decisoria más al resto de variables técnicas de este tipo de actuaciones. Las escalas VSOF presentan costes constructivos un 10-20% menores que las HV para desniveles y caudales de diseño habituales, y permiten una mayor plasticidad en obra debido a su mayor rango de pendientes admisible. No obstante, el criterio económico y constructivo es un condicionante más en la toma de decisiones y ésta debe regirse también por la eficiencia en el ascenso para los peces y el mantenimiento que requieren.

### Palabras clave

Permeabilidad fluvial, conectividad longitudinal, pasos para peces, hendidura vertical, vertedero sumergido, estudio de costes, construcción, ecosistemas acuáticos.

### 1. Introducción

Uno de los principales impactos que afectan a las especies de peces de agua dulce consiste en la falta de permeabilidad longitudinal (NISSON et al., 2005). La presencia de obstáculos transversales al cauce supone en muchos casos una barrera infranqueable para los peces, principalmente durante la época de reproducción, en la que su fenología les exige movimientos a lo largo del río en busca del medio adecuado para sus puestas (LUCAS et al., 2001; GARCÍA-VEGA et al. 2021).

Las escalas para peces suponen la principal medida correctora, o al menos mitigadora, en estos tramos fluviales (LARINIER, 2002). En función de su diseño, se favorecerá la permeabilidad longitudinal, facilitando al menos el paso de la especie-objetivo y ampliando el tramo fluvial disponible.

Uno de los aspectos más determinantes en el diseño de un paso para peces es establecer su tipología. Existen diferentes alternativas como las rampas de piedras, pasos de ralentizadores, escalas de estanques sucesivos, entre otros muchos (LARINIER, 2002; SANZ-RONDA et al.,

2013). Dentro de cada uno de estos grupos se han desarrollado distintos sistemas constructivos que pueden adaptarse a la problemática de cada caso y a los requerimientos de cada especie.

En el caso de los pasos de estanques sucesivos, los dos modelos más empleados a nivel mundial son las escalas de hendidura vertical (HV) y las escalas de vertederos sumergidos con orificio de fondo (VSOF) (VALBUENA-CASTRO et al., 2020). Ambas tipologías están muy estudiadas para las especies ibéricas (SANZ-RONDA et al., 2016; BRAVO-CÓRDOBA et al., 2021) y su funcionalidad es muy similar (BRAVO-CÓRDOBA et al., 2018; SANZ-RONDA et al., 2019).

Sin embargo, estos dos modelos presentan importantes diferencias constructivas que deben ser valoradas durante la fase de diseño teniendo en cuenta las particularidades de cada actuación. Las escalas de hendidura vertical presentan una mayor tolerancia a las variaciones de la cota del agua en el río, se obturan menos y permiten a los peces moverse por la profundidad deseada (LARINIER, 2002) aunque requieren, por lo general, un mayor caudal y mayor longitud de obra, debido a su menor pendiente (FUENTES-PÉREZ et al., 2017; LARINIER, 2002).

A nivel constructivo, ambas soluciones requieren una estructura similar, formada por un canal de hormigón, dividido en estanques rectangulares, comunicados a través de vertederos (Fig. 1). En el caso de las escalas de hendidura vertical, el vertido de agua entre estanques se realiza mediante una ranura vertical que abarca toda la altura del tabique. En el caso de las escalas de vertedero sumergido el vertido del caudal de diseño de la escala se realiza mediante dos elementos: un vertedero rectangular que permanece parcialmente sumergido y un orificio de fondo situado en el extremo opuesto del tabique de separación de los estanques (FUENTES-PÉREZ et al., 2017).

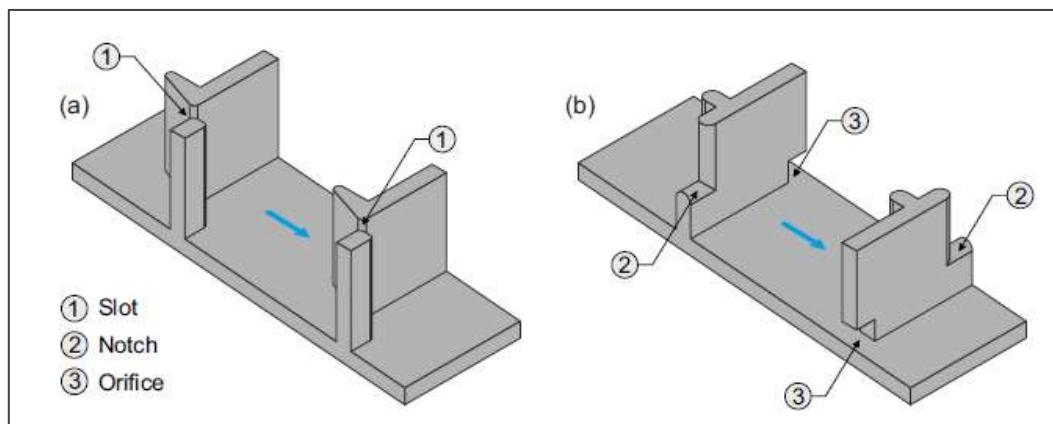


Figura 1 Esquema de una escala de estanques sucesivos a) y de vertederos sumergidos y orificios de fondo b) (slot = hendidura; notch = vertedero; orifice = orificio) (FUENTES-PÉREZ et al., 2017). Obsérvense las diferencias entre la comunicación entre estanques, a través de una hendidura vertical en a) y de un vertedero y un orificio de fondo en la esquina opuesta en b).

Estas diferencias entre ambos tipos de escalas de artesas afectan a diversas variables de su diseño como sus dimensiones y la diferencia de cota entre los estanques. Posteriormente, estas variables derivan en diferencias en la obra global como es la longitud total de la escala, la superficie de ocupación necesaria o el volumen de la obra finalmente requerido. Todo ello redundará en distintos costes económicos de la estructura y plazos de ejecución. Desde un punto de vista medioambiental, sobre la alteración en la ribera y el cauce fluvial, la superficie ocupada por la estructura puede suponer un mayor o menor impacto, tanto desde la afección en los márgenes como en el consumo de materiales.

Por todo ello, un estudio del volumen de obra requerido entre ambos sistemas y del coste presupuestario derivado puede suponer una herramienta decisoria más en la definición del paso para peces más adecuado en cada caso.

## 2. Objetivos

El objetivo de este trabajo es analizar las diferencias de los costes constructivos entre los sistemas de escalas de hendidura vertical y de vertederos sumergidos con orificio de fondo, con objeto de facilitar la toma de decisiones en la fase de selección entre ambas alternativas. Asimismo, se estudiarán otros indicadores como la superficie de ocupación entre ambos tipos de pasos para peces.

