

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

ANEJO 12 PROGRAMA DE MEDIDAS

APÉNDICE VI. MANUAL DE DISEÑO Y CÁLCULO DE RAMPAS CON FLUJO ASCENDENTE

MAYO 2021

Confederación Hidrográfica del Duero O.A.



MANUAL DE **DISEÑO** **Y CÁLCULO** DE RAMPAS CON FLUJO ASCENDENTE

José Anastasio Fernández Yuste
Carolina Martínez Santa-María



LIFE 13 NAT/ES/000772
Este proyecto está financiado por el
programa LIFE de la Unión Europea



ACTUACIONES PARA LA
PROTECCIÓN Y CONSERVACIÓN
DE CIRÍNIDOS IBÉRICOS
DE INTERÉS COMUNITARIO

MANUAL DE **DISEÑO** **Y CÁLCULO** DE RAMPAS CON FLUJO ASCENDENTE



José Anastasio Fernández Yuste & Carolina Martínez Santa-María
E.T.S. Ingeniería de Montes, Forestal y del Medio Natural
Universidad Politécnica de Madrid



VICEPRESIDENCIA
CUARTA DEL GOBIERNO
GOBIERNO
DE ESPAÑA
MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO

CONFEDERACIÓN
HIDROGRÁFICA
DEL DUERO, C.A.



POLITÉCNICA

UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE MADRID

Proyecto CIPRIBER:

MANUAL DE DISEÑO DE RAMPAS CON FLUJO ASCENDENTE

Lengua/s: Español

Catálogo de publicaciones oficiales: <http://www.060.es>

NIPO: 641-19-001 -X

DL VA 807-2020

EDITA: © CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL DUERO - 2019

www.chduero.es

1ª EDICIÓN, OCTUBRE 2019

DIRECCIÓN Y COORDINACIÓN: Carlos Marcos Primo, CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL DUERO.

AUTORES: José Anastasio Fernández Yuste y Carolina Martínez Santa-María

E.T.S. INGENIERÍA DE MONTES, FORESTAL Y DEL MEDIO NATURAL

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

COLABORADORES: Gustavo González, ICTHIOS GESTIÓN AMBIENTAL S.L.

IMÁGENES: © PROYECTO CIPRIBER, Carlos Rodríguez, PRODUCCIONES BICHO.

Departamento de Ingeniería y Gestión Forestal y Ambiental, UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID.

DISEÑO Y MAQUETACIÓN: Carolina Gómez, www.estudioplanc.com

IMPRESIÓN: A&M Gráficas-Grupo Comunicación

Impreso en papel FSC

Sugerencia de cita: Fernández Yuste, J.A. y Martínez Santa-María, C. 2019. *Manual de diseño y cálculo de rampas con flujo ascendente*. Edita: Confederación Hidrográfica del Duero. Valladolid. p. 112



ACTUACIONES PARA LA
PROTECCIÓN Y CONSERVACIÓN
DE CIRINIDOS IBÉRICOS
DE INTERÉS COMUNITARIO
www.cipriber.eu

LIFE 13 NAT/ES/000772

Este proyecto está financiado por el
programa LIFE de la Unión Europea



VICEPRESIDENCIA
CUARTA DEL GOBIERNO
GOBIERNO
DE ESPAÑA
MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO

CONFEDERACIÓN
HIDROGRÁFICA
DEL DUERO, C.A.



VICEPRESIDENCIA
CUARTA DEL GOBIERNO
GOBIERNO
DE ESPAÑA
MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO

CONFEDERACIÓN
HIDROGRÁFICA
DEL DUERO, C.A.



PRESENTACIÓN

La continuidad fluvial es la capacidad que tiene un río de transportar agua, sedimentos y biota. Se mide a lo largo de su ejes longitudinal y lateral, éste en relación con las zonas inundables, y ha pasado de ser un aspecto marginal, a un primer plano de la administración pública del agua. La Directiva Marco ha jugado, como en tantas otras cuestiones, un papel esencial ya que nos dice a los organismos responsables de los Estados miembros que debemos incluir entre nuestras preocupaciones y en nuestro quehacer diario medidas de planificación, actuación, control, seguimiento y mejora de la continuidad fluvial de los ríos.

En el ámbito de la mejora de la continuidad longitudinal, la Confederación Hidrográfica del Duero ha sido pionera, habiendo llevado a cabo hasta la fecha numerosas actuaciones de demolición de obstáculos transversales fuera de uso, así como promoviendo entre los titulares de aprovechamientos en uso que interceptan los ríos, todo tipo de medidas para atenuar sus efectos negativos. Entre dichas medidas, destacan las encaminadas a permitir el paso de la ictiofauna lo que coloquialmente se conoce como “pasos para peces”.

