

Estimación de costes en escalas para peces de estanques sucesivos. Modelo SECEP

Cost estimation for stepped fishway construction. SECEP model

Asier Saiz-Rojo 

Ana García-Vega 

Francisco J. Bravo-Córdoba 

Francisco J. Sanz-Ronda 

Centro Tecnológico ITAGRA CT, Palencia. España. asaiz@itagra.com

Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias, Universidad de Valladolid, Palencia. España. ana.garcia.vega@uva.es

Centro Tecnológico ITAGRA CT, Palencia. España. fjbravo@itagra.com

Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias, Universidad de Valladolid, Palencia. España. jsanz@uva.es

Autor de contacto: asaiz@itagra.com

RESUMEN

La normativa estatal obliga a los concesionarios de agua a mejorar la conectividad longitudinal de los ríos mediante la construcción de pasos para peces. Uno de los desafíos clave que se encuentran en la fase de planificación es la estimación del coste de ejecución de estos proyectos. Este trabajo presenta el modelo SECEP (*Sistema de Estimación de Costes de Escalas para Peces*) como herramienta para la valoración de costes constructivos de escalas de artesas de tipo hendidura vertical (HV) y de vertedero sumergido con orificio de fondo (VSOF). Los resultados del modelo SECEP se han validado con 30 proyectos reales. Además, se han realizado 36 simulaciones constructivas variando las dimensiones de la escala para peces (caudal y la altura). SECEP proporciona estimaciones de presupuestos rápidas y precisas ante diferentes situaciones, que pueden ser utilizadas para la planificación de actuaciones en la fase de proyecto básico.

Palabras clave: continuidad fluvial; pasos para peces; escalas de artesas; estudio de costes; presupuesto de ejecución material.

ABSTRACT

National regulations require water concessionaires to enhance the longitudinal connectivity of rivers through the construction of fish passes. A key challenge in the planning phase is accurately estimating the execution costs of these projects. This work introduces the SECEP model (*Cost Estimation System for Fishways*) as a tool for assessing construction costs of stepped fishways, specifically vertical slot (HV) and submerged weirs with bottom orifice (VSOF). The SECEP model has been validated against 30 real projects, demonstrating its effectiveness. Additionally, 36 construction simulations were conducted, varying the dimensions of the fishways (flow and height). SECEP offers quick and precise budget estimates for various scenarios, facilitating planning efforts in the basic project phase.

Keywords: river connectivity; fish passes; stepped fishways; cost study; material execution budget.

1. INTRODUCCIÓN

Los ríos y arroyos son ecosistemas de gran fragilidad sometidos frecuentemente a multitud de impactos: modificaciones hidromorfológicas, alteraciones físico-químicas de la calidad del agua, reducción de la conectividad lateral, destrucción de la vegetación de ribera, variación del régimen de caudales o pérdida de la conectividad longitudinal entre otros [1, 2]. Todos ellos, de forma aislada o sinérgica, provocan un impacto directo sobre las comunidades faunísticas vinculadas con el entorno fluvial [3, 4]. Los peces son uno de los grupos más vulnerables, debido a su menor capacidad de adaptación y de movilidad [5, 6]. Entre los impactos más preocupantes para la ictiofauna destaca la pérdida de conectividad longitudinal producida por la presencia de obstáculos no franqueables (azudes y presas), especialmente en especies migradoras que requieren movimientos periódicos para completar su ciclo vital [7, 8].

Durante las últimas décadas, al amparo de la Directiva Marco del Agua 2000/60/CE en el caso de la UE, los gobiernos, ONGs e iniciativas privadas han implementado acciones para mejorar la conectividad longitudinal de los ríos. La opción más eficaz consiste en la eliminación (demolición) del obstáculo [9, 10]. Sin embargo, esto no siempre es posible, ya sea porque el aprovechamiento tiene una concesión vigente o por motivos históricos o afectivos [11, 12]. En esos casos, la construcción de un paso para peces es la alternativa más viable [13]. Un paso para peces es un dispositivo que permite la migración de los peces conectando ambos lados de un obstáculo en un río. La elección del tipo, su diseño y dimensionamiento requiere un completo estudio que exige la definición de variables como la especie objetivo, el caudal de funcionamiento o la localización de la estructura, entre otros [13, 14]. Para tener éxito, se debe seleccionar el sistema de paso más adecuado técnica y ambientalmente, asegurando su viabilidad en la ejecución, así como el cumplimiento del plazo y del presupuesto disponible.

Uno de los tipos de pasos para peces más empleados son las escalas de estanques sucesivos o de artesas [15, 16]. Consisten en una secuencia de estanques consecutivos, conectados mediante vertederos que salvan el desnivel total del obstáculo dividiéndolo en pequeños saltos entre los estanques. Las tipologías más habituales son las escalas de artesas de hendidura vertical (HV) y las de vertedero sumergido con orificio de fondo (VSOF) [16, 17], las cuales han mostrado sobradamente su funcionalidad para peces ibéricos [18, 19].

La selección del sistema de paso para peces debe tener en cuenta las especies objetivo y los condicionantes particulares del obstáculo y de su entorno [13]. Todo ello afectará directamente al coste de la actuación, condicionando su viabilidad [20, 21]. En este sentido, el presupuesto final supone un aspecto fundamental en su ejecución, dado que los recursos económicos son limitados y se deben optimizar. Las administraciones públicas, principales impulsoras de este tipo de actuaciones, realizan una programación previa y una planificación económica para la distribución de fondos públicos. Esto también se aplica al diseño de planes y programas regionales, nacionales o europeos, en muchos casos, a nivel de cuenca, territorio o incluso país, para lo que se requiere una recopilación de datos y herramientas fiables de estimación de costes [10, 22]. Igualmente, los promotores privados están muy condicionados por la disponibilidad económica y requieren una adecuada programación de inversiones. Por lo tanto, resulta fundamental poder realizar estimaciones económicas rápidas y precisas desde la fase inicial del proyecto. En definitiva, se necesitan herramientas de planificación predictivas para el estudio de costes [23, 24]. Obtener de forma eficiente una primera estimación económica aporta certidumbre y debe considerarse como un elemento decisivo más entre las distintas alternativas. Además, facilita en gran medida los trabajos de planificación a nivel de cuenca permitiendo disponer de valoraciones económicas preliminares para la distribución de los recursos económicos entre distintos proyectos. Llegar a una estimación precisa y rápida en fase de ante-proyecto es complejo. Hay muchos factores que afectan al presupuesto final, como las condiciones del entorno (morfología del cauce y sus márgenes), su localización, la dificultad de acceso, la necesidad de ataguías, la presencia de servicios afectados, los condicionantes ambientales o los materiales utilizados. Por otra parte, puede existir una variabilidad de precios según la base de referencia empleada, o incluso también debido a factores socioeconómicos regionales [25, 26]. En fase de ejecución, la diferencia en el sistema de contratación de la obra también afectará al presupuesto final. Por ejemplo, un concurso o subasta pública puede plantear un sistema más abierto y con más competencia que una contratación privada que puede estar, incluso, vinculada con la ejecución de un proyecto de mayor envergadura [27]. El tamaño de las obras, o la construcción en conjunto con otras actuaciones, también pueden suponer un elemento distorsionador del presupuesto final de la actuación [28].

Algunos autores han realizado estimaciones de costes como herramientas para la planificación en la demolición de azudes y presas [10, 29], o han recopilado datos económicos de construcción de sistemas de pasos para peces de diferentes tipologías [21, 30-32]. También existe un modelo que cuantifica los costes de construcción de pasos para peces y de los servicios ecosistémicos asociados, en ríos asiáticos como el Mekong [33]. En otros casos se ha realizado una revisión de costes a nivel internacional para la construcción de pasos para peces, orientada a su extrapolación en China [34] en base a estudios de costes europeos [21]. Estos estudios establecen un rango de costes muy amplio, de entre 8.729 y 184.410 €/m de altura del desnivel para una escala de VSOF y de entre 11.875 €/m y 41.800 para escalas de HV (costes actualizados a 2023 según la metodología descrita en el apartado 2.2), muy variable en función del país y de las dimensiones de las estructuras analizadas. En el ámbito ibérico, también encontramos alguna referencia a costes constructivos de pasos para peces [35, 36]; sin embargo, no se analizan con detalle las características constructivas de los casos estudiados (dimensiones, accesos, bases de precios, etc.), no se diferencia entre tipologías de escala y se trata de costes finales, afectados por las particularidades de la licitación y del entorno regional.