## 3. Metodología

Se ha realizado el cálculo y dimensionamiento de dos tipologías de escalas (HV y VSOF), dimensionadas para tres caudales diferentes: 280, 500 y 770 L/s y seis alturas del obstáculo: 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5 y 4 m (Tablas 1, 2 y 3). En total se han estudiado 36 actuaciones distintas que recogen la gran mayoría de situaciones que podemos encontrar en nuestros ríos (Valbuena-Castro et al., 2020).

*Tabla 1. Variables de longitud de escala, pendiente, potencia disipada y velocidad máxima para cada una de las opciones simuladas. En tabla 2 y 3 se incluyen dimensiones ( $\Delta H=0,2\text{ m}$  en HV y  $\Delta H=0,25\text{ m}$  en VSOF).*

Caudal (L/s)	Tipo de escala	Desnivel total (m)	Longitud escala (m)	Pendiente (%)	VPD (W/m <sup>3</sup> )	Vel. máxima (m/s)
280	HV	1,5	17,7	8,0	147,2	2,0
		2,0	22,7			
		2,5	30,2			
		3,0	35,2			
		3,5	42,7			
		4,0	47,7			
	VSOF	1,5	13,7	9,3	147,5	2,2
		2,0	19,1			
		2,5	24,5			
		3,0	29,9			
		3,5	35,3			
		4,0	40,7			
500	HV	1,5	22,6	6,3	147,1	2,0
		2,0	29			
		2,5	38,6			
		3,0	45,0			
		3,5	54,6			
		4,0	61,0			
	VSOF	1,5	16,2	7,8	150,8	2,2
		2,0	22,6			
		2,5	29,0			
		3,0	35,4			
		3,5	41,8			
		4,0	48,2			
770	HV	1,5	24,7	5,7	147,1	2,0
		2,0	31,7			
		2,5	42,2			
		3,0	49,2			
		3,5	59,7			
		4,0	66,7			

	VSOF	1,5	18,7	6,7	150,8	2,2
		2,0	26,1			
		2,5	33,5			
		3,0	40,9			
		3,5	48,3			
		4,0	55,7			

Tabla 2. Principales dimensiones empleadas para las simulaciones realizadas para los 3 caudales (280, 500 y 770 L/s) en las escalas de hendidura vertical (Espesor de tabiques ( $e$ ) = 0,20 m).

ESCALA	Caudal (L/s)	Estanque tipo			Vertedero (m)	Desnivel entre estanques (m)
		Longitud (m)	Anchura (m)	Profundidad (m)		
HV	280	2,3	1,8	1,2	0,2	0,2
	500	3,0	2,1	1,4	0,3	0,2
	770	3,0	2,1	1,5	0,4	0,2

Tabla 3. Principales dimensiones empleadas para las simulaciones realizadas para los 3 caudales (280, 500 y 770 L/s) en las escalas de vertedero sumergido y orificio de fondo (Espesor de tabiques ( $e$ ) = 0,20 m).

ESCALA	Caudal (L/s)	Estanque tipo			Vertedero (m)	Desnivel entre estanques (m)	Superficie orificio de fondo (m <sup>2</sup> )
		Longitud (m)	Anchura (m)	Profundidad (m)			
VSOF	280	2,5	1,55	1,6	0,25	0,25	0,04
	500	3,0	2,1	1,6	0,35	0,25	0,09
	770	3,0	2,1	1,7	0,50	0,25	0,16

En el diseño geométrico e hidráulico de las escalas se han empleado criterios equivalentes, con objeto de que las soluciones sean comparables entre sí. La energía disipada por unidad de volumen (VPD) se ha establecido en torno a 150 W/m<sup>3</sup>, valor recomendable tanto para ciprínidos reófilos como salmonídos. La diferencia de cota entre los estanques se ha definido en 0,2 cm para las de hendidura vertical y de 0,25 cm para las de vertedero sumergido. El desnivel entre estanques se ha fijado en 0,2 m para las escalas de hendidura vertical y en 0,25 m para las de vertedero sumergido (Véase tablas 2 y 3), siguiendo las recomendaciones de diseño habituales para nuestras especies más significativas (LARINIER, 2002; BRAVO-CÓRDOBA et al., 2021). A nivel geométrico, se han definido estanques de planta rectangular distribuidos en dos filas de estanques paralelos y de dirección opuesta, aprovechando uno de los muros cajeros para ambas líneas de estanques (cajero intermedio) (Figuras 2 y 3). Con objeto de homogeneizar las soluciones, en la línea de estanques más alta se han incluido al menos dos estanque más que en la línea baja. La transición entre ambas líneas consiste en un estanque de giro de 180°, de trazado horizontal, con una longitud de al menos la anchura de los estanques (Figura 2).

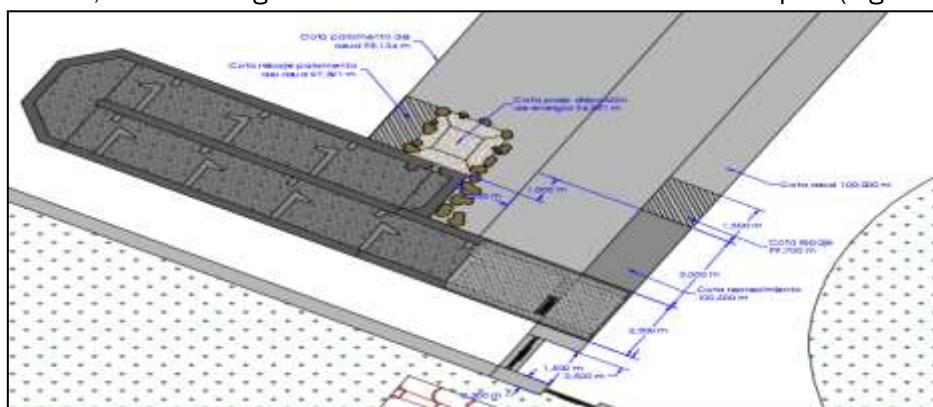


Figura 2. Plano de planta de una escala para peces situada en el río Arlanzón en la ciudad de Burgos, con un estanque de cambio de dirección de 180° con esquinas achaflanadas (a).



Figura 3. Ejemplo de escala para peces de hendidura vertical con un estanque de cambio de dirección de 180° con esquinas achaflanadas, situada en el río Arlanzón en ciudad de Burgos (Misma escala que la de la figura 2).

Una vez calculadas las dimensiones de cada uno de los elementos de la escala, se ha procedido a estimar su coste, distribuyéndolo de acuerdo al índice habitual del documento de presupuesto de un proyecto técnico (Véase tabla 4).

Tabla 4. Distribución de capítulos y unidades principales del contenido de un presupuesto de escala para peces.