*El modelo más extendido y tradicional es el de las escalas de peces de estanques sucesivos. Se trata de estructuras de hormigón, adosadas al cuerpo de la presa que se pretende hacer franqueable, y que comportan numerosos problemas de diseño y explotación. La mejor de las escalas de peces, con el mejor diseño y la ejecución más minuciosa, requiere de una explotación y atención permanentes. Y aun así, la efectividad es siempre parcial. Para conocer y mejorar el funcionamiento de este tipo de dispositivos de paso, la Confederación Hidrográfica del Duero, fruto de un convenio de colaboración con el Grupo de Ecohidráulica de la Universidad de Valladolid (Campus de Palencia), elaboró un **“Manual para la evaluación de la funcionalidad de pasos para peces de estanques sucesivos. Metodología AEPS (1.0)”**.*

*La experiencia desarrollada a lo largo de más de 10 años, nos indica que los pasos de peces tipo “rampa” son los más eficaces y los que mejor se integran. Como consecuencia de los trabajos llevados a cabo en numerosos proyectos de restauración fluvial, hemos adquirido unos conocimientos que deseamos compartir. El **“Manual de diseño de rampas con flujo ascendente”** que aquí se presenta, de gran solidez en su planteamiento gracias a su fuerte base empírica, sigue la estela de los trabajos anteriores, y trata de explicar el funcionamiento y ayudar a diseñar y construir este tipo de dispositivos de paso para peces. Este manual es fruto de la colaboración de la empresa ICTHIOS, y del Departamento de Ingeniería y Gestión Forestal y Ambiental de la Universidad Politécnica de Madrid, quienes han pateado y medido unos cuantos ríos y rampas para obtener un conocimiento del más alto nivel que aquí comparten con todos nosotros.*

Ignacio Rodríguez Muñoz

Comisario de Aguas de la Confederación Hidrográfica del Duero

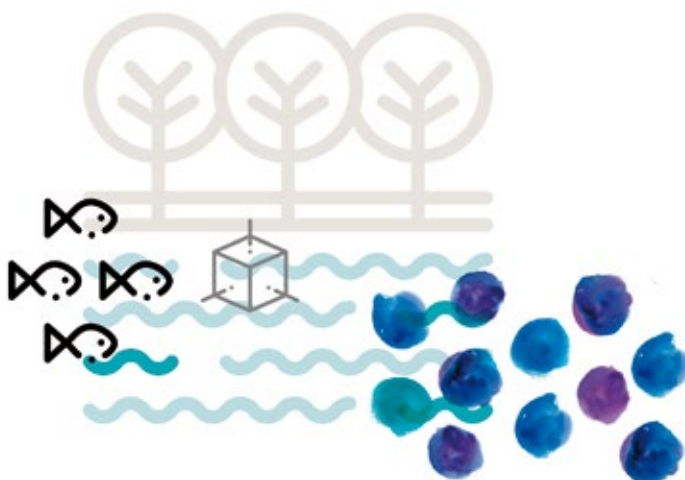
AGRADECIMIENTOS

Nuestros nombres -Carolina y Tasio- aparecen como autores de este Manual, y siendo cierto, lo hemos escrito, no es la verdad completa.

Y es incompleta porque para que este Manual se haya hecho realidad, han hecho falta, mucha falta, la colaboración, el entusiasmo, la confianza, el estímulo, el conocimiento y la implicación de muchos.

Sin el estímulo y la confianza de Carlos Marcos -CH Duero-, sin el conocimiento de Gustavo González, Anna Pedescoll y Rafael Aguado -Icthos-, sin el fecundo y deslumbrante trabajo de Carlos Rodríguez -Producciones Bicho-, sin la implicación y entusiasmo de Luis Carlos Arias, Manuel Oliva -Tragsa-, Javier Carpio -Serbaikal- y David Martínez -Alida-, sin la colaboración de Lorenzo Aguilera, Montaña Cepa, Lidia Arenillas -CH Tajo-, no podríamos haber escrito ni una sola línea.

Gracias por ese bagaje fecundo e intangible que de vosotros nos llevamos, y que fructifica en este texto, con la esperanza de que sirva para mejorar el maltrecho estado de las poblaciones de nuestros peces.



índice general

1	INTRODUCCIÓN	11
2	FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO	17
3	TRÁNSITO DE LA ICTIOFAUNA	25
4	VARIABLES	31
4.1	Introducción	33
4.2	Variables en planta	33
4.3	Variables del perfil longitudinal entre dos hiladas	39
4.4	Variables del perfil longitudinal del total de la rampa	42
4.5	Otras variables de diseño	44
5	DIMENSIONADO	47
5.1	Introducción	49
5.2	Escenarios de caudales a considerar	50
5.3	Protocolo de cálculo	55
5.3.1	FASE 1. DIMENSIONADO HIDRÁULICO	56
5.3.2	FASE 2. DIMENSIONADO GEOMÉTRICO	59
5.3.3	FASE 3. DIMENSIONADO PARA EL CONTROL DE LA POTENCIA DISIPADA	60
5.3.4	FASE 4. OBTENCIÓN DEL RANGO FUNCIONAL DE CAUDALES	63
5.3.5	FASE 5. EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO EN RÉGIMEN NO UNIFORME	67
5.3.6	DIMENSIONADO PARA VENTANA DE FLUJO CON UMBRAL DE FONDO O ZÓCALO	72
5.3.7	RESUMEN DEL DIMENSIONADO	77
5.3.8	DIAGRAMA DE FLUJO	79
6	REFERENCIAS	81
	ANEJO 1: VARIABLES Y ECUACIONES	85
	ANEJO 2: RAMPA DE “EL PARDO”	95