El presente trabajo se centra en el desarrollo y aplicación de un modelo práctico y sencillo de estimación de costes en escalas para peces durante la fase de proyecto: el sistema SECEP (Sistema de Estimación de Costes de Escalas para Peces). Se trata de una herramienta rápida y eficaz, basada en

un modelo de valoración que homogeniza la información económica y efectúa un análisis más preciso del coste final. Los objetivos específicos del estudio son: (1) desarrollar un modelo para la estimación rápida de costes constructivos en distintas tipologías y dimensiones de escalas para peces (HV y VSOF) y plasmarlo en una aplicación informática, (2) comparar los resultados del modelo frente a proyectos reales y analizar su variabilidad, y (3) definir indicadores económicos (coste unitario por metro de desnivel a salvar [€/m] o coste por estanque [€/ud]) e indicadores constructivos (longitud total de la escala [m] y superficie de ocupación [m²]), que sirvan como herramientas adicionales para la toma de decisiones en el diseño y la planificación de estas estructuras.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Modelo de estimación de costes

El modelo SECEP contempla 3 fases diferenciadas. En primer lugar, se definen las dimensiones de cada uno de los elementos que forman la escala para peces. Posteriormente, a partir de esta información, se lleva a cabo el cálculo de sus costes de ejecución y, finalmente, se establecen los costes de las actuaciones accesorias. Todo ello se ordena en 7 pasos secuenciales, en los que los 3 primeros son obligatorios y los 4 siguientes opcionales, disponiendo estos últimos de valores por defecto (Figura 1).

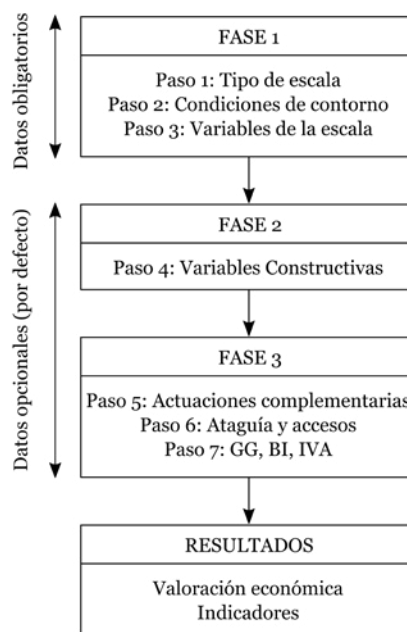


Figura 1. Diagrama de flujo del funcionamiento del modelo SECEP

La base de cálculo del modelo SECEP son las dimensiones de la escala. Desde el punto de vista geométrico, una escala de artesas (HV y VSOF) consiste en una sucesión de estanques alineados y en pendiente, en los que el agua pasa de uno a otro a través de aberturas de conexión en los tabiques (vertederos y/u orificios), generando unas condiciones de velocidad de flujo y de disipación de la potencia hidráulica suficientes para permitir el ascenso de los peces [37]. Constituye una estructura geométrica compuesta por una serie de piezas (principalmente una cimentación, muros cajeros y tabiques con vertederos y/u orificios) que se repiten a lo largo de la estructura (Figuras 2 y 3).

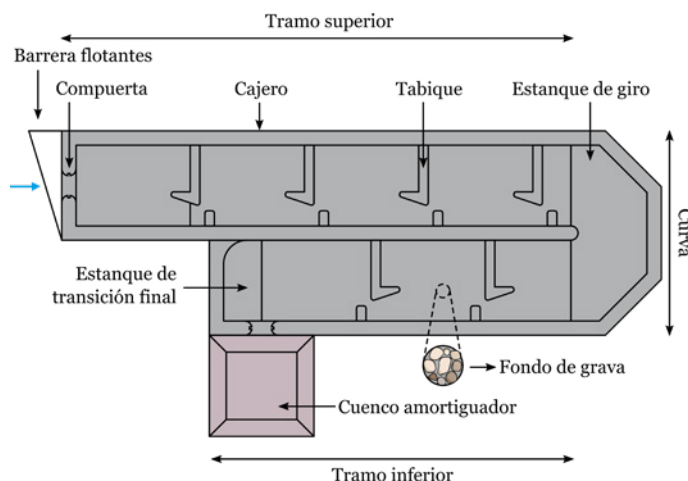


Figura 2. Planta de referencia con los elementos básicos de una escala de artesas.

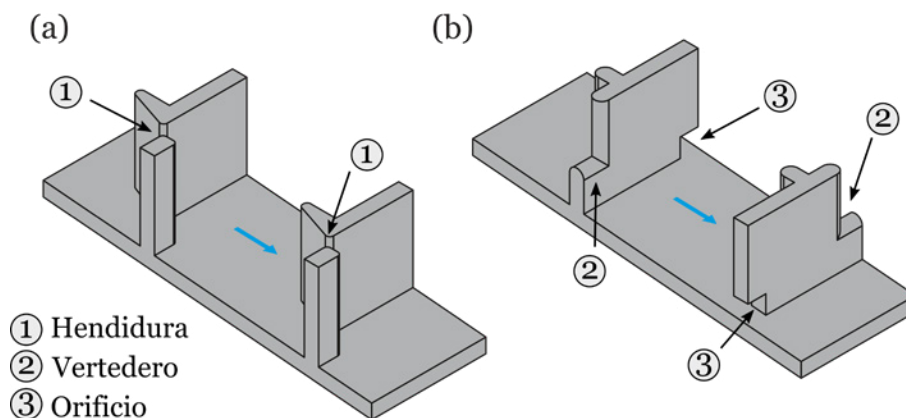


Figura 3. Esquema de una escala de estanques sucesivos de (a) hendiduras verticales y (b) vertederos sumergidos y orificios de fondo. Modificado de Fuentes et al., 2017.

Durante la primera fase del proceso de estimación de costes (pasos 1, 2 y 3), se selecciona el tipo de escala (paso 1) y se introducen las variables de inicio empleadas en el dimensionamiento de la escala (paso 2), que se corresponden con las características del entorno, externas a la propia obra: desnivel de las láminas de agua a superar y profundidad del río en la zona de actuación. Las variables de la escala (paso 3) son las derivadas del propio diseño interno de la obra: diferencia de cotas entre estanques (en función de la especie objetivo), dimensiones de los estanques (altura, longitud y anchura), tamaño del vertedero de la toma de agua en el azud y tamaño de los vertederos entre los estanques (las escalas de HV tendrán un único vertedero de tipo hendidura mientras que las escalas de VSOF tendrán dos: un vertedero sumergido y un orificio de fondo). Todos estos datos dependen del diseño de la escala desde un punto de vista técnico y deben asegurar el funcionamiento de la misma, por ejemplo, mediante la comprobación de que los parámetros geométricos e hidráulicos son adecuados a los requerimientos de la especie para la que se diseña la escala [13], [14].

Las variables de inicio (paso 2) y de escala (paso 3) son la información básica y obligatoria para el funcionamiento del modelo. El modelo utiliza ciertos valores por defecto, que se pueden modificar de forma manual para adaptarlas al diseño deseado. Por ejemplo, en el caso específico de una escala de HV, el modelo emplea un valor de referencia para la anchura de la hendidura de 0,2 m, mientras que para las escalas de VSOF, se establece inicialmente un orificio cuadrado de 0,2 x 0,2 m.

En una segunda fase se incorporan las variables constructivas (paso 4), que consisten en las dimensiones (alto, ancho, largo) de cada tramo de la escala (superior, curva e inferior) agrupados en: losa inferior, cajeros laterales y tabiques transversales. El modelo incluye un dimensionamiento básico y garantista de estas variables, aunque permite su adaptación de forma manual modificando los valores de referencia: espesor de la losa (30 cm), anchura de cajeros (30 cm) y tabiques (20 cm), resguardos (20 cm), nivel de armado de las estructuras (entre 60 y 100 kg de acero/m³ de hormigón) o tamaño de los deflectores (20 cm).

Por último, en una tercera fase (pasos 5, 6 y 7), se incluyen las variables complementarias para la posterior incorporación de los costes de las actuaciones accesorias (paso 5), cuya ejecución depende de las condiciones finales de la obra y del propio diseño específico. Se incluyen aspectos como la instalación de barreras para evitar obstrucciones por elementos flotantes; compuertas de control del caudal; la colocación de cerramientos para el control del acceso a la escala y pates para acceder al interior en las labores de mantenimiento; la construcción de un cuenco amortiguador en la entrada de la escala; la ejecución de escolleras de defensa frente a avenidas; la colocación de grava en la solera o la integración de la obra en la ribera mediante plantación de especies vegetales. El modelo realiza una cuantificación de estas actuaciones en función del dimensionamiento global de la obra, aunque son factores que pueden resultar variables en relación al diseño y a las necesidades finales de la misma. A continuación, se debe definir si se requiere la construcción de una ataguía y un camino de acceso temporal (paso 6). Las mediciones de estos dos factores se pueden incluir de forma manual o emplear la estimación que realiza el modelo por defecto. Por último, hay que comprobar los valores a emplear para gastos generales, beneficio industrial y en el impuesto de valor añadido (paso 7).