Nº	CAPÍTULO	SUBCAPÍTULO	CONTENIDO / UNIDAD DE EJECUCIÓN
1	Trabajos previos y ataguía	Trabajos previos	Roza, desbroce y recogida de restos vegetales.
		Acceso temporal a obra	Movimiento de tierras (desmonte y terraplén) y capa granular para el acceso a obra.
		Ataguía	Construcción y retirada de ataguía y bombeo de agua durante la ejecución.
2	Escala	Estructura	Cimiento, losa, cajeros laterales y tabiques transversales.
		Cuenco amortiguador	Excavación y construcción del cuenco amortiguador.
		Acondicionamiento del azud	Demolición y construcción del primer vertedero.
		Actuaciones complementarias	Compuertas, barreras deflectoras, estructuras auxiliares de acceso peatonal, solera de grava, escollera de roca y plantaciones en el entorno.
3	Seguridad y salud	--	Partida de seguridad y salud en la obra.
4	Gestión de residuos	--	Partida de gestión de residuos generados durante la obra.
5	Varios	--	Partida para ajustes hidráulicos.

La definición de cada una de las unidades de obra se ha realizado empleando criterios objetivos y de carácter general y aplicando el criterio de situación más desfavorable.

En los trabajos previos se ha previsto un clareo previo con una carga de trabajo muy alta, el desbroce y despeje de la vegetación herbácea y la retirada de la tierra vegetal a una distancia de 20 m. También se ha incluido la recogida, saca y apilado de residuos de rozas y desbroces y su posterior gestión con una densidad igual o superior a 8-15 t/ha.

En las labores de construcción de un acceso temporal se ha incluido la excavación en desmonte y el transporte a terraplén a una distancia de 200 m, así como un terraplén para el vial de acceso a la zona de obra y la construcción de una capa granular de 5-10 cm de espesor de zahorra con un material de 25 mm de tamaño máximo.

La construcción de la ataguía se ha previsto mediante la ejecución de un terraplén perimetral a la zona de actuación en el cauce y en la ribera, con una anchura en coronación de 3 m, que pueda permitir el tránsito seguro del personal y de la maquinaria de obra alrededor de la escala.

En cuanto a la estructura, en el cimiento se ha empleado una capa previa de hormigón no estructural como capa de "limpieza" y posteriormente se ha utilizado hormigón ciclópeo elaborado "in situ". El resto de la estructura se ha previsto en hormigón armado HA-25 elaborado en planta a una distancia máxima de 20 km. Se ha empleado acero corrugado B-500S con una dotación prevista de 100 kg/m<sup>3</sup> para las losas y los muros cajeros y de 60 kg/m<sup>3</sup> para los tabiques interiores. Como elemento de unión entre la losa y el relleno de hormigón ciclópeo (o en su caso la roca donde se pueda asentar la estructura) se han previsto líneas de taladros de 30 cm de profundidad (1 línea bajo cada cajero con un taladro cada 25 cm) en los que se colocan barras de acero corrugado de 12 mm de diámetro sellados con resina de alta resistencia. Los 20 cm superiores de estas barras posteriormente se integran en la armadura de las losas consiguiendo una completa unión entre la estructura y el cimiento. Las losas y los muros cajeros se han establecido con un espesor de 30 cm y los tabiques transversales así como los deflectores se han previsto con un espesor de 20 cm.

Se ha considerado la ejecución de cuenco amortiguador situado en el acceso de los peces a la escala (Figura 2) (SANZ-RONDA et al., 2013), se ha dimensionado, mayorando un 25 % el tamaño de los estanques de la escala.

Las unidades de actuaciones complementarias han incluido la instalación de una compuerta metálica para el control del caudal en la escala, la construcción de una estructura metálica formada por una plataforma horizontal (tipo tramex o equivalente) para el acceso peatonal a la compuerta en el estanque superior y la instalación de pates de acceso a dos estanques. También se ha previsto la instalación de un manto de escollera en el lateral de la escala que linda con el cauce y la plantación árboles y arbustos como medida de integración natural y paisajística. Por último se ha incluido la cubrición de todo el "lecho" de la escala con una solera de grava natural embebida en el hormigón de la losa.

La partida de seguridad y salud de la obra se ha estimado como un 1,75 % del presupuesto de la obra. El coste de la gestión de los residuos generados durante la obra se ha estimado con un 2,0 % del presupuesto y se ha incluido por último una partida de ajustes hidráulicos común para todas las simulaciones. Esto consiste en ajustar los niveles de agua en el interior de los estanques, manipulando la compuerta de alimentación y el vertedero de entrada de peces, para conseguir las condiciones hidráulicas óptimas en la escala.

Basándose en el criterio de cumplir los requerimientos de la situación más desfavorable, y con objeto de aumentar el margen de seguridad de la obra, las mediciones resultantes se han redondeado por arriba y empleando la unidad mínima de 10 cm. Esto asegura su viabilidad en la ejecución, adaptando las medidas a los requerimientos prácticos de la obra como son las dimensiones de los encofrados, o el nivel de detalle que puede alcanzarse en este tipo de obra.

Por otra parte, existe un riesgo de subjetividad en los precios empleados en las simulaciones, que puede proceder de la localización de las actuaciones o de los suministradores consultados. Por ello, con objeto de ser lo más objetivo posible, se ha empleado una base de precios aplicable a nivel nacional y que sirve de referencia a gran cantidad de este tipo de obras, como es la tarifa de la empresa pública TRAGSA (TRAGSA, 2020), del año 2020.

Los datos de costes que se aportan en el presente artículo consisten en el presupuesto de ejecución material de la obra, al que se le añaden el 16 % de gastos generales, el 6 % de beneficio industrial para la empresa constructora y el 21 % del actual impuesto de valor añadido (IVA).

#### 4. Resultados

##### 4.1. Diferencias de coste de inversión

En el caso de las escalas de HV el coste medio de inversión unitario por metro de desnivel se estima entre 40.316,5 €/m para un caudal de 280 L/s y 62.972,1 €/m para un caudal de 770 L/s. En el caso de las escalas VSOF el coste de inversión asciende a una media de 35.947,2 €/m para un caudal de 280 L/s y 56.840,2 €/m para un caudal de 770 L/s (Véase tabla 5).

Tabla 5. Coste de inversión en euros, por metro de desnivel para escalas de HV y de VSOF para caudales de 280, 500 y 770 L/s.

Diferencia de cota (m)	Coste de escala de HV (€/m)			Coste escala de VSOF (€/m)		
	Q: 280 L/s	Q: 500 L/s	Q: 770 L/s	Q: 280 L/s	Q: 500 L/s	Q: 770 L/s
1.5	43642,5	56415,7	66794,2	38797,7	48991,6	60168,2
2.0	39543,4	51610,1	61181,2	36050,3	45881,5	56590,3
2.5	39345,1	51862,2	61546,9	35008,1	44801,7	55440,7
3.0	38370,2	50821,6	60317,2	34833,3	44761,3	55052,0
3.5	40476,1	53874,3	63888,3	35167,0	45314,9	56279,6
4.0	40522,0	54064,8	64104,7	35826,8	46262,7	57510,7
MEDIA	40316,5	53108,1	62972,1	35947,2	46002,3	56840,2

En cuanto al coste total de la inversión es mayor en las escalas de HV, variando las diferencias entre ambas tipologías con un valor medio del 12,2 % para un caudal de 280 L/s, del 15,5 % para un caudal de 500 L/s y del 10,8 % para 770 L/s. La media global de todas las simulaciones realizadas es del 12,8 % (Véase tablas 6 y 7).