índice de figuras

Figura 1.	Representación esquemática de las dimensiones que definen la geometría de los bloques -naturales o artificiales- que se disponen en la rampa para generar las condiciones de flujo que propician su transitabilidad: altura vista (H_b), diámetro (D_b) y anchura (A_b).....	19
Figura 2.	Vista en planta de la disposición de los bolos de una hilada.....	19
Figura 3.	Izquierda: anchura de ventana geométrica (AvG) e hidráulica (AvH) en planta. Derecha: fotografía de la rampa de El Pardo donde se visualizan AvG , AvH y el desnivel en la lámina de agua entre dos estanques consecutivos (Δh)....	20
Figura 4.	Alzado del comportamiento del flujo en una hilada. Se observan las superficies libres aguas arriba y aguas abajo de la hilada y las variables: calado aguas arriba del bolo (h_1), calado aguas abajo del bolo (h_2), y desnivel de la lámina de agua entre dos estanques consecutivos (Δh).....	21
Figura 5.	Esquema simplificado del comportamiento del flujo a través de dos ventanas contiguas y entre dos hiladas consecutivas.....	21
Figura 6.	Imagen de la rampa de El Pardo donde se visualizan las zonas de velocidades altas y las zonas de reflujo.....	22
Figura 7.	Esquema de la zonificación del flujo en las rampas de flujo ascendente con indicación de los dos tipos de módulo considerados.....	23
Figura 8.	Fotografía de la rampa de El Pardo donde se visualizan los dos tipos de módulo.....	24
Figura 9.	Alzado de una hilada con indicación de la ventana sumergida y de las variables: anchura de la ventana geométrica (AvG) y desnivel de la superficie libre entre dos estanques consecutivos (Δh).....	25
Figura 10.	Recorrido del pez en su ascenso por las rampas de flujo ascendente.....	25
Figura 11.	Resultados de la monitorización de calados y velocidades de la rampa de El Pardo para un caudal de $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$	26
Figura 12.	Perfil longitudinal de la rampa con indicación de las variables definitorias de la altura del bolo (H_b).....	35
Figura 13.	Disposición de los bolos en planta con indicación del ángulo α y las proyecciones a y b de la anchura de la ventana geométrica (AvG).....	36
Figura 14.	Rampa de El Pardo, donde se visualizan las variables: número de hiladas (N_{hil}) y longitud del estanque (L_e).....	39



Figura 15.	Perfil longitudinal de la rampa entre dos hiladas, con indicación de las variables a considerar.....	40
Figura 16.	Sección longitudinal entre dos bolos consecutivos de una hilada con indicación de las variables a considerar.....	40
Figura 17.	Perfil longitudinal de la rampa con indicación de las variables más representativas.....	42
Figura 18.	Hilada para un módulo sin zócalo: planta (izquierda) y perfil longitudinal (derecha).....	45
Figura 19.	Hilada para un módulo con zócalo: planta (izquierda) y perfil longitudinal (derecha).....	45
Figura 20.	Perfil de lámina de agua cuando $Qd=Q_{RMIN}$	51
Figura 21.	Perfil de lámina de agua cuando $Qd=Q_R(y=0)$	51
Figura 22.	Perfil de lámina de agua cuando $Qd=Q_{RMAX}+Q_{9Z}(h_{9Z})$	52
Figura 23.	Perfiles de lámina de agua en régimen uniforme $[\Delta h(U)=\Delta Z]$, y no uniforme con remanso tipo M2 $[\Delta h(M2)>\Delta Z]$, y remanso tipo M1 $[\Delta h(M1)<\Delta Z]$,.....	68
Figura 24.	Para régimen no uniforme con Q_{RMAX} y $h_{2,n}^{no U}(Q_{RMAX}) = h_2^U Q(y=0) = 0.35m$, evolución de valores de Δh a lo largo de la rampa.....	71
Figura 25.	Para régimen no uniforme con Q_{RMAX} y $h_{2,n}^{no U}(Q_{RMAX}) = 0.8 * h_2^U(Q_{RMAX}) = 0.4m$, evolución de valores de Δh a lo largo de la rampa.....	72
Figura 26.	Vista en planta y alzado lateral de módulo con zócalo entre bolos.....	72
Figura 27.	Para régimen no uniforme, dos módulos con zócalo, Q_{RMAX} y $h_{2,n}^{no U}(Q_{RMAX}) = h_2^U Q(y=0) = 0.3m$, evolución de valores de Δh a lo largo de la rampa.....	77
Figura 28.	Localización del azud de El Pardo: vista general del tramo del río Manzanares donde se ubica el azud (izquierda). Detalle de la ubicación (derecha).....	97
Figura 29.	Estado inicial del azud de El Pardo (derecha) y ubicación relativa de la balsa contra incendios y la caseta de bombeo (izquierda).....	98
Figura 30.	Situación actual con la rampa de peces y el rebaje del umbral del azud.....	99
Figura 31.	Imagen obtenida con un vuelo dron (2019) donde se observa el remanso aguas arriba del azud en la situación actual y las nuevas islas emergidas.....	99
Figura 32.	Imagen obtenida con un vuelo dron (2017) donde se observa la situación inicial del remanso.....	99
Figura 33.	Vista aérea de la obra ya finalizada (vuelo dron 2019).....	101