A nivel de funcionamiento, una vez incorporadas las variables de inicio (paso 2) y de escala (paso 3), se deben tomar una serie de decisiones. La primera de ellas es definir el número de estanques necesario y determinar la forma en planta o la distribución de artesas. Esta decisión influye directamente en el dimensionamiento del resto de elementos. Una de las características de las escalas de estanques sucesivos es que la sucesión de artesas se puede disponer en línea recta, quebrada o plegada, permitiendo adaptarse al espacio disponible y a las características de la orilla fluvial. En este caso, el modelo propone, como referencia, una escala plegada en dos líneas de artesas paralelas, con un primer tramo superior, un espacio de giro y un tramo inferior, teniendo la parte superior siempre dos estanques más que la inferior. Esta distribución espacial es la más habitual, siendo el recorrido superior más largo que el inferior (Figura 2). En la parte final de la escala (entrada de los peces) se sitúa un estanque de transición para conectar la escala con el cauce y adaptar correctamente la entrada de los peces. El estanque de giro se considera, a efectos del cálculo, como un tramo de pendiente nula (funciona como estanque de descanso), siendo este un criterio conservador sobre el cómputo global del modelo.

Como resultado de todo lo anterior, la valoración económica obtenida se organiza en los siguientes seis capítulos: (1) trabajos previos y ataguía, (2) estructura de la escala, (3) actuaciones complementarias, (4) seguridad y salud, (5) gestión de residuos de obra y (6) otros aspectos (Tabla 1).

Tabla 1. Distribución de capítulos y contenido del modelo

Capítulo	Contenido
1. Trabajos previos y ataguía	Desbroces, podas, y gestión de residuos
	Acceso temporal a obra
	Ataguía en el margen fluvial
2. Escala	Excavación previa y cimiento
	Losa inferior y cajeros laterales
	Tabiques transversales
	Cuenco amortiguador
3. Actuaciones complementarias	Compuertas y toma de agua
	Barreras deflectoras de flotantes
	Acceso: cerramiento y pates
	Colocación de grava en la solera
	Escollera de defensa y plantaciones
4. Seguridad y salud.	
5. Gestión de residuos generados en obra.	
6. Otros aspectos: ajustes hidráulicos de la obra.	

En el capítulo 1 (trabajos previos), el modelo parte de una primera actividad de desbroce, retirada de tierra vegetal y eliminación de vegetación existente suponiendo una densidad igual o superior a 8-15 t/ha, en base a experiencias previas. Se añaden dos actuaciones que no siempre se incluyen en los proyectos de construcción de escalas para peces: la creación de un acceso temporal de obra por la ribera hasta la orilla y la construcción de una ataguía en el cauce. El vial de acceso incluye la construcción de una plataforma en terraplén y una capa de firme granular de 10 cm de espesor. La ataguía, aunque no siempre es necesaria, se propone mediante un relleno perimetral de la obra con una anchura de coronación de 3 m para permitir el tránsito seguro del personal y de los equipos de obra.

En el capítulo 2 se incluye la valoración económica de los componentes constructivos de la escala. En primer lugar, se estima la excavación del terreno y la construcción de un cimiento empleando hormigón ciclópeo sobre una capa de hormigón de limpieza de 10 cm. Existen otros sistemas de cimentación como escolleras hormigonadas o cimientos de hormigón apoyados directamente sobre la orilla, que deberían valorarse aparte. A continuación, se prevé una losa continua en toda la longitud de la escala que servirá como base al resto de la estructura. Sobre ella se sitúan los cajeros longitudinales, dos en la línea superior, dos en la inferior y uno, exterior, en el tramo de giro. Perpendicularmente se proyectan los tabiques transversales con sus correspondientes vertederos y deflectores. Tanto la losa, como los cajeros y los tabiques se plantean en hormigón armado HA-25 elaborado en planta a una distancia inferior a los 40 km, con distintos espesores por defecto: 30 cm para la solera y los cajeros y 20 cm para los tabiques transversales. Se emplea acero corrugado B-500S con una dotación inicial prevista de 100 kg/m³ para las losas y los muros cajeros y de 60 kg/m³ para los tabiques interiores. Todos estos valores cumplen el Código Estructural aprobado según el RD 470/2021 de 29 de junio y pueden modificarse de forma manual en la aplicación informática de acuerdo con los criterios del proyectista. Por último, se prevé la construcción de un cuenco amortiguador de mampostería que evite descalces en la entrada de peces y la adaptación del vertedero en el azud para la toma de agua de la escala.

Las actuaciones complementarias del capítulo 3 incluyen los aspectos accesorios de la obra: la instalación de una compuerta para la regulación del caudal de entrada, los elementos de defensa del dispositivo (barreras antiflotantes aguas arriba o escolleras en el lateral de la estructura), los sistemas para el control del acceso a la escala (estructuras de tramex), las actuaciones de integración natural como la plantación de especies vegetales en el margen fluvial o la colocación de grava en el fondo de la escala para favorecer el ascenso de los peces [13, 14].

En el capítulo 4, el coste de seguridad y salud se estima en un 1,75 % del presupuesto de ejecución material (PEM). El importe de la partida correspondiente a las medidas para la prevención de la seguridad y salud en este tipo de obra se sitúan habitualmente entre el 1,5 y el 2 % de su presupuesto [38].

La partida económica de gestión de residuos generados en obra (capítulo 5) se ha estimado en un 3,5 % del PEM en base a 36 simulaciones de diseño de escalas de artesas de distinto tamaño (18 HV y 18 VSOF; véase sección 2.3). En base a ello se obtiene una media el 3,1 % del coste de la obra. Ampliando este importe a la gestión de los residuos de las demoliciones y del resto de materiales, se establece un coste del 3,5 % del presupuesto. Según el modelo para la cuantificación de costes de residuos de la construcción en la etapa de planificación de proyectos de construcción [39], se estima un factor de coste de los residuos asociado a los materiales empleados del 7 % en el cemento y del 6 % en el acero de armado.

Por último, se ha incluido un capítulo final (nº 6) denominado “otros aspectos” con una partida alzada para los ajustes hidráulicos, frecuentemente necesarios dada la variación topográfica que suele existir entre los niveles de agua estimados en proyecto, las cotas constructivas propuestas y la ejecución final [37]. Incluye el control y revisión final del correcto funcionamiento de la estructura, mediante los ajustes necesarios de los niveles de agua en los estanques, en la toma de agua y en la cota de acceso de los peces.

Uno de objetivos de este modelo es que se pueda emplear, de forma generalizada, en distintas regiones españolas. Por ello, se ha utilizado una base de precios de ámbito nacional, de carácter público, empleada en la construcción de escalas para peces y reconocida por las principales administraciones públicas, como son las tarifas de la empresa pública TRAGSA (Empresa de Transformación Agraria S.A) que se revisan y actualizan anualmente [40].

2.2. Comparación con otros proyectos técnicos

Una vez desarrollado el modelo SECEP, se ha comparado el nivel de coincidencia con los resultados económicos de proyectos técnicos de construcción de escalas para peces desarrollados por consultorías o empresas públicas, recopilados a través de la solicitud a Confederaciones Hidrográficas, Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico, así como empresas públicas y privadas. Se analizaron 50 proyectos de distintas regiones de España, de los cuales 20 fueron descartados por falta de detalle, uso de precios sin referenciar o deficiencias técnicas. De los 30 proyectos seleccionados (Figura 4, Tabla 2), se extrajeron las variables geométricas empleadas y se realizó una simulación con el modelo desarrollado SECEP.

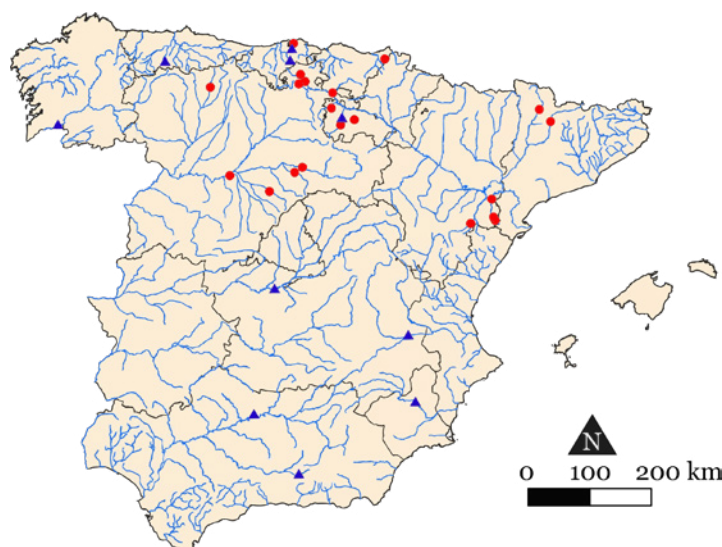


Figura 4. Mapa de localización de los proyectos empleados en la comprobación (círculos: proyectos de VSO y triángulos: proyectos de HV).