En las simulaciones realizadas, se ha obtenido que el coste de construcción de una escala para peces de hendidura vertical es superior al de escalas de vertedero sumergido y orificio de fondo. Tanto el caudal de diseño como el desnivel del obstáculo a superar, influyen de manera notable en el presupuesto final de la escala en ambos sistemas. Sin embargo, las diferencias porcentuales entre ambos sistemas (HV y VSOF) no se trasladan de forma proporcional con estas dos variables (caudal y altura a superar).

Tabla 6. Coste total de inversión, en euros, para escalas de HV y de VSOF para caudales de 280, 500 y 770 L/s y diferencias entre sí (El porcentaje de la diferencia está calculado tomando como referencia el valor menor, en este caso el presupuesto de la escala VSOF: % Diferencia = ( $\text{€ Escala HV} - \text{€ Escala VSOF}$ ) / ( $\text{€ Escala VSOF}$ )).

VARIABLES		INVERSIÓN (€)		DIFERENCIA INVERSIÓN	
Q (L/s)	H (m)	Escala de HV	Escala de VSOF	EUROS (€)	(%)
280	1,5	65463,7	58196,6	7267,1	12,5%
280	2,0	79086,8	72100,6	6986,2	9,7%
280	2,5	98362,8	87520,3	10842,6	12,4%
280	3,0	115110,5	104490,0	10610,5	10,2%
280	3,5	141666,4	123084,5	18582,0	15,1%
280	4,0	162088,0	143307,3	18780,7	13,1%
500	1,5	84623,6	73487,3	11136,3	15,2%
500	2,0	103220,2	91763,0	11457,2	12,5%
500	2,5	129655,5	112004,9	17651,4	15,7%
500	3,0	152464,8	134283,8	18181,0	13,5%
500	3,5	188560,1	158602,3	29957,8	18,9%
500	4,0	216259,4	185050,7	31208,7	16,9%
770	1,5	100191,3	90252,2	9939,1	11,0%
770	2,0	122362,5	113180,5	9182,0	8,1%
770	2,5	153867,2	138601,9	15265,3	11,0%
770	3,0	180951,7	165156,0	15795,7	9,6%
770	3,5	223608,9	196978,4	26630,5	13,5%
770	4,0	256418,8	230042,7	26376,2	11,5%

El coste de construcción es siempre superior en el caso de las escalas de HV respecto a las escalas VSOF. Sin embargo, las mayores diferencias se producen en las simulaciones con caudales intermedios de 500 L/s, oscilando entre un 12,5 y un 18,9 % de diferencia (Véase tabla 6 y figuras 4 y 5).

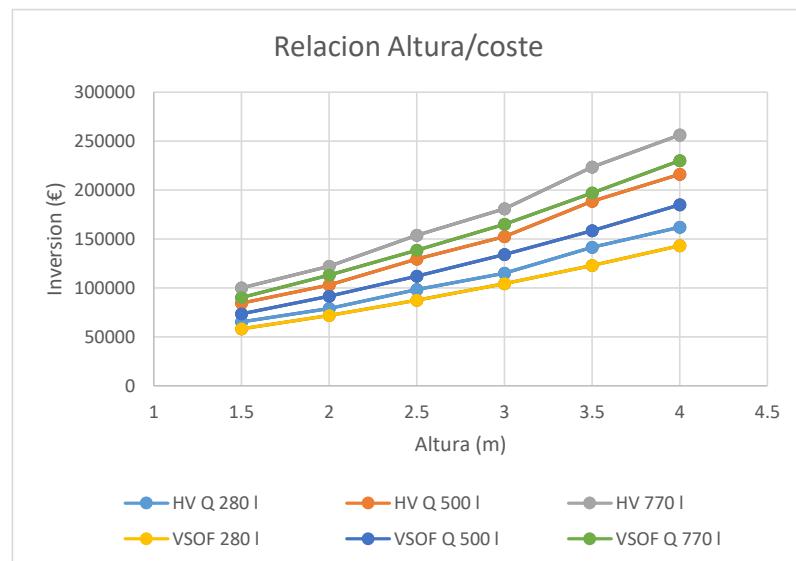


Figura 4. Relación entre la diferencia de cota (m) y el coste total de inversión en euros.

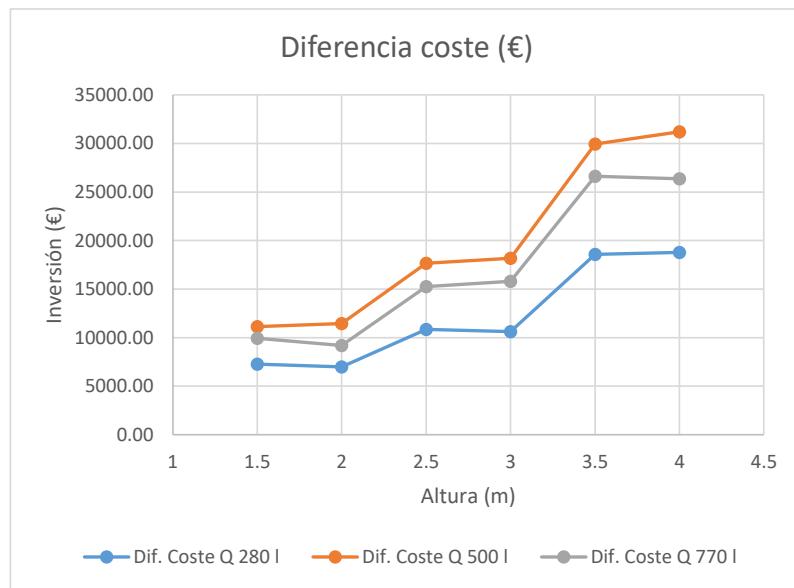


Figura 5. Relación de diferencia de coste total entre la solución de escala de HV y de VSOF para diferencias de cota entre 1,5 y 4 m.

Desglosando las diferencias por capítulos de ejecución (Véase tabla 3), las principales diferencias de inversión entre ambas soluciones técnicas se producen en las partidas de “excavación y cimiento”, “construcción de la losa” y “construcción de los tabiques”. En el caso de una escala diseñada para un caudal de 280 L/s la diferencia económica media es del 28,7 % más en HV que en VSOF en la partida de excavación y cimiento, del 31,3 % para la construcción de la losa y del 36,7 % para la construcción de los tabiques que separan cada una de las artesas (Véase tabla 4).