Figura 34.	Estanque de encuentro.....	106
Figura 35.	Hilada de control.....	107
Figura 36.	Vista aérea de la rampa y azud en la situación actual.....	107
Figura 37.	Vista del canal de derivación (izquierda) y de la compuerta de entrada (derecha).....	107
Figura 38.	Lecho naturalizado de la rampa.....	108
Figura 39.	Vista de la rampa con los muros laterales encachados.....	108
Figura 40.	Campaña de monitoreo para la estimación de calados y velocidades.....	108
Figura 41.	Construcción del acceso a la rampa en la margen derecha.....	109
Figura 42.	Demolición parcial del azud para vaciado del remanso y construcción de la ataguía.....	109
Figura 43.	Detalle de la construcción de la base de la rampa.....	109
Figura 44.	Colocación de los bolos en la rampa.....	109
Figura 45.	Comprobación de la disposición relativa de bolos en la hilada.....	110
Figura 46.	Hormigonado del lecho de la rampa.....	110
Figura 47.	Encachado del lecho de la rampa.....	110
Figura 48.	Puesta en funcionamiento de la rampa con el equipo técnico y de ejecución material (de izquierda a derecha, Javier Carpio, Manuel Oliva y Luis Carlos Arias).....	111
Figura 49.	Tareas previas a la construcción del estanque de encuentro.....	111
Figura 50.	Disposición de los elementos de la hilada de control.....	111
Figura 51.	Imagen de la rampa para el escenario Q_{RMIN}	112
Figura 52.	Imagen de la rampa para el escenario $(Q_{RMIN}-Q_R (y=0))$	112
Figura 53.	Imagen de la rampa para el escenario $Q > Q_R (y=0)$	112

índice de tablas

Tabla 1.	Referencias para la potencia disipada (P_d) máxima admisible.....	29
Tabla 2.	Referencias para el dimensionado de la anchura de ventana geométrica (AvG).....	36
Tabla 3.	Determinación de la anchura de la rampa en función del número de módulos.....	38
Tabla 4.	Variables a considerar en el perfil longitudinal de la rampa entre dos hiladas con indicación de su carácter.....	39
Tabla 5.	Trascendencia biológica y condicionado ambiental de Δh y h_2	40
Tabla 6.	Trascendencia y condicionado geométrico de Δh y $tg\beta$	41
Tabla 7.	Otras recomendaciones.....	41
Tabla 8.	Variables a considerar en el perfil longitudinal del total de la rampa con indicación de su carácter.....	43
Tabla 9.	Trascendencia hidráulica y recomendaciones para la altura del zócalo (p).....	46
Tabla 10.	Rango de caudales para cada uno de los escenarios considerados para el dimensionado de la rampa.....	54
Tabla 11.	Combinaciones de (h_2 ; Δh) que, con dos módulos y para $Q_{RMIN}=0.25\text{ m}^3/\text{s}$, ofrecen valores de $AvG \geq AvG_{min} \geq 0.2\text{ m}$	58
Tabla 12.	Combinaciones de (h_2 ; Δh) que, con un módulo y para $Q_{RMIN}=0.25\text{ m}^3/\text{s}$, ofrecen valores de $AvG \geq AvG_{min} \geq 0.2\text{ m}$	59
Tabla 13.	Para $Db=0.55\text{ m}$, longitudes del estanque (Le), de la rampa (L_R), volumen de módulo (V_m) y potencia disipada (P_d), para el rango de pendientes $0.03 \leq tg\beta \leq 0.07$	62
Tabla 14.	Para $Db=0.65\text{ m}$, longitudes del estanque (Le), de la rampa (L_R), volumen de módulo (V_m) y potencia disipada (P_d), para el rango de pendientes $0.03 \leq tg\beta \leq 0.07$	63
Tabla 15.	Para $Q_R(y=0)=0.355\text{ m}^3/\text{s}$, volumen de módulo (V_m) y potencia disipada (P_d), para el rango de pendientes $0.03 \leq tg\beta \leq 0.07$	64
Tabla 16.	Para $Q_{RMAX}=0.46\text{ m}^3/\text{s}$, volumen de módulo (V_m) y potencia disipada (P_d), para el rango de pendientes $0.03 \leq tg\beta \leq 0.07$	66
Tabla 17.	Rango de caudales para los que la rampa dimensionada es funcional.....	66