Se seleccionaron 20 proyectos de escalas de VSO, con caudales de diseño entre 220 y 430 L/s, redactados entre los años 2009 y 2021 y dimensionados tanto para la trucha como para ciprínidos (Tabla 2, Figura 4). En el caso de los proyectos de escalas de HV, se utilizaron 10 proyectos con caudales de diseño de entre 280 y 377 L/s, redactados entre 2014 y 2022 y dimensionados tanto para salmónidos como ciprínidos (Figura 4, Tabla 2).

Uno de los requisitos para comparar costes constructivos es la actualización de precios al año 2023, pues los proyectos fueron redactados entre 2009 y 2022. Esto implica la capitalización del presupuesto teniendo en cuenta el incremento de precio específico de los materiales, de la mano de obra y de la inflación durante este periodo. Para ello, se ha utilizado el “Índice de costes del sector de la construcción”, del Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible, que toma como año de referencia base el 2021 y emplea el indicador de ingeniería civil [41].

Como referencia, en la mano de obra en la ingeniería civil el índice publicado con referencia a 2023 es de 116,33, habiéndose incrementado en 27,1 puntos desde 2008 (Tabla 3). Entre los materiales más empleados en la construcción de escalas para peces, el incremento de los precios es mayor. El acero muestra un índice de 112,67 y el hormigón de 131,23, habiéndose incrementado en 31,4 y 33,1 puntos porcentuales respectivamente.

A nivel metodológico se han comparado los presupuestos de los proyectos de referencia actualizados a 2023 con los resultados obtenidos de las simulaciones del modelo, analizando las desviaciones producidas.

2.3. Definición de indicadores económicos y constructivos

La metodología SECEP proporciona varios indicadores que permiten comparar de forma rápida y sencilla ambas tipologías de escalas. Estos indicadores son: el coste por metro de altura a salvar, la longitud de las estructuras, la superficie media ocupada o incluso el coste unitario por estanque. Para su elaboración, se han realizado 36 simulaciones de diferentes geometrías de escalas aplicando el modelo SECEP (18 VSO y 18 HV).

Tabla 2. Listado de proyectos de escalas de VSOF y de HV empleados en la comprobación del modelo y comparativa del presupuesto de ejecución material (PEM) de los proyectos, actualizados a 2023, y su simulación según el modelo SECEP. (S=Salmónidos; C=Ciprínidos; H=desnivel entre láminas de agua superior e inferior de la presa o azud en metros).

Cauce		Año	S/C	H	Presupuesto 2023	Presupuesto SECEP	Dif. (%)
Vertedero sumergido con orificio de fondo (VSOF)	Cega	2010	S	3,3	53.730,3	56.810,6	5,7
	Riaza	2013	S	1,0	11.565,0	11.097,9	-4,0
	Duero	2010	C	3,5	220.094,3	230.978,7	5,0
	Duero	2016	C	2,9	46.207,3	54.927,1	18,9
	Urumea	2016	S	4,9	128.016,7	144.966,6	13,2
	Noguera	2009	S	3,2	115.274,4	103.724,7	-10,0
	Nela	2009	C	2,6	75.140,0	78.093,1	3,9
	Bayas	2009	C	2,6	48.040,0	57.111,2	18,9
	Matarraña	2009	C	1,6	32.486,8	32.415,4	-0,2
	Trema	2011	C	2,3	90.444,7	79.876,7	-11,7
	Matarraña	2010	C	4,3	123.593,7	143.578,8	16,2
	Guadalope	2010	C	4,2	137.831,7	139.532,6	1,2
	Matarraña	2009	C	1,8	64.712,4	63.050,9	-2,6
	Ebro	2011	C	4,4	153.663,1	182.458,6	18,7
	Najerilla	2010	C	5,7	178.858,6	196.856,9	10,1
	Iregua	2010	C	2,4	101.341,9	99.042,6	-2,3
	Glera	2010	C	4,1	142.594,9	136.424,8	-4,3
	Segre	2011	C	3,4	116.658,4	133.205,2	14,2
	Miera	2021	S	1,0	62.974,4	56.103,3	-10,9
	Porma	2019	S	3,0	67.286,6	73.216,7	8,8
Media:					98.525,8	103.673,6	4,4
Hendidura vertical (HV)	Najerilla	2021	S	3,2	76.936,3	84.264,1	9,5
	Somiedo	2019	S	3,0	43.381,7	43.121,7	-0,6
	Júcar	2019	C	3,2	180.972,6	167.548,9	-7,4
	Miera	2017	S	3,5	69.316,4	61.498,5	-11,3
	Deva	2017	S	3,6	110.481,8	96.694,3	-12,5
	Segura	2014	C	2,7	115.259,1	125.830,5	9,2
	Miera	2016	S	3,1	172.973,8	170.584,3	-1,4
	Guadalquivir	2022	C	4,7	165.243,9	172.790,8	4,6
	Tajo	2019	S	2,6	81.101,6	68.555,7	-15,5
	Pisuerga	2018	C	3,1	93.119,82	87.777,39	-5,74
	Media:				110.878,70	107.866,61	-3,1

Tabla 3. Índice de precios de costes de la construcción en base a 2021 [41]

Año	Índice de actualización	Año	Índice de actualización
2023	116,33	2015	89,51
2022	113,75	2014	90,80
2021	100,00	2013	91,08
2020	92,26	2012	91,71
2019	93,35	2011	90,99
2018	93,39	2010	87,09
2017	91,05	2009	86,00
2016	88,44	2008	89,23

Se emplearon tres caudales de diseño (280, 500 y 770 L/s) y seis alturas de desnivel a salvar (1,5; 2; 2,5; 3; 3,5 y 4 m), que recogen la mayoría de las situaciones que podemos encontrar en nuestros ríos [17]. Todas las escalas se dimensionaron hidráulicamente con el programa de libre uso *Escalas* (versión 2.0) [37]. En ambas tipologías de escala (HV y VSOF) se aplicaron criterios de diseño equivalentes (Tabla 4), siguiendo las recomendaciones geométricas de diseño para cada tipo [14], [16] y con una energía máxima disipada por unidad de volumen en torno a 150 W/m³, adecuada tanto para ciprínidos reófilos como salmónidos [16], [42].

Tabla 4. Dimensiones hidráulicas de las simulaciones realizadas en las escalas de HV y de VSOF

TIPO	Caudal (L/s)	Longitud (m)	Anchura (m)	Altura (m)	Anchura Vertedero (m)	Desnivel estanques (m)
HV	280	2,30	1,80	1,20	0,20	0,20
	500	3,00	2,10	1,40	0,30	0,20
	770	3,30	2,50	1,50	0,40	0,20
VSOF	280	2,50	1,55	1,55	0,25	0,25
	500	3,00	2,10	1,60	0,35	0,25
	770	3,50	2,50	1,70	0,50	0,25

A partir de esta información se obtuvieron datos comparativos como la longitud total de cada escala, la superficie de ocupación y el coste total estimado, además de indicadores económicos como la relación del coste por metro de altura de desnivel a salvar, entendido como desnivel de proyecto: diferencia de cota entre las láminas de agua a superar por los peces para cada tipo de escala [relación coste (€) / altura entre láminas de agua (m)], así como el coste unitario por estanque [relación coste (€) / estanque (ud)]. Así mismo, se elaboraron regresiones lineales múltiples para ofrecer una estimación aproximada de la inversión en términos del PEM para cada tipo de escala en función del desnivel total a salvar (H) y del caudal de diseño (Q).

3. RESULTADOS

3.1. Modelo de estimación de costes SECEP

El modelo SECEP se plasma en una herramienta intuitiva que permite obtener de forma rápida una estimación del coste de construcción de una escala para peces, abarcando dos tipologías: VSOF y HV. Desarrollada en formato Excel, esta herramienta facilita la planificación y comparación de proyectos constructivos. La aplicación está disponible de forma gratuita en https://www.gea-ecohidraulica.org/GEA_es/software.html, junto con un video tutorial explicativo.