Tabla 7. Diferencias del coste de inversión, en porcentaje, entre escalas de HV y de VSOF para diferencias de cota entre 1,5 y 4 m y un caudal de 280 L/s para cada una de las partidas presupuestarias. (El porcentaje de la diferencia está calculado tomando como referencia el valor del presupuesto de la escala VSOF:  

$$\% \text{ Diferencia} = (\text{€ Escala HV} - \text{€ Escala VSOF}) / (\text{€ Escala VSOF}).$$

Altura (m)	Diferencias de coste (%) en cada una de las unidades de ejecución							
	Trabajos Previos	Excavación y cimiento	Losa	Cajeros	Tabiques	Cuenco	Otras Actuaciones	TOTAL
1,5	16,0%	33,4%	38,1%	2,9%	41,9%	3,4%	3,5%	12,4%
2,0	12,7%	26,3%	28,8%	-1,2%	33,4%	3,4%	2,5%	9,7%
2,5	11,9%	30,6%	34,0%	-1,1%	39,0%	3,4%	6,1%	12,4%
3,0	9,6%	26,2%	28,4%	-3,7%	33,8%	3,4%	5,1%	10,2%
3,5	16,0%	29,6%	30,9%	3,5%	37,8%	3,4%	5,3%	15,1%
4,0	13,9%	26,3%	27,2%	1,1%	34,0%	3,4%	4,4%	13,1%
MEDIA	13,3%	28,7%	31,2%	0,3%	36,7%	3,4%	4,5%	12,2%
MIN	9,6%	26,2%	27,2%	-3,7%	33,4%	3,4%	2,5%	9,7%
MAX	16,0%	33,4%	38,1%	3,5%	41,9%	3,4%	6,1%	15,3%
RANGO	6,4%	7,2%	10,9%	7,3%	8,5%	0,00%	3,6%	5,4%

NOTA: No se han incluido las partidas en las que no se producen diferencias.

En el caso de la comparación de las simulaciones realizadas en escalas de 500 y 770 L/s, las partidas con mayor diferencia continúan siendo las mismas, la “excavación y cimiento”, la construcción de la losa y la ejecución de los tabiques. En el caso de la escala para 550 L/s, las diferencias medias son de 23,2 %, 27,4 % y 35,1 % respectivamente (Véase tabla 8).

*Tabla 8. Diferencias del coste de inversión, en porcentaje, entre escalas de HV y de VSOF para diferencias de cota entre 1,5 y 4 m y un caudal de 500 L/s para cada una de las partidas presupuestarias. (El porcentaje de la diferencia en cada partida está calculado tomando como referencia el valor del presupuesto de la escala VSOF:*

$$\% \text{ Diferencia} = (\text{€ Escala HV} - \text{€ Escala VSOF}) / (\text{€ Escala VSOF}).$$

Altura (m)	Diferencias de coste (%) en cada una de las unidades de ejecución						
	Trabajos Previos	Excavación y cimiento	Losa	Cajeros	Tabiques	Otras Actuaciones	TOTAL
1,5	16,1%	26,4%	32,0%	11,4%	40,4%	6,8%	15,2%
2,0	13,7%	20,2%	24,3%	8,0%	31,9%	5,9%	12,4%
2,5	13,9%	25,0%	30,1%	8,8%	37,5%	10,6%	15,8%
3,0	12,2%	21,2%	25,2%	6,3%	32,3%	9,6%	13,5%
3,5	19,5%	24,7%	28,1%	14,6%	36,2%	10,0%	18,9%
4,0	17,7%	21,8%	24,6%	12,1%	32,5%	9,2%	16,9%
MEDIA	15,5%	23,2%	27,4%	10,2%	35,1%	8,7%	15,5%
MIN	12,2%	20,2%	24,3%	6,3%	31,9%	5,9%	12,4%
MAX	19,5%	26,4%	32,0%	14,6%	40,4%	10,6%	18,9%
RANGO	7,3%	6,3%	7,8%	8,4%	8,4%	4,7%	6,4%

NOTA: No se han incluido las partidas en las que no se producen diferencias. En la partida del cuenco amortiguador no hay diferencia de coste, dado que las dimensiones coinciden en este caso entre ambas tipologías. Se ha estimado un cuenco de dimensiones equivalentes en ambos casos (Tamaño de cuenco: un 25 % mayor que los estanques).

Por último, para el caso de un escala diseñada para 770 L/s, las diferencias en la inversión de las partidas más representativas son proporcionalmente menores, con un 17,7 % en el caso de la partida de “Excavación y cimiento”, del 21,3 % para la construcción de la losa y del 18,9 % para la construcción de los tabiques (Véase tabla 9).

*Tabla 9. Diferencias del coste de inversión, en porcentaje, entre escalas de HV y de VSOF para diferencias de cota entre 1,5 y 4 m y un caudal de 770 L/s para cada una de las partidas presupuestarias. (El porcentaje de la diferencia en cada partida está calculado tomando como referencia el valor del presupuesto de la escala VSOF:*

$$\% \text{ Diferencia} = (\text{€ Escala HV} - \text{€ Escala VSOF}) / (\text{€ Escala VSOF}).$$

Altura (m)	Diferencias de coste (%) en cada una de las unidades de ejecución							
	Trabajos Previos	Excavación y cimiento	Losa	Cajeros	Tabiques	Cuenco	Otras Actuaciones	TOTAL
1,5	12,0%	21,2%	26,2%	6,5%	23,7%	-3,1%	5,2%	11,0%
2,0	9,4%	15,0%	18,5%	3,3%	16,2%	-3,1%	3,9%	8,1%
2,5	9,4%	19,4%	23,78%	3,8%	20,9%	-3,1%	8,5%	11,0%
3,0	11,9%	15,6%	19,0%	1,4%	16,4%	-3,1%	8,1%	9,7%
3,5	14,3%	18,8%	21,7%	9,0%	19,8%	-3,1%	7,4%	13,5%
4,0	12,4%	16,0%	18,4%	6,7%	16,5%	-3,1%	6,4%	11,5%
MEDIA	11,6%	17,7%	21,3%	5,1%	18,9%	-3,1%	6,6%	10,8%
MIN	9,4%	15,0%	18,4%	1,4%	16,2%	-3,1%	3,9%	8,1%

Altura (m)	Diferencias de coste (%) en cada una de las unidades de ejecución							
	Trabajos Previos	Excavación y cimiento	Losa	Cajeros	Tabiques	Cuenco	Otras Actuaciones	TOTAL
MAX	14,3%	21,2%	26,2%	9,0%	23,7%	-3,1%	8,5%	13,5%
RANGO	4,9%	6,2%	7,8%	7,7%	7,5%	0,0%	4,6%	5,4%

NOTA: No se han incluido las partidas en las que no se producen diferencias.