Tabla 18.	Para régimen no uniforme, con Q_{RMAX} y $h_{2,n}^{no U}(Q_{RMAX}) = h_2^U(Q(y=0)) = 0.35m$, se presentan, para cada hilada, los valores de los calados aguas abajo (h_2) y arriba (h_1) del bolo, Δh y la velocidad correspondiente.....	71
Tabla 19.	Para régimen no uniforme, Q_{RMAX} y $h_{2,n}^{no U}(Q_{RMAX}) = 0.8 * h_2^U(Q_{RMAX}) = 0.4m$ se presentan, para cada hilada, los valores de los calados aguas abajo (h_2) y arriba (h_1) del bolo, Δh y la velocidad correspondiente. En rojo los valores de $V_{max,n}$ que no cumplen con el condicionado establecido para la especie objetivo.....	71
Tabla 20.	Combinaciones de (h_2 ; Δh) que, con dos módulos, zócalo de 0.1m y para $Q_{RMIN}=0.25m^3/s$, ofrecen valores de $AvG \geq AvG_{min} \geq 0.2m$	73
Tabla 21.	Para $Db=0.55m$, longitudes del estanque (L_e), de rampa (L_R), volumen de módulo (V_m) y potencia disipada (P_d), para el rango de pendientes $0.04 \leq tg\beta \leq 0.08$	74
Tabla 22.	Para $Q_R(y=0)=0.357 m^3/s$, volumen de módulo (V_m) y potencia disipada (P_d), para el rango de pendientes $0.04 \leq tg\beta \leq 0.08$	75
Tabla 23.	Para $Q_{RMAX}=0.53 m^3/s$, volumen de módulo (V_m) y potencia disipada (P_d), para el rango de pendientes $0.04 \leq tg\beta \leq 0.08$	76
Tabla 24.	Para régimen no uniforme, dos módulos con zócalo, Q_{RMAX} y $h_{2,n}^{no U}(Q_{RMAX}) = h_2^U(Q_R(y=0)) = 0.3m$, se presentan, para cada hilada, los valores de los calados aguas abajo (h_2) y arriba (h_1) del bolo, Δh y la velocidad correspondiente.....	76
Tabla 25.	Valores de las variables obtenidos para $Q_{RMIN}=0.25m^3/s$ y las dos opciones consideradas en el dimensionado (1 módulo sin zócalo y 2 módulos con zócalo).....	78
Tabla 26.	Valores de los caudales que definen los distintos rangos de funcionalidad de la rampa para las dos opciones consideradas en el dimensionado (1 módulo sin zócalo y 2 módulos con zócalo).....	78
Tabla 27.	Caudales ecológicos mínimos trimestrales en m^3/s para el horizonte 2015 en la masa estratégica Río Manzanares desde Embalse de el Pardo hasta Arroyo de la Trofa (BOE nº 89 de 2014).....	100
Tabla 28.	Rango de caudales para los que la rampa dimensionada es funcional.....	104
Tabla 29.	Resultados correspondientes a la comprobación en régimen no uniforme.....	105
Tabla 30.	Resumen de variables de diseño.....	106



01



INTRODUCCIÓN





El problema_

Muchas de las especies de ictiofauna de los ríos realizan migraciones en algún momento de su ciclo biológico. El objetivo de estas migraciones es el acceso a determinados hábitats en busca de unas condiciones ambientales adecuadas (temperatura del agua, oxígeno disuelto, ...) y de un biotopo hidráulico idóneo (calado, velocidad y sustrato) que les asegure, -o les haga favorable-, la reproducción, la disponibilidad de alimento, el refugio, etc. (McIntyre *et al.*, 2015).

Las infraestructuras transversales que salpican las redes fluviales (presas, azudes, vados, enlosados, obras de drenaje transversal, ...), si no llevan asociadas un dispositivo de paso correctamente diseñado, pueden constituir verdaderas barreras infranqueables, o suponer retrasos importantes en estos movimientos a lo largo del eje fluvial. Consecuencia de ello es la alteración en la distribución y abundancia de especies y poblaciones en los ríos (Cooper *et al.*, 2017; Fuller, Doyle and Strayer, 2015).

La solución _

La tipología de dispositivos de paso existente actualmente para mitigar el efecto barrera es muy amplia (U.S. Fish and Wildlife Service, 2017) (Sanz-Ronda *et al.*, 2013) (Franklin *et al.*, 2018).

Como primera aproximación pueden distinguirse dos grupos principales: pasos asistidos y no asistidos, según se ayude o no al pez en el tránsito por el obstáculo.

Dentro del primer grupo se incluyen los ascensores, las esclusas y la captura y transporte. Al segundo grupo pertenecen las escalas (de ralentizadores y de artesas con sus múltiples variantes), los cauces artificiales naturalizados (rampas y by-pass principalmente) y otros dispositivos de uso más limitado como prebarreras o rampas angulares, entre otros.





Las rampas de rocas _

Las rampas de rocas o más comúnmente rampas, constituyen por su carácter naturalizado en mayor o menor medida, su versatilidad, y su alto grado de franqueabilidad por la ictiofauna, uno de los dispositivos de paso más recomendables actualmente para obstáculos de altura reducida. Consisten básicamente en un cauce con sustrato naturalizado y pendientes suaves, diseñado para mantener condiciones de profundidad y velocidad biológicamente adecuadas durante los caudales representativos del período de migración de la especie objetivo. Otros elementos de diseño aseguran la circulación de caudales mayores sin comprometer la estabilidad estructural de la misma.

Las condiciones de flujo en la rampa están condicionadas, además de por la pendiente, por la disposición y tamaño de los bolos que la conforman. Respecto a las disposiciones utilizadas, las más frecuentes son la ubicación de los bolos alineados longitudinalmente en hiladas transversales al flujo principal o la disposición de bolos dispersos, manteniendo unos patrones para las distancias relativas (FAO/DVWK, 2002).

En la mayoría de las rampas, el flujo se produce a través de los vertederos o de las escotaduras existentes entre cada dos bolos consecutivos. Las condiciones críticas de paso para la ictiofauna vendrán dadas por la velocidad en la ventana de vertido, el calado mínimo en el paso, el salto necesario en el caso de no haber paso sumergido y la potencia generada en el salto de agua y su disipación hasta umbrales aceptables.