El modelo requiere introducir una serie de campos obligatorios, y otros datos de carácter opcional (Véase apartado 2.1.), generando un presupuesto desglosado por unidades. Finalmente se incorporan los gastos generales, el beneficio industrial y el correspondiente impuesto del valor añadido, obteniendo la inversión total necesaria para ejecutar la actuación, así como una relación del presupuesto por metro de altura entre láminas de agua (€/m de altura del desnivel a salvar).

3.2. Comparación con otros proyectos técnicos

La comparación de los resultados del modelo SECEP con el importe de los 20 proyectos analizados de escalas de VSOF, actualizados al año 2023, muestran diferencias porcentuales de entre el -11,7 y el +18,9 % del PEM original del proyecto. El valor medio aritmético de la desviación es del 4,4 %, en un presupuesto de ejecución material total de proyectos actualizados al año 2023 de 2,0 millones de euros (Tabla 2).

El PEM medio por altura de desnivel a salvar en escalas de VSOF es de 31.790,7 €/m para los proyectos analizados. Según las simulaciones realizadas en el modelo SECEP, y tomando esos mismos proyectos como referencia, el PEM asciende a 32.676,9 €/m, lo que supone una diferencia del 2,8 % (Tabla 2).

En el caso de los 10 proyectos de escalas de HV, el PEM medio es de 34.206,6 €/m. Simulando estas mismas actuaciones en el modelo SECEP, el coste medio asciende a 33.216,6 €/m. Se han obtenido diferencias con el modelo de entre el -15,5 y el +9,5 % del PEM, con una media aritmética de la desviación del -3,1 %, en una inversión total de 1,1 millones de euros.

Si al PEM añadimos los gastos generales (habitualmente entre un 13 y un 16 %), el 6 % de beneficio industrial y el actual 21 % del impuesto de valor añadido (IVA), se obtiene la inversión total necesaria. Este dato es interesante para los promotores que necesitan conocer el presupuesto total necesario para la ejecución de las obras. Estos valores pueden variar si la actuación la ejecuta una empresa privada o una empresa pública como TRAGSA, dado que en sus presupuestos no se incluye un beneficio industrial, imputando un porcentaje de costes indirectos y de gastos generales, que actualmente ascienden al 7 y al 5 % respectivamente, y que se revisan y actualizan anualmente.

Respecto a la distribución media de los costes (Figura 5), el 24,4 % de la inversión se dedica a la construcción de los cajeros; el 18,5 % a los tabiques; el 18,3 % a los trabajos previos de desbroce, la construcción de la ataguía y el acceso temporal; el 16,3 % a la cimentación y el 14,6 % a la construcción de la solera inferior.

3.3. Indicadores económicos

De acuerdo a los datos obtenidos de las 36 simulaciones realizadas en el modelo SECEP, el PEM medio de la construcción de una escala para peces de VSOF se estima en 28.264,4 €/m para un caudal de 280 L/s, 37.239,2 €/m para un caudal de 500 L/s y 46.634,1 €/m para un caudal de 770 L/s (Tabla 5).

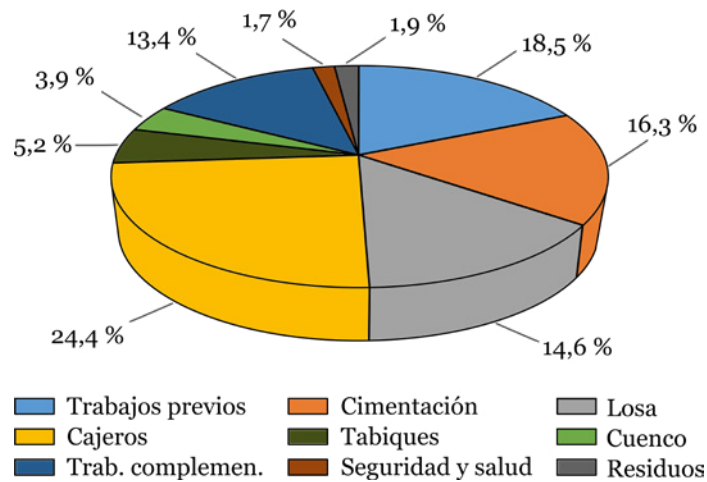


Figura 5. Gráfico de distribución de los costes en la construcción de una escala.

Tabla 5. Presupuesto de ejecución material (PEM), por metro de altura y por unidad de estanque (H=diferencia de cota entre niveles de agua en metros) para escalas de VSOF y HV con caudales de 280, 500 y 770 L/s para desniveles de lámina de agua de 1,5 y 4 m, según el modelo SECEP.

Tipo	Altura (m)	PEM por metro de altura (K€/m) / PEM por unidad de estanque (K€/m)		
		Q: 280 L/s	Q: 500 L/s	Q: 770 L/s
VSOF	1.5	31,0 / 9,3	40,1 / 12,0	49,9 / 15,0
	4.0	27,9 / 7,4	37,1 / 9,9	46,8 / 12,5
HV	1.5	35,0 / 7,5	47,2 / 10,1	56,7 / 12,1
	4.0	32,4 / 6,8	44,8 / 9,4	54,0 / 11,4

En el caso de las escalas de HV el presupuesto de ejecución material asciende a una media de 32.479,6 €/m para un caudal de 280 L/s, en 44.450,3 €/m para un caudal de 500 L/s y en 53.542,4 €/m para un caudal de 770 L/s (Tabla 5).

Como era de esperar, el aumento del caudal circulante y del desnivel a salvar supone un aumento de la inversión total a realizar (Figura 6). Para cada tipo de escala, la relación lineal viene dada por las siguientes expresiones:

VSFO: $PEM = 35.419,1 \cdot H + 103,9 \cdot Q - 49.235,8$
HV: $PEM = 42.936,1 \cdot H + 117,6 \cdot Q - 59.601,9$

Donde PEM = Presupuesto de ejecución material (€); H = Altura del desnivel a salvar (m); Q = Caudal de diseño (L/s).

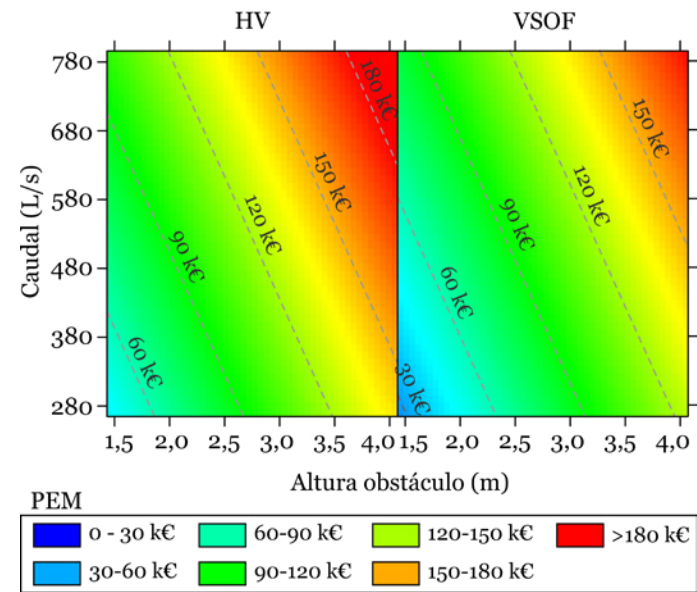


Figura 6. Contornos de la superficie de respuesta estimada segmentada por tipología de escala

El coeficiente de determinación múltiple (R-cuadrado) es en ambos del 96 % lo que muestra un buen ajuste de ambas ecuaciones derivadas del modelo SECEP.

El modelo también permite obtener un coste medio de ejecución material por estanque para cada tipología y caudal analizado (Tabla 5). Estos valores oscilan en escalas de VSOE entre los 7.890,1 €/estanque y los 13.010,2 €/estanque para caudales de 280 L/s y 770 L/s, respectivamente. En el caso de las escalas de HV, los valores se encuentran entre los 6.904,5 €/estanque y los 11.380,0 €/estanque para esos mismos caudales de referencia (Tabla 5).

La longitud total del trazado de una escala también puede resultar un indicador de interés en aquellos casos en los que no se disponga de recorrido suficiente. La longitud media de una escala de VSOE es de 11,2 m/m de altura de desnivel a salvar para un caudal de 280 L/s, aumentando a 13,4 m/m para caudales de 500 L/s y alcanzando los 15,4 m/m para 770 L/s. Estos valores son superiores en las escalas de HV, que oscilan entre los 13,5 m/m para un caudal de 280 L/s y los 18,6 m/m para 770 L/s. Cabe señalar que para mantener la misma potencia disipada el desnivel entre estanques es menor en HV frente a VSOE (0,2 m en HV y 0,25 m en VSOE), lo que se traduce en un menor número de estanques por metro de ascenso en el caso de las escalas de VSOE (4 ud/m de altura) en comparación con las escalas de HV (5 ud/m de altura), a costa de una profundidad media y dimensiones del estanque menores en HV.

