

Plan Hidrológico de la parte española de la Demarcación Hidrográfica del Duero Revisión de tercer ciclo (2022-2027)

ANEJO 12 PROGRAMA DE MEDIDAS

APÉNDICE V. MANUAL PARA LA EVALUACIÓN DE LA FUNCIONALIDAD DE PASOS PARA PECES DE ESTANQUES SUCEIVOS

MAYO 2021

Confederación Hidrográfica del Duero O.A.



Manual para la evaluación de la funcionalidad de pasos para peces de estanques sucesivos.

Metodología AEPS (1.0)



El presente manual ha sido elaborado en el marco de la colaboración establecida entre el Grupo de Ecohidráulica Aplicada de la Universidad de Valladolid, Itagra ct y la Confederación Hidrográfica del Duero, con el fin de evaluar el funcionamiento hidráulico de las escalas de artesas existentes en la cuenca del Duero.

Dirección y coordinación:

Francisco Javier Sanz Ronda (GEA)
Andrés Martínez de Azagra Paredes (GEA)

Arturo Prieto Blanco (CHD)
Ignacio Rodríguez Muñoz (CHD)
Juan Carlos Bernabé de la Iglesia (CHD)
José María Rubio Polo (CHD)
Urbano Sanz Cantalejo (CHD)

Autores:

Jorge Valbuena Castro (GEA)
Francisco Javier Sanz Ronda (GEA)
Ana García Vega (GEA)
Juan Francisco Fuentes Pérez (GEA)
Francisco Javier Bravo Córdoba (GEA)
Alberto Navas Pariente (GEA)
Jorge Ruiz Legazpi (GEA)
Néstor Joel González Alemán (GEA)
Ray Elvis Smarth Apinas (GEA)
Andrés Martínez de Azagra Paredes (GEA)

Arturo Prieto Blanco (CHD)
Ignacio Rodríguez Muñoz (CHD)
Juan Carlos Bernabé de la Iglesia (CHD)
José María Rubio Polo (CHD)
Urbano Sanz Cantalejo (CHD)

Foto de portada: escalas de peces en Vegas del Condado (río Porma, León), en el Salto de San Fernando (río Tormes, Salamanca) y en Quintana del Puente (río Arlanza, Palencia).

Recomendación a la hora de ser citado: CHD, 2016. Manual para la evaluación de la funcionalidad de pasos para peces de estanques sucesivos. Metodología AEPS (1.0). Coordinación: Sanz-Ronda *et al.*; Autores: Valbuena-Castro *et al.* Ed. Confederación Hidrográfica del Duero. Valladolid. 139 pp.

Grupo de Ecohidráulica Aplicada – GEA

Unidad Docente de Hidráulica e Hidrología

Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias (Palencia) – Universidad de Valladolid

Teléfono: 979 108358 e-mail: escalasparapeces@gmail.com web: www.gea-ecohidraulica.org

Dirección: Campus La Yutera, Avenida Madrid 44 (edificio Aulario), 34004 Palencia



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE AGRICULTURA Y PESCA,
ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE

CONFEDERACIÓN
HIDROGRÁFICA
DEL DUERO



Índice de contenidos

Resumen	11
0. Justificación	12
1. Antecedentes	14
2. Objetivos	17
3. Introducción a la metodología	17
4. Bases de aplicación de la metodología	23
4.1. Variables fundamentales	26
4.1.1. Atracción (A)	26
4.1.2. Entrada (E)	30
4.1.3. Pasaje (Ps)	40
4.1.4. Salida (S)	50
4.2. Observaciones de relevancia	59
5. Caso práctico	62
6. Bibliografía	74
ANEJOS	81
A.1. Notación y abreviaturas	82
A.2. Justificación de las variables fundamentales y observaciones de relevancia	86
A.3. Ecuaciones de gasto a través de una escala	124
A.4. Evaluación de los riesgos de los trabajos	129
A.5. Estadillo para la recogida de datos en campo	135

Índice de figuras

Figura 1. Escalas de artesas conectadas por vertederos sumergidos y orificios de fondo (arriba) y conectadas por hendiduras verticales (abajo).	18
Figura 2. Las especies piscícolas objetivo del presente documento: trucha común (izquierda), barbo ibérico (centro) y boga del Duero (derecha). Fuente: Néstor Joel González Alemán.	19
Figura 3. Categorías a considerar en una evaluación: atracción (A) (azul), entrada (E) (verde), pasaje (Ps) (amarillo) y salida (S) (rojo).	21
Figura 4. Puntuación de la variable $Q_{\text{atracción}}$. Los valores menores al 1,00 % ofrecen un valor 0 para la variable y los iguales al 1,00 % se corresponden a un valor de 5.	27
Figura 5. Ubicaciones topográficamente idóneas. Cualquier ubicación que concentre una parte importante del caudal se puede también considerar ideal.	30
Figura 6. Ubicaciones indiferentes, ¿o no? La proximidad a las orillas es siempre más interesante.	30
Figura 7. Ubicaciones desaconsejadas, si no hay caudales de atracción que ayuden a la localización. Por ejemplo, la ubicación no es la correcta, pero si concentra la totalidad del caudal, es óptima.	30
Figura 8. Explicación de ΔH_E sobre una escala y los puntos de medición (en rojo).	31
Figura 9. Desnivel entre las láminas de agua en la entrada reducido (izquierda), adecuado (centro) y excesivamente grande (derecha).	31
Figura 10. Puntuación para la variable ΔH_E . Un valor menor a 0,05 m se consideraría nulo, si la velocidad de salida fuera menor a 1,0 m/s. Si tuviera mayor velocidad, tendría un valor de 5.	32
Figura 11. Medición de h_E sobre el perfil del elemento de entrada y dónde se deben realizar las mediciones (en rojo) para un vertido sumergido (izquierda) y libre (derecha).	33
Figura 12. Esquematización de la profundidad en la entrada, donde en amarillo se representa el umbral del vertedero de entrada y en rojo la variable.	33
Figura 13. Puntuación de la variable h_E . Cuando estemos ante un vertido libre, esta variable se estima como la carga de vertido (h). Igualmente, cuando h_E sea menor a 0,10 m en un vertido sumergido, la tipología del vertido se considera “libre” y $h_E = h$	33
Figura 14. Medición de b_E sobre una hendidura vertical (izquierda), un vertedero sumergido (centro izquierda), un vertedero libre (centro derecha) y un orificio de fondo junto con su altura (d_E) (derecha) (la línea discontinua representa la lámina de agua del río). Si el vertedero fuera trapezoidal, se considera el valor medio de la base mayor a la altura del nivel de agua y de la menor.	34
Figura 15. Entradas con diferentes anchuras: 20 cm (izquierda), 80 cm (centro) y más de 100 cm (derecha).	35

Figura 16. Valoración de la anchura de la entrada para vertidos sumergidos (arriba), vertidos libres (centro), así como del área de un orificio (abajo).	36
Figura 17. Explicación gráfica de la variable $h_{previa E}$ y dónde realizar las mediciones pertinentes (en rojo).....	36
Figura 18. Vista de la poza que existe en el río antes de la entrada (en rojo) de una escala.	37
Figura 19. Puntuación de la variable $h_{previa E}$. Una profundidad menor que 0,20 m se considera con un valor nulo. En un vertido libre se exige un mínimo de profundidad en su base $> 2 \cdot \Delta H$ para obtener una valoración de 5.	37
Figura 20. Croquis para clasificar la orientación de la entrada.	38
Figura 21. Tipologías de entrada en una escala (de izquierda a derecha) (la línea discontinua representa la lámina de agua del estanque inferior): hendidura vertical (hasta $p < 0,25$ m), vertedero sumergido + orificio, vertedero libre + orificio, orificio de fondo, vertedero sumergido y vertedero libre.	39
Figura 22. Diferentes tipologías de entradas para peces: hendidura vertical (A), vertedero libre + orificio (B), vertedero sumergido + orificio (C), vertedero sumergido (D) y vertedero libre (E).	39
Figura 23. Explicación de la variable ΔH_{Ps} y los puntos donde se deben realizar las mediciones (en rojo).	40
Figura 24. Croquis del desnivel entre láminas de agua de estanques sucesivos en escalas con hendiduras verticales (A), vertederos sumergidos (B) y vertederos libres (C).	41
Figura 25. Puntuación de la variable ΔH_{Ps} para vertidos sumergidos y libres (con o sin orificios) (arriba), y hendiduras verticales u orificios (abajo).	41
Figura 26. Estanques en los que la potencia disipada por unidad de volumen presenta un valor bajo ($< 50 \text{ W/m}^3$) (izquierda), habitual ($150 - 175 \text{ W/m}^3$) (centro) y excesivo ($> 350 \text{ W/m}^3$) (derecha).	42
Figura 27. Gráfico de puntuación de la variable N.	43
Figura 28. Explicación gráfica de las variables que intervienen en t_{med}	44
Figura 29. Puntuación de la variable t_{med} . Una profundidad media menor a 0,20 m tiene un valor nulo.	44
Figura 30. Variable h_{Ps} sobre el alzado de un elemento de paso con los puntos de medición (en rojo) para un vertido sumergido (izquierda) y uno libre (derecha).	45
Figura 31. Ejemplo de la profundidad de paso sobre un vertedero (en rojo, y en azul se representa la dirección del flujo).	45
Figura 32. Valoración asociada a la variable h_{Ps} . Cuando estemos ante un vertido libre, esta variable se estima como la carga de vertido (h). Igualmente, cuando h_E sea menor a 0,10 m en un vertido sumergido, la tipología del vertido se considera "libre" y $h_{Ps} = h$	46

Figura 33. b_{Ps} sobre una hendidura vertical (izquierda), un vertedero sumergido (centro izquierda), un vertedero libre (centro derecha) y un orificio de fondo junto con su altura (d_{Ps}) (derecha) (la línea discontinua representa la lámina de agua del río).	47
Figura 34. Elementos que conectan estanques con diferentes anchuras: hendiduras de 20 cm (izquierda), vertederos sumergidos también de 20 cm (centro) y vertederos libres de 133 cm de ancho (derecha).	47
Figura 35. Puntuación de la anchura del elemento de paso para vertidos sumergidos (arriba), para vertidos libres (centro) y para el área de un orificio (abajo).	48
Figura 36. Diferentes tipos de elementos de paso más habituales (de izquierda a derecha son) (la línea discontinua representa la lámina de agua en el estanque inferior): hendidura vertical (hasta $p < 0,25$ m), vertedero sumergido+orificio, vertedero libre+orificio, orificio, vertedero sumergido y vertedero libre.	49
Figura 37. Diferentes elementos de paso en las escalas de artesas: hendidura vertical (A), vertedero sumergido y orificio de fondo (B), vertedero libre y orificio de fondo (C), orificio (D) modificación de una hendidura vertical (E) y vertido libre junto con uno de los orificios del armado del tabique (F).	49
Figura 38. Explicación de la variable ΔH_s sobre el elemento de salida junto con las ubicaciones en que se deben de realizar las mediciones (en rojo).	50
Figura 39. Desnivel en la salida de peces de una escala reducido (A), adecuado (B) y excesivo (C).	51
Figura 40. Puntuación de ΔH_s . En un vertido libre se exige un mínimo de profundidad en su base $> 2 \cdot \Delta H$ para poder ser valorada esta variable.	51
Figura 41. Variable h_s sobre el elemento de salida en vertidos sumergidos (izquierda) y libres (derecha).	52
Figura 42. Profundidad en la salida vista desde el interior de la escala.	52
Figura 43. Valoración de la variable h_s . Cuando estemos ante un vertido libre, esta variable se estima como la carga de vertido (h). Igualmente, cuando h_E sea menor a 0,10 m en un vertido sumergido, la tipología del vertido se considera "libre y $h_E = h$	53
Figura 44. Anchura de diferentes elementos de salida (b_s) (de izquierda a derecha) (la línea discontinua representa la lámina de agua en el estanque inferior): una hendidura vertical, vertedero sumergido, un vertedero libre, una hendidura vertical y un orificio de fondo (junto con su altura (d_s)).	54
Figura 45. Salidas de peces con diferentes anchuras: 20 cm (izquierda) y 50 cm (derecha).	54
Figura 46. Valoración de la anchura del elemento de paso para vertidos sumergidos (arriba), para vertidos libres (centro) y para el área de un orificio (abajo).	55
Figura 47. Medición de la variable $h_{posterior S}$	56
Figura 48. Gráfico para la puntuación de la variable $h_{posterior S}$	56
Figura 49. Categorías en las que se clasifica la salida según su dirección.	57

Figura 50. Diferentes tipos de salidas (de izquierda a derecha) (la línea discontinua es la lámina de agua del estanque inferior): hendidura vertical (hasta $p < 0,25$ m), vertedero sumergido + orificio, vertedero libre + orificio, orificio, vertedero sumergido y vertedero libre.....	58
Figura 51. Tipos de salidas más frecuentes: hendidura vertical (A), orificio (B), vertedero libre (C) y vertedero sumergido (D).	58
Figura 52. Imágenes de algunos aspectos contemplados en las observaciones de relevancia: mantenimiento y limpieza (A), accesibilidad (B), lecho naturalizado (C), deflectores en los estanques y aristas redondeadas (D), fugas de caudal (E), oscuridad (F), dispositivo contra la entrada de arrastres (barrera antiflotantes) (G), compuerta de regulación de caudales (H) y calado en el río derivado del grado de aterramiento (I). 61	
Figura 53. Entorno del paso para peces (izquierda) y detalle del mismo con la numeración de los estanques considerada en la evaluación (derecha).	62
Figura 54. Vista del interior de la escala y detalle de una de las hendiduras verticales que conectan dos de sus artesas (derecha).	63
Figura 55. Tobogán para la llamada (izquierda) y su desembocadura junto a la entrada de peces (en rojo) (derecha).	63
Figura 56. Compuertas para el vaciado del azud que se encuentran en la margen contraria a la escala, junto a la central hidroeléctrica.	64
Figura 57. Estanque tipo.	64
Figura 58. Compuerta y deflector en la salida de peces, es decir, en la alimentación de la escala.	65
Figura 59. Esquema orientativo de la planta de un estanque (arriba a la izquierda), del alzado de un tabique transversal (arriba a la derecha) y del perfil longitudinal de la escala (abajo) con las variables medidas.....	66
Figura 60. Obstrucción parcial detectada en la hendidura que conecta los estanques 3 y 4.....	72
Figura 61. Puntuación de $Q_{atracción}$	88
Figura 62. Gráfico de puntuación de ΔH_E	91
Figura 63. Ejemplos de tres profundidades previas a la entrada diferentes: reducida (izquierda), media (centro) y grande (derecha).	93
Figura 64. Puntuación de $h_{previa E}$	93
Figura 65. Gráfica para la valoración de ΔH_{Ps} en vertederos sumergidos y libres con o sin orificios.	97
Figura 66. Gráfico para la puntuación de ΔH_{Ps} para hendiduras verticales u orificios. .	98
Figura 67. Puntuación de la potencia disipada por unidad de volumen.	100
Figura 68. Estanque de una escala con un tirante medio adecuado (izquierda) y muy reducido (derecha).....	101

Figura 69. Gráfico de puntuación de t_{med}	102
Figura 70. Explicación de h_{ps} sobre un orificio de fondo (izquierda) y un vertedero sumergido (derecha).....	103
Figura 71. Gráfico para la valoración de h_{ps} . Cuando estemos ante un vertido libre, esta variable se estima como la carga de vertido (h). Igualmente, cuando h_E sea menor a 0,10 m en un vertido sumergido, la tipología del vertido se considera “libre” y $h_E = h$	103
Figura 72. Explicación de b_{ps} en un orificio de fondo (izquierda) y un vertedero sumergido (derecha).....	105
Figura 73. Puntuación de b_{ps} para vertederos sumergidos.	106
Figura 74. Sistema de puntuación de b_{ps} con vertidos libres.	106
Figura 75. Valoración de b_{ps} en orificios sumergidos.	107
Figura 76. Justificación de la puntuación de b_{ps} para orificios sumergidos.	107
Figura 77. Gráfico para la puntuación de ΔH_s	111
Figura 78. Obstrucciones en un vertedero (izquierda) y en un orificio de fondo (derecha) debidas a los restos arrastrados por la corriente al interior del paso.....	114
Figura 79. Pasarela (izquierda) y rampa en hormigón (derecha) que facilitan el acceso a dos pasos piscícolas.	115
Figura 80. Estanques que presentan aristas vivas (izquierda) y redondeadas (derecha).	115
Figura 81. Modificación de la altura de un vertedero de umbral móvil para regular el salto entre láminas de agua en la entrada.	116
Figura 82. Estanques sin deflectores (izquierda) y con ellos (derecha).....	118
Figura 83. Lecho sin naturalizar (izquierda) y naturalizado mediante la fijación de piedras (derecha).....	119
Figura 84. Ejemplos de pasos piscícolas que se encuentran parcialmente oscurecidos por elementos instalados sobre ellas o una altura excesiva de los cajeros.	120
Figura 85. Escalas con diferentes tipos de resguardos laterales: demasiado reducidos (izquierda), inicialmente insuficientes, aunque solucionado mediante la posterior colocación de vallas (centro) y suficientemente grandes (derecha).	121
Figura 86. Diferentes compuertas para regular la entrada de agua en una escala....	121
Figura 87. Ejemplos de diferentes elementos contra la entrada de elementos arrastrados por la corriente dentro de una escala.	122
Figura 88. Variables hidráulicas relacionadas con las ecuaciones de gasto: b es la anchura del elemento que conecta dos estanques, d es la altura de un orificio de fondo, h es la carga de vertido sobre un vertedero/hendidura e ΔH es el desnivel entre láminas de agua de estanques sucesivos.....	124

Figura 89. Orificio de fondo.....	125
Figura 90. Hendidura vertical.....	126
Figura 91. Vertedero libre.	127
Figura 92. Vertedero sumergido.	128
Figura 93. Medidas preventivas en la fase preliminar de los trabajos.	132
Figura 94. Algunas de las medidas preventivas durante el levantamiento topográfico.	133
Figura 95. Algunas de las medidas preventivas para la realización de aforos.....	134

Índice de tablas

Tabla 1. Variables fundamentales de cada categoría.....	22
Tabla 2. Observaciones de relevancia incluidas en cada categoría.	22
Tabla 3. Resultado de la evaluación y la necesidad de realizar mejoras o evaluaciones complementarias a partir de la puntuación obtenida para cada una de las variables fundamentales. Este criterio también es aplicable para el conjunto de estas variables de cada categoría.	25
Tabla 4. Resultado de la evaluación y la conveniencia de mejoras para cada una de las observaciones de relevancia o el conjunto de las mismas de cada categoría en función de la puntuación obtenida.....	26
Tabla 5. Valoración de los diferentes aspectos que influyen en el parámetro U_E	29
Tabla 6. Valoración de Ort_E en función de la orientación de la entrada del paso piscícola evaluado.	38
Tabla 7. Puntuación correspondiente a las diferentes tipologías de entrada.....	39
Tabla 8. Valoración de los elementos de paso según su tipología.	50
Tabla 9. Valoración de la variable Ort_s según la orientación de la salida.	57
Tabla 10. Puntuación correspondiente a cada una de las categorías en las que se engloba la salida.....	58
Tabla 11. Categorías a las que asignar cada una de las observaciones de relevancia para su puntuación.	59
Tabla 12. Criterios orientativos para la puntuación de las principales observaciones de relevancia.	60
Tabla 13. Información recogida en campo.	67
Tabla 14. Aplicación de la información recogida en campo al estadillo de campo propuesto en este documento.....	68
Tabla 15. Puntuaciones de las diferentes variables fundamentales y observaciones de relevancia.	70
Tabla 16. Puntuación total, rango de referencia, clasificación y necesidad de mejora de cada categoría.	71
Tabla 17. Explicación del sistema de puntuación planteado para $Q_{atracción}$	88
Tabla 18. Valoración de los diferentes aspectos que influyen en el parámetro U_E	89
Tabla 19. Explicación de la manera de valorar la variable ΔH_E	91
Tabla 20. Explicación detallada del sistema de valoración de $h_{previa E}$	93

Tabla 21. Justificaciones consideradas para establecer el sistema de puntuación de Ort_E	94
Tabla 22. Explicación del sistema de puntuación de ΔH_{Ps} en vertederos sumergidos y libres con o sin orificios.	98
Tabla 23. Argumentación considerada en el sistema de puntuación de ΔH_{Ps} para hendiduras verticales u orificios.	98
Tabla 24. Explicación del sistema de puntuación de la variable N.	100
Tabla 25. Justificación del sistema de valoración planteado para t_{med}	102
Tabla 26. Justificación del sistema de puntuación para la variable h_{Ps}	104
Tabla 27. Aclaración de las consideraciones valoradas para b_{Ps} en vertidos sumergidos.	106
Tabla 28. Explicación del planteamiento seguido para b_{Ps} con vertidos libres.....	107
Tabla 29. Aspectos considerados en el desarrollo del sistema de puntuación de la variable T_{Ps}	110
Tabla 30. Justificación de la valoración de la variable ΔH_s	112
Tabla 31. Justificación de la puntuación de Ort_s	113
Tabla 32. Niveles de riesgo de acuerdo a su probabilidad estimada y a sus consecuencias esperadas.....	130
Tabla 33. Estimación de la probabilidad, severidad y grado de los posibles riesgos de los trabajos de evaluación.....	131

Resumen

Los pasos para peces son dispositivos que permiten su desplazamiento hacia aguas arriba y aguas abajo de los obstáculos transversales presentes en los ríos. En las últimas décadas, su instalación a lo largo de todo el mundo ha ido en aumento. Sin embargo, a pesar de su importancia ecológica, no existe una metodología clara para evaluar su eficiencia, tanto desde el punto de vista hidráulico como biológico y son escasos los que han sido estudiados para determinar si son capaces de satisfacer la finalidad para la que fueron construidos.

Este trabajo desarrolla una metodología que permite evaluar la tipología de paso para peces más común, las escalas de estanques sucesivos o de artesas, centrándose en las necesidades de algunas de las especies más ampliamente distribuidas en la Península Ibérica y de especial importancia en la Cuenca del Duero: trucha autóctona, barbo ibérico y boga del Duero. Dicha metodología pretende ser lo suficientemente sencilla, rápida y práctica para permitir su utilización sin equipamiento sofisticado y requiriendo poco personal. La metodología proporciona resultados cuantificables que sirven para identificar los problemas que presenta una escala para peces, así como la manera de solucionarlos y la urgencia de su corrección, optimizando la aplicación de los esfuerzos y recursos destinados a mejorar la continuidad longitudinal de nuestros cursos de agua.

0. Justificación

La Confederación Hidrográfica del Duero (CHD) tiene entre sus funciones las relacionadas con la protección del dominio público hidráulico (DPH), el régimen concesional, así como la elaboración del Plan Hidrológico de la parte española de la Demarcación Hidrográfica del Duero.

La protección del DPH se lleva a cabo, entre otros, mediante el otorgamiento de concesiones para el uso privativo del agua, con la imposición de condiciones. Entre ellas la de instalación de dispositivos de pasos para peces en estructuras transversales para conseguir su franqueabilidad y permitir las migraciones de las poblaciones piscícolas, garantizando la continuidad longitudinal del río y de la masa de agua (artº 126 bis del Reglamento del Dominio Público Hidráulico, condiciones para garantizar la continuidad fluvial).

Asimismo, dicha protección se consigue a través de las funciones de vigilancia y control del DPH que corresponden a las Comisaría de Aguas, en cuyo marco se ha llevado a cabo un exhaustivo programa de seguimiento de aprovechamientos hidroeléctricos que ha conducido a la construcción y adecuación de numerosos pasos piscícolas para dar cumplimiento a la normativa estatal y autonómica y las condiciones concesionales.

La elaboración y revisión de los Planes Hidrológicos requiere, entre otros, el establecimiento de un Programa de Medidas para alcanzar los objetivos medioambientales que establece la Directiva Marco del Agua. Siendo partícipe de ello, la normativa del Plan Hidrológico de la parte española de la Demarcación Hidrográfica del Duero, establece en su artículo 22 toda una serie de medidas para evitar la ruptura de la continuidad del cauce. En el punto 5º de dicho artículo se dice que “La evaluación de la franqueabilidad se llevará a cabo conforme a los indicadores

hidromorfológicos de continuidad para la valoración del estado de las masas de agua de la categoría río...”

El cumplimiento de estas disposiciones en el marco del Plan Hidrológico comporta un conocimiento de la franqueabilidad en cada azud o presa asociados a los aprovechamientos hidroeléctricos y de otro tipo, siguiendo el índice de franqueabilidad (IF) elaborado para la cuenca del Duero, a partir del cual se calcula el índice de compartimentación (IC) que se utiliza en la valoración del estado de las masas de agua de la categoría río. Estos índices se explican en detalle en el manual de *“Criterios para la evaluación del estado de las masas de agua superficiales de la categoría río”*, constituyendo el Apéndice IV del Anejo 8.2 de la Memoria del Plan, que puede descargarse en:

www.chduero.es/Inicio/Planificaci%C3%B3n/Planhidrol%C3%B3gico20152021/PlanHidrol%C3%B3gico/tabid/734/Default.aspx

En el sistema de información de la cuenca del Duero MÍRAME-IDEDuero, se puede obtener información de la valoración de estado de cada masa de agua:

www.mirame.chduero.es

Este manual pretende ser una herramienta útil para todo lo anterior, definiendo con objetividad la franqueabilidad de los obstáculos asociados a escalas de artesas en todas sus fases: diseño, ejecución y funcionamiento.

Por último, indicar que su elaboración se ha realizado como parte de los trabajos recogidos en el Convenio específico de colaboración entre la Confederación Hidrográfica del Duero y el Instituto Tecnológico Agrario y Agroalimentario de la Universidad de Valladolid para la realización de un programa de control y monitorización de las medidas de mejora de la continuidad longitudinal en aprovechamientos hidroeléctricos de la cuenca del Duero.

1. Antecedentes

A lo largo de la historia, y en especial durante el siglo XX, el ser humano ha realizado numerosas alteraciones en los cursos de agua de todo el planeta, destacando la construcción de obras transversales como presas o azudes (Malmqvist & Rundle 2002; Nilsson *et al.* 2005; Katopodis & Williams 2012; Sanz-Ronda *et al.* 2013). Este tipo de obras tiene un impacto negativo sobre la ictiofauna ya que, entre otros, rompen la conectividad longitudinal de los ríos generando lo que se conoce como “efecto barrera” (Roscoe & Hinch 2010; Santos *et al.* 2012; Williams *et al.* 2012; Sanz-Ronda *et al.* 2013; Febrina *et al.* 2015). Este efecto impide o limita los desplazamientos piscícolas naturales, llegando a producir alteraciones en su comportamiento reproductivo (retrasos en la freza, puestas en lugares inadecuados, etc.) y en la estructura de las comunidades (aislamiento poblacional, disminución de la diversidad, degeneración genética, etc.) que pueden desembocar en reducciones drásticas de las poblaciones piscícolas, o incluso llegar a hacerlas desaparecer (Jungwirth *et al.* 1998; Santos *et al.* 2002; Nilsson *et al.* 2005; Sanz-Ronda *et al.* 2013; Febrina *et al.* 2015). Ante estos efectos adversos, se han planteado varias soluciones, siendo una de ellas la construcción de dispositivos de franqueo denominados “pasos para peces” (Katopodis 1992; Clay 1995; Bunt *et al.* 2012; Foulds & Lucas 2013; Sanz-Ronda *et al.* 2013).

Los peces, para completar o complementar sus ciclos vitales, realizan desplazamientos tanto ascendentes como descendentes, siendo un tipo de movimiento tan importante como el otro (Lucas *et al.* 2001). Históricamente, se ha prestado más atención a los movimientos reproductivos de ascenso debido a su mayor visibilidad y a la importancia que conllevan para la conservación (Lucas *et al.* 2001; Malmqvist & Rundle 2002). Sin embargo, esa tendencia está cambiando. Por ello, en el concepto actual de permeabilidad de obstáculos asociado a los pasos para peces incluye los desplazamientos en ambas direcciones (Jungwirth *et al.* 1998; Agostinho *et*

al. 2002; Larinier & Travade 2002; Armstrong *et al.* 2004; Katopodis & Williams 2012; Sanz-Ronda *et al.* 2013).

Existen muchos pasos para peces en el mundo y solo una pequeña parte de los mismos ha sido evaluada, por lo que el conocimiento sobre su funcionalidad es reducido y a menudo poco fiable (Agostinho *et al.* 2002; Santos *et al.* 2002; Roscoe & Hinch 2010; Noonan *et al.* 2012; Cooke & Hinch 2013). En los pocos casos estudiados se ha observado mucha divergencia en los resultados. Mientras que a veces su efecto es positivo para los peces (tránsito adecuado y sin retrasos), otras veces no funcionan o incluso pueden llegar a resultar perjudiciales (demoras, aglomeraciones, depredación, dispersión de especies invasoras, etc.) (Roscoe & Hinch 2010; Bunt *et al.* 2012). Por tanto, la mera presencia de un paso para peces no siempre garantiza que éstos puedan superar un obstáculo o al menos hacerlo de manera adecuada (Roscoe & Hinch 2010). Por ello, es muy conveniente que todos estos dispositivos sean evaluados antes, durante y después de su construcción para asegurar su correcto diseño, ejecución y funcionamiento respecto al proyecto original, así como su adecuación para la fauna involucrada y siempre, teniendo en cuenta las variables condiciones hidráulicas existentes en la zona (Jungwirth *et al.* 1998; Roscoe & Hinch 2010; Sanz-Ronda *et al.* 2013; Towler *et al.* 2013; Febrina *et al.* 2015).

Dentro de los trabajos de evaluación hay que distinguir dos tipos de enfoque: hidráulico y biológico. Mientras que el primero atiende al estudio de las relaciones entre aspectos biológicos de los peces (capacidad de nado y comportamiento) conocidos previamente y la hidráulica del conjunto del paso (movimiento del flujo dentro de la estructura, su diseño, su dimensionado y su situación con respecto a las láminas de agua) (Sanz-Ronda *et al.* 2014); el segundo se centra en el comportamiento real de los individuos en el propio paso y analiza la cantidad y diversidad de ictiofauna que emplea estos dispositivos. Ambos criterios deben integrarse para llegar a una completa evaluación de la estructura.

La forma lógica de actuar al evaluar un paso para peces, en su fase de diseño o tras su ejecución, es comenzar atendiendo a las cuestiones hidráulicas y de diseño. Esto, permitirá la identificación y solución de problemas que afectan al funcionamiento. Una vez identificados y corregidos los aspectos conflictivos, si existen, se procederá con la evaluación biológica. Sin embargo, en la práctica, debido a los requerimientos técnicos y económicos, se suele atender exclusivamente a las variables hidráulicas de dimensionamiento como método de evaluación aproximado para determinar la eficiencia de un paso para peces (Sanz-Ronda *et al.* 2013).

Así mismo, a pesar de que actualmente existen múltiples trabajos que tratan de manera amplia el tema de los pasos para peces y desde diferentes enfoques [manuales de diseño (Larinier *et al.* 1992; Clay 1995; Martínez de Azagra 1999; DVWK 2002;), artículos científicos (Wang *et al.* 2010; Sanz-Ronda *et al.* 2013), congresos internacionales (Fish Passage, Ecohydraulics), cursos y material de formación (Sanz-Ronda *et al.* 2009 y posteriores), entre otros], aún son escasos los que se centran específicamente en su evaluación hidráulica (Kemp & O'Hanley. 2010; Solà *et al.* 2011; Ordeix *et al.* 2011; Schmutz & Mielach 2013; Baudoin *et al.* 2015) o biológica (Castro-Santos *et al.* 2009, Bunt *et al.* 2012; Sanz-Ronda *et al.* 2016). Estos últimos precisan de muestreos o marcaje y detección de peces por el sistema de paso, lo que conlleva gran cantidad de recursos (económicos y temporales) para obtener resultados reseñables. No obstante, sus conclusiones son enormemente fiables.

Por su parte, los procedimientos de evaluación hidráulica mencionados se basan en la medición de varios parámetros clave de una escala de artesas (i.e. anchura de los vertederos, longitud del estanque, saltos de agua y profundidades) con objeto de un pre-análisis cualitativo y rápido de su funcionalidad. Es decir, consumen menos recursos, pero sus resultados son orientativos, pues no analizan variables de interés dentro de la escala (caudal, potencia disipada, profundidades de paso en los vertederos) y ni fuera de ella (atracción de los hacia la misma).

Por lo tanto, resulta necesario el desarrollo de un método de evaluación objetivo, rápido, fiable y fácil de aplicar en las escalas de artesas. Éste es el fin último del presente trabajo.

2. Objetivos

Desarrollar una metodología técnica para la evaluación del ascenso de los peces a través de las escalas de estanques sucesivos. La metodología propuesta debe:

- ser práctica y de sencilla aplicación.
- estar fundamentada biológica e hidráulicamente.
- considerar todas las etapas del desplazamiento ascendente del pez: atracción hacia el paso, entrada al mismo, pasaje y salida.
- tener capacidad para determinar cuantitativamente la funcionalidad de la escala e identificar sus problemas.
- ser útil en todas las fases de un proyecto (redacción, evaluación administrativa y post-ejecución).
- aportar resultados concluyentes y fácilmente interpretables para tomar decisiones de gestión en el ámbito de una Confederación Hidrográfica.

3. Introducción a la metodología

Un paso para peces ideal es aquél que posibilita que los peces se muevan sin experimentar retrasos, daños, inseguridad o selectividad en cuanto a los individuos que son capaces de utilizarlo por razones de edad, sexo o especie (Martínez de

Azagra 1999; DVWK 2002; Armstrong *et al.* 2004; Roscoe y Hinch 2010; Bunt *et al.* 2012b).

Dentro de las diferentes tipologías de pasos para peces existentes, las más frecuentes a nivel mundial son las llamadas “escalas de estanques sucesivos o de artesas” (Martínez de Azagra 1999; Larinier 2002b; Armstrong *et al.* 2004; Sanz-Ronda *et al.* 2013; Fuentes-Pérez *et al.* 2014). Estas escalas conectan las masas de agua arriba y abajo de un obstáculo mediante una serie de depósitos o “piscinas” colocadas consecutivamente a modo de escaleras entre las que el agua fluye a través de tabiques vertientes, vertederos, hendiduras u orificios (Clay 1995; Martínez de Azagra 1999; DVWK 2002; Larinier 2002b; Sanz-Ronda *et al.* 2013).