Las rampas de flujo ascendente _

En las rampas de flujo ascendente presentadas en este Manual, se mantienen muchas de las características comunes al conjunto de rampas anteriormente citadas, pero se introduce como rasgo distintivo una disposición singular de los bolos en la hilada.

Esta nueva disposición genera un comportamiento hidráulico muy particular ya que se inducen flujos ascendentes de sentido contrario al flujo principal en la rampa.

La trascendencia biológica de estos nuevos flujos es incuestionable, pues ayudan al pez en su remonte, hasta tal punto que en muchas ocasiones el pez podría atravesar la rampa empujado por estos flujos y sólo puntalmente debería nadar para superar la ventana entre dos bolos.

El diseño presentado, y el protocolo de dimensionado, además de garantizar la generación de estos flujos ascendentes, asegura también velocidades adecuadas en los pasos, calados mínimos en los estanques y potencias a disipar, siempre dentro de niveles compatibles con las capacidades natatorias de nuestras especies. Además, contempla aspectos que permiten al proyectista dimensionar la rampa para un rango notable de caudales, garantizando para todo el rango su transitabilidad.

¿Qué encontrará el lector en este Manual? _

El objetivo es proporcionar un Manual preciso y claro en el que gestores y técnicos puedan basarse para dimensionar rampas de flujo ascendente.

El Manual ofrece una relación detallada de las variables implicadas, del proceso de cálculo y de las comprobaciones necesarias para asegurar un buen funcionamiento del dispositivo y para la determinación del rango de caudales operativo en la rampa.

El Manual considera también circunstancias especiales como (i)el requerimiento en cuanto a la cota de lámina de agua mínima para garantizar la derivación vinculada al azud o presa, (ii)la circulación del caudal ecológico, (iii)la efectividad del efecto llamada y (iv)el diseño del estanque de encuentro entre la rampa y el río, considerando la influencia que en el comportamiento hidráulico de la escala tienen las variaciones de calado aguas abajo de la rampa impuestas por el río.

Las rampas de flujo ascendente que se proponen en este manual son innovadoras; no obstante, el contenido de este Manual, se ha apoyado (i)en los fundamentos hidráulicos e hidrobiológicos disponibles en la literatura especializada (Baudoin *et al.*, 2015) (Santos *et al.*, 2012) (Baki *et*

al., 2017a) (Baki *et al.*, 2017b) (Muraoka, Nakanishi and Kayaba, 2017) (Tran *et al.*, 2016) (Cassan and Laurens, 2016) (Wang, 2008) (Mooney, Holmquist-Johnson and Broderick, 2007) (United States Department of Agriculture, 2007) (Bretón *et al.*, 2013), (ii) en las inquietudes, reflexiones y aportaciones transmitidas por el equipo de profesionales del proyecto CIPRIBER (<https://cipriber.eu/>), y (iii) en la experiencia acumulada en las fases de diseño, cálculo, construcción y seguimiento de la primera rampa de flujo ascendente construida recientemente en El Pardo, en el marco del proyecto “*Restauración ambiental del río Manzanares a su paso por el Real Sitio de El Pardo (Madrid)*” (<http://restauracionfluvialriomanzanares.es/>).

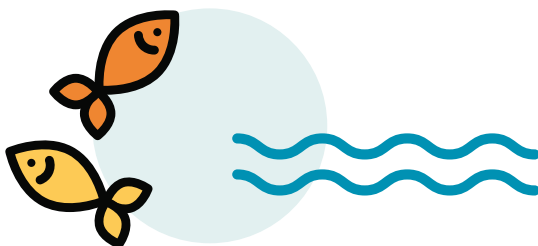
Por último, señalar que el usuario tiene a su disposición una aplicación que le ayudará a la hora de aplicar la secuencia de cálculo propuesta.

Sus limitaciones _

La diversidad de nuestra red fluvial, tanto en sus condicionantes de partida, bien de carácter natural (hidrología, topografía, biología, etc.), y de carácter antrópico (accesos, tipología del obstáculo, demandas existentes, cumplimientos ambientales, etc.) es de tal complejidad, que hacen imposible elaborar un Manual capaz de abarcar todos los condicionantes de diseño. Por tanto, las recomendaciones recogidas en esta guía deberán ser adaptadas a los condicionantes específicos de cada caso.

Es necesario señalar que la aplicación de este Manual no debería abordarse exclusivamente desde una óptica hidráulica, y tampoco desde un punto de vista meramente hidrobiológico. Los dos aspectos -hidráulicos e hidrobiológicos- son esenciales e imprescindibles para alcanzar el objetivo de un adecuado diseño de este tipo de rampas y, en general, de cualquier tipo de dispositivo de paso para peces (Valbuena Castro *et al.*, 2016).