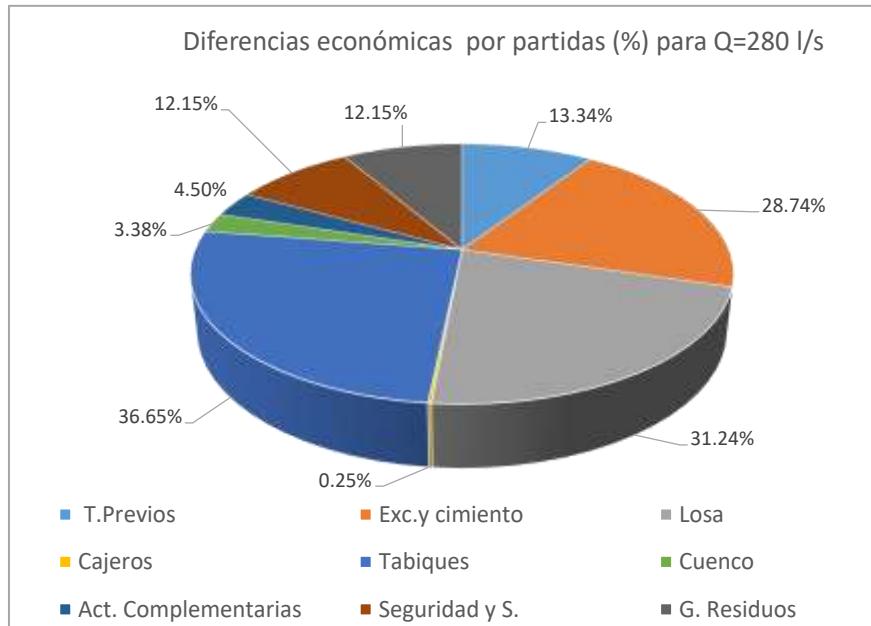


Figura 6. Diferencias económicas (en porcentaje) de las principales partidas entre una escala de HV y una escala de VSOF para una escala tipo con un caudal de diseño de 280 L/s.

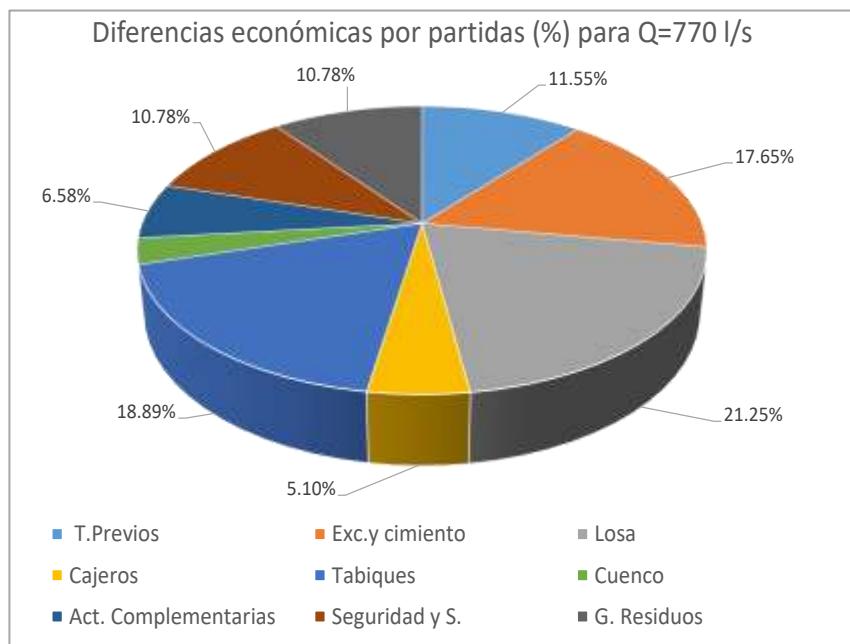


Figura 7. Diferencias económicas (en porcentaje) de las principales partidas entre una escala de HV y una escala de VSOF para una escala tipo con un caudal de diseño de 770 L/s.

## 4.2. Diferencias de la superficie necesaria

Otra variable que puede servir como herramienta decisoria es la superficie ocupada por cada tipo de escala para peces. En lugares con poco espacio disponible o que presentan condiciones complicadas de acceso y ejecución (inclinación de taludes, profundidad del cauce, etc.), puede requerirse el empleo de una tipología que exija una menor superficie.

La superficie mínima requerida depende entre otros aspectos de la diferencia de cota a salvar. En las simulaciones realizadas, las escalas de HV requieren menos superficie que las de VSOF. Las diferencias obtenidas han alcanzado el 22,8-29,3 % para un caudal de 280 L/s, entre un 19,9 y un 24,8 % para escalas de 500 L/s y entre el 17,8 y el 21,2 % para estructuras diseñadas con un caudal del 770 L/s (Véase tabla 10).

Tabla 10. Superficie ( $m^2$ ) ocupada por escalas de hendidura vertical (HV) y de vertedero sumergido con orificio de fondo (VSOF) y diferencia entre ambas en  $m^2$  y %.

Caudal (L/s)	Desnivel (m)	Superficie de ocupación		Diferencia	
		Escala HV ( $m^2$ )	Escala VSOF ( $m^2$ )	( $m^2$ )	(%)
280	1,5	55,4	39,2	16,3	29,3%
280	2,0	68,9	52,4	16,5	24,0%
280	2,5	89,9	65,6	24,3	27,0%
280	3,0	103,4	78,9	24,6	23,8%
280	3,5	122,9	92,1	30,9	25,1%
280	4,0	136,4	105,3	31,1	22,8%
500	1,5	77,3	58,1	19,2	24,8%
500	2,0	96,5	77,3	19,2	19,9%
500	2,5	126,3	96,5	29,8	23,6%
500	3,0	145,5	115,7	29,8	20,5%
500	3,5	173,3	134,9	38,4	22,2%
500	4,0	192,5	154,1	38,4	19,9%
770	1,5	97,0	76,4	20,6	21,2%
770	2,0	120,8	101,6	19,2	15,9%
770	2,5	157,5	126,7	30,8	19,6%
770	3,0	181,3	151,9	29,5	16,2%
770	3,5	216,0	177,0	38,9	18,0%
770	4,0	239,8	202,2	37,6	15,7%

Aunque la superficie de ocupación aumenta de forma constante (Véase figuras 8 y 9) al aumentar el desnivel de agua a salvar por la escala, las diferencias entre ambas tipologías aumentan de forma escalonada por cada metro en el incremento de dicho desnivel (Véase figura 9). Esto se produce debido a que cada metro de desnivel a salvar por parte de la escala aumenta la diferencia en el número de estanques entre ambas tipologías, lo que provoca un incremento escalonado de la diferencia en la superficie afectada.