Figura 1. Escalas de artesas conectadas por vertederos sumergidos y orificios de fondo (arriba) y conectadas por hendiduras verticales (abajo).

La metodología está enfocada hacia tres especies piscícolas ampliamente distribuidas en la Península Ibérica y de especial importancia en la cuenca Duero: la trucha común o autóctona (*Salmo trutta* Linnaeus 1758), el barbo ibérico (*Luciobarbus bocagei* Steindachner 1864) y la boga del Duero (*Pseudochondrostoma duriense* Coelho 1985), todas ellas con capacidades natatorias conocidas y similares (Castro-Santos *et al.* 2013; Sanz-Ronda *et al.* 2015), y sobre las que ya existen trabajos previos sobre su comportamiento ascendente en escalas de artesas (Sanz-Ronda *et al.* 2016; Bravo-Córdoba *et al.* 2016). Así mismo, la metodología contempla únicamente el ascenso de los peces por la escala, pues los desplazamientos de descenso pueden realizarse mediante diferentes alternativas: el propio paso, aliviaderos y rebajes, estructuras específicas, caer por la propia coronación del obstáculo, pasar a través de las turbinas, ... (Baudoin *et al.* 2014).



Figura 2. Las especies piscícolas objetivo del presente documento: trucha común (izquierda), barbo ibérico (centro) y boga del Duero (derecha). Fuente: Néstor Joel González Alemán.

Aunque los pasos para peces deben resultar funcionales durante todo el año (Martínez de Azagra 1999; DVWK 2002), es primordial asegurar las épocas más importantes (reproducción) por la cuantía de desplazamientos y la sostenibilidad de las poblaciones de peces (Larinier 2002b; Armstrong *et al.* 2004). Por ello, se recomienda aplicar la metodología propuesta en condiciones normales (caudal y régimen de funcionamiento del complejo: escala y derivación) durante la época de migración

reproductiva. Dentro del ámbito de la cuenca hidrográfica del río Duero, la migración reproductiva ascendente de la trucha común suele producirse desde noviembre hasta diciembre, pudiendo alargarse hasta enero o febrero (Doadrio 2002). El barbo ibérico y la boga del Duero suelen desplazarse hacia aguas arriba con fines reproductivos desde marzo hasta junio e incluso hasta julio (Doadrio 2002), siendo lo más habitual en la cuenca del Duero los meses de mayo y junio (Sanz-Ronda *et al.* 2013). No obstante, también existen desplazamientos muy evidentes de trucha a comienzos de verano, buscando aguas más frescas río arriba y de ciprínidos durante el otoño (especialmente la boga) por motivos tróficos (Lucas *et al.* 2001).

Se deben tener en cuenta las cuatro fases o categorías más importantes en la evaluación de un paso para peces (Odeh 1999; Castro-Santos *et al.* 2009): atracción (A), entrada (E), pasaje (Ps) y salida (S) (Figura 3)¹. La atracción (A) estudia la facilidad de la aproximación de los peces a la escala. La entrada (E) se refiere a la acción por la cual los peces pasan del río (aguas abajo) al interior de la escala. El pasaje (Ps) analiza el recorrido que realizan por el interior del paso para peces desde la parte inferior hasta alcanzar la parte superior. La salida (S) estudia el proceso de abandono de la escala para proseguir su ascenso por el río (aguas arriba), una vez que los peces han alcanzado el último estanque.

¹ Todas las abreviaturas y notación que se utilizan en adelante se encuentran reflejadas en el Anejo A.1. Notación y abreviaturas, además de en la página donde se realiza la primera mención.

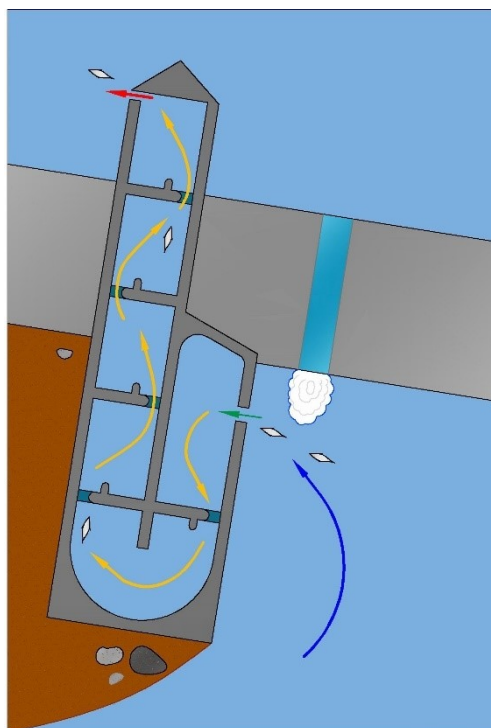


Figura 3. Categorías a considerar en una evaluación: atracción (A) (azul), entrada (E) (verde), pasaje (Ps) (amarillo) y salida (S) (rojo).

Dentro de las cuatro categorías anteriores se engloban 44 aspectos relevantes para la realización de una evaluación, de los cuales, 20 reciben el nombre de “variables fundamentales” y consideramos imprescindible su análisis pues condicionan enormemente el paso de los peces (Tabla 1). Se trata de variables cuantitativas y el equipo necesario para su estudio es un flexómetro, un nivel topográfico y una pértiga. Los 24 aspectos restantes se denominan “observaciones de relevancia” (O) y se refieren a aspectos complementarios que facilitan el funcionamiento y manejo de la escala, o que facilitan el ascenso de los peces (Tabla 2). Se corresponden con variables cualitativas, generalmente, cuya valoración se realiza en base a la observación del evaluador (normalmente presencia/ausencia).

Tabla 1. Variables fundamentales de cada categoría.

Categoría	Variable fundamental	Notación
Atracción	Caudal relativo de atracción	$Q_{atracción}$
	Ubicación de la entrada para peces	U_E
Entrada	Desnivel entre la lámina de agua en el río y en el estanque inferior	ΔH_E
	Profundidad en la entrada	h_E
	Anchura de la entrada	b_E
	Profundidad previa a la entrada	$h_{previa\ E}$
	Orientación de la entrada respecto del río	Ort_E
	Tipología de la entrada	T_E
Pasaje	Desnivel entre láminas de agua de estanques sucesivos	ΔH_{Ps}
	Potencia disipada por unidad de volumen	N
	Tirante medio en los estanques	t_{med}
	Profundidad de paso entre estanques	h_{Ps}
	Anchura de paso entre estanques	b_{Ps}
	Tipología del paso (conexión) entre estanques	T_{Ps}
Salida	Desnivel entre la lámina de agua en el río y en el estanque superior	ΔH_S
	Profundidad en la salida	h_S
	Anchura de la salida	b_S
	Profundidad posterior al vertedero de salida	$h_{posterior\ S}$
	Orientación de la salida respecto del río	Ort_S
	Tipología de la salida	T_S

Tabla 2. Observaciones de relevancia incluidas en cada categoría.

Categoría	Observaciones de relevancia
Atracción	Mantenimiento y limpieza
	Accesibilidad
Entrada	Mantenimiento y limpieza
	Elementos para la regulación del salto entre láminas de agua
	Descargas de flujo en la entrada
	Ausencia de otras descargas de flujo que alejen el pez de la escala
	Aristas redondeadas
	Accesibilidad
Pasaje	Mantenimiento y limpieza
	Forma de los estanques
	Deflectores en los estanques
	Conservación de la estructura
	Lecho naturalizado con piedras
	Aristas redondeadas
	Oscuridad por elementos que cubren la escala
	Resguardo en los estanques
Salida	Accesibilidad
	Mantenimiento y limpieza
	Compuerta de regulación de caudales
	Dispositivo contra la entrada de arrastres
	Salida segura
	Aristas redondeadas
	Accesibilidad

4. Bases de aplicación de la metodología

A partir de la bibliografía existente y de las experiencias en campo y laboratorio del Grupo de Ecohidráulica Aplicada (GEA) de la Universidad de Valladolid, para cada variable considerada se ha establecido una valoración de 0 (mínimo) a 10 (máximo) en función de su idoneidad para el ascenso de los peces por una escala.

La asignación de un valor de 0 puntos implica que un aspecto resulta desaconsejable para la mayoría de los individuos de la población piscícola objetivo, mientras que 10 puntos indica que es teóricamente apropiado para todos los ejemplares (Anejo A.2.).

Para aplicar la metodología, primero hay que realizar la medición y análisis de las diferentes variables fundamentales y observaciones de relevancia sobre la escala a evaluar (Tabla 1 y 2). Dichos aspectos se encuentran recogidos en un estadillo a cumplimentar en campo (Anejo A.5.). Posteriormente, se cuantifican en gabinete siguiendo los criterios de puntuación asociados a cada variable fundamental (apartado 4.1.) y a cada observación de relevancia (apartado 4.2.).

Una vez que se dispone de las valoraciones de cada variable fundamental, se determina la puntuación correspondiente para cada una de las 4 categorías según las ecuaciones 1 a 4. Las ecuaciones propuestas (1 a 4) realizan una media geométrica² de las diferentes variables fundamentales consideradas en cada una de las categorías:

$$A = (Q_{atracción} \cdot U_E)^{1/2} \quad (\text{Ec. 1})$$

$$E = (\Delta H_E \cdot h_E \cdot b_E \cdot h_{previa E} \cdot Ort_E \cdot T_E)^{1/6} \quad (\text{Ec. 2})$$

² La media geométrica ofrece valores nulos (0) si una de sus variables tiene un valor 0. De esta manera, si todas son idóneas y una es totalmente inapropiada, el resultado final es nulo, es decir, que los peces no ascienden.

$$Ps = (\Delta H_{Ps} \cdot N_{Ps} \cdot t_{med} \cdot h_{Ps} \cdot b_{Ps} \cdot T_{Ps})^{1/6} \quad (\text{Ec. 3})$$

$$S = (\Delta H_S \cdot h_S \cdot b_S \cdot h_{posterior\ S} \cdot Ort_S \cdot T_S)^{1/6} \quad (\text{Ec. 4})$$

De manera similar, cuando se determina la puntuación de cada observación de relevancia por separado, se procede a calcular la puntuación correspondiente a cada una de las 4 categorías, pero en este caso mediante una media aritmética³:

$$PO_i = \frac{O_{i1} + \dots + O_{in}}{n_O} \quad (\text{Ec. 5})$$

donde PO_i es la puntuación conjunta de las observaciones de relevancia de una categoría i , O_{i1} es puntuación de la primera y O_{in} de la última, y n_O es el número total de observaciones.

En la categoría Ps se calculan las puntuaciones de cada variable para el estanque tipo de diseño, que es el mayoritario, pero también se tienen en cuenta cada uno de los estanques singulares (si existen), es decir, aquéllos que son diferentes a la mayoría por algún motivo (normalmente, mala ejecución de la obra)⁴. Después, se calcula la

³ La media aritmética penaliza los valores nulos (0) en su resultado, pero no ofrece un valor final nulo si alguna de las observaciones es defectuosa (valor = 0) y el resto no. Esto se debe a que las observaciones de relevancia, en caso de existir, mejoran el conjunto de la escala. Sin embargo, si no están presentes, el funcionamiento de la estructura para el paso de peces puede seguir siendo válido.

⁴ Un estanque de descanso semejante a los estanques tipo, a excepción de su longitud, no se consideraría una singularidad.

puntuación conjunta de cada variable para todos los estanques de acuerdo a la ecuación (Ec. 6), es decir, como media aritmética de la puntuación obtenida⁵:

$$Punt = \frac{n_{tipo} \cdot Punt_{tipo} + \sum Punt_i}{n_{total}} \quad (Ec. 6)$$

donde *Punt* es la puntuación final de la variable fundamental u observación de relevancia que se considera en la evaluación, *n_{tipo}* es el número de estanques tipo, *Punt_{tipo}* es la puntuación de la variable u observación para el estanque tipo, *Punt_i* es la puntuación de esa variable u observación para un estanque singular *i*, mientras que *n_{total}* es el número total de estanques.

Finalmente, se determina el grado de necesidad de que se realicen modificaciones o mejoras para cada una de las variables fundamentales o para el conjunto de las mismas englobadas en una categoría (Tabla 3)⁶.

Tabla 3. Resultado de la evaluación y la necesidad de realizar mejoras o evaluaciones complementarias a partir de la puntuación obtenida para cada una de las variables fundamentales. Este criterio también es aplicable para el conjunto de estas variables de cada categoría.

Rango de referencia	Resultado de la evaluación	Modificaciones o mejoras
$0 \leq \text{Parámetro} \leq 4$	Muy Desfavorable	Imprescindibles o evaluación biológica
$4 < \text{Parámetro} \leq 6$	Desfavorable	Muy necesarias o evaluación biológica
$6 < \text{Parámetro} \leq 8$	Favorable	Recomendables
$8 < \text{Parámetro} \leq 10$	Muy favorable	Opcionales

⁵ El empleo del estanque tipo en el que se basa la obra simplifica los trabajos de campo. No obstante, en el caso de topografías exhaustivas (toda la escala) y/o muchos estanques singulares, cada estanque puede considerarse de manera independiente y realizar la media aritmética del conjunto.

⁶ En el caso de que alguna de las categorías, o toda la escala, obtengan una puntuación de 0 deberán indicarse las causas.

Además, por separado, se establece la conveniencia de efectuar mejoras y modificaciones de las observaciones de relevancia de forma individual o todas las consideradas en cada categoría (Tabla 4).

Tabla 4. Resultado de la evaluación y la conveniencia de mejoras para cada una de las observaciones de relevancia o el conjunto de las mismas de cada categoría en función de la puntuación obtenida.

Rango de referencia	Resultado de la evaluación	Modificaciones o mejoras
$0 \leq \text{Parámetro} < 2$	Muy Desfavorable	Muy necesarias
$2 \leq \text{Parámetro} < 5$	Desfavorable	Necesarias
$5 \leq \text{Parámetro} < 8$	Favorable	Recomendables
$8 \leq \text{Parámetro} \leq 10$	Muy favorable	Opcionales

4.1. Variables fundamentales ^{7, 8, 9 y 10}

4.1.1. Atracción (A)

4.1.1.a. Caudal relativo de atracción ($Q_{\text{atracción}}$)

Se corresponde con el flujo que posibilita la llamada (agitación de las aguas, ruido, oxigenación, etc.) en el entorno del paso para peces y que los atrae hacia su entrada. Si el caudal de atracción es demasiado reducido respecto del caudal que vierte el azud, no se facilita que los peces localicen la ubicación del paso de forma sencilla y rápida, ni que se acerquen a las inmediaciones de la escala. Esta variable se determina como la relación entre los caudales que generan atracción, que son el caudal de la escala y el auxiliar de llamada (si existiese), respecto del total que circula por el curso de agua (Ec. 7 y 8).

⁷ Es recomendable, e imprescindible en muchas ocasiones, cortar el flujo de agua en la escala para poder medir las variables de manera correcta.

⁸ Las mediciones sobre la lámina de agua de un estanque se realizarán en el centro de dicho estanque. Las mediciones sobre la lámina de agua del río han de realizarse lo más próximas a la escala, siempre y cuando se trate de una zona horizontal, es decir, sin saltos ni turbulencias de relevancia.

⁹ Las mediciones sobre la lámina de agua del río han de realizarse lo más próximas a la escala, siempre y cuando se trate de una zona horizontal, es decir, sin saltos ni turbulencias de relevancia.

¹⁰ Todas las mediciones se efectuarán en circunstancias de caudal habituales para la época de migración.

$$Q_{llamada} = Q_{escala} + Q_{auxiliar} \quad (\text{Ec. 7})$$

$$Q_{atracción} = \frac{Q_{llamada}}{Q_{curso}} \cdot 100 \quad (\text{Ec. 8})$$

Donde $Q_{atracción}$ es el % del caudal que sirve para la llamada respecto del total de la corriente o del caudal ecológico (Q_{curso} , en m^3/s); Q_{escala} es el caudal que circula a través de la escala (m^3/s); $Q_{auxiliar}$ es el caudal auxiliar de llamada peces¹¹ (m^3/s).

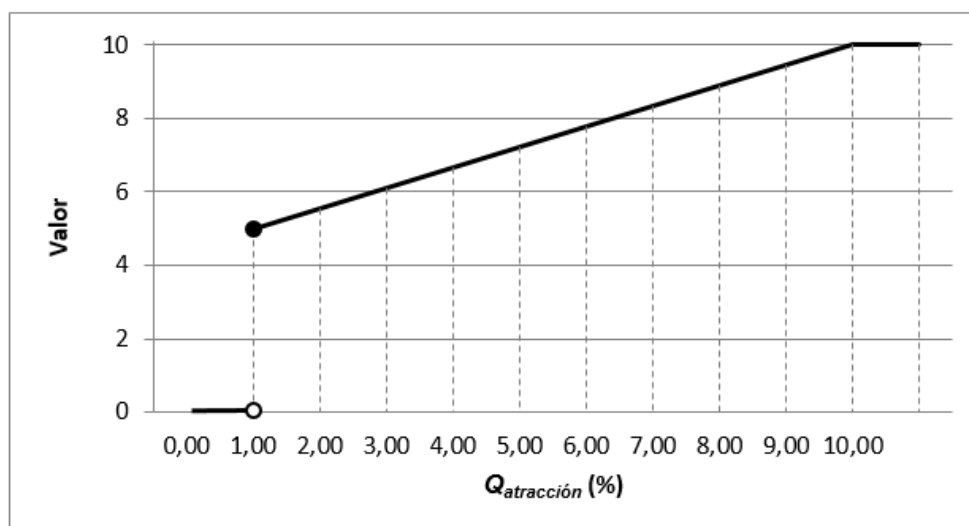


Figura 4. Puntuación de la variable $Q_{atracción}$. Los valores menores al 1,00 % ofrecen un valor 0 para la variable y los iguales al 1,00 % se corresponden a un valor de 5.

Q_{curso} se corresponde con un caudal habitual durante la migración (cuenca Duero: mayo/junio para los ciprínidos y noviembre/diciembre para la trucha). En el caso de centrales hidroeléctricas que turbinan a pie de presa (sin canal de restitución), debe considerarse el caudal turbinado. Si la restitución está alejada del azud, no se

¹¹ Para considerarlo como un caudal auxiliar, éste debe concentrarse a ≤ 3 m respecto de la entrada de peces de la escala, debido a que esa es la distancia máxima a la que se considera que el flujo de la propia escala puede atraer a un pez (Bunt et al. 1999, 2012a; Aarestrup et al. 2003). En caso contrario, no se considera, e incluso puede ser negativo para la atracción.

contempla, al no incidir directamente en la funcionalidad de la escala. No obstante, hay que tener en cuenta que la confluencia entre la restitución y río puede ser un punto crítico en la orientación ascendente de los peces (Bravo-Córdoba *et al.* 2016). En cualquier caso, la relación entre el caudal ecológico y el caudal máximo turbinado suele ser mayor que el 5 % en las centrales de la cuenca del Duero.

4.1.1.b. Ubicación de la entrada para peces (U_E)

Emplazamiento de la entrada del paso para peces respecto del teórico ideal. Influye en la facilidad con que los peces encuentran dicha entrada. Las ubicaciones idóneas son aquellas en las que la entrada del paso se encuentra lo más aguas arriba que permita el obstáculo, junto a la base de dicho obstáculo, próxima a las orillas (Figura 5), junto a la base y/o en los lugares en los que se concentra la mayor cantidad del caudal (i.e. salida de turbinas a pie de presa, vertederos de llamada, etc.)¹² (Clay 1995; DVWK 2002; Larinier 2002b; Katopodis *et al.* 2013). Ello facilita que los peces sean dirigidos hacia la entrada de la escala, siempre y cuando exista una profundidad de agua suficiente en la aproximación (óptimo $\geq 0,60$ m) para que alcancen el interior del paso piscícola sin quedar excesivamente expuestos a depredadores, presentar daños por rozaduras o sufrir estrés. Si la ubicación teórica (i.e. lo más aguas arriba posible) no presenta una profundidad mínima ($< 0,60$ m) no se considera idónea y en su lugar la mejor opción será aquella que esté inmediatamente aguas abajo, pero que sí que presente un calado suficiente.

En el caso de azudes rectos en planta (dispuestos perpendicularmente frente a la corriente), siempre se prefieren ubicaciones próximas a la orilla y/o donde se

¹² La casuística es muy variable y el caudal que vierte por el azud es también un condicionante. Un caso habitual son azudes muy anchos, con un caudal ecológico repartido uniformemente (o no) por su coronación y que discurre por un tramo de río trezado, dividido en varios brazos. En esta situación se recomienda escoger el cauce de mayor entidad (dimensiones y caudal) para conocer la mejor ubicación de la escala. El caso práctico (Apartado 5) analiza una situación similar.

concentre la mayor cantidad de caudal (Figura 6) (Larinier 2002b). La figura 7 muestra disposiciones desaconsejables para diferentes estructuras de azud, y son en las que la estructura del azud dificulta que los individuos puedan encontrar la entrada del paso.

Por lo tanto, en este parámetro se deben valorar los siguientes aspectos según su idoneidad (Tabla 5), para posteriormente puntuar la variable de acuerdo a un valor medio.

- Ubicación próxima a una orilla (o sin que exista vertido sobre coronación entre la orilla y la escala de peces).
- Emplazamiento lo más aguas arriba posible (o sin que exista vertido sobre coronación entre la escala de peces y el estribo de aguas arriba del azud).
- Colocación junto a la base del obstáculo (o alejada, si por la escala se concentra todo el caudal).
- Localización donde se concentre un mayor caudal (si existe una zona con vertido natural, un vertedero de llamada o junto a la restitución de una central hidroeléctrica que turбина a pie de presa).

Tabla 5. Valoración de los diferentes aspectos que influyen en el parámetro U_E^{13} .

Nivel de idoneidad	Valor
Muy adecuado	10
Adecuado	6,7
Inadecuado	3,3
Muy inadecuado	0

¹³ Si la escala concentra todo el caudal del tramo, su ubicación será siempre óptima.

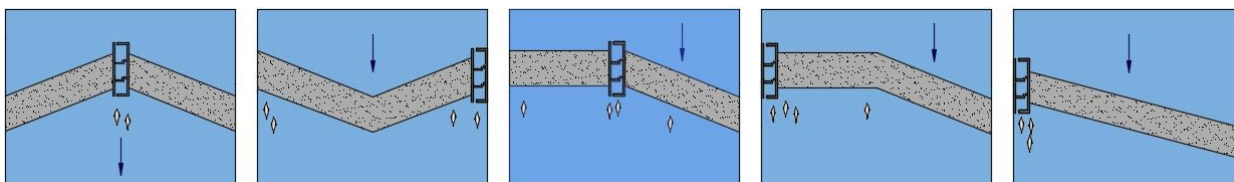


Figura 5. Ubicaciones topográficamente idóneas. Cualquier ubicación que concentre una parte importante del caudal se puede también considerar ideal.

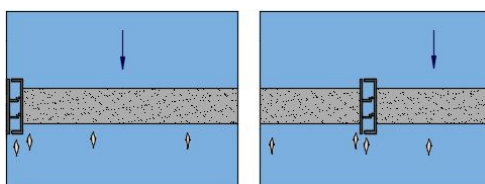


Figura 6. Ubicaciones indiferentes, ¿o no? La proximidad a las orillas es siempre más interesante.

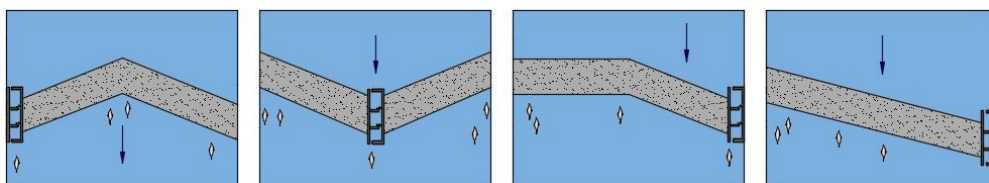


Figura 7. Ubicaciones desaconsejadas, si no hay caudales de atracción que ayuden a la localización. Por ejemplo, la ubicación no es la correcta, pero si concentra la totalidad del caudal, es óptima.

4.1.2. Entrada (E)¹⁴

4.1.2.a. Desnivel entre la lámina de agua en el río y en el estanque inferior (ΔH_E)

Diferencia de cota (ΔH_E) (m) medida entre las láminas de agua del río y del estanque de entrada de peces (Figura 8). Si el desnivel es demasiado pequeño, el efecto llamada que produce el caudal que circula por la escala es muy reducido, disminuyendo la estimulación de los peces por introducirse en el paso. Por otro lado, si

¹⁴ En caso de que existan dos entradas, se valorará de manera independiente cada una.

esta variable resulta demasiado grande, la proporción de individuos de la población piscícola capaz de superar la corriente e introducirse en la escala es mínima o inexistente¹⁵.

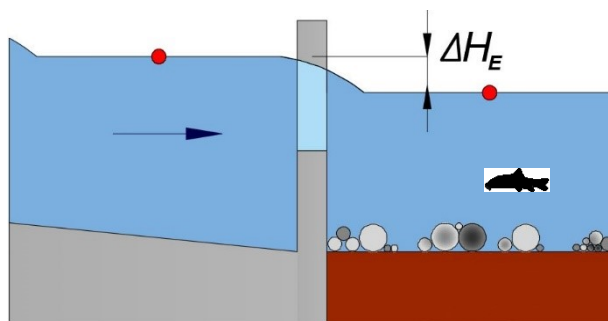


Figura 8. Explicación de ΔH_E sobre una escala y los puntos de medición (en rojo).



Figura 9. Desnivel entre las láminas de agua en la entrada reducido (izquierda), adecuado (centro) y excesivamente grande (derecha).

¹⁵ Este valor fluctúa con el caudal y sólo se considera un problema, si para caudales habituales es elevado o muy reducido. En ocasiones, si el caudal en la visita está en el rango superior de caudales ordinarios para la época de migración, es posible que la entrada esté anegada y el salto sea reducido. En ese caso, la velocidad del flujo puede resultar también atrayente y se debe comprobar si en la entrada es $> 1,0$ m/s (mediante la ecuación de continuidad: $v = Q/\text{Área}M$). Si fuera así, se le otorga a la variable un valor de 5. Si el vertedero de entrada tiene un sistema operativo de compuertas o ranuras para regular el salto ΔH_E , la incidencia es mínima. Si ocurre lo contrario (salto excesivo con caudales bajos) el problema es mayor. Es importante considerar estos aspectos durante la visita a la escala.

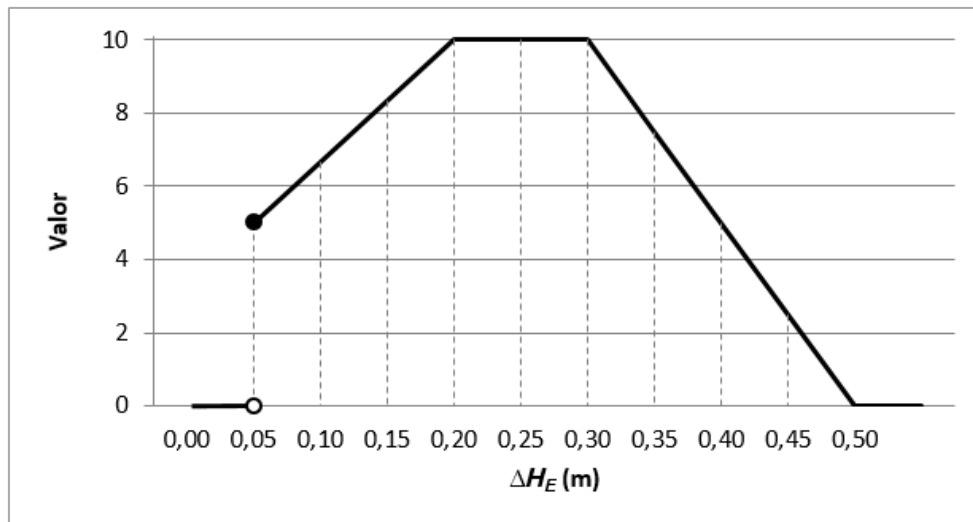


Figura 10. Puntuación para la variable ΔH_E . Un valor menor a 0,05 m se consideraría nulo, si la velocidad de salida fuera menor a 1,0 m/s. Si tuviera mayor velocidad, tendría un valor de 5.

4.1.2.b. Profundidad de paso en la entrada (h_E)

Altura del agua (h_E) (m) en la entrada para peces de la escala (Figura 11). Se mide como la diferencia de cota (m) entre la lámina de agua en el río y el umbral o parte superior del elemento de entrada (m). Si esta altura resulta demasiado pequeña, puede que el pez se roce o tenga que saltar para acceder al interior del paso, aunque, por encima de un determinado umbral (20 cm) no se prevén problemas de acceso.

Cuando h_E sea inferior a 10 cm, el tipo de vertido, a efectos de ascenso de los peces, se considerará como “libre”, lo que también debe contemplarse en los apartados 4.1.2.c, d y f. En esta situación, y también en un vertido libre convencional, la variable se estima como la carga de vertido (h): diferencia de cota entre lámina de agua del estanque y el umbral del vertedero de entrada de peces.

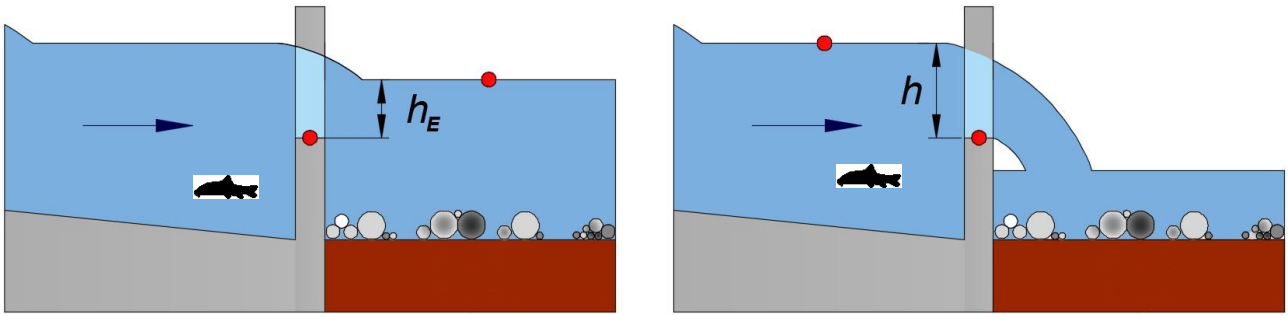


Figura 11. Medición de h_E sobre el perfil del elemento de entrada y dónde se deben realizar las mediciones (en rojo) para un vertido sumergido (izquierda) y libre (derecha).



Figura 12. Esquematización de la profundidad en la entrada, donde en amarillo se representa el umbral del vertedero de entrada y en rojo la variable.

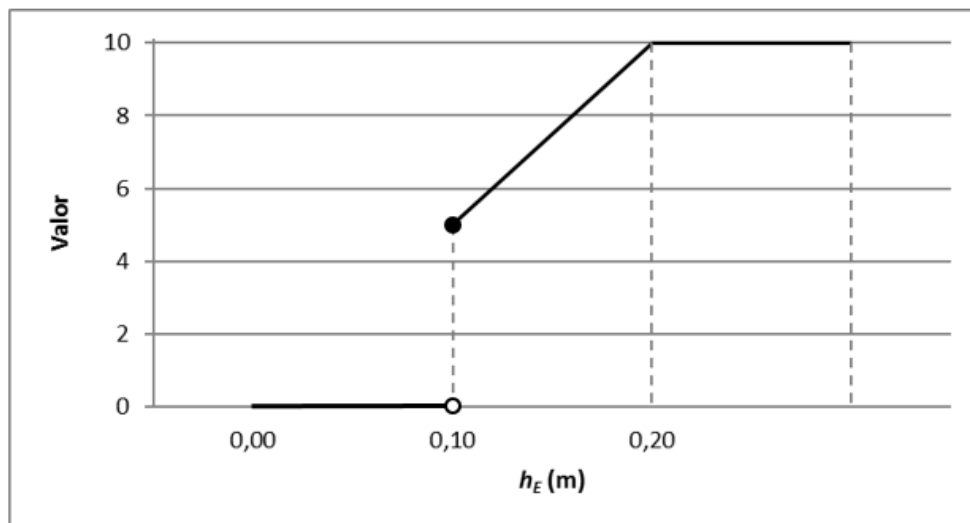


Figura 13. Puntuación de la variable h_E . Cuando estemos ante un vertido libre, esta variable se estima como la carga de vertido (h). Igualmente, cuando h_E sea menor a 0,10 m en un vertido sumergido, la tipología del vertido se considera “libre” y $h_E = h$.

4.1.2.c. Anchura de la entrada (b_E)

Anchura (b_E) (m) de la entrada por la que los peces acceden al interior de la escala (Figura 14). En caso de tratarse de un orificio, además de la anchura (b) deberá considerarse su altura (d) para calcular su área (m^2) ($\text{Área} = b_E \cdot d_E$). Si el elemento de entrada es demasiado pequeño, existe un elevado riesgo de que presente obstrucciones por restos arrastrados por la corriente, que los peces sufran daños por rozaduras o los ejemplares de mayor tamaño tengan complicaciones para atravesarlo. Cuando haya una combinación de orificio y vertedero, el valor final será la media de ambos. Si el vertedero de entrada fuera trapezoidal en vez de rectangular, se considera b_E como el valor medio de la base mayor a la altura del nivel de agua y de la menor.