Por último, indicar que un correcto diseño y cálculo de la rampa es importante, pero siéndolo, no es garantía de la funcionalidad del dispositivo. Junto con esa fase de diseño y cálculo es necesario considerar, por su relevancia, las etapas de construcción, mantenimiento y seguimiento (Pedescoll *et al.*, 2019) (Baudoin *et al.*, 2015) (O'Connor, Mallen-Cooper and Stuart, 2015) (Dodd, Cowx and Bolland, 2017) (BAW/BfG, 2015), etapas que escapan del alcance de este Manual y que el usuario necesariamente debe abordar con rigor para así poder ofrecer una solución eficaz a los problemas de transitabilidad de nuestra ictiofauna.





02

FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO





El componente más característico de este tipo de dispositivo de paso es el **bolo** (FIGURA 1), bloque natural o artificial, definido por sus tres dimensiones principales (D_b , A_b y H_b).

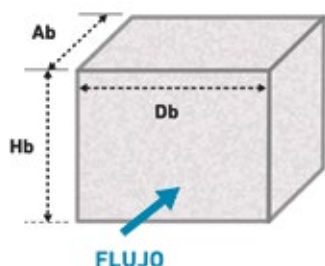


FIGURA 1

Representación esquemática de las dimensiones que definen la geometría de los bolos -naturales o artificiales- que se disponen en la rampa para generar las condiciones de flujo que propician su transitableidad: altura vista (H_b), diámetro (D_b) y anchura (A_b)

En posteriores capítulos de este Manual se darán las referencias oportunas para el correcto dimensionado de estas tres variables.

Los bolos se disponen formando hiladas, con la dimensión D_b transversal a la corriente. Aunque el eje principal de la hilada es transversal al flujo, en cada hilada la disposición de los bolos es contrapeada o en zig-zag, manteniendo un ángulo de desplazamiento (α) entre cada dos bolos consecutivos (FIGURA 2).

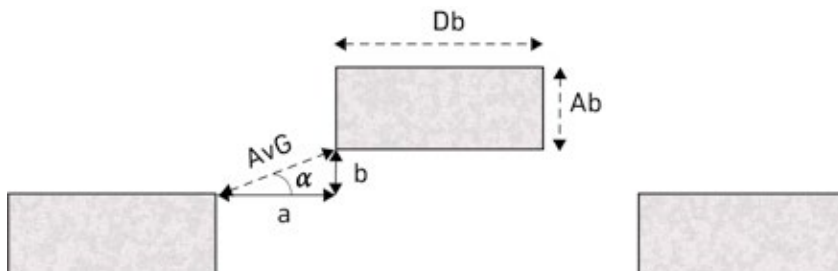


FIGURA 2

Vista en planta de la disposición de los bolos de una hilada (No se incluyen definiciones de las variables en los pies de las figuras para no sobrecargarlos. Se remite al lector al anejo 1 donde puede consultar la definición de todas las variables que aparecen en este Manual)

El ángulo α es una variable independiente, pero con un condicionamiento estricto, ya que debe verificarse: $30^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$

La separación entre bolos es la denominada “anchura de ventana geométrica” (AvG), con una proyección en la dirección del flujo (b) y otra en la dirección transversal (a) (FIGURA 2).

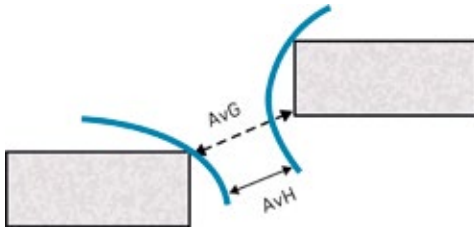


FIGURA 3

Izquierda: anchura de ventana geométrica (AvG) e hidráulica (AvH) en planta. Derecha: fotografía de la rampa de El Pardo donde se visualizan AvG , AvH y el desnivel en la lámina de agua entre dos estanques consecutivos (Δh).

Como consecuencia de la contracción de la vena líquida al pasar por la ventana, la anchura hidráulica o efectiva (AvH) es siempre menor que la anchura geométrica (AvG) (FIGURA 3). Esta reducción es función de la velocidad de vertido y por tanto de Δh (desnivel en la lámina de agua entre dos estanques consecutivos), pudiéndose establecer una relación entre ambas ventanas del modo:

$$Ec. 1 \quad AvH = AvG - C_c * \Delta h$$

siendo¹:

AvH = anchura de la ventana hidráulica

AvG = anchura de la ventana geométrica

Δh = desnivel en la lámina de agua entre dos estanques consecutivos

C_c = coeficiente de contracción de la vena líquida

El caudal que desagua la ventana se estima con la ecuación (Fuentes-Pérez *et al.*, 2017):

$$Ec. 2 \quad Qv = \frac{2}{3} * \sqrt{2g} * C_s * AvH * (h_1)^{1.5}$$

$$Ec. 3 \quad C_s = \beta_0 * \left[1 - \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^{1.5} \right]^{\beta_1}$$

siendo:

Qv = caudal circulante por la ventana de flujo

C_s = coeficiente de gasto en la ventana de flujo

¹ Todas las variables de este manual se miden en unidades del Sistema Internacional (SI)

AvH = anchura de la ventana hidráulica

h_1 =calado aguas arriba del bolo

h_2 =calado aguas abajo del bolo

β_0 = coeficiente de cálculo (0.812)

β_1 = coeficiente de cálculo (0.335)