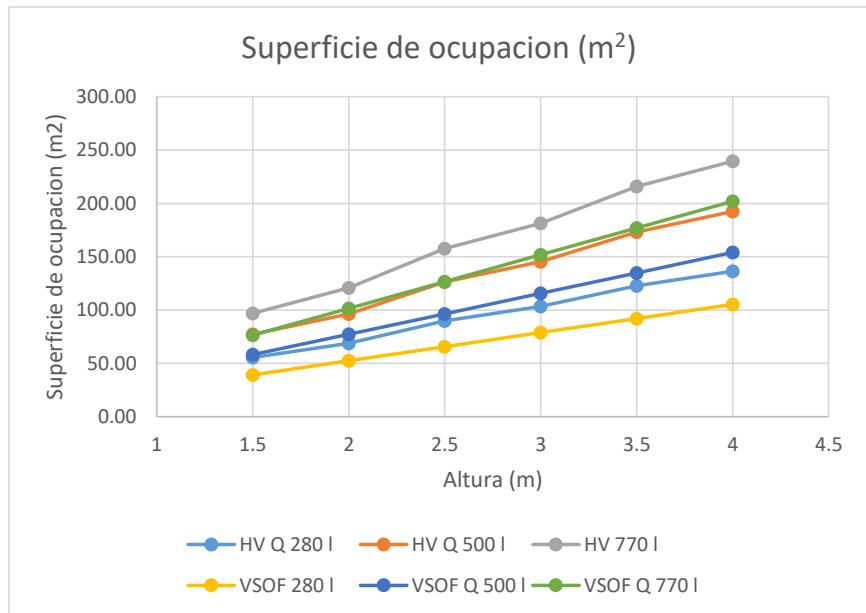


Figura 8. Superficie de ocupación estimada (en m<sup>2</sup>) de escalas de HV y de escalas de VSOF para caudales de diseño de 280, 500 y 770 L/s.

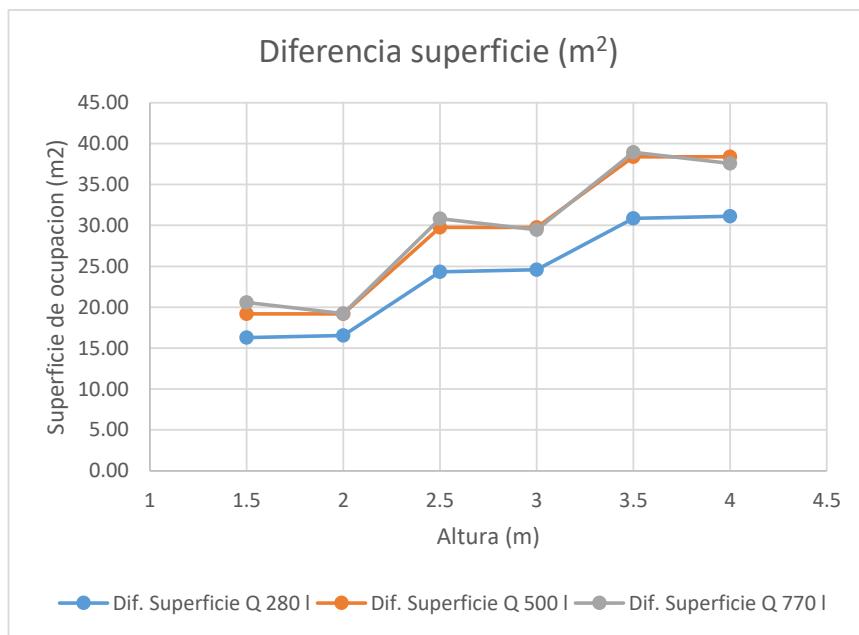


Figura 9. Diferencia de la superficie de ocupación estimada (en m<sup>2</sup>) de escalas de HV y de escalas de VSOF para caudales de diseño de 280, 500 y 770 L/s.

## 5. Discusión

Las dos tipologías de escalas para peces analizadas en el presente artículo presentan una eficiencia similar para el pasaje de las principales especies de peces migradores (p.e trucha, barbo y boga) de la península ibérica (BRAVO-CÓRDOBA et al., 2018, 2021; SANZ-RONDA et al., 2019). Cuando el criterio biológico es coincidente, resulta necesario analizar otros factores que puedan ayudarnos en la selección del mejor dispositivo. Entre ellos están los criterios

económicos y constructivos, importantes en la toma de decisiones y sobre los que versa el presente trabajo

Ambos sistemas de paso para peces requieren métodos constructivos similares, precisando de unidades de ejecución equivalentes. Tanto las escalas de HV como las de VSOF consisten en una secuencia de artesas o estanques sucesivos, construidos en hormigón con una forma rectangular en planta, en los que varían principalmente las dimensiones de los diferentes elementos.

De acuerdo a las simulaciones realizadas entre ambas tipologías para caudales de diseño de 280, 500 y 770 L/s las escalas de HV requieren una mayor inversión económica. Como valor medio, esta diferencia es del 12,8 % aunque puede alcanzar valores de hasta el 18,9 %. Aunque las dimensiones de los estanques sean menores que en el caso de los VSOF, tienen un mayor volumen de obra, dada su menor pendiente (FUENTES-PÉREZ et al., 2017; LARINIER, 2002).

La diferencia de inversión entre ambas alternativas puede suponer una herramienta decisoria entre las dos tipologías, que debe emplearse como una variable más en la fase de diseño, valorando de forma paralela otros aspectos técnicos y biológicos: caudal disponible, diferencias de caudal a lo largo de la temporada de freza, caudal mínimo, características de la especie ictícola objetivo, etc. En general, ambas tipologías ofrecen una eficiencia en el ascenso y tiempos de paso similares, aunque la motivación de los peces, expresada por el número de intentos de ascenso por unidad de tiempo, es ligeramente superior para las escalas del tipo HV (SANZ-RONDA et al., 2019; BRAVO-CÓRDOBA et al., 2021).

Además de todo ello, las diferencias en la inversión económica aportan otro indicador indirecto que corresponde con las necesidades de material y equipos. Dado que las escalas de VSOF requieren menos inversión, requerirán a su vez menos materiales. De acuerdo a las diferencias obtenidas por capítulos y unidades de ejecución, este tipo de escalas requieren una menor excavación y cimiento, así como un menor volumen de obra en la losa inferior y un menor volumen en los tabiques separadores de los estanques. Esta menor necesidad de materiales y maquinaria también puede ser una herramienta decisoria de interés en aquellas escalas situadas en zonas alejadas de puntos de suministro o de acceso difícil. Cabe destacar que, en estas situaciones, las diferencias en las necesidades de inversión serán mayores, siendo más altas en las escalas de HV. Asimismo, existirán mayores dificultades de ejecución de la obra y afectará a otros factores para tener en cuenta: el transporte y suministro de materiales, el tiempo de trabajo de la maquinaria o incluso el tipo de maquinaria a emplear. Si alguno de estos limitantes citados exige el empleo de maquinaria más pequeña, las diferencias de coste en la inversión aumentarán debido a su menor rendimiento unitario.