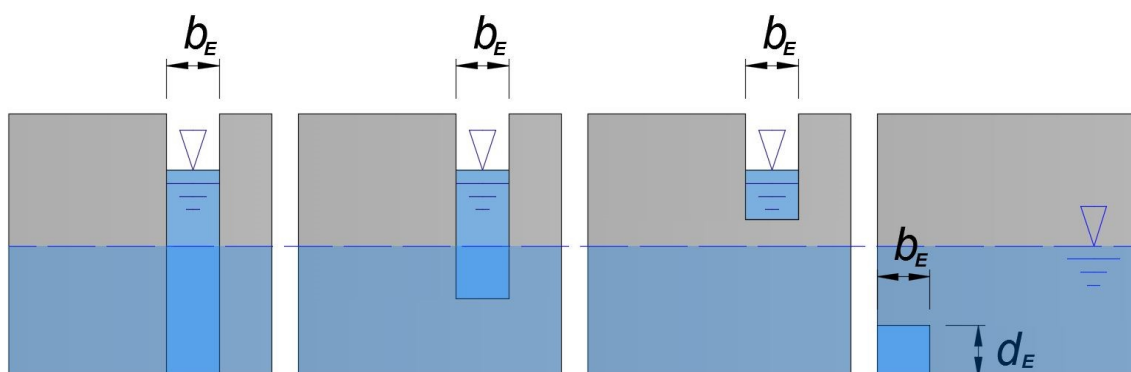
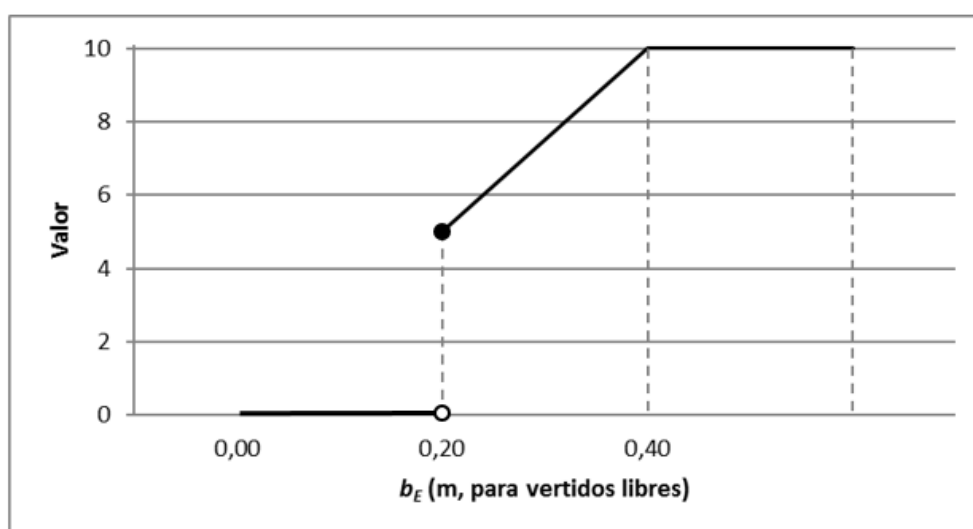
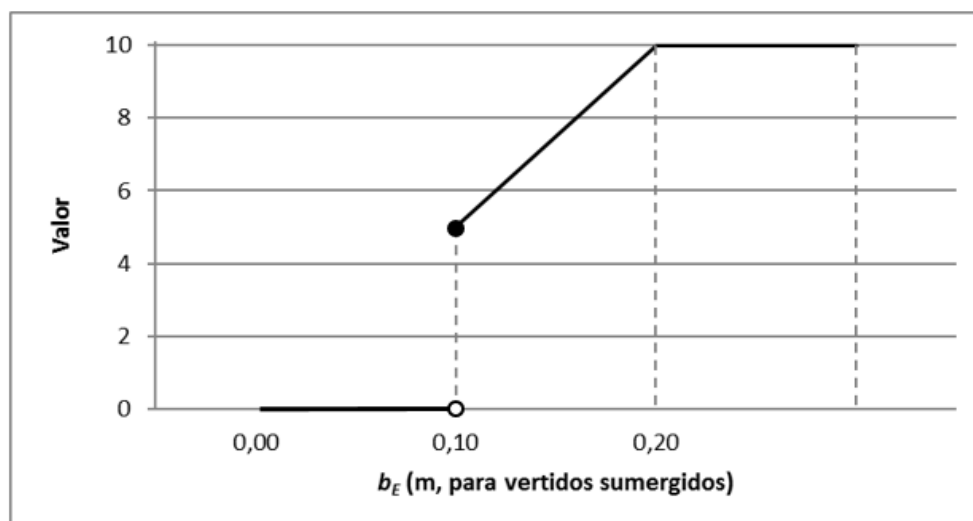


Figura 14. Medición de b_E sobre una hendidura vertical (izquierda), un vertedero sumergido (centro izquierda), un vertedero libre (centro derecha) y un orificio de fondo junto con su altura (d_E) (derecha) (la línea discontinua representa la lámina de agua del río). Si el vertedero fuera trapezoidal, se considera el valor medio de la base mayor a la altura del nivel de agua y de la menor.



Figura 15. Entradas con diferentes anchuras: 20 cm (izquierda), 80 cm (centro) y más de 100 cm (derecha).



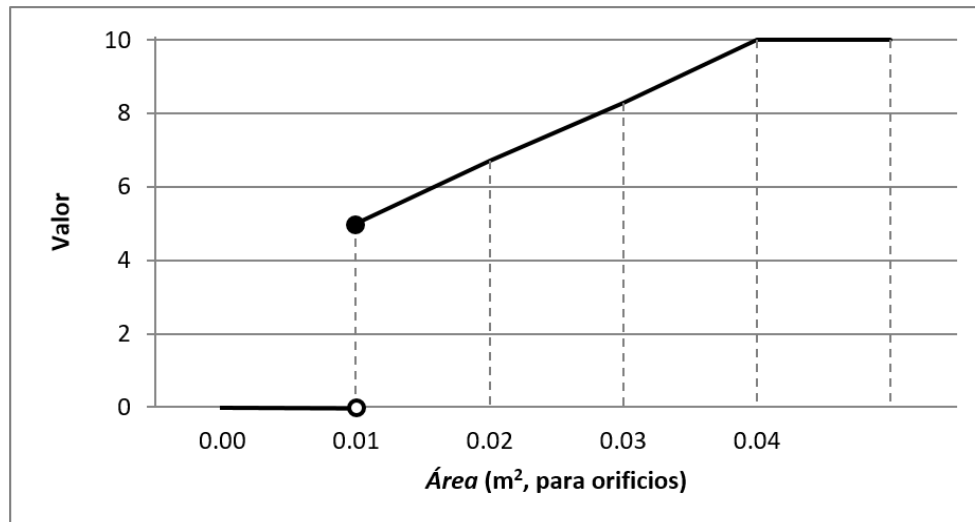


Figura 16. Valoración de la anchura de la entrada para vertidos sumergidos (arriba), vertidos libres (centro), así como del área de un orificio¹⁶ (abajo).

4.1.2.d. Profundidad previa a la entrada ($h_{previa E}$)

Se trata de una profundidad de agua previa a la entrada que permite a los peces concentrarse, descansar y tomar impulso para adentrarse desde el río hacia el interior del paso (Figura 17). Si la profundidad ($h_{previa E}$) es demasiado reducida, se dificulta su tránsito. Se mide como el calado (m) existente en el río en la zona próxima a la entrada de la escala.

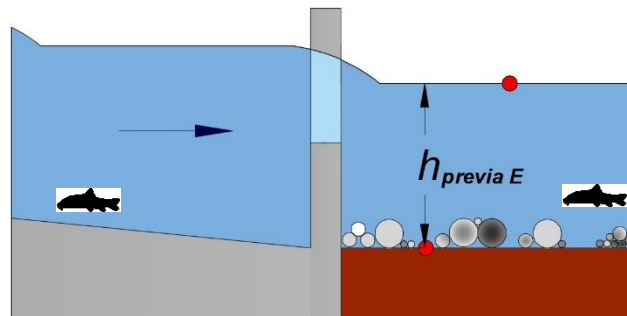


Figura 17. Explicación gráfica de la variable $h_{previa E}$ y dónde realizar las mediciones pertinentes (en rojo).

¹⁶ Tanto b_E como d_E han de ser $\geq 0,10$ m para no ser puntuados con 0. Normalmente el orificio de la entrada funciona como un desarenador y su dimensión es menor que el resto de orificios de la escala.



Figura 18. Vista de la poza que existe en el río antes de la entrada (en rojo) de una escala.

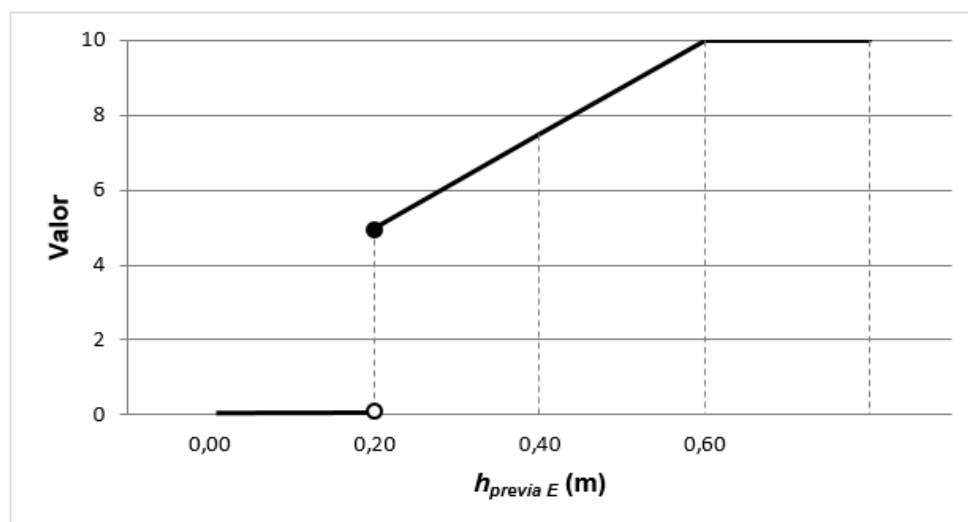


Figura 19. Puntuación de la variable $h_{previa E}$. Una profundidad menor que 0,20 m se considera con un valor nulo. En un vertido libre se exige un mínimo de profundidad en su base $> 2 \cdot \Delta H$ para obtener una valoración de 5.

4.1.2.e. Orientación de la entrada respecto del río (Ort_E)

Indica el sentido hacia el que se enfoca la entrada de peces de una escala respecto del eje longitudinal del río ($^{\circ}$ sexagesimales) (Figura 20).

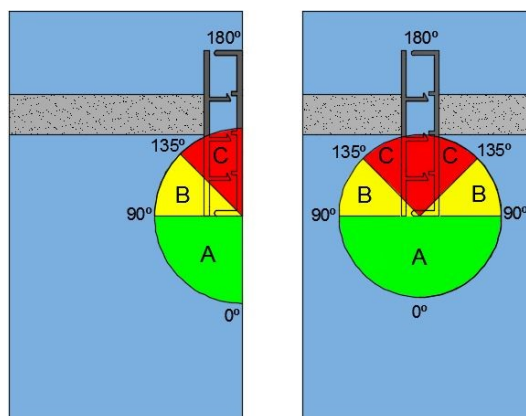


Figura 20. Croquis para clasificar la orientación de la entrada.

Tabla 6. Valoración de Ort_E en función de la orientación de la entrada del paso piscícola evaluado.

Categoría	Descripción	Valor
A	Entrada orientada paralela respecto de la dirección de la corriente y en el sentido de la aproximación de los peces ($0^{\circ} \leq \alpha \leq 90^{\circ}$)	10
B	Entrada orientada perpendicular a la corriente ($90^{\circ} < \alpha \leq 135^{\circ}$)	1-5 ¹⁷
C	Entrada orientada paralela a la corriente y en dirección contraria a la lógica aproximación de los peces ($135^{\circ} < \alpha \leq 180^{\circ}$)	0

NOTA: α es el ángulo que forma la entrada respecto del eje hidráulico del río

4.1.2.f. Tipología de la entrada (T_E)

Refleja cómo es la entrada de los peces al interior de una escala (Figura 21). Existen tipos de vertidos más atractivos y recomendables que otros, por lo que esta variable intenta cuantificarlo.

¹⁷ En función de su proximidad a la zona A y de las características locales de la entrada.

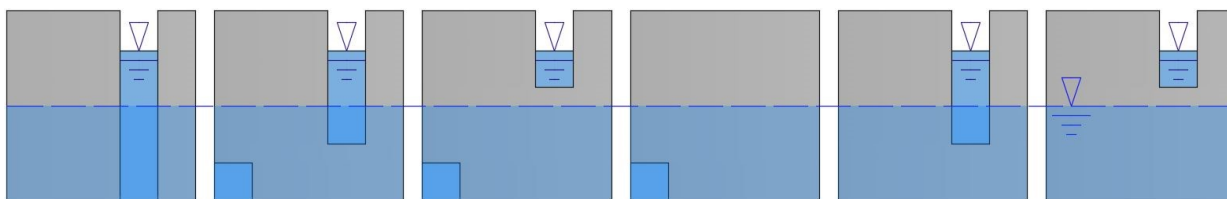


Figura 21. Tipologías de entrada en una escala (de izquierda a derecha) (la línea discontinua representa la lámina de agua del estanque inferior): hendidura vertical (hasta $p < 0,25$ m), vertedero sumergido + orificio, vertedero libre + orificio, orificio de fondo, vertedero sumergido y vertedero libre.



Figura 22. Diferentes tipologías de entradas para peces: hendidura vertical (A), vertedero libre + orificio (B), vertedero sumergido + orificio (C), vertedero sumergido (D) y vertedero libre (E).

Tabla 7. Puntuación correspondiente a las diferentes tipologías de entrada.

Tipología del elemento de entrada	Valor
Hendidura vertical ($p < 0,25$ m; con o sin orificio)	10
Vertedero con vertido sumergido + orificio de fondo	10
Vertedero con vertido libre + orificio de fondo	8
Vertedero con vertido sumergido	7
Orificio de fondo sumergido	5
Vertedero con vertido libre	5
Orificio con vertido libre	0

4.1.3. Pasaje (P_s)^{18 y 19}

4.1.3.a. Desnivel entre láminas de agua de estanques sucesivos (ΔH_{Ps})

Diferencia de cota (ΔH_{Ps}) (m) entre las láminas de agua de dos estanques sucesivos (Figura 23). Si el desnivel es demasiado pequeño, se reduce la motivación de los peces por ascender. Por otro lado, si resulta demasiado grande, el paso de los individuos de un estanque al siguiente será más exigente, reduciendo el número de los mismos que son capaces de atravesar la escala²⁰.

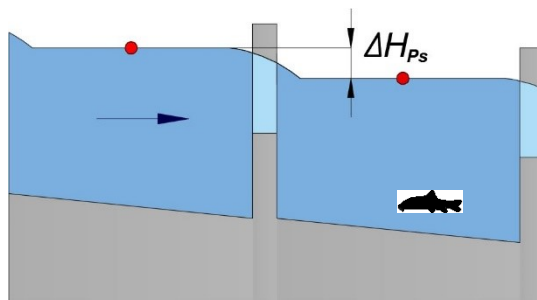


Figura 23. Explicación de la variable ΔH_{Ps} y los puntos donde se deben realizar las mediciones (en rojo).

¹⁸ En ocasiones se detectan defectos constructivos o anomalías evidentes que provocan una variabilidad importante entre estanques. En estos casos, no cabe trabajar con un estanque tipo de manera exclusiva y deben considerarse también los estanques singulares, por lo que debe aplicarse la ecuación 5. En ocasiones, el estanque de más aguas arriba puede ser un estanque singular. En ese caso se consideran todas las variables del mismo, incluido el salto ΔH , que se contemplaría nuevamente en la Salida.

¹⁹ La obstrucción total o parcial de los vertederos puede alterar los niveles de agua en uno o varios estanques. Si esto ocurre, se recomienda trabajar con las cotas topográficas de los vertederos/soleras antes que considerarlo como un estanque singular.

²⁰ Este valor fluctúa con el caudal del río, que condiciona los saltos en los estanques más próximos a la entrada. En ocasiones, si el caudal en la visita está en el rango superior de caudales ordinarios para la época de migración, es posible que la entrada esté anegada y los saltos próximos sean reducidos. En ese caso, la velocidad de paso del flujo puede resultar también atrayente y no suele ser un problema para el tránsito del pez. Si ocurre lo contrario (salto excesivo con caudales bajos) el problema es mayor. Es importante considerar estos aspectos durante la visita a la escala.

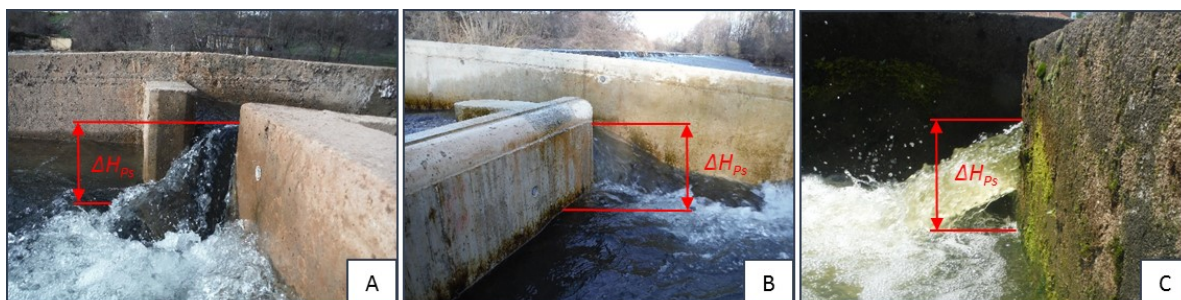


Figura 24. Croquis del desnivel entre láminas de agua de estanques sucesivos en escalas con hendiduras verticales (A), vertederos sumergidos (B) y vertederos libres (C).

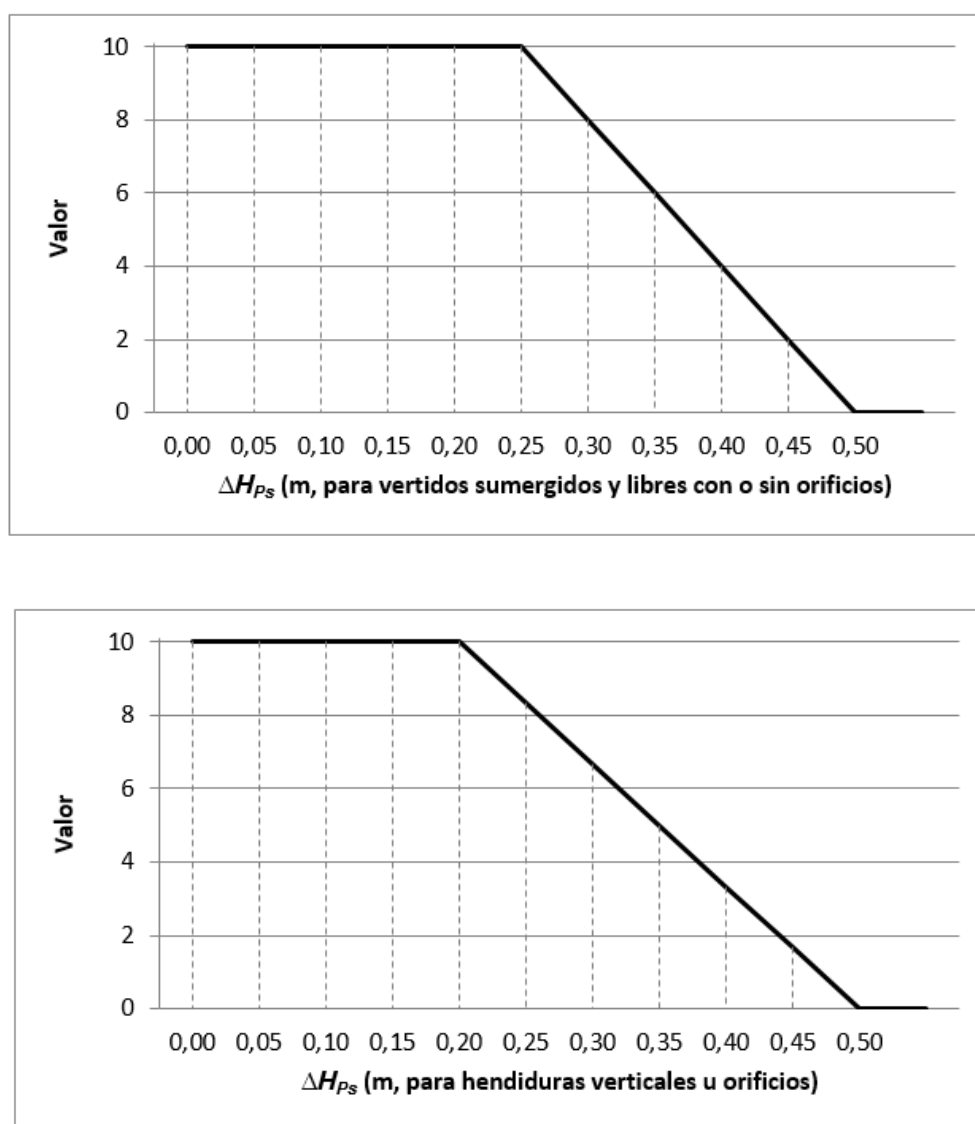


Figura 25. Puntuación de la variable ΔH_{ps} para vertederos sumergidos y libres²¹ (con o sin orificios) (arriba), y hendiduras verticales u orificios (abajo).

²¹ Para que el vertido libre sea efectivo debe existir una profundidad en su base $> 2 \cdot \Delta H$ (de lo contrario su valor = 0).

4.1.3.b. Potencia disipada por unidad de volumen (N)

Energía que posee el flujo y que es disipada en un determinado volumen de agua en el interior de los estanques de la escala (N) (W/m^3) (Ec. 9). Si esta variable es demasiado reducida, no genera ningún perjuicio para los peces mientras que, si es demasiado grande, se producen recirculaciones y turbulencias en el interior de los estanques que los desorientan y dificultan su ascenso. Su cálculo se realiza de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$N = \frac{g \cdot \rho \cdot Q_{escala} \cdot \Delta H'}{B \cdot L \cdot t_{med}} \quad (Ec. 9)$$

donde N es la potencia disipada por unidad de volumen (W/m^3); g es la aceleración de la gravedad ($9,81 \text{ m/s}^2$); ρ es la de densidad absoluta del agua (kg/m^3); $\Delta H'$ hace referencia al desnivel entre las láminas de agua consecutivas del estanque considerado y del precedente (m); B es la anchura del estanque inferior (m); L es su longitud (m); y t_{med} es su tirante o profundidad media en el estanque inferior (m).



Figura 26. Estanques en los que la potencia disipada por unidad de volumen presenta un valor bajo ($< 50 \text{ W/m}^3$) (izquierda), habitual ($150 - 175 \text{ W/m}^3$) (centro) y excesivo ($> 350 \text{ W/m}^3$) (derecha).

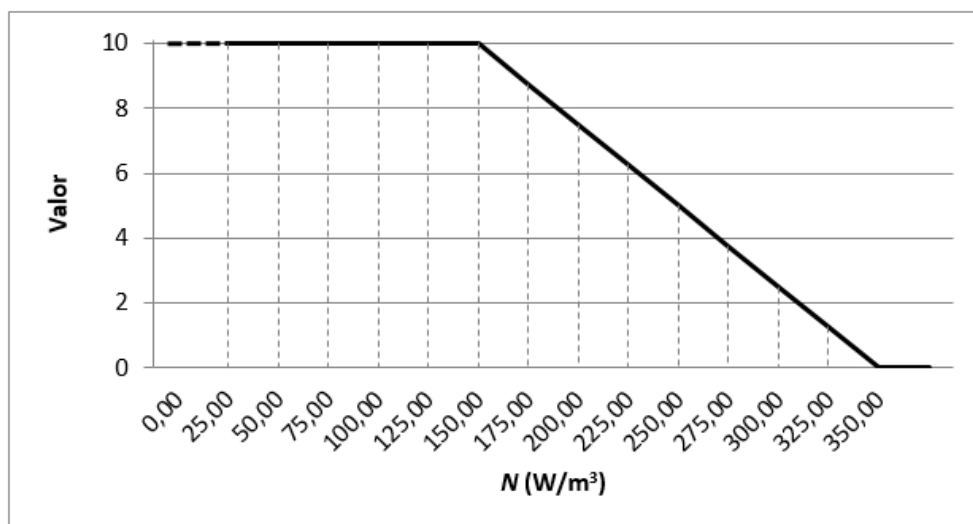


Figura 27. Gráfico de puntuación de la variable N .

4.1.3.c. Tirante medio de los estanques (t_{med})

Profundidad media (t_{med}) (m) en el interior de los estanques de la escala (Ec. 10 y figura 28). Si esta variable es muy reducida, se puede dificultar el desplazamiento de los individuos por el interior de los estanques, impidiendo que puedan descansar, quedando expuestos a depredadores, sufrir daños por rozadura y estar sometidos a gran estrés. Todo ello puede disminuir su motivación para ascender por la escala. Se estima mediante la siguiente ecuación:

$$t_{med} = \frac{p + h_{Ps} + p' + h'_{Ps} - \Delta H'_{Ps}}{2} \quad (\text{Ec. 10})$$

donde p es la altura umbral del elemento de paso aguas abajo del estanque evaluado (m) (Figura 28); h_{Ps} es la carga de vertido entre el estanque evaluado y el de aguas abajo, es decir, diferencia de cota entre la lámina de agua y la altura umbral del vertedero (m) (Figura 28); p' es la altura umbral del elemento que comunica el

estanque evaluado y el de aguas arriba (Figura 28); h'_{ps} es la carga de vertido entre el estanque evaluado y el de aguas arriba (Figura 28); y $\Delta H'_{ps}$ es el desnivel entre las láminas de agua entre el estanque evaluado y el anterior²² y ²³ (Figura 28).

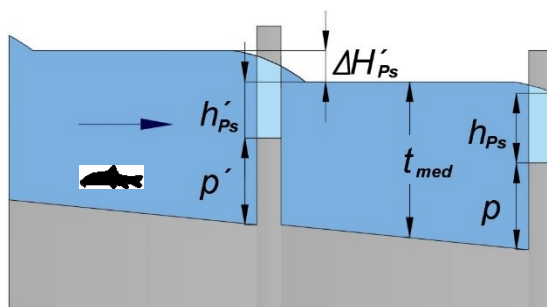


Figura 28. Explicación gráfica de las variables que intervienen en t_{med} .

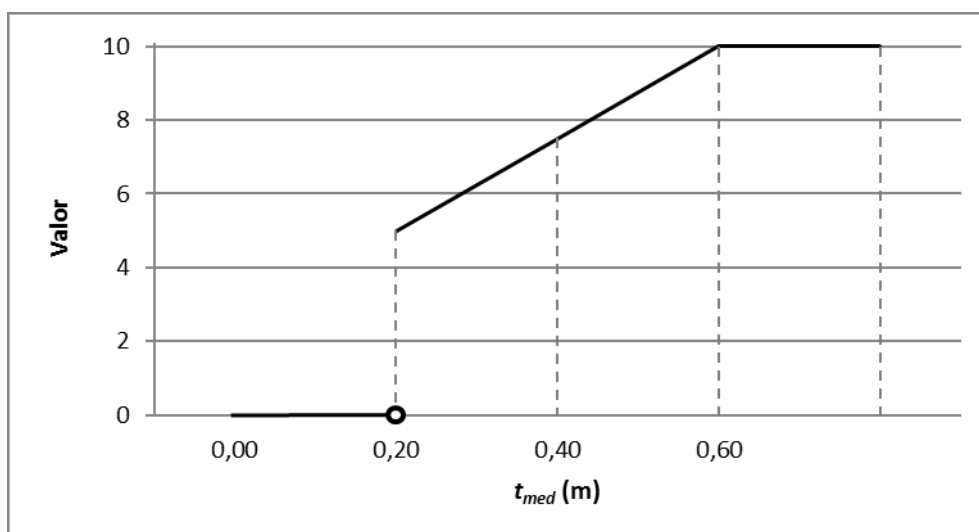


Figura 29. Puntuación de la variable t_{med} ²⁴. Una profundidad media menor a 0,20 m tiene un valor nulo.

²² En escalas de hendiduras verticales p y p' tienen un valor habitual de 0,00 m (aunque hasta $p < 0,25$ m lo consideramos una hendidura vertical por su similar comportamiento hidráulico).

²³ En caso de no poderse medir las diferentes variables que se requieren para el cálculo del tirante medio, se aceptará la medición de la profundidad en el centro del estanque.

²⁴ En un vertido libre se exige un mínimo de profundidad en su base $> 2 \cdot \Delta H$ para obtener una valoración de 5.

4.1.3.d. Profundidad de paso entre estanques (h_{Ps})

Profundidad existente en los vertederos (h_{Ps}) (m) por la que los peces se desplazan entre estanques (Figura 30). Para flujos sumergidos, se mide como la diferencia de cota entre el umbral del vertedero/hendidura²⁵ y la lámina de agua del estanque inferior.

Si esta variable es demasiado reducida los peces pueden sufrir heridas o verse obligados a saltar de un estanque a otro; por otro lado, si resulta muy grande, no causa perjuicio alguno.

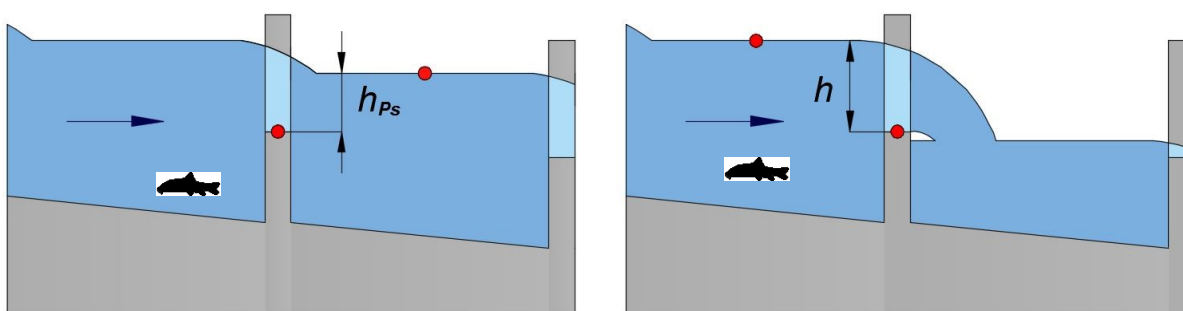


Figura 30. Variable h_{Ps} sobre el alzado de un elemento de paso con los puntos de medición (en rojo) para un vertido sumergido (izquierda) y uno libre (derecha).

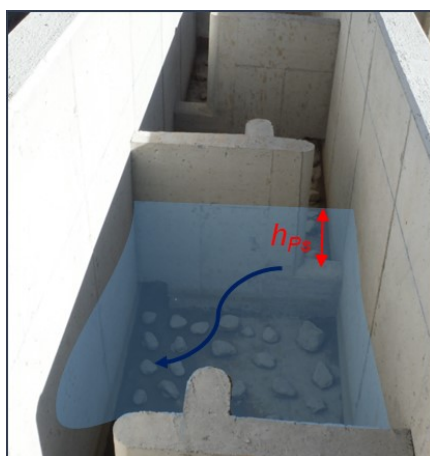


Figura 31. Ejemplo de la profundidad de paso sobre un vertedero (en rojo, y en azul se representa la dirección del flujo).

²⁵ Normalmente, las hendiduras verticales tienen $p = 0$. Si la conexión entre estanques estuviera compuesta únicamente por un orificio de fondo, esta variable sería prescindible, al estar contemplada en el apartado anterior.

Cuando h_{Ps} sea inferior a 10 cm, el tipo de vertido, a efectos de ascenso de los peces, se considerará como “libre”, lo que también debe contemplarse en los apartados 4.1.3.c, e y f. En esa situación, y en un vertido libre convencional, esta variable se estimaría como la carga de vertido (h): diferencia de cota entre lámina de agua del estanque y el umbral del vertedero inferior.

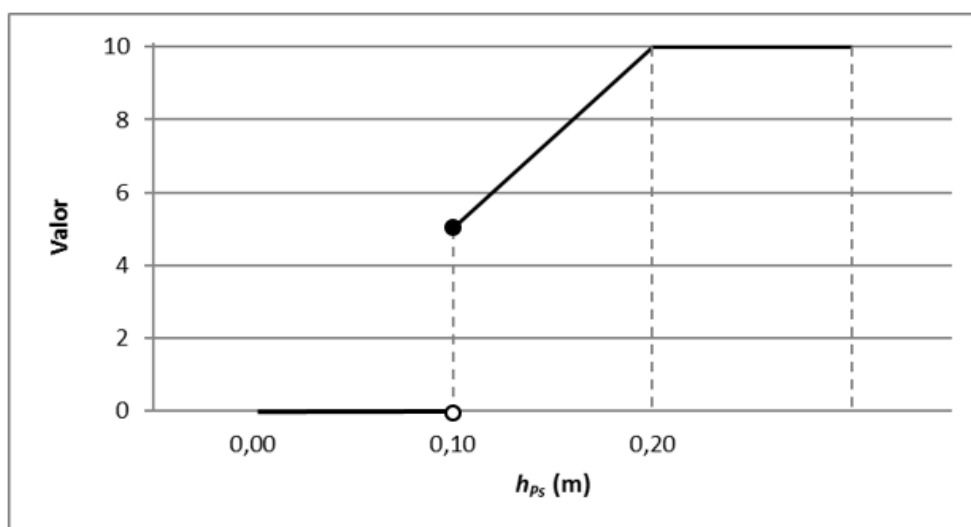


Figura 32. Valoración asociada a la variable h_{Ps} . Cuando estemos ante un vertido libre, esta variable se estima como la carga de vertido (h). Igualmente, cuando h_E sea menor a 0,10 m en un vertido sumergido, la tipología del vertido se considera “libre” y $h_{Ps} = h$.

4.1.3.e. Anchura de paso entre estanques (b_{Ps})

Anchura (b_{Ps}) (m) de los espacios por los que los peces pasan de un estanque al siguiente (Figura 33). En caso de que se trate de un orificio, además de la anchura (b_{Ps}) deberá considerarse su altura (d_{Ps}) (m) para poder calcular su área ($\text{Área} = b_{Ps} \cdot d_{Ps}$) (m^2). Si los elementos de paso presentan una anchura demasiado reducida, pueden presentar obstrucciones por restos arrastrados por la corriente, ocasionar rozaduras a los peces y complican el ascenso a individuos grandes. Cuando haya una combinación de orificio y vertedero, el valor final será la media de ambos. Si el

vertedero de paso fuera trapezoidal en vez de rectangular, se considera b_{Ps} como el valor medio de la base mayor a la altura del nivel de agua y de la menor.