En cuanto a la superficie requerida para la construcción de una escala para peces, depende de la tipología de la escala y de la diferencia de cota a salvar. Para escalas de VSOE se requiere una media de 24,2 m²/m de altura de desnivel a salvar para un caudal de 280 L/s, 36,1 m²/m para una estructura de 500 L/s y 47,9 m²/m para 770 L/s. En el caso de las escalas de HV la superficie requerida es mayor, con valores de 32,3 m²/m para un caudal de 280 L/s, 45,8 m²/m para 500 L/s y 57,7 m²/m para 770 L/s. Las diferencias entre ambas tipologías se reducen al aumentar el caudal, situándose entre el 33,7 % de las más pequeñas hasta el 20,6 % en las estructuras de mayor tamaño.

4. DISCUSIÓN

4.1. Modelo de estimación de costes SECEP

La adaptación de los ecosistemas fluviales a la Directiva Marco del Agua requiere una planificación de actuaciones a nivel de grandes cuencas, siendo la conectividad longitudinal de los ríos uno de los grandes ejes de actuación [43, 44]. Para ello, es necesario un análisis preliminar de costes rápido y preciso, que priorice y oriente las inversiones necesarias, tanto públicas como privadas [23, 24]. En este sentido, SECEP realiza una estimación de costes de manera eficiente en las dos tipologías más empleadas de escalas para peces de estanques sucesivos. Los importes obtenidos se ajustan a los de proyectos constructivos específicos y se sitúan dentro del rango establecido por otros autores [21, 34, 35], que han ofrecido estimaciones económicas más generalistas, con menos variables y horquillas más amplias.

El uso de precios unitarios de bases públicas como la de la empresa TRAGSA [40], ofrece datos garantistas desde un punto de vista económico y tienen un alcance nacional. Posteriormente, la inversión final en ejecución podrá ser menor si la actuación se tramita, por ejemplo, mediante una licitación pública y abierta, en la que las empresas más competitivas puedan hacer su correspondiente baja económica. Se considera muy importante el uso de precios publicados y con validez a escala nacional, evitando sesgos o diferencias por razones de territorio. Cabe señalar que, en la fase de redacción específica de un proyecto, los precios deberán adaptarse de acuerdo con las características del mismo, relacionándolos a las condiciones reales del lugar de ejecución de la obra. La estimación económica del modelo SECEP no debe sustituir la elaboración de las mediciones y del presupuesto de un proyecto, ni resulta lo suficientemente detallada y precisa para realizar este documento. Sin embargo, es muy recomendable tenerlo en consideración, puesto que ofrece un margen de confianza para comparar el coste final de la obra y considera una serie de actuaciones constructivas (accesos, ataguías, etc.) que suelen despreciarse en muchos proyectos.

4.2. Comparación con otros proyectos

Los resultados de la comparación del modelo SECEP con los 30 proyectos analizados muestran que el modelo se ajusta al coste previsto de las actuaciones, teniendo en cuenta la alta variabilidad de situaciones que pueden presentarse en la definición de una escala para peces: profundidad del cauce, pendiente del margen fluvial, accesibilidad, distancia de suministro de los materiales, coste de la mano de obra, accesorios, etc. y los criterios y consideraciones propias del proyectista.

Se han descartado en la comparación los proyectos de construcción de escalas con medios no convencionales, empleando elementos prefabricados. Este tipo de proyectos pueden ser interesantes en lugares con difícil acceso y falta de espacio para actividades como el encofrado de los muros o el transporte y vertido de hormigón. El modelo SECEP se basa en unidades de ejecución de la obra in situ, por lo que no es apropiado para actuaciones que emplean estanques prefabricados, generalmente con un coste superior y otras unidades de obra.

Las diferencias entre el modelo SECEP y los proyectos comparados se originan por distintas causas. Por una parte, no se está trabajando con los mismos precios de referencia. Cada uno de los proyectos analizados emplea precios unitarios adaptados a su territorio y a su localización. Por otra parte, se ha abarcado un periodo de 14 años, comparando proyectos desde 2009 hasta 2022. Esto se ha homogeneizado mediante una actualización económica empleando el “Índice de costes del sector de la construcción” [41], aunque la diferencia temporal puede reducir la precisión del ajuste, dado que este índice, aunque oficial, es generalista para todo el sector de la obra civil en España.

Además, se han incluido proyectos redactados por 13 entidades o empresas diferentes, lo que añade más variabilidad en los criterios de diseño y medición por parte de sus autores. En la

comparativa de los proyectos de ambas tipologías se han detectado carencias en cuatro aspectos transversales del diseño de las actuaciones: la ausencia de un acceso para la ejecución de la obra, la falta de construcción de una atagüa; la necesidad de accesorios como compuertas, barreras anti-flotantes, etc.; así como la omisión de los capítulos de seguridad y salud, o de la gestión de residuos generados en obra. Todos estos aspectos en conjunto pueden suponer más del 25 % de coste total de la obra.

En cuanto a los costes medios de construcción de escalas para peces por altura de desnivel a salvar (€/m de altura), las diferencias medias entre los proyectos y el modelo SECEP es muy reducida (+4,4 % en las escalas de VSOF y del -3,1 % de escalas de HV). Este indicador, muy práctico e intuitivo a nivel económico, muestra datos considerablemente ajustados.

4.3. Definición de indicadores económicos

Las dos tipologías de escalas para peces contempladas en la metodología presentan una eficiencia equiparable para permitir el paso de las principales especies de peces migradoras de la península ibérica, como la trucha, el barbo y la boga [18, 19, 45, 46]. Dado que el funcionamiento biológico es similar, es esencial considerar otros factores para seleccionar el dispositivo más adecuado. Las escalas de VSOF se construyen con mayor pendiente, lo que requiere menor longitud y superficie, favoreciendo su diseño en zonas con espacio limitado. En cambio, las escalas de HV necesitan pendientes menores y generalmente un mayor caudal; sin embargo, toleran mejor las variaciones de la lámina de agua y permiten a los peces elegir la profundidad de paso [15, 16]. Las HV permiten un ascenso de los peces más rápido en general [18] y se obturan menos que las VSOF, por lo que exigen un menor mantenimiento [17].

Este estudio se centra en los criterios económicos y constructivos, que son cruciales en la toma de decisiones. Las escalas para peces de VSOF y de HV requieren métodos constructivos similares y precisan unidades de ejecución equivalentes. Las simulaciones realizadas para caudales de diseño habituales indican que las escalas de HV requieren una inversión económica mayor. En promedio, esta diferencia oscila entre el 13,1 y el 22,6 % del presupuesto, en función del caudal y de la altura del desnivel a salvar. Aunque los estanques de las escalas de HV son más pequeños que los de VSOF, el volumen de obra global es mayor debido a la menor pendiente con la que son construidas. La diferencia en la inversión entre ambas alternativas no debe ser decisiva en la fase de diseño, donde se deben considerar otros aspectos técnicos y biológicos, como la superficie de ocupación, el caudal disponible, las variaciones estacionales del caudal, el caudal mínimo y las características de las especies objetivo.

Además, las diferencias en la inversión económica aportan otro indicador indirecto sobre las necesidades de materiales y equipos. Las escalas de VSOF requieren una menor inversión, y también demandan menos materiales. Según los capítulos de ejecución, las escalas de VSOF requieren menos excavación y cimentación, así como un menor volumen de obra en la losa inferior y los tabiques separadores de los estanques. Esta necesidad de materiales y maquinaria más reducida puede ser ventajosa en áreas de difícil acceso, donde las diferencias de inversión serán más significativas y las dificultades de ejecución mayores.

Respecto al cálculo de la superficie ocupada y a la longitud requerida, se está considerando un sesgo al considerar un salto entre estanques más pequeño en las escalas de HV y, por tanto, un mayor número de estanques para salvar el mismo desnivel, lo que implica una mayor superficie ocupada. Así mismo, el poder incluir un umbral en las escalas de VSOF puede reducir las dimensiones de los estanques al conseguir una mayor profundidad para cumplir el criterio de energía disipada en los estanques.

Los costes unitarios por estanque resultan superiores en las escalas de VSOF, puesto que el precio total se divide por menos estanques para un mismo desnivel en comparación con las de HV (4 ud/m en VSOF vs. 5 ud/m en HV). En cuanto a la longitud y superficie requeridas, las escalas de VSOF precisan una ocupación menor, debido a la mayor pendiente de la escala frente a las de HV. Esto favorece la elección de una escala de VSOF en lugares donde la superficie sea limitada o el acceso complicado, debiendo considerarse junto con otras variables técnicas de diseño y funcionamiento.