En cuanto a la superficie requerida por ambas tipologías, las escalas de VSOF exigen una menor superficie de ocupación frente a las escalas de HV. Estas diferencias alcanzan valores de entre el 17,8 y el 29,3 % en función del desnivel existente y el caudal de diseño. Esta variable favorece la elección de una escala de VSOF en aquellos lugares en los que la superficie o el acceso disponible sea un limitante, debiéndose valorar este aspecto en paralelo al resto de variables técnicas de diseño y funcionamiento.

Los costes unitarios y sus referencias relativas por metro de desnivel, tipología de escala y tamaño de ésta, son una indicación importante para la valoración rápida y directa de proyectos globales de mejora de la conectividad longitudinal. No obstante, se trata de unos valores máximos, pues provienen de una base de datos generalista, que seguro presenta diferencias en costes reales en función de la ubicación geográfica de la obra. Además, en muchos casos algunas unidades de obra pueden ser prescindibles (p.e. ataguías, cuenco amortiguador, plantaciones) y se pueden reducir en volumen o en coste.

Finalmente, volvemos a incidir en el hecho de que el coste de construcción debe ser un criterio más a la hora de acometer un paso para peces. En nuestro caso, el coste de VSOF es menor, pero probablemente las escalas de HV sean hoy en día una opción más interesante por motivos de un menor mantenimiento, mejor funcionamiento con oscilaciones de caudales importantes o del nivel de agua y mayor motivación de los peces al pasaje (SANZ-RONDA et al., 2019, VALBUENA-CASTRO et al., 2020, BRAVO-CÓRDOBA et al., 2021). No obstante, las limitaciones del espacio constructivo hacen que las escalas de VSOF, con mayores rangos de pendiente, puedan adaptarse mejor.

## 6. Conclusiones

- El coste unitario de inversión es menor en las escalas de VSOF, entre un 9,7 y un 18,9 %, en función del desnivel a salvar y el caudal de diseño.
- Las principales diferencias en el coste económico entre ambas tipologías se producen en las unidades de “excavación y cimiento”, en la construcción de la losa y en la construcción de los tabiques que separan los estanques sucesivos.
- La superficie requerida es menor en el caso de las escalas de VSOF, ocupando entre un 17,8 % y un 29,3 % menos de espacio, lo que favorece su ejecución en lugares con escasa superficie disponible o en los que el acceso a la zona de trabajo es un factor limitante.
- El coste de construcción debe ser un criterio más a la hora de acometer un paso para peces, aunque no el único ya que deben valorarse criterios de mantenimiento, mejor funcionamiento con oscilaciones de caudal, eficiencia y motivación de los peces en el pasaje, así como las particularidades específicas de cada proyecto.

## 7. Bibliografía

BRAVO-CÓRDOBA, F. J., VALBUENA-CASTRO, J., GARCÍA-VEGA, A., FUENTES-PÉREZ, J. F., RUIZ-LEGAZPI, J., & SANZ-RONDA, F. J. (2021). Fish passage assessment in stepped fishways: Passage success and transit time as standardized metrics. *Ecological Engineering*, 162, 106172.

BRAVO-CÓRDOBA, F. J., SANZ-RONDA, F. J., RUIZ-LEGAZPI, J., VALBUENA-CASTRO, J., & MAKRAKIS, S. (2018). Vertical slot versus submerged notch with bottom orifice: Looking for the best technical fishway type for Mediterranean barbels. *Ecological Engineering*, 122, 120-125.

GARCÍA-VEGA, A., FUENTES-PÉREZ, J.F., BRAVO-CÓRDOBA, F.J., RUIZ-LEGAZPI, J., VALBUENA-CASTRO. J., & SANZ-RONDA, F.J. (2021). Pre-reproductive movements of potamodromous cyprinids in the Iberian Peninsula: when environmental variability meets semipermeable barriers. *Hydrobiologia*, 1-22.

FUENTES-PÉREZ, J.F., GARCÍA-VEGA, A., SANZ-RONDA, F.J., MARTÍNEZ DE AZAGRA-PAREDES, A., 2017. Villemonte's approach: validation of a general method for modeling uniform and non-uniform performance in stepped fishways. *Knowl Manag Aquat Ecosyst* 418 (23), 11.

LARINIER, M. Pool fishways, pre-barrages and natural bypass channels. *Bull. Français Pêche Piscic.* 2002, 364, 54-82.

LUCAS, M.C.; BARAS, E.; THOM, T.J.; DUNCAN, A.; SLAVÍK, O. Migration of Freshwater Fishes; Blackwell Science: Oxford, UK, 2001; ISBN 0632057548.

NILSSON, C.; REIDY, C.A.; DYNESIUS, M.; REVENGA, C. Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems. *Science* 2005, 308, 405–408.

SANZ RONDA, F.J., BRAVO-CÓRDOBA, F. J., FUENTES, J., RUIZ LEGAZPI, A. GARCÍA VEGA, N. RAMOS, V. SALGADO-GONZÁLEZ, A. MARTÍNEZ DE AZAGRA. Pasos para peces: escalas y otros dispositivos de paso. Notas técnicas del CIREF, 7 (2013), p. 17.

SANZ RONDA, F.J., BRAVO-CÓRDOBA, F. J., FUENTES, J., & CASTRO-SANTOS, T. (2016). Ascent ability of *Salmo trutta*, and two iberian cyprinids -*Luciobarbus bocagei* and *Pseudochondrostoma duriense*- in a vertical slot fishway. *Knowledge and management of aquatic ecosystems*. (417), 10.

SANZ RONDA, F.J., BRAVO-CÓRDOBA, F. J., SÁNCHEZ-PÉREZ, A., GARCÍA-VEGA, A., VALBUENA-CASTRO, J., FERNANDES-CELESTINO, L., TORRALVA, M. & OLIVA-PATERNA, F. J. (2019) Passage Performance of Technical Pool-Type Fishways for Potamodromous Cyprinids: Novel Experiences in Semiarid Environments. *Water*, 11(11), 2362.

TRAGSA; 2020. Tarifas del Grupo Tragsa. Grupo Transformaciones Agrarias S.A.

VALBUENA-CASTRO, J., FUENTES-PÉREZ, J. F., GARCÍA-VEGA A., Bravo-CÓRDOBA, F. J., RUIZ-LEGAZPI, J., MARTÍNEZ DE AZAGRA PAREDES, A. M., & SANZ-RONDA, F. J. (2020). Coarse fishway assessment to prioritize retrofitting efforts: A case study in the Duero River basin. *Ecological Engineering*, 155, 105946.