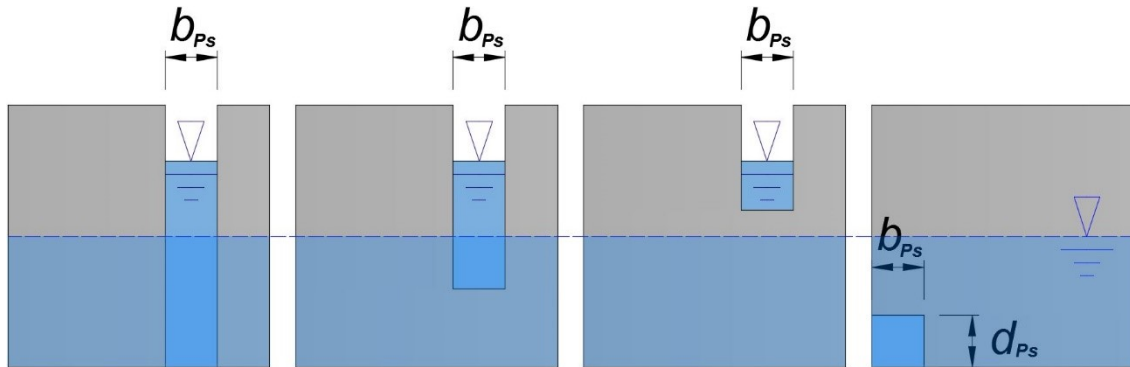


Figura 33. b_{Ps} sobre una hendidura vertical (izquierda), un vertedero sumergido (centro izquierda), un vertedero libre (centro derecha) y un orificio de fondo junto con su altura (d_{Ps}) (derecha) (la línea discontinua representa la lámina de agua del río).



Figura 34. Elementos que conectan estanques con diferentes anchuras: hendiduras de 20 cm (izquierda), vertederos sumergidos también de 20 cm (centro) y vertederos libres de 133 cm de ancho (derecha).

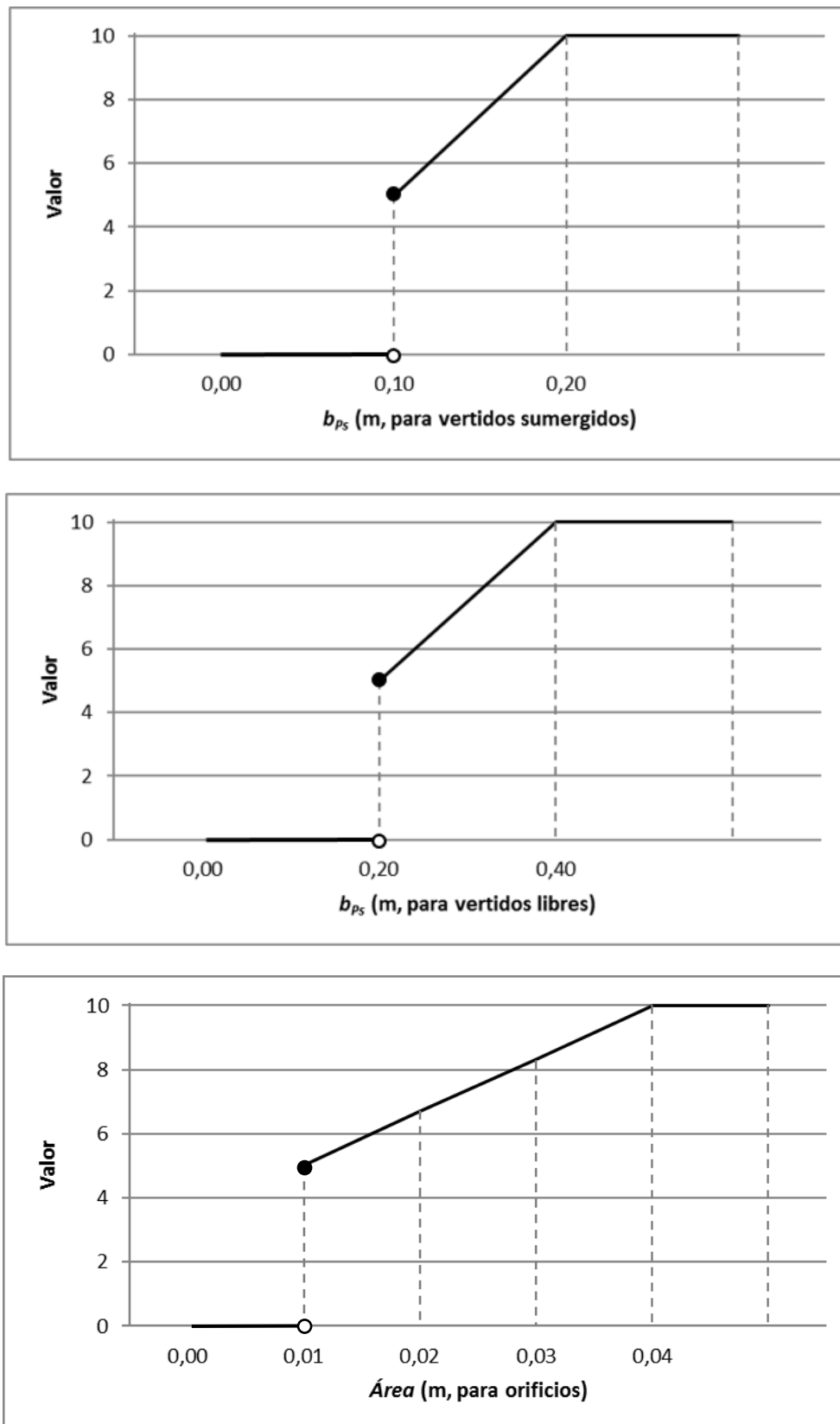


Figura 35. Puntuación de la anchura del elemento de paso para vertidos sumergidos (arriba), para vertidos libres (centro) y para el área de un orificio²⁶ (abajo).

²⁶ Tanto b_{ps} como d_{ps} han de ser $\geq 0,10$ m para no ser puntuados como 0.

4.1.3.f. Tipología del paso entre estanques (T_{Ps})

Considera los diferentes elementos de paso que conectan los estanques (Figura 36).

Esta variable cuantifica las diferentes conexiones hidráulicas y sus diferentes efectos de atracción sobre los peces.

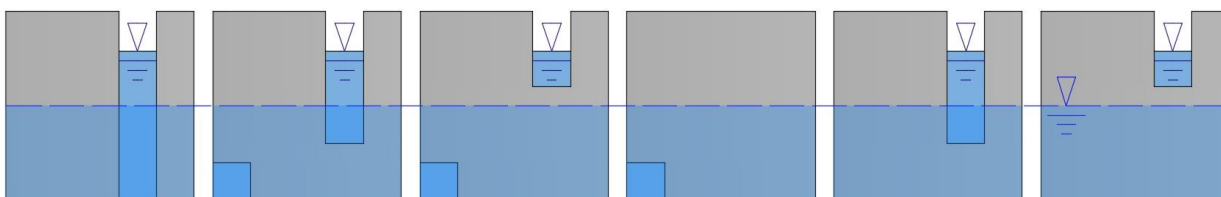


Figura 36. Diferentes tipos de elementos de paso más habituales (de izquierda a derecha son) (la línea discontinua representa la lámina de agua en el estanque inferior): hendidura vertical (hasta $p < 0,25$ m), vertedero sumergido+orificio, vertedero libre+orificio, orificio, vertedero sumergido y vertedero libre.



Figura 37. Diferentes elementos de paso en las escalas de artesas: hendidura vertical (A), vertedero sumergido y orificio de fondo (B), vertedero libre y orificio de fondo (C), orificio (D) modificación de una hendidura vertical (E) y vertido libre junto con uno de los orificios del armado del tabique (F).

Tabla 8. Valoración de los elementos de paso según su tipología.

Tipología de los elementos de paso	Valor
Hendidura vertical ($p < 0,25$ m; con o sin orificio)	10
Vertedero con vertido sumergido + orificio de fondo	10
Vertedero con vertido libre + orificio de fondo	8
Vertedero con vertido sumergido	7
Orificio de fondo	5
Vertedero con vertido libre	5
Orificio con vertido libre	0

4.1.4. Salida (S)²⁷

4.1.4.a. Desnivel entre la lámina de agua en el río y en el estanque superior (ΔH_s)

Diferencia de cota (ΔH_s) (m) entre las láminas de agua del río y del estanque de aguas arriba (Figura 38). Si el desnivel es demasiado pequeño, se puede reducir el interés de los peces por salir de la escala mientras que, si resulta demasiado grande, la proporción de peces capaces de realizar el esfuerzo para vencer la corriente y salir del paso es mínima o inexistente.

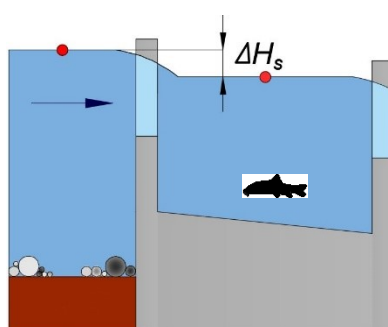


Figura 38. Explicación de la variable ΔH_s sobre el elemento de salida junto con las ubicaciones en que se deben de realizar las mediciones (en rojo).

²⁷ En caso de que existan dos salidas, se valorará de manera independiente cada una.

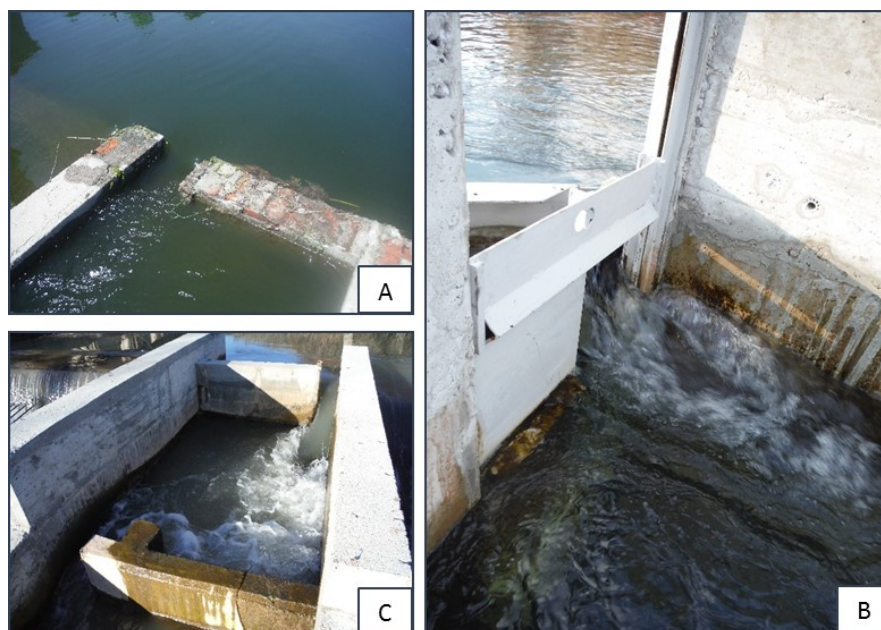


Figura 39. Desnivel en la salida de peces de una escala reducido (A), adecuado (B) y excesivo (C).

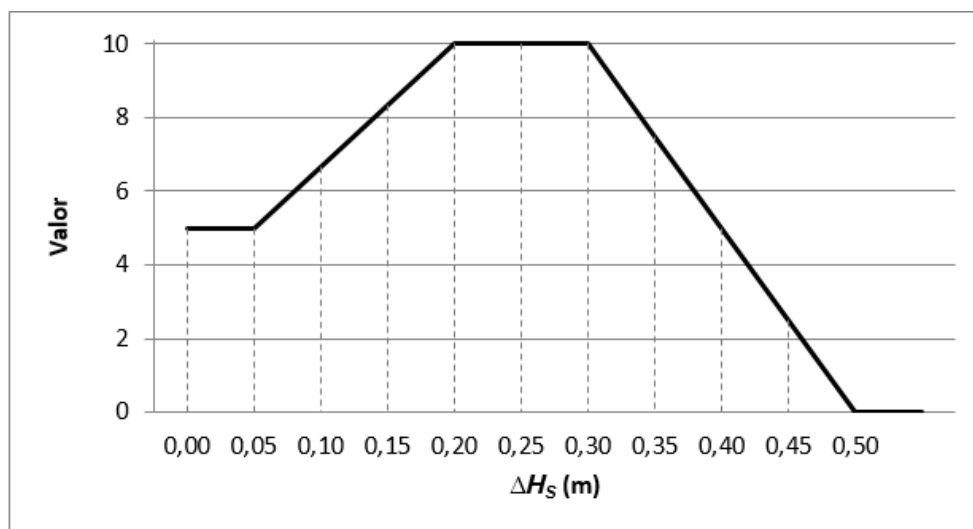


Figura 40. Puntuación de ΔH_s . En un vertido libre se exige un mínimo de profundidad en su base $> 2 \cdot \Delta H$ para poder ser valorada esta variable.

4.1.4.b. Profundidad de paso en la salida (h_s)

Profundidad (h_s) (m) en la salida por la que la fauna piscícola abandona la escala (Figura 41). Se calcula como la diferencia de cota entre la lámina de agua en el estanque superior y el umbral del vertedero o hendidura. Si resulta demasiado pequeña, los distintos ejemplares pueden sufrir heridas por rozadura o pueden tener que saltar para salir del paso.

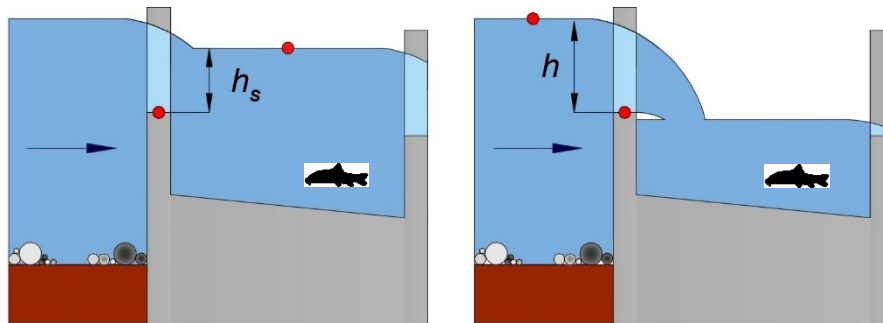


Figura 41. Variable h_s sobre el elemento de salida en vertidos sumergidos (izquierda) y libres (derecha).



Figura 42. Profundidad en la salida vista desde el interior de la escala.

Cuando h_s sea inferior a 10 cm, el tipo de vertido, a efectos de ascenso de los peces, se considerará como “libre”, lo que también debe contemplarse en los apartados 4.1.4.c y f. En esa situación, y en un vertido libre convencional, esta variable se estimaría como la carga de vertido (h): diferencia de cota entre lámina de agua del estanque y el umbral del vertedero inferior.

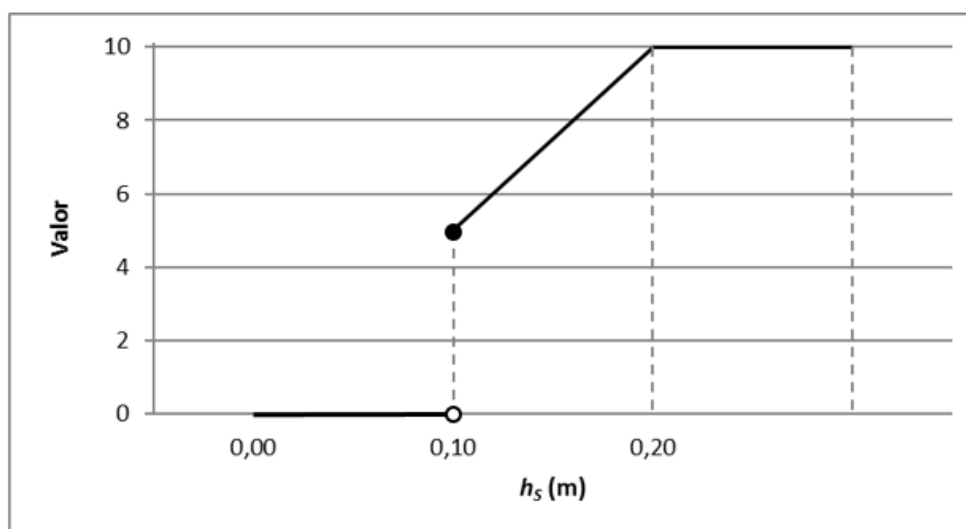


Figura 43. Valoración de la variable h_s . Cuando estemos ante un vertido libre, esta variable se estima como la carga de vertido (h). Igualmente, cuando h_E sea menor a 0,10 m en un vertido sumergido, la tipología del vertido se considera “libre” y $h_E = h$.

4.1.4.c. Anchura de la salida (b_s)

Anchura (b_s) (m) de la salida por la que la ictiofauna abandona el dispositivo y vuelve al río (Figura 44). En caso de que se trate de un orificio también se medirá su altura (d_s) (m) con el fin de calcular el área disponible para el paso de los individuos ($\text{Área} = b_s \cdot d_s$) (m^2). Cuando haya una combinación de orificio y vertedero, el valor final será la media de ambos. Si el vertedero de salida fuera trapezoidal en vez de rectangular, se considera b_s como el valor medio de la base mayor a la altura del nivel de agua y de la menor.

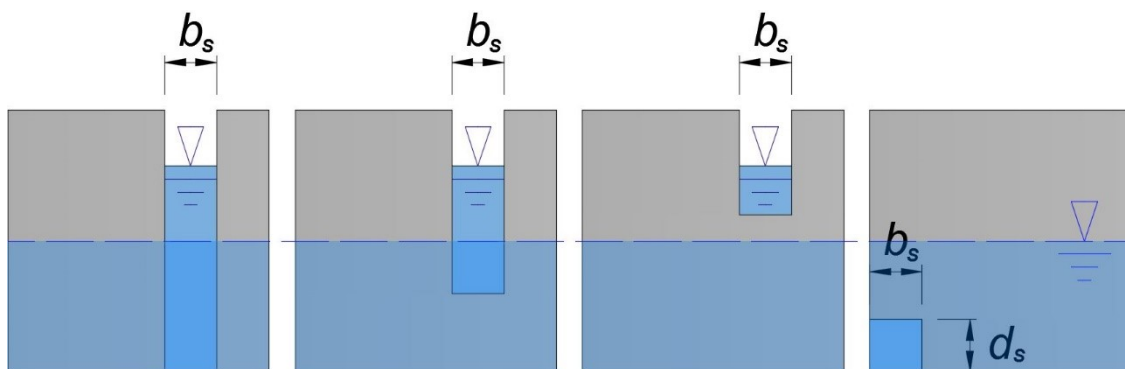
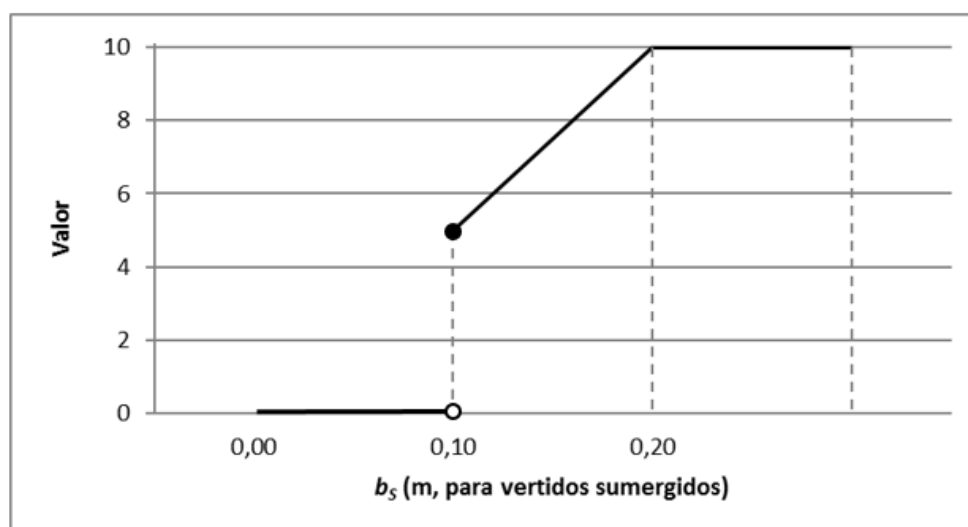


Figura 44. Anchura de diferentes elementos de salida (b_s) (de izquierda a derecha) (la línea discontinua representa la lámina de agua en el estanque inferior): una hendidura vertical, vertedero sumergido, un vertedero libre, una hendidura vertical y un orificio de fondo (junto con su altura (d_s)).



Figura 45. Salidas de peces con diferentes anchuras: 20 cm (izquierda) y 50 cm (derecha).



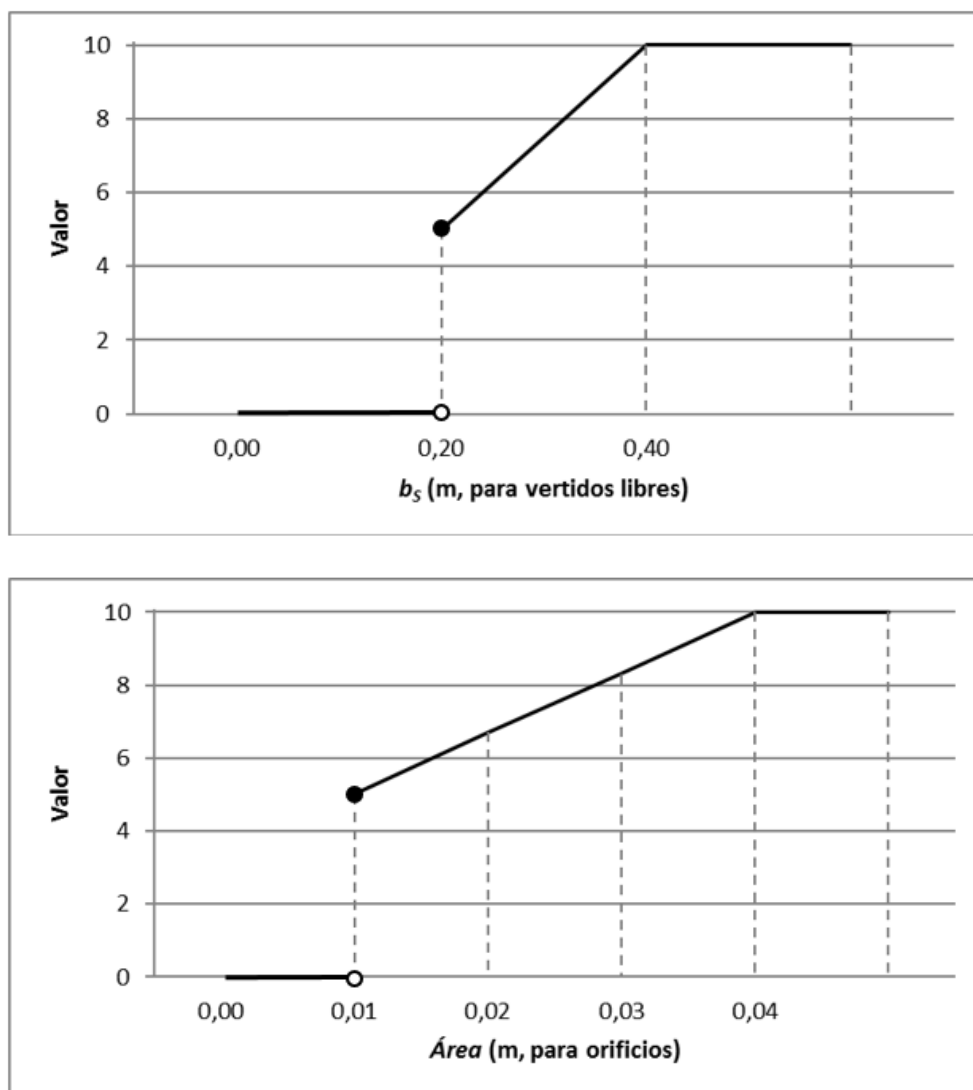


Figura 46. Valoración de la anchura del elemento de paso para vertidos sumergidos (arriba), para vertidos libres (centro) y para el área de un orificio²⁸ (abajo).

4.1.4.d. Profundidad posterior al vertedero de salida ($h_{posterior\ S}$)

Profundidad ($h_{posterior\ S}$) (m) que existe en el río aguas arriba de la salida del paso (Figura 47). Se calcula como la diferencia de cota entre la lámina de agua del río y los sedimentos o restos acumulados en el vaso del estanque. Valores demasiado reducidos de esta variable pueden provocar que cuando los peces salen de la escala tengan dificultades para remontar el río sin sufrir daños por rozaduras, estrés o ser

²⁸ Tanto b_s como d_s han de ser $\geq 0,10$ m para no ser puntuados con 0.

fácilmente depredados. Si la variable es suficientemente grande los peces pueden abandonar el dispositivo y continuar su desplazamiento por el río sin riesgo alguno.

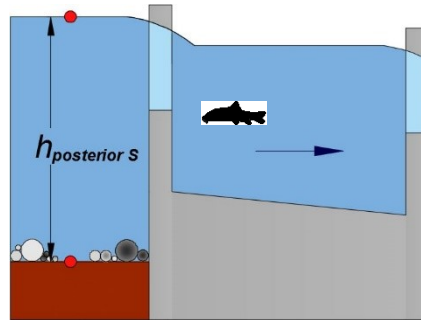


Figura 47. Medición de la variable $h_{posterior S}$.

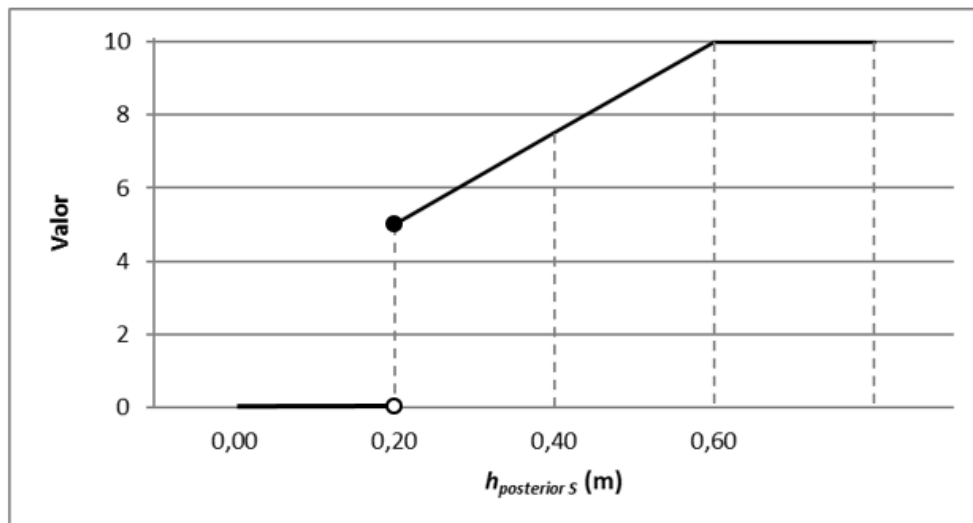


Figura 48. Gráfico para la puntuación de la variable $h_{posterior S}$.

4.1.4.e. Orientación de la salida respecto del río ($Orts$)

Sentido de la salida respecto del eje longitudinal del río (Figura 49).

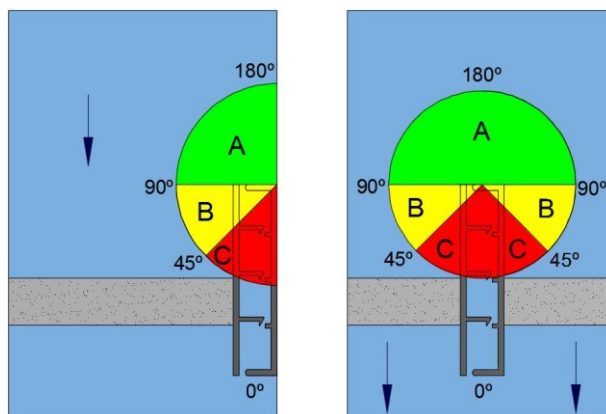


Figura 49. Categorías en las que se clasifica la salida según su dirección.

Tabla 9. Valoración de la variable $Orts$ según la orientación de la salida.

Categoría	Descripción	Valor
A	Salida ubicada en dirección de la corriente, aunque en sentido contrario ($90^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$)	10
B	Salida perpendicular al flujo ($45^\circ \leq \alpha < 90^\circ$)	1-5 ²⁹
C	Salida situada a favor de la corriente y en su mismo sentido ($0^\circ \leq \alpha < 45^\circ$)	0

NOTA: α es el ángulo que forma la salida respecto del eje hidráulico del río

4.1.4.f. Tipología de la salida (T_s)

Refleja cómo es la salida del dispositivo por la que los peces abandonan la escala y vuelven al río (Figura 50). Esta variable cuantifica la atracción que generan los diferentes tipos de vertidos.

²⁹ En función de su proximidad a la zona A y de las características locales de la salida.

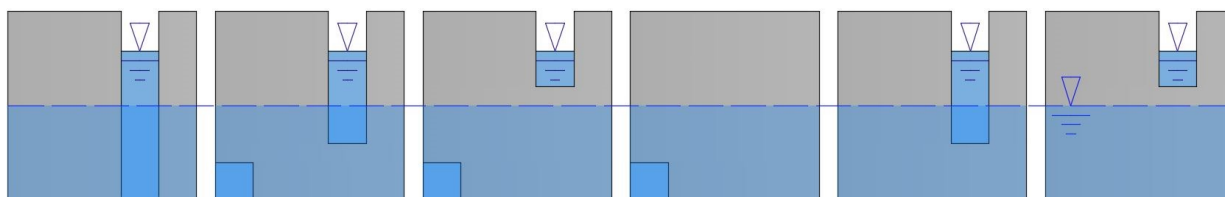


Figura 50. Diferentes tipos de salidas (de izquierda a derecha) (la línea discontinua es la lámina de agua del estanque inferior): hendidura vertical (hasta $p < 0,25$ m), vertedero sumergido + orificio, vertedero libre + orificio, orificio, vertedero sumergido y vertedero libre.



Figura 51. Tipos de salidas más frecuentes: hendidura vertical (A), orificio (B), vertedero libre (C) y vertedero sumergido (D).

Tabla 10. Puntuación correspondiente a cada una de las categorías en las que se engloba la salida.

Tipología del elemento de salida	Valor
Hendidura vertical ($p < 0,25$ m; con o sin orificio)	10
Vertedero con vertido sumergido + orificio de fondo	10
Vertedero con vertido libre + orificio de fondo	10
Vertedero con vertido sumergido	10
Orificio sumergido	5
Vertedero con vertido libre	5
Orificio con vertido libre	0

4.2. Observaciones de relevancia

Las cuatro categorías consideradas presentan diferentes observaciones de relevancia a las que se atiende durante la evaluación de una escala para peces (Tabla 2).

Concretamente, se analiza la adecuación de cada una de las observaciones respecto de lo que se considera idóneo para el ascenso de los peces, ya sea porque se facilita éste o porque se permite un buen manejo y mantenimiento de la escala (Anejo A.2.). Así, en función del grado de adecuación de una observación a la situación ideal, se le otorgará una puntuación u otra de acuerdo a la tabla 11. La ecuación 5 se usa para conocer la puntuación final de las observaciones de relevancia en cada categoría y la tabla 4 nos indica su idoneidad media.

Tabla 11. Categorías a las que asignar cada una de las observaciones de relevancia para su puntuación.

Categorías de asignación de las observaciones de relevancia	Puntuación correspondiente
Muy adecuado/ muy favorable	10
Adecuado/ favorable	5
No adecuado/ no favorable/ no existe	0

Seguidamente se presentan una serie de orientaciones de lo considerado como más o menos adecuado para la puntuación de las principales observaciones de relevancia a considerar:

Tabla 12. Criterios orientativos para la puntuación de las principales observaciones de relevancia.

Categorías asociadas	Observación de relevancia	Valor		
		No adecuado/ no favorable/ no existe (0 puntos)	Adecuado/ favorable (5 puntos)	Muy adecuado/ muy favorable (10 puntos)
A, E, Ps, S	Mantenimiento y limpieza	Obstrucciones impiden completamente el ascenso.	Obstrucciones dificultan, aunque permiten, el ascenso.	Obstrucciones no influyen en el ascenso. Ausencia de restos.
	Accesibilidad	Acceso a la escala y a su interior complicados.	Acceso a la escala y a su interior fácil.	Acceso a la escala y a su interior muy fácil.
E, Ps, S	Aristas redondeadas	Ausencia de aristas redondeadas.	Solo algunas aristas son redondeadas.	Todas las aristas son redondeadas.
E	Elementos para la regulación del salto entre láminas de agua	Elementos generan un salto inadecuado. Ausencia de elementos.	Elementos generan un salto favorable, aunque no idóneo.	Elementos generan un salto idóneo (que puede ser superado por cualquier individuo).
	Descargas de flujo en la entrada	No existe un flujo que ayude a la atracción.	Existe un flujo que ayuda ligeramente a la atracción.	Existe un flujo que ayuda a la atracción.
	Ausencia de otras descargas de flujo que alejen el pez de la escala	Grandes descargas y/o descargas con caudal medio-bajo próximas a la escala.	Descargas con caudal medio-bajo alejadas de la escala.	Ausencia de otras descargas.
Ps	Forma de los estanques	Ni L ni B cumplen las recomendaciones de diseño: L : 7-12 veces β y B : 4-8 veces β .	L o B respetan las recomendaciones de diseño.	Tanto L como B satisfacen las recomendaciones de diseño.
	Deflectores de los estanques	Ausencia de deflectores.	Deflectores demasiado pequeños y/o con ubicación inadecuada.	Deflectores con dimensiones y ubicación adecuada.
	Conservación de la estructura	Fugas de caudal de relevancia y/o daños importantes en los tabiques.	Algunas fugas de importancia o daños leves en los tabiques.	Ausencia de fugas de importancia y de daños en los tabiques.
	Lecho naturalizado con piedras	Ausencia de piedras.	Pocas piedras o mala ubicación.	Múltiples piedras.
	Oscuridad por elementos que cubren la escala	Oscuridad absoluta en algún tramo.	Oscuridad parcial en algún tramo.	Ningún tramo en oscuridad.
	Resguardo en los estanques	Resguardos laterales insuficientes en toda la escala (≤ 20 cm).	Resguardos laterales mínimos en toda la escala (> 20 cm - < 40 cm).	Resguardos laterales muy adecuados en toda la escala (≥ 40 cm).
S	Compuerta de regulación de caudales	Ausencia de compuertas.	No se puede regular adecuadamente el caudal y/o se dificulta que los peces salgan.	Se puede regular adecuadamente el caudal y no dificultan que los peces salgan.
	Dispositivo contra la entrada de arrastres	Ausencia de dispositivo.	Presencia de dispositivo que impide la entrada de parte de los elementos.	Presencia de dispositivo que impide la entrada de la mayoría de los elementos.
	Salida segura	Distancia insuficiente a coronación (< 2 m) y a turbinas o captaciones (< 5 m).	Distancia suficiente a coronación (≥ 2 m) o a turbinas y captaciones (≥ 5 m).	Distancia adecuada a coronación (≥ 2 m) y a turbinas o captaciones (≥ 5 m).