Los costes unitarios y sus referencias relativas por metro de desnivel, estanque, tipología de escala y tamaño son importantes para la valoración rápida de proyectos de mejora de la conectividad longitudinal. Además, algunas unidades de obra pueden ser prescindibles o reducibles en volumen o coste.

En resumen, aunque el coste de construcción de las escalas de VSOF sea en general menor y permitan adaptarse mejor a espacios más reducidos, las escalas de HV tienen otras ventajas como su menor mantenimiento, mejor rendimiento con oscilaciones de caudal y mayor motivación de los peces en el ascenso [17, 18, 19, 45, 46].

5. CONCLUSIONES

El modelo SECEP supone una herramienta sencilla y eficiente para la estimación de costes en la construcción de escalas para peces, ofreciendo una respuesta rápida y útil en fases iniciales de planificación. Su capacidad para calcular el coste constructivo tanto de escalas de vertedero sumergido y orificio de fondo (VSOF) como de hendidura vertical (HV), así como su aplicación a través de una herramienta informática de estimación de costes, lo convierte en un recurso versátil para el desarrollo de proyectos de mejora de la conectividad fluvial y, por tanto, un recurso valioso para la restauración de los ecosistemas acuáticos.

La comparación de los costes entre SECEP y los presupuestos reales de 30 proyectos distribuidos por distintas cuencas de toda España ha mostrado resultados consistentes, lo que avala la fiabilidad del modelo como una herramienta de referencia para estimaciones de costes constructivos.

El presupuesto medio de ejecución material para una escala tipo, con un desnivel entre láminas de agua de 3 m y un caudal de diseño de 280 L/s, es de 27.244,2 €/m de desnivel de agua en las escalas de VSO y de 31.244,0 €/m en las de HV. Esto supone que el coste medio de construcción de una escala de HV es de media un 16,4 % superior al de una escala de VSO para el rango de dimensiones estudiado.

El modelo SECEP no reemplaza las mediciones detalladas necesarias para un proyecto específico, pero su capacidad para ofrecer una estimación preliminar precisa lo convierte en una herramienta valiosa para la planificación inicial. Su uso permite orientar de manera eficaz las inversiones públicas y privadas, ayudando a priorizar y tomar decisiones clave en proyectos de restauración fluvial y conectividad ecológica.

MATERIAL SUPLEMENTARIO

La aplicación informática del modelo SECEP está disponible para su descarga en la página web https://www.gea-ecohidroa.org/GEA_es/software.html, junto con un video tutorial explicativo.

AGRADECIMIENTOS

A Pedro Boné Puyo (TYPESA), a Pedro Castillo (GAN-NIK) y a José Manuel Checa (HGM) por la información facilitada. A las Confederaciones Hidrográficas del Duero, Segura, Miño-Sil, Tajo y a la Dirección General del Agua del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico por los proyectos y el resto de la información aportada. A la Confederación Hidrográfica del Duero y a la empresa TRAGSA, por la financiación y apoyo en el desarrollo del programa Escalas 2.0, y las bases de precios empleadas en este trabajo. Francisco Javier Bravo y Ana García fueron parcialmente financiados por el IV convenio de colaboración entre la CHD e ITAGRA-Universidad de Valladolid.

DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERESES

Los autores de este artículo declaran no tener conflictos de intereses financieros, profesionales o personales que pudieran haber influido de manera inapropiada en este trabajo.

DECLARACIÓN DE CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Asier Saiz-Rojo: Conceptualización, Análisis formal, Investigación, Metodología, Redacción – borrador original.
Ana García-Vega: Análisis formal, Investigación, Redacción – revisión y edición.
Francisco Javier Bravo-Córdoba: Análisis formal, Investigación, Redacción – revisión y edición.
Francisco Javier Sanz-Ronda: Conceptualización, Análisis formal, Investigación, Metodología, Redacción – revisión y edición.

REFERENCIAS

- [1] B. Belletti et al., "More than one million barriers fragment Europe's rivers," *Nature*, vol. 588, no. 7838, pp. 436–441, 2020, <https://doi.org/10.1038/s41586-020-3005-2>.
- [2] C. J. Vörösmarty, P. Green, J. Salisbury, and R. B. Lammers, "Global water resources: vulnerability from climate change and population growth," *Science* (80-.), vol. 289, pp. 284–288, 2000, <https://doi.org/10.1126/science.289.5477.284>.
- [3] D. Dudgeon et al., "Freshwater biodiversity: importance, threats, status and conservation challenges," *Biol. Rev.*, vol. 81, no. 02, pp. 163–182, 2006, <https://doi.org/10.1017/S1464793105006950>.
- [4] A. J. Reid et al., "Emerging threats and persistent conservation challenges for freshwater biodiversity," *Biol. Rev.*, vol. 94, no. 3, pp. 849–873, 2019, <https://doi.org/10.1111/brev.12480>.
- [5] G. Su, M. Logez, J. Xu, S. Tao, S. Villéger, and S. Brosse, "Human impacts on global freshwater fish biodiversity," *Science* (80-.), vol. 371, no. 6531, pp. 835–838, 2021, <https://doi.org/10.1126/science.abc3369>.
- [6] M. S. Dias et al., "Anthropogenic stressors and riverine fish extinctions," *Ecol. Indic.*, vol. 79, pp. 37–46, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.03.053>.
- [7] M. C. Lucas, E. Baras, T. J. Thom, A. Duncan, and O. Slavík, *Migration of freshwater fishes*. Oxford, UK: Wiley Online Library, 2001. <https://doi.org/10.1002/9780470999653.fmatter>.
- [8] C. Brönmark et al., "There and back again: migration in freshwater fishes 1," *Can. J. Zool.*, vol. 92, no. 6, pp. 467–479, 2014, <https://doi.org/10.1139/cjz-2012-0277>.
- [9] A. T. Bednarek, "Undamming rivers: a review of the ecological impacts of dam removal," *Environ. Manage.*, vol. 27, pp. 803–814, 2001, <https://doi.org/10.1007/s002670010189>.
- [10] S. M. Born, K. D. Genskow, T. L. Filbert, N. Hernandez-Mora, M. L. Keefer, and K. A. White, "Socioeconomic and institutional dimensions of dam removals: the Wisconsin experience," *Environ. Manage.*, vol. 22, no. 3, pp. 359–370, 1998, <https://doi.org/10.1007/s002679900111>.
- [11] M. W. Doyle, J. M. Harbor, and E. H. Stanley, "Toward policies and decision-making for dam removal," *Environ. Manage.*, vol. 31, pp. 453–465, 2003, <https://doi.org/10.1007/s00267-002-2819-z>.
- [12] F. J. Magilligan, C. S. Sneddon, and C. A. Fox, "The social, historical, and institutional contingencies of dam removal," *Environ. Manage.*, vol. 59, pp. 982–994, 2017, <https://doi.org/10.1007/s00267-017-0835-2>.
- [13] M. Larinier, F. Travade, J.-P. P. Porcher, and F. Travade, "Fishways: biological basis, design criteria and monitoring," *Bull. Fr. la Pech. la Piscic.*, vol. 364, no. Suppl S, p. 208, 2002, [Online]. Available: <https://www.kmae-journal.org/articles/kmae/abs/2002/04/contents/contents.html>
- [14] FAO/DVWK, *Fish Passes: Design, Dimensions, and Monitoring*. Rome, Italy: FAO, 2002. [Online]. Available: <http://www.fao.org/publications/card/en/c/fc11949e-9dc5-59a1-bf10-9e9480a3fe7f/>
- [15] J. F. Fuentes-Pérez, A. García-Vega, F. J. Sanz-Ronda, and A. Martínez de Azagra Paredes, "Villemonte's approach: validation of a general method for modeling uniform and non-uniform performance in stepped fishways," *Knowl. Manag. Aquat. Ecosyst.*, vol. 418, no. 23, p. 23, 2017, <https://doi.org/10.1051/kmae/2017013>.
- [16] M. Larinier, "Pool fishways, pre-barrages and natural bypass channels," *Bull. Fr. Pêche Piscic.*, vol. 364, no. supplement, pp. 54–82, 2002, <https://doi.org/10.1051/kmae/2002108>.
- [17] J. Valbuena-Castro et al., "Coarse fishway assessment to prioritize retrofitting efforts: a case study in the Duero River basin," *Ecol. Eng.*, vol. 155, p. 105946, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105946>.
- [18] F. J. Bravo-Córdoba, F. J. Sanz-Ronda, J. Ruiz-Legazpi, J. Valbuena-Castro, and S. Makrakis, "Vertical slot versus submerged notch with bottom orifice: Looking for the best technical fishway type for Mediterranean barbels," *Ecol. Eng.*, vol. 122, pp. 120–125, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.07.019>.
- [19] F. J. Sanz-Ronda, F. J. Bravo-Córdoba, J. F. Fuentes-Pérez, and T. Castro-Santos, "Ascent ability of brown trout, *Salmo trutta*, and two Iberian cyprinids - Iberian barbel, *Luciobarbus bocagei*, and northern straight-mouth nase, *Pseudochondrostoma duriense* - in a vertical slot fishway," *Knowl. Manag. Aquat. Ecosyst.*, vol. 417, no. 417, p. 10, 2016, <https://doi.org/10.1051/kmae/2015043>.
- [20] J. O'Connor, R. Hale, M. Mallen-Cooper, S. J. Cooke, and I. Stuart, "Developing performance standards in fish passage: Integrating ecology, engineering and socio-economics," *Ecol. Eng.*, vol. 182, p. 106732, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106732>.
- [21] E. Nieminen, K. Hyytiäinen, and M. Lindroos, "Economic and policy considerations regarding hydropower and migratory fish," *Fish Fish.*, vol. 18, no. 1, pp. 54–78, 2017, <https://doi.org/10.1111/faf.12167>.
- [22] J. Duda et al., "Patterns, drivers, and a predictive model of dam removal cost in the United States," *Front. Ecol. Evol.*, vol. 11, p. 1215471, 2023, <https://doi.org/10.3389/fevo.2023.1215471>.
- [23] A. Alamanos, A. Rolston, and G. Papaioannou, "Development of a Decision Support System for Sustainable Environmental Management and Stakeholder Engagement," 2021. <https://doi.org/10.3390/hydrology8010040>.
- [24] A. T. Moody et al., "Pet Project or Best Project? Online Decision Support Tools for Prioritizing Barrier Removals in the Great Lakes and Beyond," *Fisheries*, vol. 42, no. 1, pp. 57–65, Jan. 2017, <https://doi.org/10.1080/03632415.2016.1263195>.
- [25] N. Roqueñí, V. Álvarez, G. Martínez, and F. J. de Cos, "Características de las herramientas de estimación de costes en proyectos utilizadas en España," *Univ. Oviedo, Astur.*, 2004, [Online]. Available: https://www.aepro.com/files/congresos/2004bilbao/icec04_0217_0224.2387.pdf