NOTA: Explicación más detallada de cada una de las observaciones de relevancia en el Anejo A.2.



Figura 52. Imágenes de algunos aspectos contemplados en las observaciones de relevancia: mantenimiento y limpieza (A), accesibilidad (B), lecho naturalizado (C), deflectores en los estanques y aristas redondeadas (D), fugas de caudal (E), oscuridad (F), dispositivo contra la entrada de arrastres (barrera antiflotantes) (G), compuerta de regulación de caudales (H) y calado en el río derivado del grado de aterramiento (I).

5. Caso práctico

El caso práctico que se estudia está localizado en el paso para peces del azud de la central hidroeléctrica de Almenara, en el río Tormes a su paso por el término municipal de Almenara de Tormes [Salamanca, España (41°03'29,86''N, 5°49'27,75''O)].

En este tramo se encuentran diversas especies piscícolas autóctonas de la familia *Cyprinidae* como el barbo ibérico y la boga del Duero (MÍRAME-IDEDuero 2016), que son dos de las tres especies en las que se centra la metodología propuesta. Además, están presentes varias especies exóticas pertenecientes a las familias *Cyprinidae*, *Salmonidae*, *Poeciliidae*, y *Centrarchidae* (MÍRAME-IDEDuero 2016).

La recogida de la información para el proceso de evaluación se realizó durante el mes de junio de 2015. El azud objeto de estudio presenta forma de “L” (Figura 53) y una cuerda o longitud de coronación de unos 230,00 m (C.H.D. 2015). La escala de peces se encuentra más próxima a la margen derecha, en dirección hacia aguas abajo, y en el ramal del río que porta un mayor caudal y el agua circula a lo largo de todo el año, es decir, es donde se ejerce una mayor atracción a los peces. Dicho ramal presenta una anchura aproximada de 14,5 m.

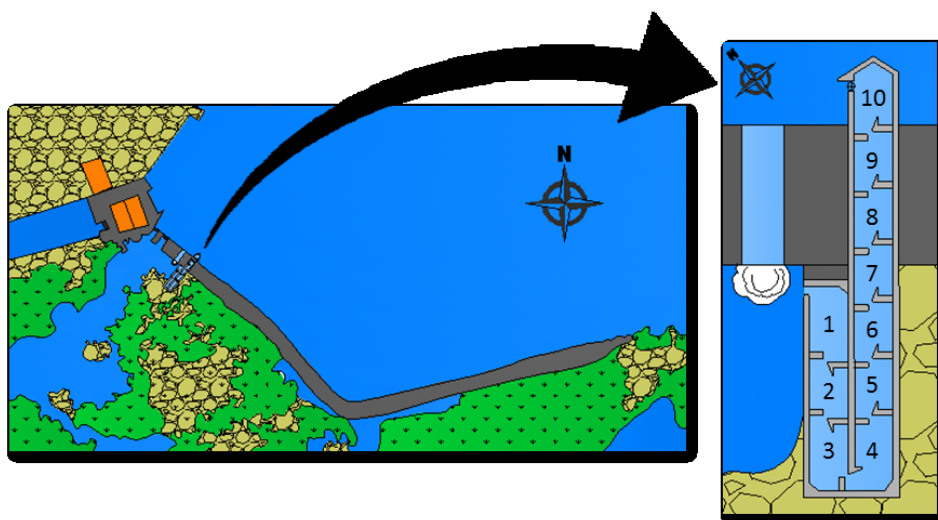


Figura 53. Entorno del paso para peces (izquierda) y detalle del mismo con la numeración de los estanques considerada en la evaluación (derecha).

Esta escala consta de 10 estanques sucesivos conectados por hendiduras verticales (HV), de los cuales 2 son singulares (los estanques 1 y 10) (Figura 53 y 54). En esa misma margen se encuentra un rebaje en el labio del azud de 2,00 m de ancho para aumentar la llamada hacia el paso (Figura 53 y 55), y también existen dos compuertas para el vaciado del azud y la casa de turbinas de la central en la margen opuesta (tanto las compuertas como la central están a más de 5,00 m de distancia del paso) (Figura 56).



Figura 54. Vista del interior de la escala y detalle de una de las hendiduras verticales que conectan dos de sus artesas (derecha).



Figura 55. Tobogán para la llamada (izquierda) y su desembocadura junto a la entrada de peces (en rojo) (derecha).



Figura 56. Compuertas para el vaciado del azud que se encuentran en la margen contraria a la escala, junto a la central hidroeléctrica.

Las dimensiones del estanque tipo son 2,40 m de largo x 1,80 m de ancho x 1,03 m de profundidad media -tirante- (considerando los estanques comprendidos entre el número 2 y el 9 desde aguas arriba, exceptuando para el cálculo los estanques 2 y 4) (con un caudal estimado circulando por la escala de $0,31 \text{ m}^3/\text{s}$) (Figura 57). Los estanques se encuentran conectados entre sí por hendiduras verticales de 21 cm de anchura media (Figura 54 y 57).



Figura 57. Estanque tipo.

La escala cuenta en su alimentación con una compuerta para la regulación de los caudales que circulan por la estructura y que facilita su limpieza y mantenimiento (Figura 58). Además, presenta un deflector que reduce la entrada de restos arrastrados por la corriente dentro del paso (Figura 58). La salida se encuentra aproximadamente a 1,50 m de distancia de la coronación del azud. Tanto la salida como la entrada cuentan con una orientación perpendicular a la corriente del río.



Figura 58. Compuerta y deflector en la salida de peces, es decir, en la alimentación de la escala.

El caudal medio anual circulante por el río Tormes en el tramo de estudio es de 26,12 m³/s [estación de aforos 2087 en Salamanca desde 1915 hasta 2012 (CEDEX 2015)]. El caudal medio para el mes de mayo es de 32,30 m³/s y para el mes de junio es de 23,63 m³/s [desde 1915 hasta 2012 (CEDEX 2015)]. Durante la evaluación, en junio de 2015, coincidiendo la época de migración reproductiva de los ciprínidos, el caudal circulante medido por esta estación de aforos fue de 17,99 m³/s (S.A.I.H. del Duero 2015).

Así mismo, el caudal ecológico fijado para el tramo de río en que se encuentra la escala es de 2,11 m³/s. Durante los trabajos de evaluación, la diferencia de nivel entre las láminas de agua del río a ambos lados del obstáculo durante la evaluación era de

1,93 m y el caudal que circulaba por el tobogán para la llamada fue de unos $0,15 \text{ m}^3/\text{s}$ (calculado a partir de una anchura de 2,00 m y una carga de vertido de 12 cm). El caudal que circulaba por el interior de la escala se estimó en $0,32 \text{ m}^3/\text{s}$ y se determinó como un promedio de los caudales a través de las hendiduras verticales que conectan las artesas tipo, y en concreto, de aquellas hendiduras que no presentaban ninguna anomalía en su funcionamiento hidráulico (se consideraron todas las hendiduras que conectan los estanques salvo las que se encuentra entre los estanques 2 y 4, y las que conectan el paso con el río) (Anejo A.3., Ec. 15 y 16).

Para la toma de datos se empleó un flexómetro y una estación total *Leica* modelo *TC307* con prisma y pértiga para la medición de aspectos correspondientes a las variables fundamentales.

En la figura 59 y tabla 13 se muestran los datos y aspectos analizados en campo:

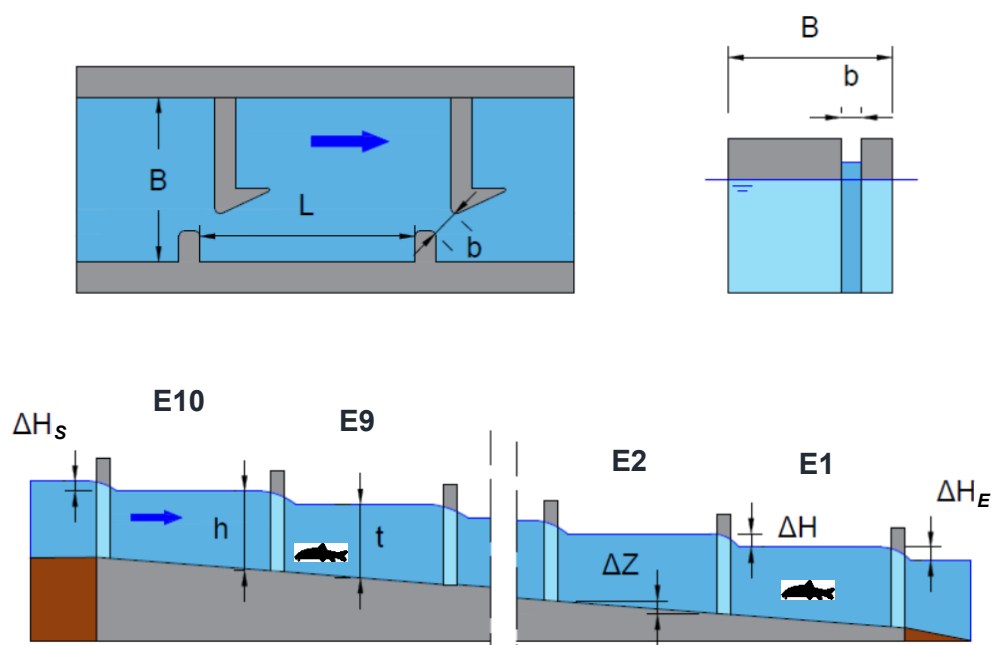


Figura 59. Esquema orientativo de la planta de un estanque (arriba a la izquierda), del alzado de un tabique transversal (arriba a la derecha) y del perfil longitudinal de la escala (abajo) con las variables medidas.

Tabla 13. Información recogida en campo.

VARIABLE	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10
Anchura del vertedero de aguas abajo, b (cm)	40	21	21	21	21	21	21	21	21	21
Ancho de los estanques, B (m)	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80
Longitud de los estanques, L (m)	3,46	2,40	2,40	2,40	2,40	2,40	2,40	2,40	2,40	3,0
Carga de vertido, h (m)	0,77	1,04	0,97	1,29	1,25	1,23	1,15	1,14	1,11	1,03
Desnivel (salto) entre láminas de agua de estanques sucesivos, ΔH (cm)	13,1 (³⁰)	33,9 (³¹)	16,3	35,8 (³¹)	11,6	14,6	10,9	22,9	16,9	14,0 (³²)
Desnivel (salto) entre soleras de estanques sucesivos, ΔZ (cm) (³³)	16,3	18,1	24,5	19,7	18,2	19,5	20,4	21,7	19,3	15,7

³⁰ Valor que coincide con ΔH_E .

³¹ Variable afectada por una obstrucción parcial en la hendidura más aguas abajo del estanque considerado y que no será considerada en el cálculo de la puntuación de los estanques tipo.

³² $\Delta H_S = 3,4$ cm.

³³ El desnivel entre las soleras de los estanques sucesivos, ΔZ , se utiliza como estimación del desnivel entre láminas de agua, ΔH , cuando existen obstrucciones que afectan al normal funcionamiento hidráulico del paso.

Tabla 14. Aplicación de la información recogida en campo al estadillo de campo propuesto en este documento.



Número de estanques tipo	8	Número de estanques totales	10
--------------------------	---	-----------------------------	----

ATRACCIÓN		
	Parámetro	Valor medido
Variables fundamentales	Caudal auxiliar de llamada (m^3/s)	0,15
	Caudal circulante por la escala (m^3/s)	0,32
	Caudal medio en la época de migración (m^3/s)	2,11
	Ubicación próxima a una orilla	Muy adecuado
	Emplazamiento lo más aguas arriba	Muy adecuado
	Colocación junto a la base del obstáculo	Muy adecuado
	Localización donde se concentre un mayor caudal	Muy inadecuado
Observaciones de relevancia	Mantenimiento y limpieza	Muy adecuado
	Accesibilidad	Adecuado

ENTRADA		
	Parámetro	Valor medido
Variables fundamentales	Desnivel entre la lámina de agua en el río y en el estanque inferior (m)	0,13
	Carga de vertido en la entrada (m)	0,77
	Profundidad de paso en la entrada (m)	0,64
	Anchura de la entrada (m)	0,40
	Área del orificio de entrada (m^2)	-
	Menor dimensión del orificio (m)	-
	Profundidad previa a la entrada (m)	1,21
	Orientación de la entrada respecto del río ($^\circ$)	Zona A
	Tipología de la entrada	Hendidura vertical
Observaciones de relevancia	Mantenimiento y limpieza	Muy adecuado
	Accesibilidad	Muy adecuado
	Aristas redondeadas	Adecuado
	Elementos para la regulación del salto entre láminas de agua	No adecuado/ no existe
	Descargas de flujo en la entrada	Muy adecuado
	Ausencia de otras descargas de flujo que alejen el pez de la escala	No adecuado

PASAJE		E _{tipo}	E ₁	E ₁₀
	Parámetro	Valor medido		
Variables fundamentales	Desnivel entre láminas de agua de estanques sucesivos (m)	0,16	0,13	0,14
	Anchura del estanque (m)	1,80	1,80	1,80
	Longitud del estanque (m)	2,40	3,46	3,00
	Altura umbral del elemento de paso entre estanques (m)	0,00	0,00	0,00
	Carga de vertido sobre el elemento de paso (m)	1,14	0,77	1,03
	Profundidad de paso entre estanques (m)	0,95	0,64	0,89
	Anchura de paso entre estanques (m)	0,21	0,40	0,21
	Área del orificio entre estanques (m ²)	-	-	-
	Menor dimensión del orificio (m)	-	-	-
	Tipología de paso entre estanques	Hendidura vertical	Hendidura vertical	Hendidura vertical
Observaciones de relevancia	Mantenimiento y limpieza	Adecuado	Muy adecuado	Muy adecuado
	Accesibilidad	Muy adecuado	Muy adecuado	Muy adecuado
	Aristas redondeadas	Muy adecuado	Muy adecuado	Muy adecuado
	Forma de los estanques	Muy adecuado	Muy adecuado	Adecuado
	Deflectores en los estanques	Muy adecuado	Muy adecuado	Muy adecuado
	Conservación de la estructura	Muy adecuado	Muy adecuado	Muy adecuado
	Lecho naturalizado con piedras	Muy adecuado	Muy adecuado	Muy adecuado
	Oscuridad por elementos que cubren la escala	Muy adecuado	Muy adecuado	Adecuado
	Resguardo en los estanques	Muy adecuado	Muy adecuado	Muy adecuado

SALIDA		
	Parámetro	Valor medido
Variables fundamentales	Desnivel entre la lámina de agua en el río y en el estanque superior (m)	0,03
	Carga de vertido en la salida (m)	0,92
	Profundidad de paso en la salida (m)	0,89
	Anchura de la salida (m)	0,50
	Área del orificio de salida (m ²)	-
	Menor dimensión del orificio (m)	-
	Profundidad posterior al vertedero de salida (m)	> 0,60
	Orientación de la salida respecto del río (°)	Zona A
	Tipología de la salida	Hendidura vertical
Observaciones de relevancia	Mantenimiento y limpieza	Muy adecuado
	Accesibilidad	Muy adecuado
	Aristas redondeadas	No adecuado
	Compuerta de regulación de caudales	Muy adecuado
	Dispositivo contra la entrada de arrastres	Adecuado
	Salida segura	Adecuado

Las puntuaciones correspondientes a cada una de las variables fundamentales y de las observaciones de relevancia de cada categoría se muestran en la tabla 15.

Tabla 15. Puntuaciones de las diferentes variables fundamentales y observaciones de relevancia.

Categoría	Variable / Observación	Código	Valor ($E_{\text{tipo}}/E_1/E_{10}$)	Puntuación ($E_{\text{tipo}}/E_1/E_{10}$)
Atracción	Caudal relativo de atracción (%)	$Q_{\text{atracción}}$	22,3	10,0
	Ubicación de la entrada para peces	U_E	3 de 4	7,5
	Mantenimiento y limpieza	O	10,0	7,5
	Accesibilidad		5,0	
Entrada	Desnivel entre la lámina de agua en el río y en el estanque inferior (m)	ΔH_E	0,13	7,7
	Profundidad en la entrada (m)	h_E	0,64	10,0
	Anchura de la entrada (m)	b_E	0,40	10,0
	Profundidad previa a la entrada (m)	$h_{\text{previa } E}$	1,21	10,0
	Orientación de la entrada respecto del río	Ort_E	Zona A	10,0
	Tipología de la entrada	T_E	Hendidura Vert.	10,0
	Mantenimiento y limpieza	O	10,0	5,8
	Accesibilidad		10,0	
	Aristas redondeadas		5,0	
	Elementos para la regulación del salto entre láminas de agua		0,0	
	Descargas de flujo en la entrada		10,0	
	Ausencia de otras descargas de flujo que alejen al pez de la escala		0,0	
	Desnivel entre láminas de agua de estanques sucesivos (m)	ΔH_{Ps}	0,16/0,13/0,14	10,0/10,0/10,0
	Potencia disipada por unidad de volumen (W/m^3)	N	109,7/92,9/84,8	10,0/10,0/10,0
	Tirante medio de los estanques (m)	t_{med}	1,06/0,71/0,96	10,0/10,0/10,0
	Profundidad de paso entre estanques (m)	h_{Ps}	0,95/0,64/0,89	10,0/10,0/10,0
	Anchura de paso entre los estanques (m)	b_{Ps}	0,21/0,40/0,21	10,0/10,0/10,0
Pasaje	Tipología del paso entre los estanques	T_{Ps}	Hendidura vertical	10,0/10,0/10,0
	Mantenimiento y limpieza	O	5,0/10,0/10,0	8,9
	Accesibilidad		10,0/10,0/10,0	
	Aristas redondeadas		10,0/10,0/10,0	
	Forma de los estanques		10,0/10,0/5,0	
	Deflectores en los estanques		10,0/10,0/10,0	
	Conservación de la estructura		10,0/10,0/10,0	
	Lecho naturalizado con piedras		10,0/10,0/10,0	
	Oscuridad por elementos que cubren la escala		10,0/10,0/5,0	
	Resguardo en los estanques		10,0/10,0/10,0	
	Desnivel entre la lámina de agua en el río y en el estanque superior (m)	ΔH_s	0,03	5,0
Salida	Profundidad en la salida (m)	h_s	0,89	10,0

Anchura de la salida (m)	b_s	0,50	10,0
Profundidad posterior al vertedero de salida (m)	$h_{posterior\ S}$	> 0,60	10,0
Orientación de la salida respecto del río	Ort_s	Zona A	10,0
Tipología de salida	T_s	Hendidura vertical	10,0
Mantenimiento y limpieza		10,0	
Accesibilidad		10,0	
Aristas redondeadas		0,0	
Compuertas de regulación de caudales	O	10,0	6,7
Dispositivo contra la entrada de arrastres		5,0	
Salida segura		5,0	

A partir de las puntuaciones asignadas a las variables fundamentales y a las observaciones de relevancia se procedió a calcular la puntuación para cada categoría:

Tabla 16. Puntuación total, rango de referencia, clasificación y necesidad de mejora de cada categoría.

Categoría	Variable / observación	Puntuación	Rango de referencia	Clasificación de la categoría	Modificaciones o mejoras
Atracción	Variables fundamentales	8,7	$8 < Categoría \leq 10$	Muy favorable	Opcionales
	Observaciones relevancia	7,5	$5 \leq Categoría < 8$	Favorable	Recomendables
Entrada	Variables fundamentales	9,6	$8 < Categoría \leq 10$	Muy favorable	Opcionales
	Observaciones relevancia	5,8	$5 \leq Categoría < 8$	Favorable	Recomendables
Pasaje	Variables fundamentales	10,0	$8 < Categoría \leq 10$	Muy favorable	Opcionales
	Observaciones relevancia	9,4	$8 \leq Categoría \leq 10$	Muy favorable	Opcionales
Salida	Variables fundamentales	8,9	$8 < Categoría \leq 10$	Muy favorable	Opcionales
	Observación relevancia	6,7	$5 \leq Categoría < 8$	Favorable	Recomendables

Debe destacarse que, en el momento de la evaluación, las hendiduras verticales que conectan los estanques 1 y 2, y 3 y 4 presentaban una obstrucción parcial por restos arrastrados por la corriente que podía cambiar el normal funcionamiento de dichos

estanques (Figura 60) (Fuentes-Pérez *et al.* 2014). Tal y como indican Martínez de Azagra (1999), DVWK (2002) y Towler *et al.* (2013), este tipo de incidencias son la principal causa de alteraciones en el funcionamiento de los dispositivos.



Figura 60. Obstrucción parcial detectada en la hendidura que conecta los estanques 3 y 4.

Evaluando las variables fundamentales de cada categoría se observa cómo todas ellas obtienen una puntuación alta, lo que conlleva un ascenso teórico favorable de los peces a través de la escala (8,7 puntos para *A*; 9,6 para *E*; 10,0 para *Ps*; y 8,9 para *S*) (Tabla 16). Por otro lado, al analizar las observaciones de relevancia se detectan más problemas que en las variables fundamentales, aunque en todas las categorías también se favorece el ascenso (7,5 para *A*; 5,8 para *E*; 9,4 para el *Ps*; y 6,7 para *S*) (Tabla 16).

En base a todo ello, se sugiere actuar sobre las observaciones de relevancia de la atracción, entrada y la salida. En la entrada, se aconseja instalar algún elemento que permita la regulación del salto entre las láminas de agua del estanque inferior y el río, evitar descargas de flujo que puedan alejar a los peces de la escala durante la época

de migración (concretamente, la apertura de las compuertas que se encuentran en la orilla contraria al paso). Mientras que, en la salida se recomienda la colocación de un dispositivo más eficiente contra la entrada de arrastres dentro del paso, recrecer parte de la coronación del azud para garantizar una salida segura de los peces y sin riesgo de ser arrastrados hacia aguas abajo del obstáculo.

6. Bibliografía

- Aarestrup, K., Lucas, M.C. y Hansen, J.A. (2003) Efficiency of a nature-like bypass channel for sea trout (*Salmo trutta*) ascending a small Danish stream studied by PIT telemetry. *Ecology of Freshwater Fish* 12, 160-168.
- Aigoui, F., Dufour, M., Isidore, G., et al. (2008) *Guide passes à poissons*. Centre d'Études Techniques Maritimes et Fluviales, CETMEF, Béthune.
- Amaral, S.D., Branco, P., Silva, A., et al. (2016) Performance of a potamodromous cyprinid negotiating a small weir. En: *11th International Symposium on Ecohydraulics (ISE)*. Melbourne, Australia.
- Armstrong, G., Apahamian, M., Fewings, G., Gough, P., Reader, N. y Varallo, P. (2004) *Environment Agency Fish Pass Manual*. Environment Agency, Bristol.
- Ayllón, D., Almodóvar, A., Nicola, G.G. y Elvira, B. (2010) Ontogenetic and spatial variations in brown trout habitat selection. *Ecology of Freshwater Fish* 19, 420-432.
- Baudoin, J., Burgun, V., Chanseau, M., et al. (2014) *Assessing the passage of obstacles by fish: concepts, design and application*, Onema. Onema.
- Bravo-Córdoba, F.J., Sanz-Ronda, F.J., Fuentes-Pérez, J.F., Ruíz-Legazpi, J., Salgado-González, V.M., García-Vega, A. y Valbuena-Castro, J. (2014) Evaluación biológica de la escala para peces de la Central Hidroeléctrica de Josefina (Padilla de Duero, Valladolid). Informe técnico, GEA-Ecohidráulica.

- Bravo-Córdoba, F.J., Sanz-Ronda, F.J., Valbuena-Castro, J., Fuentes-Pérez, J., Ruiz-Legazpi, J., Salgado-González, V.M., García-Vega, A. y Peña-Garrido, A. (2015) Fishway with two entrance locations. Fish Passage 2015: International conference on river connectivity best practices and innovations. Umherst, Holanda 22-24, june, 2015.
- Bravo-Córdoba, F.J., Sanz-Ronda, F.J., Valbuena-Castro, J., González-Alemán, N.J., Smart, R. y Navas-Pariente, A. (2016) Evaluación biológica de la escala para peces de la Central Hidroeléctrica de Navapalos en el río Duero (Burgo de Osma, Soria). Informe técnico, GEA-Ecohidráulica.
- Bunt, C.M. (2001) Fishway entrance modifications enhance fish attraction. *Fisheries Management and Ecology* 8, 95-105.
- Bunt, C.M., Castro-Santos, T. y Haro, A. (2012a) Performance of fish passage structures at upstream barriers to migration. *River Research and Applications* 28, 457-478.
- Bunt, C.M., Castro-Santos, T. y Haro, A. (2012b) Performance of fish passage structures at upstream barriers to migration. *River Research and Applications* 28, 457-478.
- Bunt, C.M., Katopodis, C. y McKinley, R.S. (1999) Attraction and passage efficiency of white suckers and smallmouth bass by two Denil fishways. *North American Journal of ...* 19, 793-803.
- C.H.D. (2015) Portal de la Confederación Hidrográfica del Duero. Disponible en: www.chduero.es [Consultado el 1 de septiembre de 2015].

- Calles, O. y Greenberg, L. (2009) Connectivity is a two-way street. The need for a holistic approach to fish passage problems in regulated rivers. *River Research and Applications* 25, 1268-1286.
- Castro-Santos, T., Cotel, A. y Webb, P. (2009) Fishway Evaluations for Better Bioengineering : An Integrative Approach. *American Fisheries Society Symposium* 69, 557-575.
- Castro-Santos, T., Sanz-Ronda, F.J. y Ruiz-Legazpi, J. (2013) Breaking the speed limit—comparative sprinting performance of brook trout (*Salvelinus fontinalis*) and brown trout (*Salmo trutta*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 70, 280-293.
- CEDEX (2015) Centro de Estudios Hidrográficos. Disponible en: ceh-flumen64.cedex.es [Consultado el 1 de septiembre de 2015].
- Clay, C.H. (1995) *Design of Fishways and Other Fish Facilities*. CRC Press.
- Doadrio, I. (2002) *Atlas y Libro Rojo de los Peces Continentales de España*. Dirección General de Conservación de la Naturaleza: Museo Nacional de Ciencias Naturales, Madrid.
- DVWK (2002) *Fish passes: design, dimensions and monitoring*. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (DVWK) y Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome.
- Ead, S.A., Asce, M., Rajaratnam, N., Asce, F., Katopodis, C. y Asce, M. (2002) Generalized Study of Hydraulics of Culvert Fishways Generalized Study of Hydraulics of Culvert Fishways. *Journal of Hydraulic Engineering* 128, 1018-1022.
- Elvira, B., Nicola, G. y Almodóvar, A. (1998) *Sistemas de paso para peces en presas*. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, CEDEX, Madrid.

- Fuentes-Pérez, J.F., Sanz-Ronda, F.J., Martínez de Azagra Paredes, A. y García-Vega, A. (2014) Modeling Water-Depth Distribution in Vertical-Slot Fishways under Uniform and Nonuniform Scenarios. *Journal of Hydrualic Engineering* 140, 1-5.
- Fuentes-Pérez, J.F., Sanz-Ronda, F.J., Martínez de Azagra, A. y García-Vega, A. (2016) Non-uniform hydraulic behaviour of pool-weir fishways: A tool to optimize its design and performance. *Ecological Engineering* 86, 5-12.
- Goettel, M.T., Atkinson, J.F. y Bennett, S.J. (2015) Behavior of western blacknose dace in a turbulence modified flow field. *Ecological Engineering* 74, 230-240.
- González-Alemán, N.J. (2016) Índice Gonadosomático en barbo ibérico (*Luciobarbus bocagei*) y en boga del Duero (*Pseudochondrostoma duriense*) al momento de su migración y paso por la escala de peces de San Fernando en el río Tormes. Trabajo fin de máster, Universidad de Valladolid.
- Harvey, B.C. y Stewart, A.J. (1991) Fish size and habitat depth relationships in headwater streams. *Oecologia* 87, 336-342.
- Hotchkiss, R.H. y Frei, C.M. (2007) Design for Fish Passage at Roadway-Stream Crossings: Synthesis Report. U.S. Department of Transportation, McLean, Virginia.
- Katopodis, C. (1992) Introduction to fishway design. *Oceans*, 67.
- Katopodis, C., Kells, J.A. y Acharya, M. (2013) Nature-Like and Conventional Fishways: Alternative Concepts? *Canadian Water Resources Journal* 26, 211-232.

- Kondratieff, M.C. y Myrick, C. a. (2006) How High Can Brook Trout Jump? A Laboratory Evaluation of Brook Trout Jumping Performance. *Transactions of the American Fisheries Society* 135, 361-370.
- Larinier, M. (2000) Dams and Fish Migration. En: *World Commission on Dams*. World Commission on Dams, p 26.
- Larinier, M. (2008) Fish passage experience at small-scale hydro-electric power plants in France. *Hydrobiologia* 609, 97-108.
- Larinier, M. (2002a) Location of fishways. En: *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*. pp 39-53.
- Larinier, M. (1992) Passes à bassins successifs, prébarrages et rivières artificielles. En: *Bull. Fr. Peche Piscic*, Vol. 326-327. pp 45-72.
- Larinier, M. (2002b) Pool fishways, pre-barrages and natural bypass channels. En: *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*. pp 54-82.
- Larinier, M. (1998) Upstream and Downstream Fish Passage Experience in France. En: *Fish Migration and Fish Bypasses*. Fishing News, London, pp 127-145.
- Lucas, M.C., Baras, E., Thom, T.J., Duncan, A. y Slavík, O. (2001) *Migration of Freshwater Fishes*. Oxford.
- Lundqvist, H., Rivinoja, P., Leonardsson, K. y McKinnell, S. (2008) Upstream passage problems for wild Atlantic salmon (*Salmo salar* L .) in a regulated river and its effect on the population. *Hydrobiologia*, 111-127.
- Martínez-Capel, F., García de Jalón, D. y Rodilla-Alamá (2004) On the estimation of nose velocities and their influence on the physical habitat simulation for *Barbus bocagei*. *Hydroécologie Appliquée* 14, 139-159.

- Martínez de Azagra Paredes, A. (1999) *Escalas para peces*. Publicaciones E.T.S.II.AA. nº 26. Universidad de Valladolid, Palencia.
- MÍRAME-IDEDuero (2016) Sistema de Información MÍRAME IDEDuero. Disponible en: www.mirame.chduero.es [Consultado el 10 de enero de 2016].
- Morán-López, R. y Uceda Tolosa, O. (2016) Relative leaping abilities of native versus invasive cyprinids as criteria for selective barrier design. *Biological Invasions*, Publish on-line.
- NMFS, N.M.F.S. (2011) *Anadromous salmonids passage facility design*. Northwest Region, Portland, Oregon.
- Odeh, M. (1999) *Fish passage innovation for ecosystem and fishery restoration*. Bethesda.
- Odeh, M., Noreika, J., Haro, A., Maynard, A., Castro-Santos, T. y Cada, G.F. (2002) Evaluation of the effects of turbulence on the behavior of migratory fish. Final Report 2002, Report to Bonneville Power Administration, Contract No. 00000022, Project No. 200005700. Portland, Oregon, USA.
- Rajaratnam, N., Katopodis, C. y Solanki, S. (1992) New designs for vertical slot fishways. *Canadian Journal of Civil Engineering* 19, 402-414.
- Roscoe, D.W. y Hinch, S.G. (2010) Effectiveness monitoring of fish passage facilities: Historical trends, geographic patterns and future directions. *Fish and Fisheries* 11, 12-33.
- Ruiz-Legazpi, J., Sanz-Ronda, F.J., Bravo-Córdoba, F.J., Bartolomé-San Miguel, D., Valbuena-Castro, J., González-Alemán, N.J., Santos-Santisteban, D. (2015) Evaluación biológica de la escala para peces de la Central Hidroeléctrica de Pereruela (Pereruela, Zamora). Informe técnico, GEA-Ecohidráulica.

S.A.I.H. del Duero (2015) Sistema Automático de Información Hidrológica (S.A.I.H.) de la Cuenca Hidrográfica del Duero. Disponible en: www.saihduero.es [Consultado el 1 de septiembre de 2015].

Santo, M. (2005) *Dispositivos de passagem para peixes em Portugal*. Lisboa.

Sanz-Ronda, F.J., Bravo-Córdoba, F.J., Fuentes-Pérez, J.F., et al. (2013) PASOS PARA PECES : escalas y otros dispositivos de paso. *Notas técnicas del CIREF* 7, 17.

Sanz-Ronda, F.J., Bravo-Cordoba, F.J., Fuentes-Pérez, J.F. y Castro-Santos, T. (2016) 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. *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems* 417, 10.

Sanz-Ronda, F.J., Bravo-Córdoba, F.J., Ruiz-Legazpi, J., et al. (2014) Criterios de diseño , construcción y evaluación. En: *VI curso sobre pasos para peces*. Palencia, pp 1-100.

Sanz-Ronda, F.J., Ruiz-Legazpi, J., Bravo-Córdoba, F.J., Makrakis, S. y Castro-Santos, T. (2015) Sprinting performance of two Iberian fish: *Luciobarbus bocagei* and *Pseudochondrostoma duriense* in an open channel flume. *Ecological Engineering* 83, 61-70.

Silva, A.T., Katopodis, C., Santos, J.M., Ferreira, M.T. y Pinheiro, A.N. (2012) Cyprinid swimming behaviour in response to turbulent flow. *Ecological Engineering* 44, 314-328.

Tarrade, L., Texier, A., David, L. y Larinier, M. (2008) Topologies and measurements of turbulent flow in vertical slot fishways. *Hydrobiologia* 609, 177-188.

- Towler, B., Mulligan, K. y Haro, A. (2015) Derivation and application of the energy dissipation factor in the design of fishways. *Ecological Engineering* 83, 208-217.
- Towler, B., Orvis, C., Dow, D. y Haro, A. (2013) Fishway Inspection Guidelines. *UMass Amherst*, 18.
- Videler, J.J. y Wardle, C.S. (1991) Fish swimming stride by stride: speed limits and endurance. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 1, 23-40.
- Wang, R.W., David, L. y Larinier, M. (2010) Contribution of experimental fluid mechanics to the design of vertical slot fish passes. *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems* 396, 21.
- Williams, J.G., Armstrong, G., Katopodis, C., Larinier, M. y Travade, F. (2012) Thinking like a fish: A key ingredient for development of effective fish passage facilities at river obstructions. *River Research and Applications* 28, 407-417.
- Zitek, A., Pacher, K., Honsig-Erlenburg, W. y Schmutz, S. (2012) Attraction and Passage Efficiency of a Fish Pass Within a Chain of Impoundments At the River Drau, Villach, Austria. En: *9th International Symposium on Ecohydraulics*. (eds H. Mader y J. Kraml). Vienna, pp 2-6.

A.1. Notación y abreviaturas

Las siguientes abreviaturas y símbolos han sido utilizados en este documento:

ρ : densidad absoluta del agua en el curso de agua considerado ($\approx 1000 \text{ kg/m}^3$).

ΔH : desnivel entre láminas de masas de agua consecutivas (m).

ΔH_E : desnivel entre la lámina de agua en el río y en el estanque inferior (m).

ΔH_{Ps} : desnivel entre láminas de agua de estanques sucesivos (m).

ΔH_S : desnivel entre la lámina de agua del estanque superior y del río (m).

ΔZ : desnivel entre soleras o lechos de estanques sucesivos (m).

A : atracción.

Área : área de un orificio sumergido (m^2).

ÁreaM : área mojada (m^2).

b : anchura de paso entre estanques consecutivos (m).

B : anchura de un estanque (m).

b_E : anchura de la entrada (m).

b_{pez} : anchura dorsoventral del pez objetivo (cm).

b_{Ps} : anchura de paso entre estanques (m).

b_S : anchura de la salida (m).

C_{dh} : coeficiente de descarga de una hendidura.

C_{do} : coeficiente de descarga del orificio (cuyo valor es 0,876).

C_{dv} : coeficiente de descarga de un vertedero.

C_s : coeficiente de sumergencia para vertederos sumergidos.

d_E : altura del orificio de entrada (m).

d_{Ps} : altura del orificio de paso que conecta dos estanques (m).

d_S : altura del orificio de salida (m).

E : entrada.

g : aceleración de la gravedad ($9,81 \text{ m/s}^2$).

GEA : Grupo de Ecohidráulica Aplicada de la Universidad de Valladolid.

h : carga de vertido sobre un elemento que conecta dos estanques consecutivos (m).

h'_{Ps} : profundidad en el elemento de paso aguas arriba de un estanque (m).

h_E : profundidad en la entrada (m).

h_{pez} : anchura dorsoventral del pez objetivo (cm).

$h_{previa E}$: profundidad previa a la entrada (m).

$h_{posterior S}$: profundidad posterior al vertedero de salida (m).

h_{Ps} : profundidad de paso entre estanques (m).

h_S : profundidad en la salida (m).

HV : hendidura vertical.

L : longitud de un estanque (m).

L_{pez} : longitud del pez objetivo (cm).

N : potencia disipada por unidad de volumen (W/m^3).

n_{tipo} : número de estanques tipo en la escala evaluada.

n_{total} : número total de estanques en la escala evaluada.

O : observaciones de relevancia.

O_{i1} : puntuación de la primera observación de relevancia de una categoría i .

O_{in} : puntuación de la última observación de relevancia de una categoría i .

Ort_E : orientación de la entrada respecto del río ($^\circ$).

Ort_s : orientación de la salida respecto del río.

p : altura umbral del elemento de paso aguas abajo del estanque evaluado (m).

p' : altura umbral del elemento de paso aguas arriba del estanque evaluado (m).

PO_i : puntuación de las observaciones de relevancia de una categoría i .

Ps : pasaje.

$Punt$: puntuación de una variable fundamental u observación de relevancia ponderada de la categoría pasaje.

$Punt_i$: puntuación de una variable fundamental u observación de relevancia para un estanque singular " i " de una escala.

$Punt_{tipo}$: puntuación de una variable fundamental u observación de relevancia para el estanque tipo de una escala.

Q : caudal (m^3/s).

$Q_{atracción}$: caudal de atracción respecto al caudal total que circula por el ramal en que se encuentra el paso piscícola (%).

$Q_{auxiliar}$: caudal que no circula por la escala y ayuda a la llamada (m^3/s).

Q_{curso} : caudal que circula por el cauce durante la evaluación (m^3/s).

Q_{escala} : caudal que circula a través de la escala (m^3/s).

Q_h : caudal que circula a través de una hendidura vertical (m^3/s).

Q_{ns} : caudal a través de un vertedero libre (m^3/s).

Q_o : caudal a través de un orificio sumergido (m^3/s).

Q_s : caudal a través de un vertedero sumergido (m^3/s).

S: salida.

T_E : tipología del elemento de entrada.

t_{med} : tirante medio de un estanque (m).

T_{Ps} : tipología de los elementos de paso.

T_S : tipología del elemento de salida.

U_E : ubicación de la entrada para peces.

v: velocidad del flujo (m/s).

A.2. Justificación de las variables fundamentales y observaciones de relevancia

Los criterios de valoración numérica que se emplean se basan en recomendaciones ampliamente consensuadas de guías de diseño sobre pasos para peces, publicaciones científicas y técnicas y en experimentos de campo.

La puntuación máxima de cada variable (10) corresponde al valor mínimo o máximo del parámetro considerado, según sea el caso, que se aconseja en el diseño. Igualmente, la calificación inferior (0) se aplica a los límites inaceptables para el parámetro considerado. En el caso de que existieran discrepancias, siempre se toma el valor más conservador de la variable.

1. Variables fundamentales

1.1. Atracción

1.1.1. Caudal relativo de atracción ($Q_{\text{atracción}}$)

Los peces tienden a seguir la corriente principal del río en sus movimientos de ascenso (DVWK 2002). Por ello, el caudal de llamada (Q_{llamada} ; caudal en las inmediaciones de la escala) ha de tener una magnitud tal, que permita captar la atención de los peces. Si no existe atracción, una escala bien diseñada puede no ser funcional. De esta manera, cuanto mayor sea el caudal de llamada, más probable será que los peces localicen el dispositivo de paso (Larinier 2000, 2002a; Calles y Greenberg 2009; NMFS 2011).

Diferentes autores aconsejan un caudal de atracción comprendido entre el 5,00 y 10,00 % del total del que circula por el cauce durante la época de migración (Larinier 1992, 1998; NMFS 2011; Williams *et al.* 2012). Otros investigadores indican que caudales menores pueden ser suficientes, sobre todo en el caso de grandes ríos: entre el 1,00 % y el 5,00 % del caudal circulante por la presa (Larinier 1998, 2002a). Algunas especies como las bogas, son más sensibles frente a barbos y truchas, a la hora de localizar estructuras con caudal de llamada próximo al 1,00 % del caudal medio anual (Zitek *et al.* 2012) o < 2,00 % del caudal circulante por el río (Bravo-Córdoba *et al.* 2016).

En base a lo anterior, se considera un valor conservador del 1,00 % como umbral mínimo que facilita la localización del paso y un óptimo del 10,00 %.

El caudal de atracción puede ser vertido por la propia escala o complementarse el flujo de ésta con estructuras específicas para tal fin (vertederos en el labio, conducciones embutidas en el paramento). Cuando se ubica la escala unida a la restitución de una turbina, el caudal turbinado ayuda a la atracción.

El caudal de llamada, $Q_{llamada}$, se determina de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$Q_{llamada} = Q_{escala} + Q_{auxiliar}^{34} \quad (\text{Ec. 11})$$

Por último, el caudal relativo de atracción, $Q_{atracción}$, se calcula y puntúa según la siguiente expresión y la posterior figura:

³⁴ Para considerarlo como un caudal auxiliar, éste debe concentrarse a $\leq 3,00$ m respecto de la entrada de peces de la escala, debido a que esa es la distancia máxima a la que se considera que el flujo de la propia escala puede atraer a un pez (Bunt *et al.* 1999, 2012b; Aarestrup *et al.* 2003). En caso contrario, no se considera, e incluso puede ser negativo para la atracción.

$$Q_{atracción} = \frac{Q_{llamada}}{Q_{curso}} \cdot 100 \quad (\text{Ec. 12})$$

donde Q_{curso} es el caudal habitual en la época de migración que circula por el tramo de río en que se encuentra el paso.

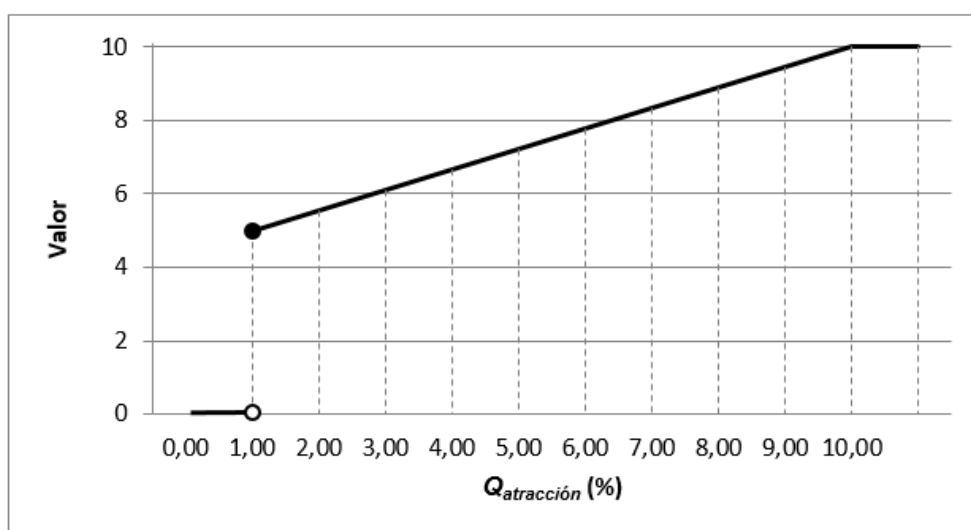


Figura 61. Puntuación de $Q_{atracción}$.

Tabla 17. Explicación del sistema de puntuación planteado para $Q_{atracción}$.

$Q_{atracción}$	Justificación	Valor
< 1,00 %	Caudal de llamada que no atraerá a un número reducido de peces.	0
= 1,00 %	Caudal que comienza a ser atractivo la fauna piscícola.	5
≥ 10,00 %	El caudal de llamada es suficientemente grande como para atraer la mayoría de ejemplares.	10

1.1.2. Ubicación de la entrada de peces (U_E)

Las mejor ubicación para la entrada de un paso para peces está a) próxima a una orilla (para facilitar que los peces la encuentren, ya que suelen desplazarse entre el *thalweg* y las orillas) (Clay 1995; DVWK 2002; Larinier 2002b; Katopodis *et al.* 2013), b) lo más aguas arriba posible y c) cercana a la base del obstáculo (a igualdad de caudal vertido por coronación, en el embudo que forma el estribo de más aguas arriba del azud y la orillas es donde más peces se acumulan) (Clay 1995; Bunt 2001; DVWK 2002; Armstrong *et al.* 2004) y/o d) adyacente a zonas con caudal de atracción, como por ejemplo en la restitución de centrales hidroeléctricas que turbinan a pie de azud (porque la ictiofauna tiende a seguir la corriente de mayor caudal) (DVWK 2002; Larinier 2002b, 2008; Aigoui *et al.* 2008).

Por lo tanto, la calificación de esta variable se centrará en criterios cuantitativos en base a lo anterior. Es decir, se va a observar el grado de cumplimiento (Tabla 18) de cada requisito sobre la situación de la entrada del paso y la variable U_E se valora como la media aritmética de todos ellos ³⁵:

- proximidad a una orilla.
- lo más aguas arriba del obstáculo.
- junto a la base del obstáculo.
- donde se concentre un mayor caudal.

Tabla 18. Valoración de los diferentes aspectos que influyen en el parámetro U_E . ³⁶

Nivel de idoneidad	Valor
Muy adecuado	10
Adecuado	6,7
Inadecuado	3,3
Muy inadecuado	0

³⁵ En el apartado 4.1.1.b se incorpora algún matiz complementario.

³⁶ Si la escala concentra todo el caudal del tramo, su ubicación será siempre óptima.

1.2. Entrada

1.2.1. Desnivel entre la lámina de agua en el río y en el estanque inferior (ΔH_E)

El flujo de agua en la entrada de la escala debe ser fácilmente distinguible por los peces entre otros flujos de corriente de los alrededores y desde zonas lo más alejadas posible (Armstrong *et al.* 2004). La atracción hacia la entrada depende de la relación entre el caudal y la velocidad en la salida del agua en la escala. A mayor valor de ambas variables, mayor penetración en la columna de agua del río y mayor atracción (Larinier 2000). La velocidad de salida debe ser superior a 1,0 m/s para todas las especies y preferiblemente del orden de 2,0 a 2,4 m/s, ideal para salmónidos grandes (que corresponden a saltos de agua de 0,20 a 0,30 m). Cuando una entrada de peces está situada en las proximidades de una restitución y compitiendo con el flujo de las turbinas, la velocidad del flujo de agua debe ser al menos el doble de la salida de la turbina (Armstrong *et al.* 2004).

En este caso, vamos a proponer unos valores óptimos de desnivel comprendidos entre 0,20 y 0,30 m. Los valores más desaconsejables se establecen a partir 0,50 m, según las observaciones detalladas más adelante (Anejo A.2.), pues las velocidades o saltos son difícilmente compatibles con la capacidad de nado y/o salto de los peces. Tampoco interesan valores bajos de la variable ($\Delta H < 0,05$ m) que puedan provocar velocidades menores a 1,0 m/s. A veces, el desnivel puede ser complicado de medir (saltos reducidos), por lo que debe comprobarse mediante el empleo sencillo de la ecuación de continuidad ($v = Q/\text{Área}M$), la velocidad de salida del flujo.

No debe olvidarse que este valor fluctúa con el caudal del río, que hace aumentar o disminuir el nivel de agua y, por consiguiente, también el salto en la entrada del paso

(Fuentes-Pérez *et al.* 2014, 2016). Sólo se considera un problema cuando para caudales habituales es elevado o muy reducido.

No se proponen valores diferentes de la variable según el tipo de vertedero como en el *Pasaje*, pues se trata de un único vertedero, el salto es bastante variable según el caudal del río y su finalidad es animar a entrar al pez de manera puntual.

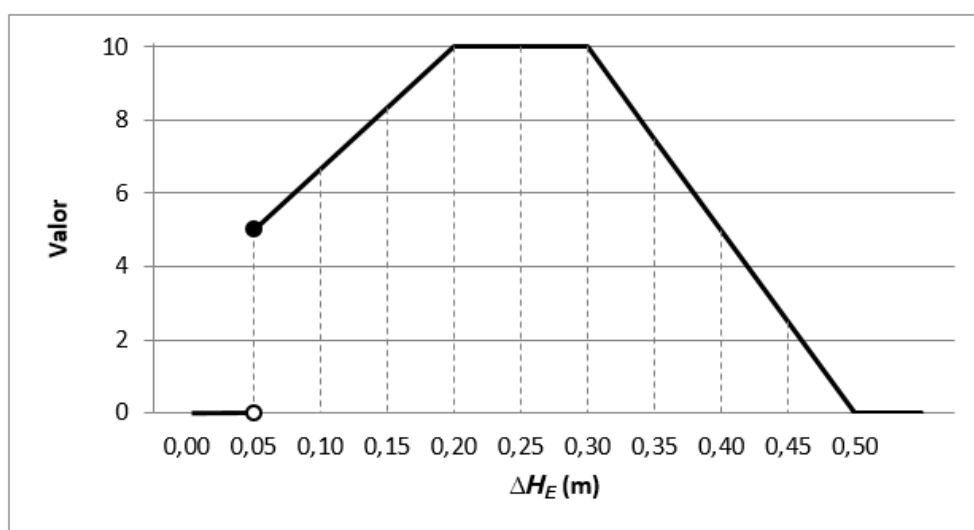


Figura 62. Gráfico de puntuación de ΔH_E .

Tabla 19. Explicación de la manera de valorar la variable ΔH_E .

ΔH_E	Justificación	Valor
$< 0,05 \text{ m}^{37}$	Velocidad reducida que disminuye la atracción por la entrada de peces.	0
$= 0,05 \text{ m}$	Valor mínimo que provoca atracción y entrada	5
$\geq 0,20 \text{ y } \leq 0,30 \text{ m}$	Se consiguen velocidades de flujo óptimas.	10
$= 0,40 \text{ m}$	Valor superior admisible.	5
$\geq 0,50 \text{ m}$	Velocidades de flujo que no pueden ser superadas por la mayoría de los ejemplares.	0

³⁷ Si la velocidad es $> 1,0 \text{ m/s}$ la variable se considera adecuada, aunque no óptima (valor = 5).

1.2.2. Profundidad en el vertedero de entrada (h_E)

Esta variable se desarrolla en en el apartado 1.3.4.

1.2.3. Anchura de la entrada (b_E , d_E)

Esta variable se desarrolla en en el apartado 1.3.5.

1.2.4. Profundidad previa a la entrada ($h_{previa E}$)

Analiza el calado de agua en el río previo a la entrada que permite a los peces permanecer en los pies de la escala mientras se deciden a entrar o descansan. Igualmente, permite coger impulso para introducirse en el paso. Si es demasiado reducido, los peces ven complicada la aproximación a la escala, su entrada, pueden rozarse con el lecho del río y el riesgo de predación aumenta (DVWK 2002).

Varios manuales de diseño recomiendan la existencia de una poza de remonte previa a la entrada de la escala (Clay 1995; Elvira *et al.* 1998; Martínez de Azagra 1999; Larinier 2002b; NMFS 2011) con profundidad $> 0,50$ m (DVWK 2002). Desde un punto de vista físico, una natación segura se consigue con valores $> 0,20$ m (Katopodis 1992; DVWK 2002; Armstrong *et al.* 2004) y con valores $> 0,60$ m se evitan situaciones de estrés y predación (Martínez de Azagra 1999; DVWK 2002; Larinier 2002b; Baudoin *et al.* 2014). La preferencia de profundidad de bogas, barbos y truchas sugieren como idóneos para el hábitat valores $> 0,40$ m para juveniles y $> 0,60$ m para adultos (Martínez-Capel *et al.* 2004; Ayllón *et al.* 2010).

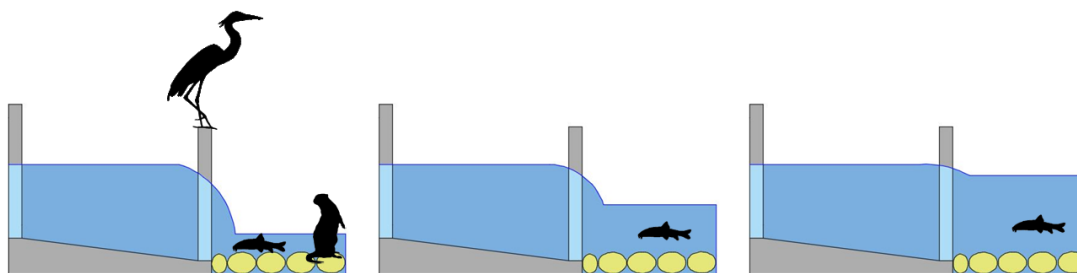


Figura 63. Ejemplos de tres profundidades previas a la entrada diferentes: reducida (izquierda), media (centro) y grande (derecha).

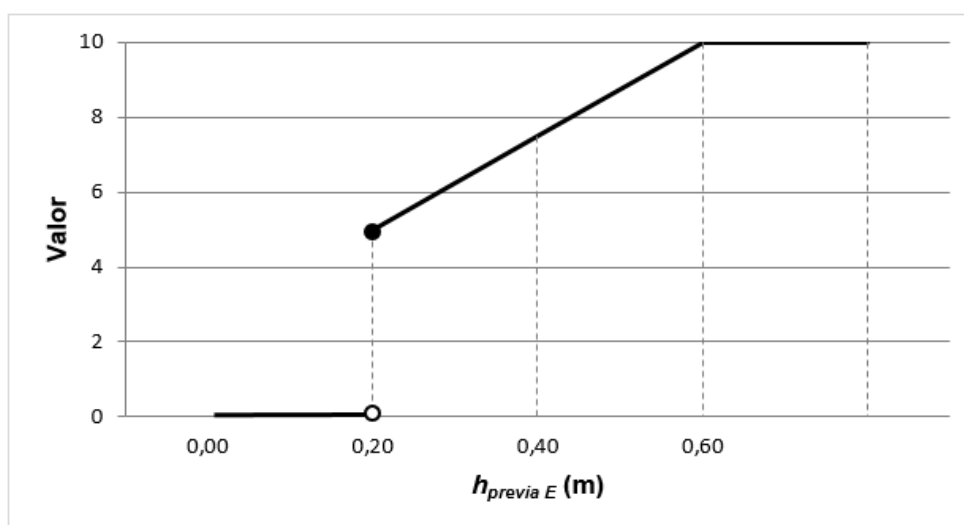


Figura 64. Puntuación de $h_{previa E}$.

Tabla 20. Explicación detallada del sistema de valoración de $h_{previa E}$.

$h_{previa E}$	Justificación	Valor
Profundidad pequeña:		
$< 0,20 \text{ m}$	- Riesgo alto de rozadura y golpes. - Riesgo alto de depredación. - Desfavorable para el descanso. - Desfavorable para tomar impulso.	0
$= 0,20 \text{ m}^{38}$	Umbral mínimo de acceso.	5
Profundidad grande:		
$\geq 0,60 \text{ m}$	- Riesgo bajo de rozadura o golpe. - Riesgo bajo de depredación. - Muy favorable para el descanso. - Muy favorable para tomar impulso.	10

³⁸ En un vertido libre la profundidad mínima es $> 2 \cdot \Delta H$.

1.2.5. Orientación de la entrada respecto del río (Ort_E)

En función de cómo se oriente la entrada de la escala en relación del eje hidráulico del río y de la dirección de ascenso de los peces, se facilita que los individuos que se desplazan por el río hacia aguas arriba se introduzcan en el paso. También, la orientación puede condicionar la entrada en el paso de arrastres transportados por la corriente (gravas, ramas, etc.).

Los manuales de diseño recomiendan que las entradas de las escalas se orienten perpendiculares al eje hidráulico del río o paralelas a dicho eje y a favor del sentido de la corriente (DVWK 2002; NMFS 2011). Una vez fuera de ese patrón, se obliga al pez a realizar giros poco naturales para adentrarse en el paso. Por ello, se otorga la calificación máxima en el primer caso, y a medida que la entrada se aleja de las recomendaciones, se penaliza este parámetro.

Tabla 21. Justificaciones consideradas para establecer el sistema de puntuación de Ort_E .

Ort_E	Justificación	VALOR
Zona A ($0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$)	- Se facilita que los peces que ascienden por el río se introduzcan en la estructura (DVWK 2002; Sanz-Ronda <i>et al.</i> 2014). - No existe entrada de arrastres.	10
Zona B ($90^\circ < \alpha \leq 135^\circ$)	- La entrada de peces comienza a dificultarse, pues éstos deben hacer un giro poco natural para acceder al paso. - La facilidad para que se introduzcan arrastres es moderada.	de 1 a 5
Zona C ($135^\circ < \alpha \leq 180^\circ$)	- Se complica el acceso de los peces, ya que deben introducirse en la escala en sentido aguas abajo para avanzar río arriba. - Además, se favorece la entrada de restos arrastrados por la corriente.	0

1.2.6. Tipología de la entrada (T_E)

Esta variable se desarrolla en el apartado 1.3.6.

1.3. Pasaje

1.3.1. Desnivel entre láminas de agua de estanques sucesivos (ΔH_{Ps})

ΔH está directamente relacionado con la velocidad del flujo a través de vertederos sumergidos, hendiduras y orificios, y por consiguiente, también con la turbulencia existente en las artesas (Fuentes-Pérez *et al.* 2016). ΔH debe ser acorde a la capacidad natatoria o de salto de las especies objetivo, pues un desnivel grande implica una velocidad de flujo y turbulencia elevadas, lo que podría condicionar el ascenso de los peces.

La distancia a la que el pez debe enfrentarse a esas velocidades elevadas en flujos sumergidos no suele superar los 2,00 m (Tarrade *et al.* 2008). Castro-Santos *et al.* (2013) y Sanz-Ronda *et al.* (2015) observaron que el 95 % de los juveniles y adultos de barbo, boga y trucha fueron capaces de recorrer una distancia de hasta 2,00 m nadando frente a una velocidad de 3,0 m/s, lo que equivaldría a un ΔH de aproximadamente 0,50 m. No obstante, éste sería un valor límite que supondría un gasto energético elevado pudiendo llevar al pez hasta el agotamiento, por lo que las guías de diseño recomiendan velocidades máximas inferiores a 2,0 m/s (DVWK 2002).

En base a lo anterior, los manuales de diseño recomiendan desniveles acordes a la capacidad de salto o natación de los peces, normalmente de 0,25 a 0,30 m para la combinación habitual de vertedero sumergido y orificio, y de 0,20 m para las hendiduras verticales (Larinier 1992, 1998; DVWK 2002; Baudoin *et al.* 2014). Valores superiores podrían causar retrasos o selección. Por ejemplo, Sanz-Ronda *et al.* (2016) observaron que, en una hendidura vertical con un ΔH puntual de 0,60 m, en torno al 40 % de los ejemplares de boga fueron capaces de superarlo (rango de longitud furcal 12 - 26 cm), aunque hubo una selección de individuos por tamaño (éxito con longitudes furcales superiores a 18 cm).

En el caso de un vertido libre, los peces se ven obligados a saltar para poder ascender por la escala, de manera que ΔH debe ser inferior a la capacidad de salto de los individuos y debe de existir una profundidad mínima que les permita coger impulso antes del salto. En general, no se sabe mucho sobre la aptitud de salto de los peces ibéricos. Kondratieff y Myrick (2006), estudiando salvelinos de 13,5 - 26,5 cm de longitud (salmónido con capacidad de nado similar a la trucha y al barbo (Castro-Santos *et al.* 2013; Sanz-Ronda *et al.* 2015) y Amaral *et al.* (2016), en experiencias con barbo ibérico (longitud media 18,7 cm) observaron que para vertederos de vertido libre el porcentaje de éxito en el ascenso depende de la combinación entre la profundidad y el desnivel, obteniendo éxitos representativos cuando la profundidad supera los 0,20 m y reduciéndose a partir de $\Delta H = 0,35 - 0,40$ m. Así mismo, Sanz-Ronda *et al.* (2015b) vieron que, en saltos naturales, la gran mayoría de ejemplares de las especies objeto de este manual, de longitud superior a 12 cm, pudieron superar desniveles de $> 0,50$ m con profundidades de impulso $> 1,00$ m. Morán-López y Uceda Tolosa (2016) describen saltos medios de barbos del sur (*L. comizo* y *L. microcephalus*) de 79,6 cm, con profundidad sobre 1,00 m y tamaño corporal menor a 35 cm. Bravo-Córdoba *et al.* (2016) observaron que en torno a un 40 % de barbos adultos fueron capaces de superar un vertido libre de 0,60 m en una escala con anchura de vertido $b = 0,20$ m y profundidad media $t_m \approx 1,00$ m. No obstante, se trata de situaciones excepcionales (saltos puntuales) que conllevarían un gran esfuerzo y gasto energético si se repiten varias veces, por lo que las guías de diseño recomiendan que ΔH no supere los 0,30 m (Larinier 1998) y que, en vertidos libres haya una profundidad de al menos dos veces el desnivel entre láminas ($2 \cdot \Delta H$) para tomar impulso y una carga de vertido (h) en el vertedero superior de 0,20 m para conseguir un paso seguro (Baudoin *et al.* 2014).

También se ha observado que el tránsito voluntario por una escala de vertederos sumergidos y orificios con $\Delta H = 0,25$ m de salto no muestra diferencias significativas

en porcentaje de éxito ni en tiempos de paso para barbo y boga, frente a un vertido libre y orificio con $\Delta H \approx 0,30$ m (Sanz-Ronda *et al.*, 2015b). En cambio, Bravo-Córdoba *et al.* (2016) constatan ascensos de barbo con menor porcentaje de éxito en una escala con vertido libre ($\Delta H \approx 30 - 35$ cm) y orificio de fondo frente a otras similares con vertido sumergido y $\Delta H \approx 25 - 30$ cm.

Los desniveles que provocan velocidades menores a 1,0 m/s ($\Delta H < 0,05$ m), podrían afectar a la motivación de los individuos durante su ascenso (Castro-Santos *et al.* 2013) y a la localización del camino a seguir (Goettel *et al.* 2015). Sin embargo, desniveles entre láminas de agua tan reducidos pueden ocurrir de manera puntual por obstrucciones o incrementos de niveles de agua en el río. No se trata de situaciones normales de diseño (Fuentes-Pérez *et al.* 2016), por lo que no se consideran en este análisis del *Pasaje*, aunque sí son importantes en el caso de la *Entrada* y de la *Salida*.

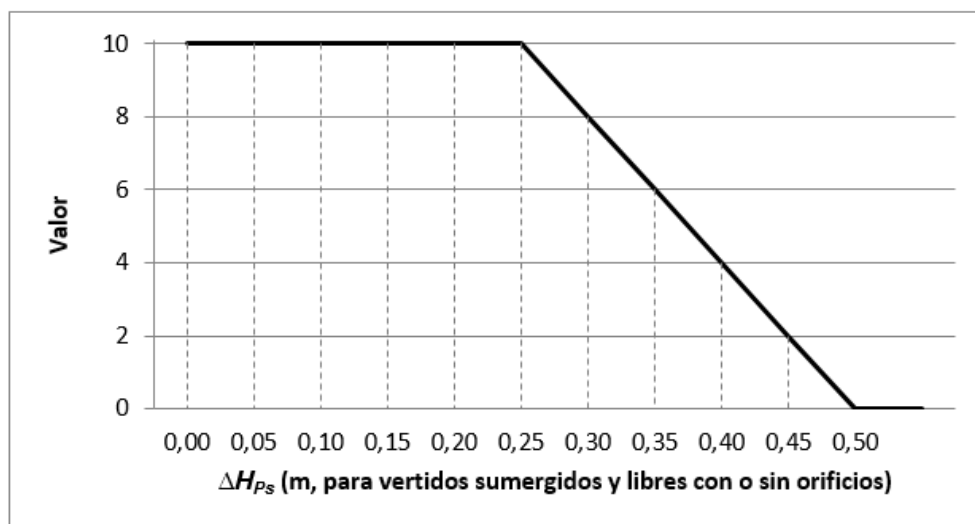


Figura 65. Gráfica para la valoración de ΔH_{ps} en vertederos sumergidos y libres con o sin orificios.

Tabla 22. Explicación del sistema de puntuación de ΔH_{Ps} en vertederos sumergidos y libres con o sin orificios.

VERTEDERO SUMERGIDO Y LIBRE ³⁹ (CON O SIN ORIFICIO)		
ΔH_{Ps}	Justificación	Valor
$\leq 0,25$ m	Desnivel que puede ser superado por la mayoría de los individuos sin dificultad.	10
$= 0,38$ m	Flujo rápido que solo puede ser superado por los ejemplares más capaces.	5
$\geq 0,50$ m	Velocidades de flujo que no puede ser superadas por la mayoría de los ejemplares.	0

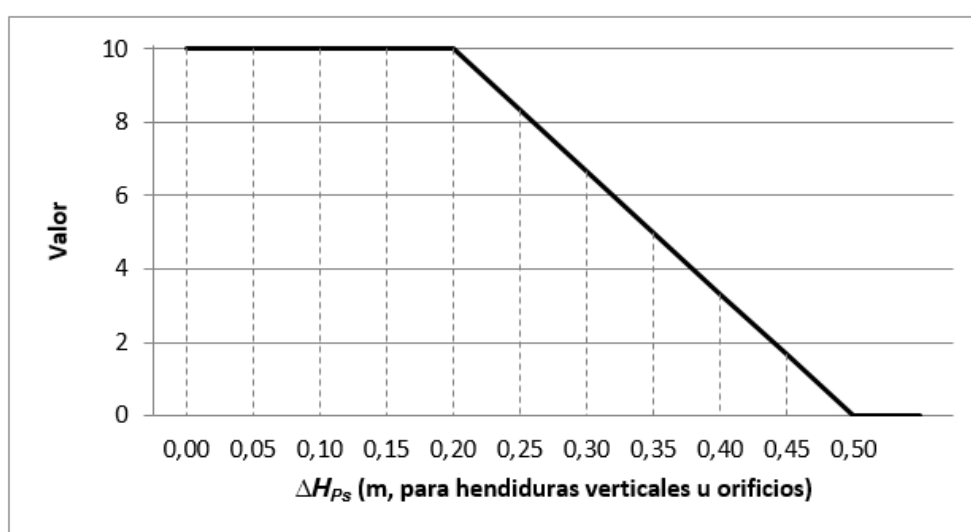


Figura 66. Gráfico para la puntuación de ΔH_{Ps} para hendiduras verticales u orificios.

Tabla 23. Argumentación considerada en el sistema de puntuación de ΔH_{Ps} para hendiduras verticales u orificios.

HENDIDURA VERTICAL U ORIFICIO ⁴⁰		
ΔH_{Ps}	Justificación	Valor
$\leq 0,20$ m	Desnivel que puede ser superado por la mayoría de los individuos sin dificultad.	10
$= 0,35$ m	Flujo rápido que sólo puede ser superado por los ejemplares más capaces.	5
$\geq 0,50$ m	Velocidades de flujo que no pueden ser superadas por la mayoría de los ejemplares.	0

³⁹ Para que el vertido libre sea efectivo debe existir una profundidad en su base $> 2 \cdot \Delta H$.

⁴⁰ Se agrupan dado su funcionamiento hidráulico similar en cuanto a velocidades (Fuentes-Pérez et al., 2015; 2016).

1.3.2. Potencia disipada por unidad de volumen (N)

La potencia disipada por unidad de volumen de agua en un estanque es el indicador de turbulencia más ampliamente utilizado en escalas de artesas (Towler *et al.* 2015). Valores excesivamente grandes de esta variable están ligados a una gran turbulencia (potentes y múltiples remolinos, y flujos muy aireados), lo que puede dificultar o limitar el ascenso de los peces pues afecta directamente a la capacidad de natación (supone un alto gasto energético) y a la orientación de los peces (Odeh *et al.* 2002; Silva *et al.* 2012). N es ampliamente utilizado en las guías de diseño de pasos para peces y existen recomendaciones de su cuantía para diferentes especies (Larinier 1992; DVWK 2002). Estos manuales clásicos aconsejan valores máximos de 150 W/m³ para ciprínidos reófilos y hasta 175 - 200 W/m³ para la trucha, incluso mayores cuando la escala tiene pocos estanques (Larinier 1992; Armstrong *et al.* 2004). Sin embargo, los criterios anteriores se basan en juicios profesionales y no son el resultado de experimentos controlados sobre los niveles de turbulencia que puede soportar una especie piscícola (Hotchkiss y Frei 2007).