- [26] M. Barrasa Rioja, M. Gómez Folgueira, and J. M. Pereira González, "Herramientas para la planificación del desarrollo económico: el proyecto de ingeniería, el presupuesto y las bases de datos de precios," 1999, [Online]. Available: <https://minerva.usc.gal/entities/publication/ob42f6b4-614e-4482-ab66-6511f8f4872>
- [27] J. L. Fuentes Bargues, C. González Gaya, and M. C. González-Cruz, "La contratación pública de obras: situación actual y puntos de mejora," *Inf. la Construcción*, vol. 67, no. 537, 2015, <https://doi.org/10.3989/ic.12.130>.
- [28] M. V. Montes, M. E. Ponce, R. M. Falcón, and A. Ramírez-de-Arellano, "Aproximación a la gestión económica integral de las obras por procesos productivos: elaboración del modelo COP de control de costes de construcción," *Inf. la Construcción*, vol. 69, no. 548, pp. e230–e230, 2017, <https://doi.org/10.3989/ic.16.121>.
- [29] J. Duda, R. C. Johnson, B. L. Jensen, E. J. Wagner, and D. J. Richards, Kyla B. Wierich, *Compilation of cost estimates for dam removal projects in the United States*. U.S. Geological Survey data release, 2023. <https://doi.org/10.5066/P9G8V371>.
- [30] R. M. Bruch and T. J. Haxton, "Cost and relative effectiveness of Lake Sturgeon passage systems in the US and Canada," *Fish. Res.*, vol. 257, p. 106510, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2022.106510>.
- [31] J. P. Porcher and M. Larinier, "Designing fishways, supervision of construction, costs, hydraulic model studies," *Bull. Français la Pêche la Piscic.*, no. 364, pp. 156–165, 2002, <https://doi.org/10.1051/kmae/2002100>.
- [32] T. E. Venus, N. Smialek, J. Pander, A. Harby, and J. Geist, "Evaluating Cost Trade-Offs between Hydropower and Fish Passage Mitigation," 2020. <https://doi.org/10.3390/su12208520>.
- [33] B. Cooper, L. Crase, and L. J. Baumgartner, "Estimating benefits and costs: a case of fish passages in Lao PDR and the development of the Lower Mekong Fishway Support Tool," *Mar. Freshw. Res.*, vol. 70, no. 9, pp. 1284–1294, 2019, <https://doi.org/10.1071/MF19156>.
- [34] W. Li et al., "A review of international fishways adaptive management systems and management prospects for China," *Acta Hydrobiol. Sin.*, vol. 42, no. 6, pp. 1240–1251, Oct. 2018, <https://doi.org/10.7541/2018.152>.
- [35] CEDEX, *Guía técnica para la caracterización de las actuaciones a considerar en planes hidrológicos y estudios de viabilidad*. Madrid, Spain: Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, 2012. [Online]. Available: <https://ceh.cedex.es/tienda/?product=guia-tecnica-para-la-caracterizacion-de-las-actuaciones-a-considerar-en-planos-hidrologicos-y-estudios-de-viabilidad-m-115>
- [36] F. J. Sanz-Ronda et al., "PASOS PARA PECES : escalas y otros dispositivos de paso," *Notas técnicas del CIREF*, vol. 7, no. September 2015, p. 17, 2013, [Online]. Available: <http://www.cirefluvial.com/boletines.php>
- [37] J. F. Fuentes-Pérez, F. J. Sanz-Ronda, A. Martínez de Azagra-Paredes, and A. García-Vega, "A step forward in fishway engineering: Validation and implementation of advanced algorithms for effective stepped fishway design, modeling, and retrofitting," *Heliyon*, p. e25996, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25996>.
- [38] M. L. Alonso, P. I. Dávila, and M. del C. R. Gámez, "Análisis de los costes de prevención en obras de construcción," *Inf. la construcción*, vol. 67, no. 537, p. 6, 2015, <https://doi.org/10.3989/ic.13.062>.
- [39] G. Garcés and A. Molina, "Proposal of a model for the quantification of construction waste costs in the planning stage of construction projects," *Inf. la Construcción*, vol. 75, no. 571, p. e515, 2023, <https://doi.org/10.3989/ic.6425>.
- [40] TRAGSA, *Tarifas del Grupo Tragsa*. Grupo Transformaciones Agrarias S.A., 2023. [Online]. Available: <https://www.tragsa.es/es/grupo-tragsa/ regimen-juridico/tarifas/Paginas/default.aspx>
- [41] MTMS, "Metodología Índice de costes del sector de la construcción. Base 21," Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible, 2024. [Online]. Available: https://www.transportes.gob.es/recursos_mfom/comodin/recursos/metodologiaicscbase2021.pdf
- [42] B. Towler, K. Mulligan, and A. Haro, "Derivation and application of the energy dissipation factor in the design of fishways," *Ecol. Eng.*, vol. 83, pp. 208–217, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.06.014>.
- [43] M. González del Tánago, D. García de Jalón, and M. Román, "River restoration in Spain: theoretical and practical approach in the context of the European Water Framework Directive," *Environ. Manage.*, vol. 50, no. 1, pp. 123–139, 2012, <https://doi.org/10.1007/s00267-012-9862-1>.
- [44] D. Hering et al., "The European Water Framework Directive at the age of 10: a critical review of the achievements with recommendations for the future," *Sci. Total Environ.*, vol. 408, no. 19, pp. 4007–4019, 2010, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.05.031>.
- [45] F. J. Bravo-Córdoba, J. Valbuena-Castro, A. García-Vega, J. F. Fuentes-Pérez, J. Ruiz-Legazpi, and F. J. Sanz-Ronda, "Fish passage assessment in stepped fishways: Passage success and transit time as standardized metrics," *Ecol. Eng.*, vol. 162, p. 106172, Apr. 2021, <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106172>.
- [46] F. J. Sanz-Ronda et al., "Passage Performance of Technical Pool-Type Fishways for Potamodromous Cyprinids: Novel Experiences in Semiarid Environments," *Water*, vol. 11, no. 11, p. 2362, 2019, <https://doi.org/10.3390/w11112362>.