Silva *et al.* (2012) observaron que los ejemplares de barbo de longitud < 25 cm se ven más afectados por la turbulencia que los de mayor tamaño, y que, en general, los barbos prefieren las zonas con turbulencias más bajas, observando una correlación negativa entre el tiempo de ascenso y los niveles de turbulencia. Por otra parte, Bravo-Córdoba *et al.* (2015) y Sanz-Ronda *et al.* (2016) observaron para dos escalas de diferente tipología que, para ejemplares juveniles y adultos de trucha, barbo y boga, prácticamente no hubo diferencias en tiempos de paso ni en porcentaje de éxito durante el ascenso con energía disipada comprendida entre 125 - 200 W/m³. Incluso, en estanques con valores puntuales de energía disipada mayores a 300 W/m³, observaron ascensos, aunque con una disminución de la eficiencia y selección de ejemplares por tamaño o capacidad de nado.

Por otro lado, no se ha podido constatar que valores bajos de esta variable afecten negativamente al tránsito de los peces, pudiendo influir, como ya se ha comentado anteriormente, en la motivación o en la localización del camino a seguir (Castro-Santos *et al.* 2013; Goettel *et al.* 2015). Esto puede ocurrir en estanques exageradamente grandes, i.e. pre-presas (Martínez de Azagra 1999), de ahí que la curva de valoración de N se haya dibujado con un tramo inicial punteado hasta 25 W/m^3 .

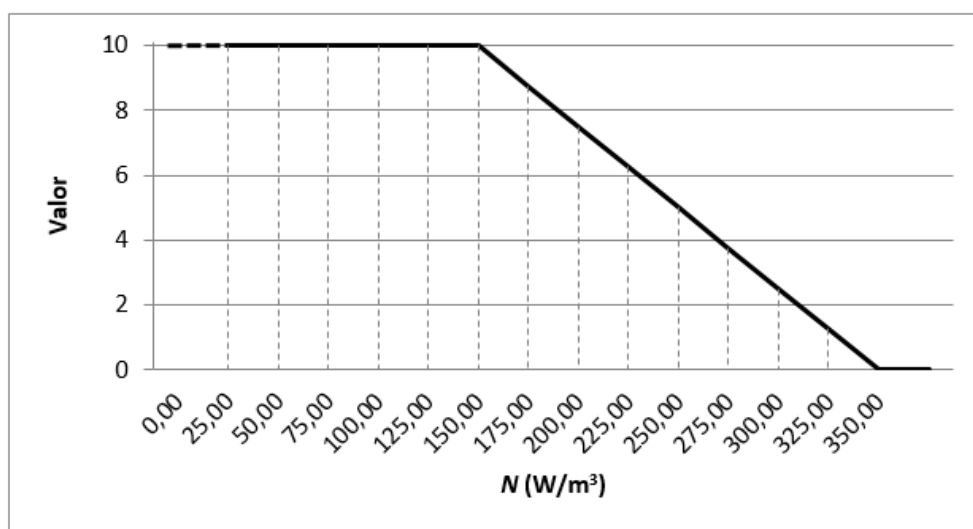


Figura 67. Puntuación de la potencia disipada por unidad de volumen.

Tabla 24. Explicación del sistema de puntuación de la variable N .

N	Justificación	Valor
$\leq 150,00 \text{ W/m}^3$	Cualquier pez objetivo puede ascender sin dificultad.	10
$= 250,00 \text{ W/m}^3$	Demasiada turbulencia como para que los peces puedan ascender con normalidad.	5
$\geq 350,00 \text{ W/m}^3$	Sólo los ejemplares más vigorosos y motivados consiguen ascender.	0

1.3.3. Tirante medio en los estanques (t_{med})

Esta variable influye en el confort de los peces, permitiendo su descanso, ayudando a disipar energía y reduciendo el riesgo de predación dentro de las artesas (Armstrong *et al.* 2004), ya que al aumentar la profundidad disminuye la probabilidad de ser visto (Harvey y Stewart 1991). Las guías de diseño recomiendan un valor superior a 0,20 m (Katopodis 1992; DVWK 2002; Armstrong *et al.* 2004). Una cuantía menor puede provocar daños por rozaduras y estrés, pues los peces pueden no tener un descanso suficiente, estar demasiado expuestos a los peligros del exterior y si además, la densidad de peces es elevada, los efectos negativos se intensifican. Sin embargo, cuanto mayor sea el valor que presenta esta variable menos perjudiciales son los problemas ya comentados. La mayoría de los autores recomiendan valores mayores a 0,60 m en los estanques para un ascenso adecuado (Martínez de Azagra 1999; DVWK 2002; Larinier 2002b; Baudoin *et al.* 2014). Las curvas de preferencia de bogas, barbos y truchas también proponen como óptimos valores $> 0,40$ m para juveniles y $> 0,60$ m para adultos (Martínez-Capel *et al.* 2004; Ayllón *et al.* 2010).

En el caso concreto de los vertidos libres, ha de existir una profundidad en su base $> 2 \cdot \Delta H$ (Baudoin *et al.* 2014) para que los peces puedan tomar impulso en su salto.

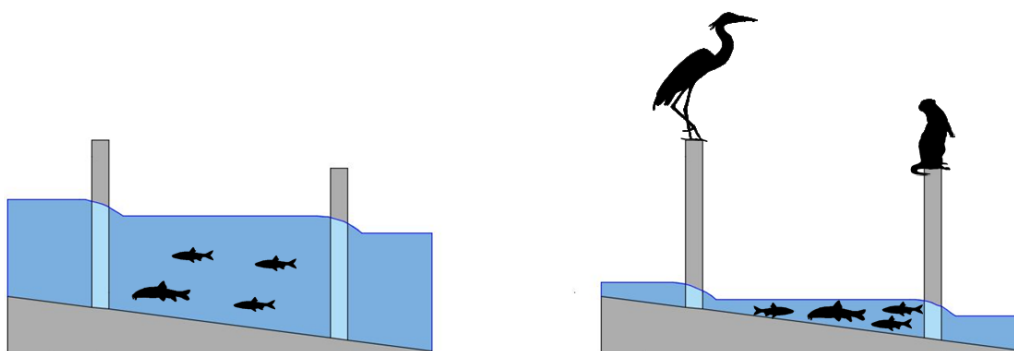


Figura 68. Estanque de una escala con un tirante medio adecuado (izquierda) y muy reducido (derecha).

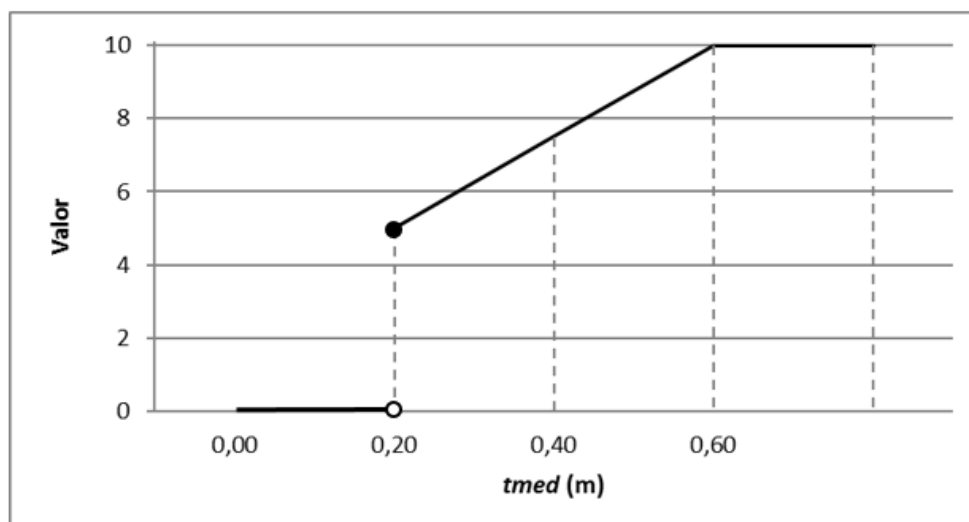


Figura 69. Gráfico de puntuación de t_{med} .

Tabla 25. Justificación del sistema de valoración planteado para t_{med} .

t_{med}	Justificación	Valor
$< 0,20 \text{ m}$	El pez tipo pasa con riesgo de roces, estrés, depredación y sin poder descansar adecuadamente.	0
$= 0,20 \text{ m}^{41}$	El pez tipo puede pasar con riesgo de depredación y sin poder descansar convenientemente pero no de golpes o rozaduras	5
$\geq 0,60 \text{ m}$	El pez tipo puede pasar con seguridad ante golpes, rozaduras y riesgo moderado de depredación y sin dificultad para poder descansar e impulsarse	10

1.3.4. Profundidad de paso (h_{Ps})

La profundidad de paso a través de los vertederos y orificios ha de permitir la natación de los peces y debe ser coherente con la anchura dorsoventral (h_{pez}) de los ejemplares de mayor tamaño que vayan a pasar por la escala, que para las especies objetivo es siempre $< 7 - 8 \text{ cm}$ (González-Alemán *et al.*, 2016), contemplando un margen de seguridad que evite el rozamiento del pez con la estructura. Se recomiendan valores mínimos $> 1,5 \cdot h_{pez}$ ($\approx 10 \text{ cm}$) y óptimos de $2,5 \cdot h_{pez}$ ($\approx 20 \text{ cm}$) para atravesar estas zonas críticas (Baudoin *et al.* 2014). Otros autores también recomiendan profundidades

⁴¹ En un vertido libre se exige un mínimo de profundidad en su base $> 2 \cdot \Delta H$.

mayores 0,20 m (Katopodis 1992; DVWK 2002; Armstrong *et al.* 2004). Al ser un paso rápido, la defensa frente a la predación no es tan vital como en el caso del tirante medio. Cuanto mayor sea el valor de h_{Ps} , más sencillo será el paso.

Para un vertido libre, h_{Ps} se corresponde con la carga de vertido h ($h_{Ps} = h$), y son necesarios $> 0,20$ m para conseguir una inserción segura del pez dentro del flujo de agua (Baudoin *et al.* 2014).

En el caso de un orificio, h_{Ps} equivale al parámetro d , que se considera en el apartado siguiente.

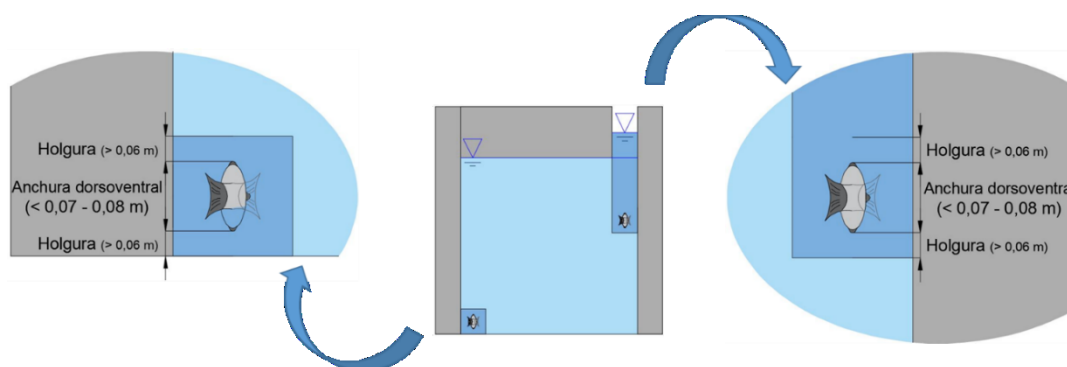


Figura 70. Explicación de h_{Ps} sobre un orificio de fondo (izquierda) y un vertedero sumergido (derecha).

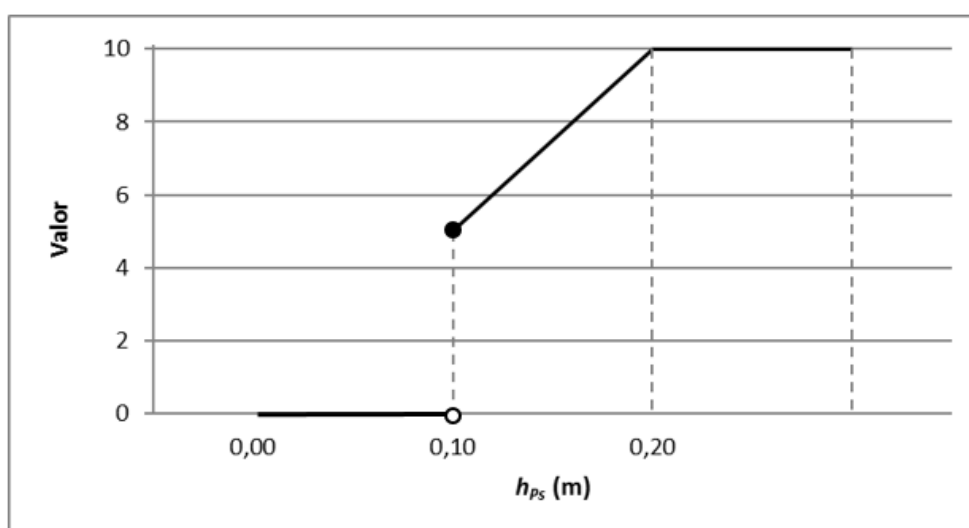


Figura 71. Gráfico para la valoración de h_{Ps} . Cuando estemos ante un vertido libre, esta variable se estima como la carga de vertido (h). Igualmente, cuando h_E sea menor a 0,10 m en un vertido sumergido, la tipología del vertido se considera "libre" y $h_E = h$.

Tabla 26. Justificación del sistema de puntuación para la variable h_{Ps} .

h_{Ps}^{42}	Justificación	Valor
< 0,10 m	El pez se rozaría con el contorno y tendría parte del cuerpo fuera del agua o, si el vertido fuera libre, no podría introducirse en la columna de agua tras un salto.	0*
= 0,10 m	Valor mínimo para un paso seguro, siempre que el pez se encuentre en la mitad de la columna de agua. En un vertido libre puede ser problemático.	5
≥ 0,20 m	Sin riesgos para el pez. En un vertido libre se sumergiría sin problemas en la columna de agua.	10

* Cuando h_{Ps} sea inferior a 10 cm, el tipo de vertido, a efectos de ascenso de los peces, se considerará como “libre”. En esa situación, y en un vertido libre convencional, esta variable se estimaría como la carga de vertido (h): diferencia de cota entre lámina de agua del estanque y el umbral del vertedero inferior.

1.3.5. Anchura de paso entre estanques (b_{Ps} , d_{Ps})

La anchura de paso entre artesas debe garantizar que el pez pase y que lo haga sin herirse, por lo que debería ser mayor a la anchura intercostal del pez de mayor tamaño que vaya a atravesarlo y considerar una holgura que permita su natación evitando roces con las paredes. Los ejemplares habituales de mayor tamaño de barbo y trucha en la cuenca del Duero tienen una longitud media (L_{pez}) de aproximadamente 50 cm, mientras que las bogas rara vez superan los 35 cm (González-Alemán, *et al.*, 2016). Estas longitudes equivalen a unas distancias intercostales (b_{pez}) menores a 7 cm (Sanz-Ronda *et al.*, 2015; González-Alemán *et al.*, 2016). Por otro lado, la amplitud total en la oscilación de la aleta caudal para peces subcarangiformes como los contemplados en este trabajo, suele ser menor a $0,2 \cdot L_{pez}$ (Videler y Wardle 1991). Ello equivale a una amplitud máxima para los peces grandes más frecuentes de 0,10 m. Lógicamente, cuanto mayor sea esta variable, más se favorecerá que los peces atraviesen el vertedero, hendidura u orificio y menor será el riesgo de atrampones que obturen las zonas de paso.

Las guías de diseño indican valores mínimos para vertederos sumergidos de $b > 0,15$ m y recomiendan valores en torno a 0,20 y 0,25 m (Larinier 1992; DVWK 2002) y mayores para vertidos libres, de 0,30 a 0,40 m (Armstrong *et al.* 2004). Sanz-Ronda *et*

⁴² $h_{Ps} = h$ para vertido libre.

al. (2015b) observaron para barbos de longitud que variaba entre 14 y 61 cm la misma eficiencia de pasaje en una escala con vertederos libres ($b = 0,4$ m) que en otra de vertederos sumergidos ($b = 0,2$ m), con el resto de variables hidráulicas similares.

En el caso de los orificios de fondo, se recomiendan valores óptimos $b \times d > 0,20 \times 0,20$ m (Área $> 0,04$ m²; Larinier 1992; DVWK 2002) y los valores mínimos deben estar acordes a lo comentado al principio del apartado, mayores a $0,10 \times 0,10$ m. El ascenso de peces a través de orificios de diferentes tamaños ($0,20 \times 0,15$ m, $0,20 \times 0,20$ m o $0,25 \times 0,25$ m), a igualdad de otros parámetros (N , ΔH) no afecta al porcentaje de éxito ni a los tiempos de paso (Bravo-Córdoba *et al.* 2014; Ruiz-Legazpi *et al.* 2015; Sanz-Ronda *et al.* 2015).

Cuando coincida un vertedero con un orificio de fondo, el parámetro "Anchura de paso" se cuantificará como el valor medio de ambos, dado que las tres especies objetivo usan ambas conexiones. Barbos y truchas ascienden indistintamente por vertedero u orificos, mientras que las bogas prefieren los vertederos sumergidos al orificio, o los orificios frente al vertido libre (Sanz-Ronda *et al.*, 2015).

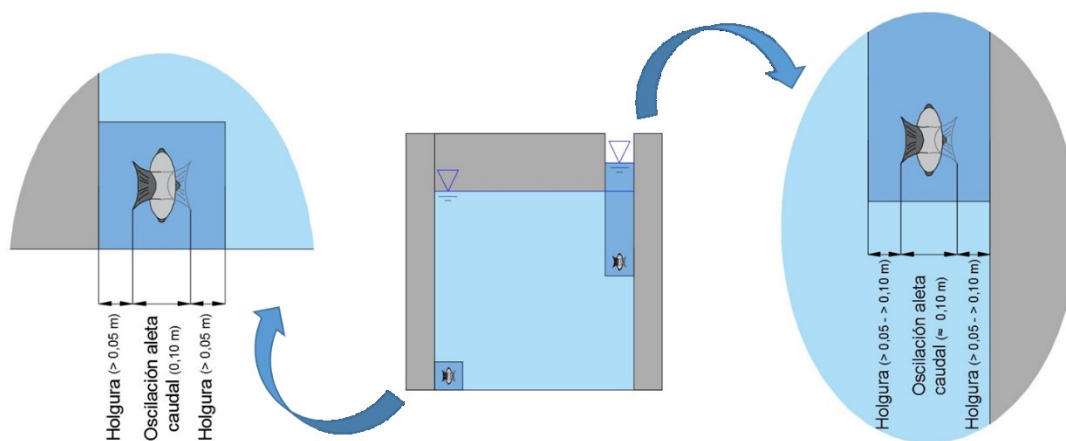


Figura 72. Explicación de b_{Ps} en un orificio de fondo (izquierda) y un vertedero sumergido (derecha).

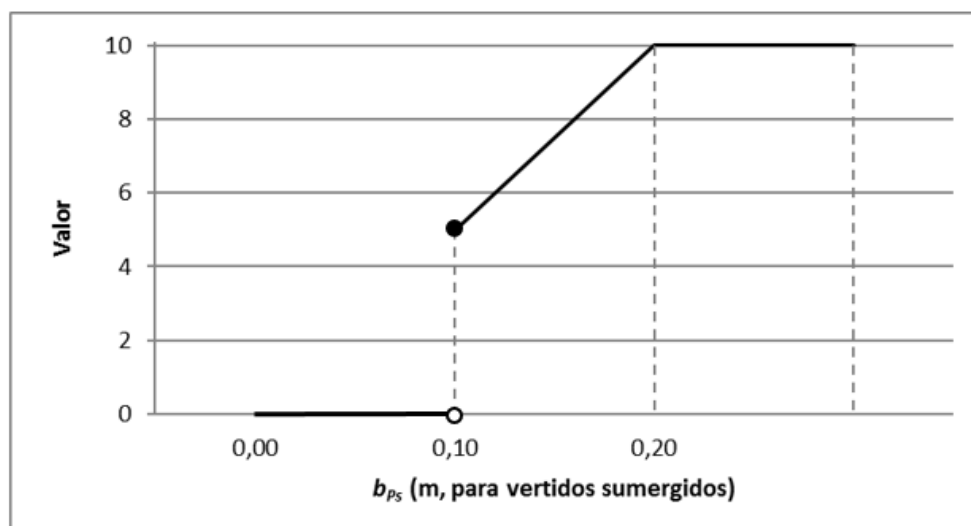


Figura 73. Puntuación de b_{Ps} para vertederos sumergidos.

Tabla 27. Aclaración de las consideraciones valoradas para b_{Ps} en vertidos sumergidos.

VERTIDOS SUMERGIDOS		
b_{Ps}	Justificación	Valor
< 0,10 m	Tamaño excesivamente reducido que limita el tránsito del pez y favorece atascos.	0
= 0,10 m	Dimensión mínima de pasaje y riesgo de obstrucciones.	5
≥ 0,20 m	Valores óptimos y menor probabilidad de obstrucciones.	10

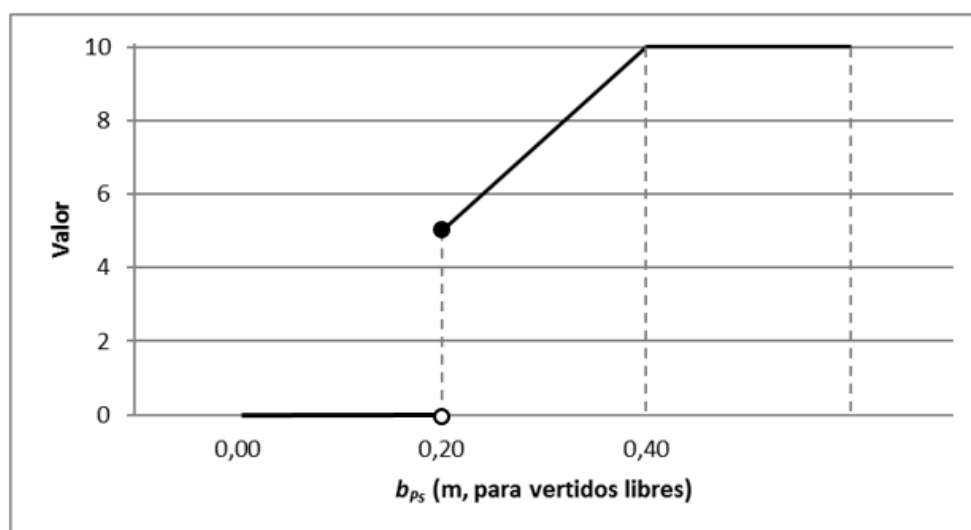


Figura 74. Sistema de puntuación de b_{Ps} con vertidos libres.

Tabla 28. Explicación del planteamiento seguido para b_{Ps} con vertidos libres.

VERTIDOS LIBRES		
b_{Ps}	Justificación	Valor
< 0,20 m	Tamaño excesivamente reducido que limita el acierto del pez durante el salto.	0
= 0,20 m	Dimensión mínima para un salto acertado.	5
≥ 0,40 m	Valores óptimos.	10

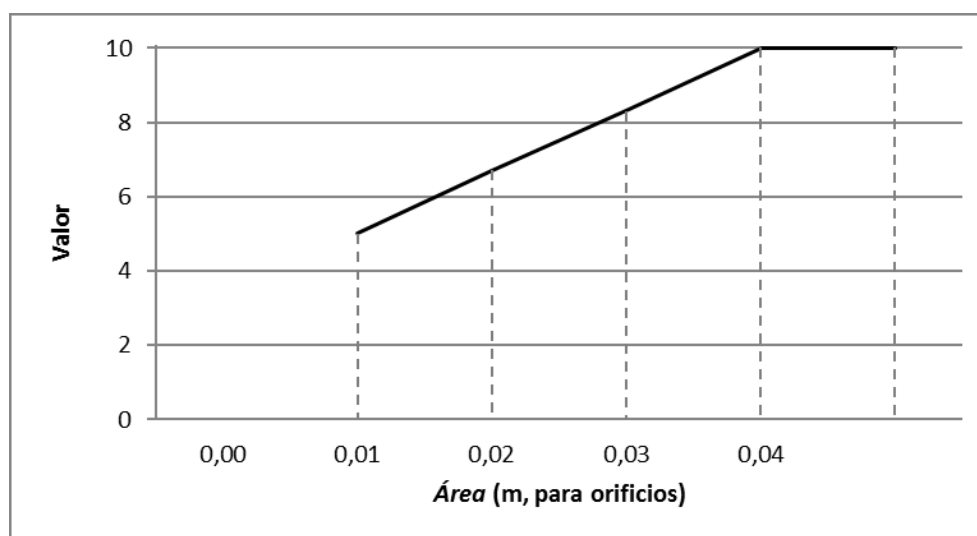


Figura 75. Valoración de b_{Ps} en orificios sumergidos.

Figura 76. Justificación de la puntuación de b_{Ps} para orificios sumergidos.

Área ⁴³	Justificación	Valor
< 0,01 m ²	Tamaño excesivamente reducido que limita el tránsito del pez y favorece atascos.	0
= 0,01 m ²	Dimensión mínima de pasaje y riesgo de obstrucciones.	5
≥ 0,04 m ²	Valores óptimos y menor probabilidad de obstrucciones.	10

⁴³ b ó $d \geq 0,10$ m.

1.3.6. Tipología del paso entre estanques (T_{Ps})

El sistema de paso entre estanques es importante porque condiciona la forma de desplazarse de los peces, la calidad de la energía disipada, las áreas de recirculación y las zonas de descanso (Larinier 2002b). Por ejemplo, un vertido libre obliga al salto de los peces y crea unas condiciones hidráulicas en el interior del estanque caracterizadas por una recirculación ascendente superficial (*plunging flow*). Por su parte, un vertido sumergido no obliga al salto y crea un flujo más horizontal y superficial (*streaming flow*), de manera que la recirculación ascendente ocurre en la solera y es menos fuerte que en el caso anterior (Ead *et al.* 2002; Larinier 2002b). Un comportamiento de flujo claramente sumergido sucede cuando $h > \Delta H/2$ (Aigoui *et al.* 2008). Esta circunstancia es menos selectiva y permite más opciones de paso a los peces (elegir entre salto o natación y usar diferentes profundidades para pasar de un estanque al siguiente) (Katopodis 1992; DVWK 2002; Larinier 2002b). Además, el flujo sumergido reduce el riesgo (un mal salto puede acabar con el pez fuera de la escala) y facilita el tránsito grupal en especies que migran en cardúmenes (e.g. la boga), en los que el paso de un primer individuo anima a que le siga el resto (Sanz-Ronda *et al.*, 2015).

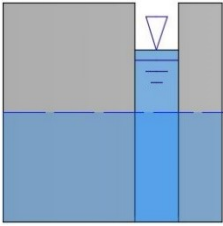
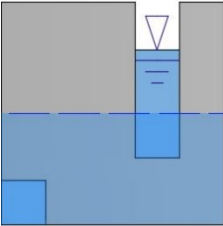
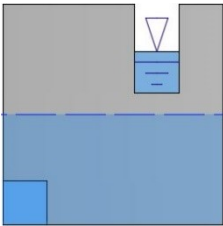
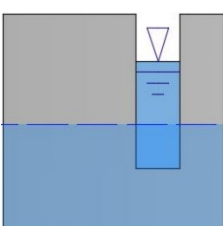
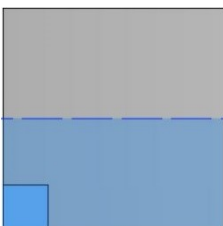
Los orificios de fondo son también flujos sumergidos y, aunque puede haber escalas para peces exclusivas de orificios, normalmente suelen ser un complemento a los vertederos tradicionales. En un principio, fueron ideados para especies que prefieren la natación próxima al lecho (Clay 1995; Larinier 2002b). Sin embargo, algunas especies usan vertederos sumergidos y orificios de manera indistinta (barbo y trucha), mientras que otras (boga) prefieren estos primeros (Sanz-Ronda *et al.*, 2015b). Si la opción es entre vertido libre y orificio, los barbos siguen sin mostrar claras preferencias, las bogas se decantan por el orificio y las truchas por el vertedero (Sanz-Ronda *et al.*, 2015b).

Pocos estudios se han centrado de manera objetiva en comparar la eficiencia de los diferentes sistemas de paso. Para las tres especies objetivo, Bravo-Córdoba *et al.* (201) no encontraron diferencias entre el éxito y los tiempos de paso en una escala de vertedero sumergido y orificio frente a otra de hendidura vertical, con igual energía disipada y caudal.

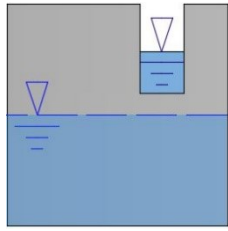
Por su parte, Sanz-Ronda *et al.* (2015b) y Bravo-Córdoba *et al.* (2015) observaron que el tránsito libre por una escala de vertederos sumergidos y orificios con $\Delta H = 0,25$ m de salto no mostró diferencias en porcentaje de éxito ni en tiempos de paso para barbo, boga y trucha, frente a una escala de vertido libre y orificio con $\Delta H \approx 0,30$ m. Sin embargo, el salto, cuando ocurría, era peligroso y no siempre conllevaba éxito (choques con el tabique o caídas fuera de la escala). En este caso, el orificio de fondo facilitaba en gran medida el ascenso de las bogas.

También es importante considerar cómo se comportan las diferentes opciones de comunicación entre estanques frente a las variaciones de niveles de agua y su facilidad para atascarse y no interferir en la migración (Fuentes-Pérez *et al.* 2014, 2016). Por ejemplo, el vertido libre no asume bien las variaciones de nivel del agua en la alimentación (si baja se reduce mucho el caudal y h), ni en la entrada de peces (aumenta ΔH), se atasca con facilidad y dicho atasco, si no está acompañado de orificios de fondo, no deja alternativa a la migración (Clay 1995; Aigoui *et al.* 2008). El orificio sumergido se adapta mejor a las variaciones de nivel, pero también es sensible a atascos y, si no está acompañado de otro tipo de comunicación, los peces detienen el ascenso (Clay 1995; Larinier 2002b; Santo 2005). Las hendiduras y los vertederos sumergidos (mejor si van acompañados de orificios) admiten mejor los cambios de nivel y son menos sensibles a los atascos (Clay 1995; Larinier 2002b).

Tabla 29. Aspectos considerados en el desarrollo del sistema de puntuación de la variable T_{Ps} .

Hendidura vertical⁴⁴		Muy buena adaptación a cambios de caudal y obstrucciones parciales (Clay 1995; Elvira <i>et al.</i> 1998; Martínez de Azagra 1999; DVWK 2002; Larinier 2002b; Armstrong <i>et al.</i> 2004; Aigoui <i>et al.</i> 2008; Baudoin <i>et al.</i> 2014). Los peces pueden atravesarla nadando a la profundidad que prefieran (Katopodis 1992; Rajaratnam <i>et al.</i> 1992; Larinier 1998, 2002b; DVWK 2002; Armstrong <i>et al.</i> 2004). Adecuación a todas las especies objetivo (los peces pueden pasar nadando, sin necesidad de saltar) (Elvira <i>et al.</i> 1998; Larinier 1998; Armstrong <i>et al.</i> 2004; Aigoui <i>et al.</i> 2008). PUNTOS 10
Vertedero sumergido + orificio de fondo		Muy buena adaptación a cambios de caudal y obstrucciones parciales (Clay 1995; Elvira <i>et al.</i> 1998; Martínez de Azagra 1999; Larinier 2002b; Aigoui <i>et al.</i> 2008). Los peces pueden pasar por el orificio (póximo al fondo) y por el vertedero. Adecuación a todas las especies objetivo (los peces pueden pasar nadando, sin necesidad de saltar) (Elvira <i>et al.</i> 1998; Aigoui <i>et al.</i> 2008). PUNTOS 10
Vertedero libre + orificio de fondo		Adaptación buena a cambios de caudal y obstrucciones (Clay 1995; Elvira <i>et al.</i> 1998; Martínez de Azagra 1999; Larinier 2002b; Aigoui <i>et al.</i> 2008). Los peces pueden pasar nadando, aunque sólo cerca del fondo, o saltando. Adecuación para todas las especies, pero especialmente bentónicas (que nadan próximas al fondo) y/o con buena capacidad de salto (Elvira <i>et al.</i> 1998; Aigoui <i>et al.</i> 2008). PUNTOS 8
Vertedero sumergido		Adaptación buena a cambios de caudal y obstrucciones (Clay 1995; Elvira <i>et al.</i> 1998; Martínez de Azagra 1999; Larinier 2002b; Aigoui <i>et al.</i> 2008). Los peces pasan nadando, pudiendo entre un rango de profundidades menor que en las opciones anteriores. Adecuado para cualquier especie objetivo, aunque las bentónicas (nadan próximas al lecho) se ven perjudicadas en comparación con otras opciones (Elvira <i>et al.</i> 1998; Aigoui <i>et al.</i> 2008). PUNTOS 7
Orificio de fondo		Adaptación media a cambios de caudal y baja a obstrucciones (Clay 1995; Elvira <i>et al.</i> 1998; Martínez de Azagra 1999; Larinier 2002b; Santo 2005). Los peces pueden pasar nadando, aunque a un rango de profundidades limitado y cercano al fondo. Adecuado para cualquier especie objetivo, aunque las que nadan próximas a la superficie se ven perjudicadas en comparación con otras opciones. PUNTOS 5

⁴⁴ Un vertedero sumergido con umbral $p < 0,25$ m se considera una hendidura vertical, por su comportamiento hidráulico similar (Rajaratnam *et al.*, 1992).

Vertedero libre⁴⁵		Baja adaptación a cambios de caudal y a obstrucciones parciales (Clay 1995; Elvira <i>et al.</i> 1998; Aigoui <i>et al.</i> 2008). Los peces solo pueden pasar saltando. Adecuado solamente para especies con capacidad de salto (entre las que se encuentran las especies objetivo) (Larinier 2002b; Armstrong <i>et al.</i> 2004; Aigoui <i>et al.</i> 2008).	PUNTOS 5
--	---	--	------------------------

1.4. Salida

1.4.1. Desnivel entre la lámina de agua en el río y en el estanque superior (ΔH_s)

Esta variable se desarrolla ampliamente en el apartado 1.2.1, aunque a diferencia de en la *Entrada*, cuando existen valores reducidos ($\Delta H < 0,05$ m) no suponen un problema de relevancia. El pez ya ha conseguido atravesar los vertederos previos y continuar por el río es el último paso.

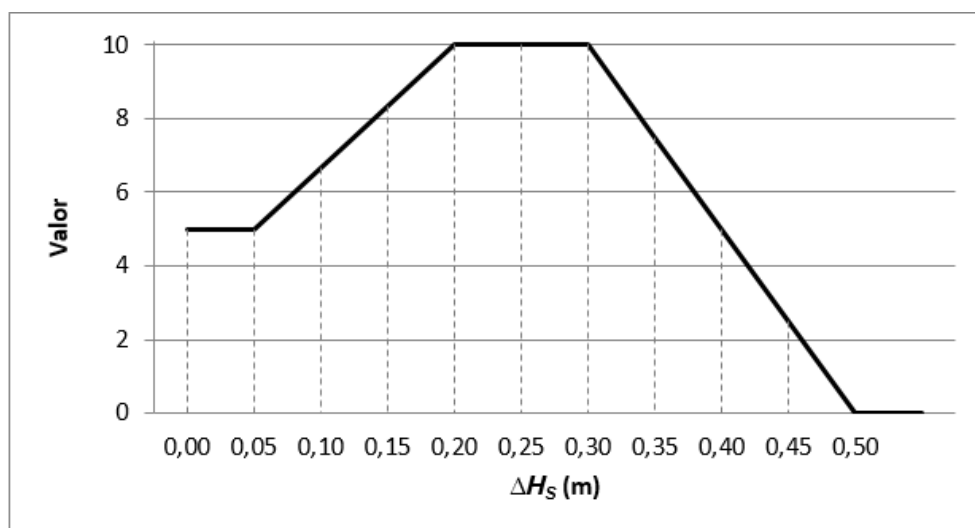


Figura 77. Gráfico para la puntuación de ΔH_s .

⁴⁵ Si el vertido por el orificio fuera libre, el valor es 0, dado que el pez debe atinar para introducirse en él, lo que complica mucho atravesarlo.

Tabla 30. Justificación de la valoración de la variable ΔH_s .

ΔH_s	Justificación	Valor
$\leq 0,05$ m	Velocidades de flujo que disminuyen la motivación.	5
$\geq 0,20$ y $\leq 0,30$ m	Velocidades de flujo óptimas.	10
$= 0,40$ m	Valor superior admisible.	5
$\geq 0,50$ m	Velocidades de flujo que no pueden ser superadas por la mayoría de los ejemplares.	0

1.4.2. Profundidad en el vertedero de salida (h_s)

Esta variable se desarrolla en en el apartado 1.3.4.

1.4.3. Anchura de la salida (b_s , d_s)

Esta variable se desarrolla en en el apartado 1.3.5.

1.4.4. Profundidad posterior al vertedero de salida ($h_{posterior\ s}$)

Este parámetro permite analizar la existencia de una profundidad suficiente para que los peces, una vez atraviesan la salida del paso, puedan continuar con sus desplazamientos hacia aguas arriba sin riesgo de sufrir daños por rozaduras, ser depredados, sufrir estrés excesivo o descansar convenientemente.

La profundidad mínima, en base a lo ya comentado anteriormente (apartados 1.2.2. y 1.3.4.) se establece en 20 cm (Katopodis 1992; DVWK 2002; Armstrong *et al.* 2004) y las condiciones óptimas se consiguen por encima de los 60 cm (Martínez de Azagra 1999; DVWK 2002; Larinier 2002b; Baudoin *et al.* 2014).

1.4.5. Orientación de la salida respecto del río (*Orts*)

La orientación de la salida influye en la facilidad con la que los peces que abandonan el paso encuentren rápidamente su camino ascendente y condiciona también la entrada de arrastes por la corriente. Una salida en sentido hacia aguas abajo y próxima al labio del azud es contraproducente porque las recirculaciones generadas pueden desorientar al pez e incluso propiciar su descenso por el labio del azud (Larinier 2002b). Por lo tanto, interesan salidas orientadas perpendicularmente a la corriente del río, o paralelas y en sentido hacia aguas arriba, aunque el riesgo de obstrucciones aumenta (Aigoui *et al.* 2008; Sanz-Ronda *et al.* 2014).

Tabla 31. Justificación de la puntuación de *Orts*.

<i>Orts</i>	Justificación	Valor
Zona A ($90^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$)	- A mayor proximidad a 180° la salida del pez será más natural, en sentido río arriba, pero aumenta la probabilidad de entrada de restos arrastrados por la corriente (se recomienda la instalación de una barrera antiflotantes).	10
Zona B ($45^\circ \leq \alpha < 90^\circ$)	- Aumenta el riesgo de desorientaciones en la salida. - Probabilidad baja de entrada de restos arrastrados la corriente.	1-5*
Zona C ($0^\circ \leq \alpha < 45^\circ$)	- Salida nada natural. - Probabilidad baja de entrada de restos arrastrados la corriente.	0

1.4.6. Tipología de la salida (*Ts*)

Esta variable se desarrolla en en el apartado 1.3.6, aunque se valora de manera distinta, según lo indicado en la tabla en 4.1.4.f.

2. Observaciones de relevancia

2.1. Generales

2.1.1. Mantenimiento y limpieza (atracción, entrada, pasaje y salida)

Independientemente de que el diseño y ejecución de una escala hayan sido correctos, un adecuado mantenimiento y limpieza son necesarios para garantizar un funcionamiento óptimo. Por el contrario, si no fueran adecuados, la estructura no operará de forma conveniente, siendo un problema para el ascenso de los peces (DVWK 2002; Santo 2005; Aigoui *et al.* 2008; Towler *et al.* 2013).



Figura 78. Obstrucciones en un vertedero (izquierda) y en un orificio de fondo (derecha) debidas a los restos arrastrados por la corriente al interior del paso.

2.1.2. Accesibilidad a la escala y a sus elementos (atracción, entrada, pasaje y salida)

Facilita el desarrollo de todas aquellas actividades relacionadas con el manejo de un paso para peces que permiten garantizar su correcto funcionamiento en el tiempo (mantenimiento y limpieza, reparación de fugas, regulación del caudal circulante por la escala, trabajos de evaluación, etc.).



Figura 79. Pasarela (izquierda) y rampa en hormigón (derecha) que facilitan el acceso a dos pasos piscícolas.

2.1.3. Aristas redondeadas (entrada, pasaje y salida)

Los bordes redondeados minimizan los daños que los ejemplares pueden sufrir cuando se encuentran dentro de los estanques del paso y colisionan con las estructuras de paso (Clay 1995). Además, hacen que el flujo se adhiera a la estructura ayudando a que sea más favorable para el ascenso de la ictiofauna (Armstrong *et al.* 2004).



Figura 80. Estanques que presentan aristas vivas (izquierda) y redondeadas (derecha).

2.2. Entrada

2.2.1. Elementos para la regulación del salto entre láminas de agua

En función de los diferentes caudales que circulen por el río, el desnivel entre la lámina de agua del estanque inferior y el río puede variar. Debido a ello, es recomendable que la escala esté equipada con algún elemento que permita la regulación y adecuación de ese desnivel, como por ejemplo con una compuerta o un vertedero de umbral móvil (Elvira *et al.* 1998; Larinier 2002b).



Figura 81. Modificación de la altura de un vertedero de umbral móvil para regular el salto entre láminas de agua en la entrada.

2.2.2. Descargas de flujo en la entrada

En ocasiones, la entrada en la escala se ve favorecida por flujos complementarios próximos, ya sean naturales o provocados (rebajes en el azud, tuberías forzadas), que ayudan en la tarea de aproximación de los peces al entorno de la entrada.

2.2.3. Ausencia de otras descargas de flujo que alejen el pez de la escala

Durante los desplazamientos ascendentes, la ictiofauna es atraída por la corriente de mayor caudal (Lundqvist *et al.* 2008; Calles y Greenberg 2009). De manera que, si en la sección del cauce en la que se encuentra la escala existen descargas de flujo de importancia próximas a su entrada, se puede reducir su atracción y desorientar a los peces (Baudoin *et al.* 2014). Esto provocaría retrasos o incluso, que los peces no fueran capaces de encontrar cómo acceder al paso.

2.3. Pasaje

2.3.1. Forma de los estanques

El paso de un estanque a otro de un flujo de agua sin la suficiente disipación de energía cinética debería ser evitado. Tampoco los chorros de corriente deberían golpear las paredes del estanque con gran velocidad, pues pueden alterar el movimiento de los peces, incluso inducir su salto en un lugar y hacia una dirección equivocada (Larinier 2002b). Por lo tanto, para dimensionar las artesas es preferible seguir las recomendaciones de diseño sobre modelos de eficiencia contrastada. Así, para estanques de vertederos sumergidos/libres, las guías de diseño indican que la longitud del estanque (L) debe estar comprendida entre 7-12 veces β , siendo β la anchura del vertedero (b) en hendiduras verticales; la carga de vertido (h) en vertido libre; en vertederos sumergidos el menor valor de h o b , y en orificios sumergidos la menor dimensión (b ó d) (Clay 1995; Larinier 2002b).

Por su parte, la anchura del estanque (B) se analiza en menor medida en los manuales de diseño, ciñéndose sus dimensiones a cumplir los criterios de energía disipada. No obstante, condiciona la forma y tamaño de las corrientes de circulación

(Tarrade *et al.* 2008). Los valores habituales rondan las 4-8 veces β (Clay 1995; Larinier 2002b).

En cualquier caso, son los valores reducidos ($L < 7 \cdot \beta$ y $B < 4 \cdot \beta$) los que pueden presentar más problemas de recirculaciones poco convenientes.

2.3.2. Deflectores en los estanques

Siempre que su dimensionamiento y ubicación sean adecuados, estabilizan el flujo y evitan que se genere una turbulencia excesiva en el interior de los estanques que desoriente a los peces (Baudoin *et al.* 2014). Así mismo, provocan recirculaciones que ofrecen zonas de bajas velocidades en las que los peces pueden descansar más cómodamente (Katopodis 1992; Sanz-Ronda *et al.* 2014).



Figura 82. Estanques sin deflectores (izquierda) y con ellos (derecha).

2.3.3. Conservación de la estructura

Se consideran las fugas de caudal del paso, así como daños estructurales en los tabiques. Si las fugas son suficientemente importantes pueden llegar a reducir el caudal que circula a través de un paso de manera notoria y, por consiguiente, afectar a su normal funcionamiento hidráulico y al ascenso de los peces. De igual manera, si los tabiques están dañados o desplazados, también pueden comprometer la correcta funcionalidad del dispositivo y perjudicar a la ictiofauna.

2.3.4. Lecho naturalizado con piedras

Además de proporcionar un aspecto más natural y previsiblemente más apetecible al de una estructura antrópica de hormigón, la fijación de piedras en el fondo aumenta la rugosidad y genera variaciones en el flujo (diferentes velocidades) que resultan favorables para los peces con diferentes capacidades natatorias, a la vez que ofrecen lugares que les permiten descansar cómodamente (DVWK 2002; Larinier 2002b; Baudoin *et al.* 2014; Sanz-Ronda *et al.* 2014).



Figura 83. Lecho sin naturalizar (izquierda) y naturalizado mediante la fijación de piedras (derecha).

2.3.5. Oscuridad por elementos que cubren la escala

Afecta a la reticencia de la ictiofauna para introducirse y ascender a través de la estructura. Múltiples especies piscícolas son reacias a atravesar por zonas en oscuridad o rehúyen los cambios bruscos de iluminación (DVWK 2002; Armstrong *et al.* 2004; Baudoin *et al.* 2014).



Figura 84. Ejemplos de pasos piscícolas que se encuentran parcialmente oscurecidos por elementos instalados sobre ellas o una altura excesiva de los cajeros.

2.3.6. Resguardo en los estanques

Al pasar de un estanque al siguiente, los peces nadan o saltan (también suelen hacerlo en vertidos sumergidos). La eficiencia del salto depende de la anchura del vertedero y de la dirección que tome el pez. Muchos saltos no tienen éxito y el pez se golpea con el tabique o cae al exterior del paso (Sanz-Ronda *et al.*, 2015). Por ello, interesa un resguardo mínimo del cajero lateral de 40 cm para evitar que los peces salgan al exterior o el empleo de protecciones especiales.



Figura 85. Escalas con diferentes tipos de resguardos laterales: demasiado reducidos (izquierda), inicialmente insuficientes, aunque solucionado mediante la posterior colocación de vallas (centro) y suficientemente grandes (derecha).

2.4. Salida

2.4.1. Compuerta de regulación de caudales

Permiten controlar el caudal que circula por el interior de la escala asegurando que se encuentra dentro del rango de diseño considerado independientemente del caudal que circule por el curso de agua en que se emplaza. Esto posibilita que la obra funcione de manera adecuada para el tránsito de las especies objetivo bajo diferentes regímenes de caudales de un río a lo largo del año (Clay 1995; Larinier 1998; DVWK 2002; Baudoin *et al.* 2014).



Figura 86. Diferentes compuertas para regular la entrada de agua en una escala.

2.4.2. Dispositivo contra la entrada de arrastres

Impide o dificulta la introducción dentro del paso de restos arrastrados por la corriente tales como hojarasca, basura, troncos, etc. Lo cual, se recomienda para ayudar a mantener limpio el interior de la escala, favoreciendo así a su correcto funcionamiento hidráulico (Larinier 2002a; Armstrong *et al.* 2004; Towler *et al.* 2013; Sanz-Ronda *et al.* 2014).



Figura 87. Ejemplos de diferentes elementos contra la entrada de elementos arrastrados por la corriente dentro de una escala.

2.4.3. Salida segura

Ayudan a que una vez que los peces salen de la escala puedan adaptarse a las condiciones del flujo del río antes de ser arrastrados por la corriente por el aliviadero, tomas, etc. Por ello, diversos autores recomiendan la existencia de una distancia de

seguridad que evite estos arrastres (Clay 1995; Elvira *et al.* 1998). En concreto, Sanz-Ronda *et al.* (2014) hablan de una distancia mínima entre la salida y la coronación del obstáculo en 2,00 m; a la vez que DVWK (2002) recomiendan más de 5,00 m entre la salida y tomas de turbinas o rejas de desbaste. En caso de que una escala no cumpla estas distancias mínimas se pueden emplear este tipo de barreras.

A.3. Ecuaciones de gasto a través de una escala

Las ecuaciones para el cálculo del gasto a través de los diferentes elementos de paso de una escala para peces (Poleni 1717 en Fuentes-Pérez *et al.* 2016; Villemonte 1974 en Fuentes-Pérez *et al.* 2014; Clay 1995; Martínez de Azagra 1999; Larinier 2002b; Wang *et al.* 2010) son las siguientes:

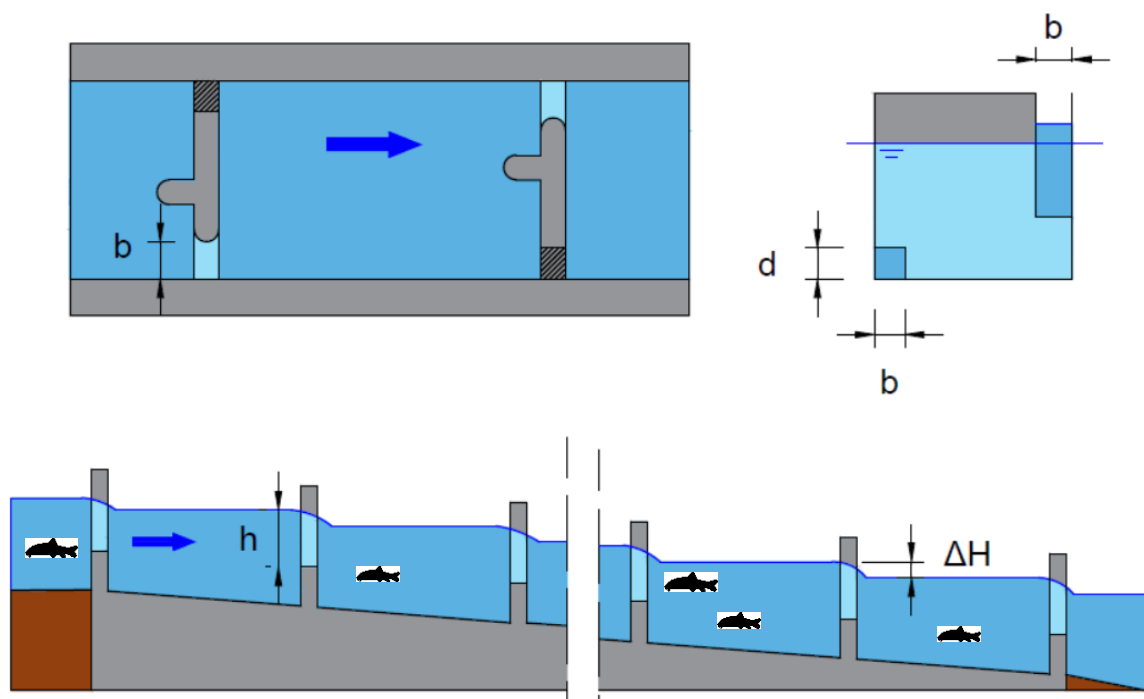


Figura 88. Variables hidráulicas relacionadas con las ecuaciones de gasto: b es la anchura del elemento que conecta dos estanques, d es la altura de un orificio de fondo, h es la carga de vertido sobre un vertedero/hendidura e ΔH es el desnivel entre láminas de agua de estanques sucesivos.

- Caudal a través de un orificio:

$$Q_o = C_{do} \cdot \text{Área} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta H} \quad (\text{Ec. 13})$$

donde Q_o es el caudal que circula a través de un orificio (m^3/s), C_{do} es el coeficiente de descarga del orificio y Área es su área (m^2):

$$C_{do} = 0,876 \quad (\text{Ec. 14})$$

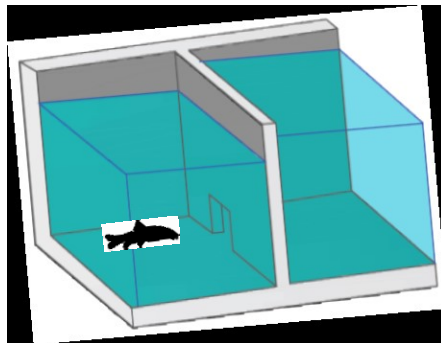


Figura 89. Orificio de fondo.

- Caudal a través de una hendidura vertical:

$$Q_h = \frac{2}{3} \cdot C_{dh} \cdot b \cdot h^{1,5} \cdot \sqrt{2 \cdot g} \quad (\text{Ec. 15})$$

donde Q_h es el caudal que circula a través de una hendidura vertical (m^3/s), $\frac{2}{3} \cdot C_{dh}$ es el coeficiente de descarga de la hendidura, que se calcula como (Fuentes-Pérez *et al.* 2016):

$$C_{dh} = 0,72 \cdot \left[1 - \left(\frac{(h - \Delta H)}{h} \right)^{1,5} \right]^{0,33} \quad (\text{Ec. 16})$$

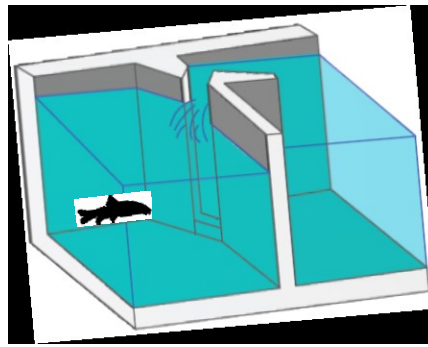


Figura 90. Hendidura vertical.

- Caudal a través de un vertedero libre:

$$Q_{ns} = \frac{2}{3} \cdot C_{dv} \cdot b \cdot h^{1,5} \cdot \sqrt{2 \cdot g} \quad (\text{Ec. 17})$$

donde Q_{ns} es el caudal que circula a través de un vertedero libre (m^3/s), $\frac{2}{3} C_{dv}$ es el coeficiente de descarga de un vertedero rectangular y se determina mediante la expresión (Fuentes-Pérez *et al.* 2016):

$$C_{dv} = 0,689 \cdot [1 - e^{-8,889 \cdot h}] \quad (\text{Ec. 18})$$

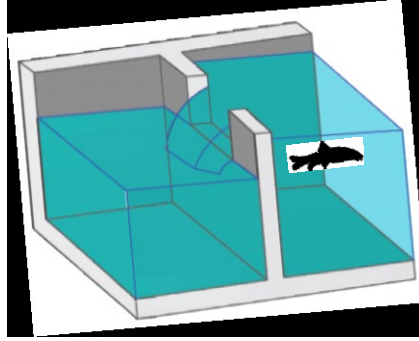


Figura 91. Vertedero libre.

- Caudal a través de un vertido sumergido:

$$Q_s = \frac{2}{3} \cdot C_{dv} \cdot C_s \cdot b \cdot h^{1,5} \cdot \sqrt{2 \cdot g} \quad (\text{Ec. 19})$$

donde Q_s es el caudal que circula a través de un vertedero sumergido (m^3/s), $\frac{2}{3} C_{dv}$ es el coeficiente de descarga de un vertedero rectangular en vertido libre y C_s es el coeficiente de sumergencia para vertederos sumergidos (Fuentes-Pérez *et al.* 2016):

$$C_{dv} = 0,689 \cdot [1 - e^{-8,889 \cdot h}] \quad (\text{Ec. 20})$$

$$C_s = \left[1 - \left(\frac{h - \Delta H}{h} \right)^{1,5} \right]^{0,331} \quad (\text{Ec. 21})$$

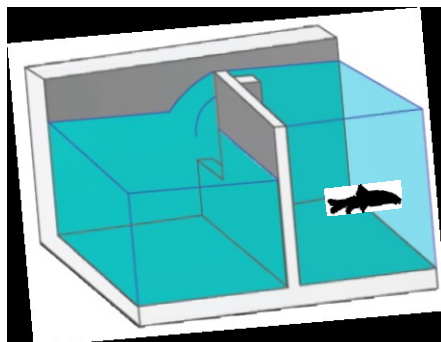


Figura 92. Vertedero sumergido.

A.4. Evaluación de los riesgos de los trabajos

1. Alcance de trabajos

Toma de cotas, dimensiones y parámetros hidráulicos en una escala de peces mediante cintas métricas y/o estación total y velocímetro.

2. Fases de los trabajos

2.1. Fase preliminar

Visualización del entorno y preparación del equipo

2.2. Levantamiento topográfico de la escala de peces

Medición con cinta métrica o estación total de la misma sin agua y con agua (láminas de agua), con caudal circulando. Un operario se ubica en la estación y otro está con el jalón dentro de la escala vacía (o con el metro y toma datos directamente). Cuando circula agua, el operario recorre la escala por el exterior, tomando datos del nivel exterior de agua.

2.3. Aforo de caudales

1.1.1. Mediante medida topográfica

Se mide el caudal indirectamente, a partir de los datos del levantamiento topográfico, aplicando fórmulas de gasto hidráulico.

1.1.2. Mediante velocímetro

Se mide la velocidad del agua en el vertedero desde el exterior, con un velocímetro de hélice.

3. Evaluación de Riesgos

Se procede a realizar la evaluación de riesgos y adopción de las medidas preventivas de los trabajos, según la tabla del Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT) (Tabla 32).

Tabla 32. Niveles de riesgo de acuerdo a su probabilidad estimada y a sus consecuencias esperadas.

Tabla de riesgos del INSHT		Consecuencias (*)		
		Ligeramente dañino	Dañino	Extremadamente dañino
Probabilidad	Baja	Riesgo trivial	Riesgo tolerable	Riesgo moderado
	Media	Riesgo tolerable	Riesgo moderado	Riesgo importante
	Alta	Riesgo moderado	Riesgo importante	Riesgo intolerable

Se deberá evaluar cada uno de estos riesgos según la probabilidad y las consecuencias, similar a esto de los posibles riesgos existentes similar a los del cuadro siguiente:

Tabla 33. Estimación de la probabilidad, severidad y grado de los posibles riesgos de los trabajos de evaluación.

Riesgo	Probabilidad	Severidad	Grado de riesgo
Caídas de personas a distinto nivel	Media	Dañino	Moderado
Caídas de personas al mismo nivel	Media	Ligeramente dañino	Tolerable
Caídas por objetos desprendidos	Baja	Dañino	Moderado
Golpes o cortes con objetos o herramientas	Baja	Dañino	Moderado
Caída en masa de agua de profundidad < 1.3 m	Media	Dañino	Moderado
Exposición o inhalación de agentes nocivos (químicos, biológicos, etc.)	Baja	Dañino	Moderado

Los riesgos en cada una de las fases indicadas y sus medidas preventivas para eliminar o minimizar son:

3.1. Fase preliminar

Riesgos:

- Indeterminados debidos a la zona de trabajos

Medidas preventivas:

- Antes de iniciar los trabajos se analizará la ubicación de los equipos y personal evitando los posibles riesgos existentes, cercanía a cauce, huecos y o lugares con caídas a distinto nivel, etc...
- Utilizar los equipos de protección individual necesarios a los riesgos existentes en la instalación y/o ubicación, entre ellos como norma general se utilizará chaleco salvavidas, casco de seguridad con barboquejo y calzado apropiado.



Figura 93. Medidas preventivas en la fase preliminar de los trabajos.

3.2. Levantamiento topográfico de la escala de peces

Riesgos:

- Caídas al mismo nivel.
- Caídas a distinto nivel.
- Caídas por objetos desprendidos.
- Golpes y/o cortes contra objetos.

Medidas preventivas:

- Con anterioridad a acceder al interior de la escala, se deberá solicitar al titular de la instalación el cierre completo de la entrada de agua, debiendo esperar el tiempo suficiente para la evacuación completa de agua en el interior de la misma.
- Utilizar calzado de seguridad antideslizante.
- Evitar acopiar materiales o equipos en las proximidades de la zona de trabajo.
- El acceso al interior de la escala de peces, se realizará por las artesas más bajas, (altura estimada 1,75 m de altura).
- El acceso a la escala de peces, se realizará mediante escalera manual, siguiendo todas las medidas preventivas con este tipo de equipos.
 - Antes de utilizar una escalera de mano deberá asegurarse su estabilidad. La base de la escalera deberá quedar sólidamente asentada. Se fijará convenientemente para evitar deslizamientos de la

misma, a causa de la posibilidad de existir verdín en la superficie de apoyo. Deberá contar con zapatas antideslizantes.

- Colocación de la escalera a 75 ° de la horizontal.
 - Cuando se utilicen para acceder a lugares elevados deberán prolongarse al menos 1,00 m por encima de éstos.
 - El ascenso, descenso y los trabajos desde escaleras se efectuarán de frente a las mismas.
 - Se prohíbe el transporte y manipulación de cargas por o desde escaleras de mano cuando su peso o dimensiones puedan comprometer la seguridad del trabajador.
 - Las escaleras de mano no se utilizarán por dos o más personas simultáneamente.
- Procurar mantener el mínimo tiempo posible los huecos debidos a la retirada provisional de los tramex, limitando el acceso de personal a dicha zona. Se protegerán o señalizarán convenientemente los huecos.
 - Se utilizarán permanentemente los equipos de protección individual, chaleco salvavidas, casco de seguridad con barboquejo y calzado apropiado.



Figura 94. Algunas de las medidas preventivas durante el levantamiento topográfico.

3.3. Aforo de caudales

Riesgos:

- Caídas al mismo nivel.
- Caídas a distinto nivel.
- Golpes y/o cortes contra objetos.

Medidas preventivas:

- Utilizar calzado de seguridad antideslizante.
- Evitar acopiar materiales o equipos en las proximidades de la zona de trabajo.
- Procurar mantener el mínimo tiempo posible los huecos debidos a la retirada provisional de los tramex, limitando el acceso de personal a dicha zona. Se protegerán o señalizarán convenientemente los huecos.
- La medición del caudal mediante velocímetro, se realizará desde un lugar seguro, para lo que se utilizará el jalón o pértiga.
- Se utilizarán permanentemente los equipos de protección individual, chaleco salvavidas, casco de seguridad con barboquejo, calzado antideslizante.



Figura 95. Algunas de las medidas preventivas para la realización de aforos.

A.5. Estadillo para la recogida de datos en campo

En este apartado se presenta un estadillo para la recogida en campo de los datos necesarios para la evaluación de una escala para peces de estanques sucesivos y para la utilización de la aplicación informática asociada a este documento que agiliza dicha evaluación:



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE AGRICULTURA Y PESCA,
ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE

CONFEDERACIÓN
HIDROGRÁFICA
DEL DUERO



GEA



itagra.ct

centro tecnológico agrario y agroalimentario

ESTADILLO PARA LA RECOGIDA EN CAMPO DE LA INFORMACIÓN NECESARIA PARA LA EVALUACIÓN DE PASOS PARA PECES DE ESTANQUES SUCESIVOS

ANOTACIONES			
Número de estanques tipo		Número de estanques totales	

ATRACCIÓN			
Nomenclatura		Parámetro	Valor medido
Variables fundamentales	Q _{atracción}	Caudal auxiliar de llamada (m³/s)	
		Caudal circulante por la escala (m³/s)	
		Caudal medio en la época de migración (m³/s)	
	U _E	Ubicación próxima a una orilla	
		Emplazamiento lo más aguas arriba	
		Colocación junto a la base del obstáculo	
		Localización donde se concentre un mayor caudal	
		Observaciones de relevancia	
Accesibilidad			

ENTRADA			
Nomenclatura		Parámetro	Valor medido
Variables fundamentales	ΔH_E	Desnivel entre la lámina de agua en el río y en el estanque inferior (m)	
	h	Carga de vertido en la entrada (m)	
	h_E	Profundidad en la entrada (m)	
	b_E	Anchura de la entrada (m)	
	Área_E	Área del orificio de entrada (m^2)	
	$h_{previa\ E}$	Profundidad previa a la entrada (m)	
	Ort_E	Orientación de la entrada respecto del río ($^\circ$)	
	T_E	Tipología de la entrada	
Observaciones de relevancia		Mantenimiento y limpieza	
		Accesibilidad	
		Aristas redondeadas	
		Elementos para la regulación del salto entre láminas de agua	
		Descargas de flujo en la entrada	
		Ausencia de otras descargas de flujo que alejen el pez de la escala	



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE AGRICULTURA Y PESCA,
ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE

CONFEDERACIÓN
HIDROGRÁFICA
DEL DUERO



Grupo de Ec hidr áulica Aplicada



itagra.ct

centro tecnológico agrario y agroalimentario

PASAJE			E _{tipo}	E _{i1}	E _{i2}	E _{i3}
Nomenclatura	Parámetro		Valor medido			
Variables fundamentales	ΔH_{Ps}	Desnivel entre láminas de agua de estanques sucesivos (m)				
	B	Anchura del estanque (m)				
	L	Longitud del estanque (m)				
	p	Altura umbral del elemento de paso entre estanques (m)				
	h	Carga de vertido sobre el elemento de paso (m)				
	h_{Ps}	Profundidad de paso entre estanques (m)				
	b_{Ps}	Anchura de paso entre estanques (m)				
	Área_{Ps}	Área del orificio entre estanques (m ²)				
	T_{Ps}	Tipología de paso entre estanques				
Observaciones de relevancia		Mantenimiento y limpieza				
		Accesibilidad				
		Aristas redondeadas				
		Forma de los estanques				
		Deflectores en los estanques				
		Conservación de la estructura				
		Lecho naturalizado con piedras				
		Oscuridad por elementos que cubren la escala				
		Resguardo en los estanques				

NOTA: “E_{tipo}” es el estanque tipo de la escala; “E_{i1}”, “E_{i2}” y “E_{i3}” son el primer, segundo y tercer estanque singular respectivamente.

SALIDA			
Nomenclatura	Parámetro		Valor medido
Variables fundamentales	ΔH_s	Desnivel entre la lámina de agua en el río y en el estanque superior (m)	
	h	Carga de vertido en la salida (m)	
	h_s	Profundidad en la salida (m)	
	b_s	Anchura de la salida (m)	
	Área_s	Área del orificio de salida (m ²)	
	$h_{\text{posterior } S}$	Profundidad posterior al vertedero de salida (m)	
	Ort_s	Orientación de la salida respecto del río (°)	
	T_s	Tipología de la salida	
Observaciones de relevancia		Mantenimiento y limpieza	
		Accesibilidad	
		Aristas redondeadas	
		Compuerta de regulación de caudales	
		Dispositivo contra la entrada de arrastres	
		Salida segura	



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE AGRICULTURA Y PESCA,
ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE

CONFEDERACIÓN
HIDROGRÁFICA
DEL DUERO



GEA



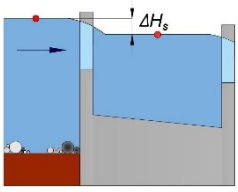
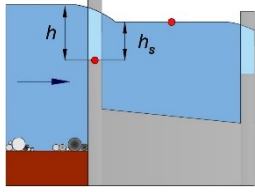
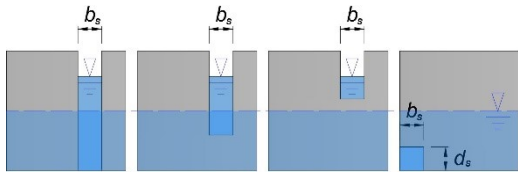
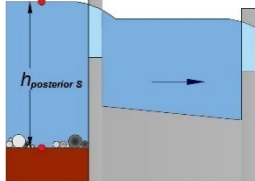
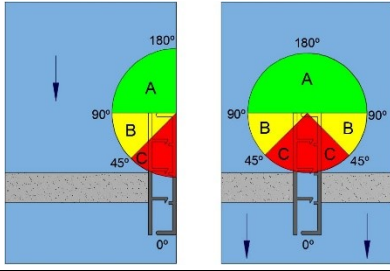
itagra.ct
centro tecnológico agrario y agroalimentario

ENTRADA

Variable	Croquis explicativo	Variable	Croquis explicativo
ΔH_E		h_E	
b_E y Área_E ($b_E \times d_E$)		$h_{\text{previa } E}$	
Ort_E		T_E	

PASAJE

Variable	Croquis explicativo	Variable	Croquis explicativo
ΔH_{Ps}		$B, L \text{ y } b$	
$t_{med}, p,$ $h_{Ps}, p',$ $h_{Ps}' \text{ y } \Delta H_{Ps}'$		h_{Ps}	
b_{Ps} y Área_{Ps} ($b_{Ps} \times d_{Ps}$)		T_{Ps}	

SALIDA			
Variable	Croquis explicativo	Variable	Croquis explicativo
ΔH_s		h_s	
b_s y Áreas ($b_s \times d_s$)		$h_{posterior S}$	
$Orts$		T_s	