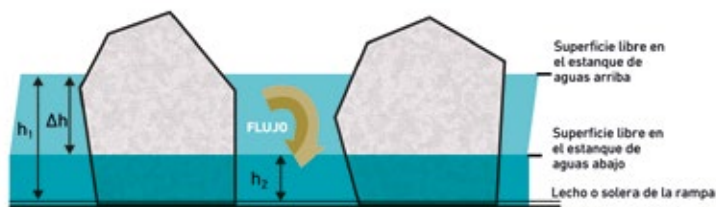


FIGURA 4

Alzado del comportamiento del flujo en una hilada. Se observan las superficies libres aguas arriba y aguas abajo de la hilada y las variables: calado aguas arriba del bolo (h_1), calado aguas abajo del bolo (h_2), y desnivel de la lámina de agua entre dos estanques consecutivos (Δh)

Sabiendo que el vertido se produce siempre perpendicular a la ventana de flujo, la disposición en zig-zag de los bolos en la hilada, origina que los flujos de vertido de dos ventanas contiguas “choquen” uno contra otro, frenándose mutuamente y disipando de manera natural la potencia del salto (FIGURA 5).

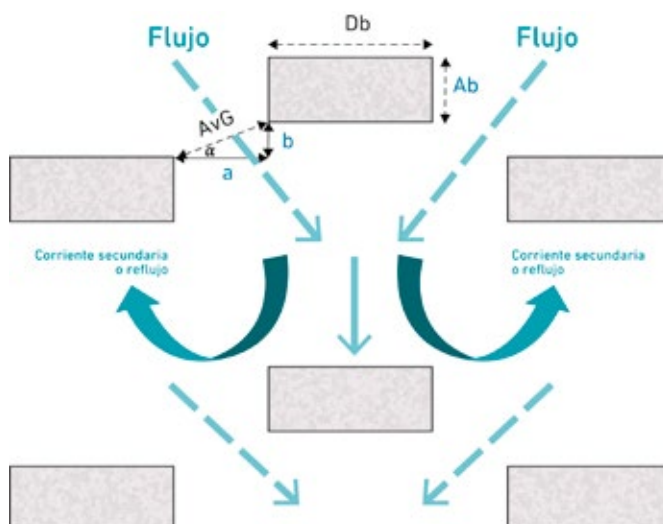


FIGURA 5

Esquema simplificado del comportamiento del flujo a través de dos ventanas contiguas y entre dos hiladas consecutivas

Este flujo ralentizado iniciaría su aceleración aguas abajo en la rampa, pero la cara plana del bolo de la hilada siguiente lo detiene de nuevo. Como consecuencia de todo este proceso, se generan corrientes secundarias ascendentes o “reflujo” (en sentido contrario al del flujo principal) que pueden visualizarse fácilmente en campo y donde se han constatado velocidades muy bajas, nulas e incluso negativas en muchas ocasiones (FIGURA 6). Esta circunstancia es la que permite denominar a este tipo de rampas como “rampas de flujo ascendente”.



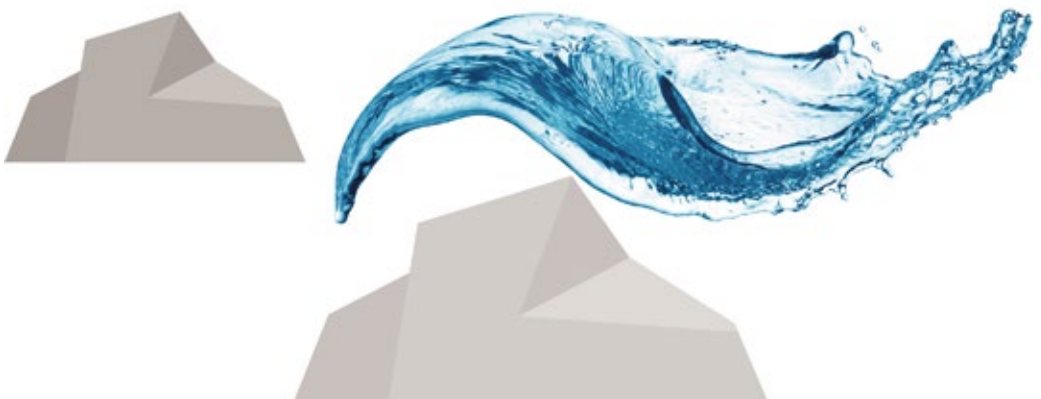
FIGURA 6

Imagen de la rampa de El Pardo donde se visualizan las zonas de velocidades altas y las zonas de reflujo.

La generación de estos flujos ascendentes está garantizada siempre que, en la hilada, los bolos se dispongan con el ángulo adecuado (α). De este modo, el flujo se compartimenta en la rampa, alternándose las zonas de flujo descendente con velocidades más altas, y las de flujo ascendente con velocidades bajas o reflujo. Esta compartimentación nos permite definir un elemento fundamental del diseño en este tipo de rampas: el “módulo”.

Un módulo es la unidad mínima necesaria para generar flujos ascendentes y está constituido por tres bolos consecutivos pertenecientes a una hilada y dispuestos adecuadamente.

La FIGURA 7 representa de modo esquemático el comportamiento del flujo en una rampa con tres módulos, en la que se generarían 4 zonas de reposo o flujo ascendente y tres zonas rápidas de flujo descendente.



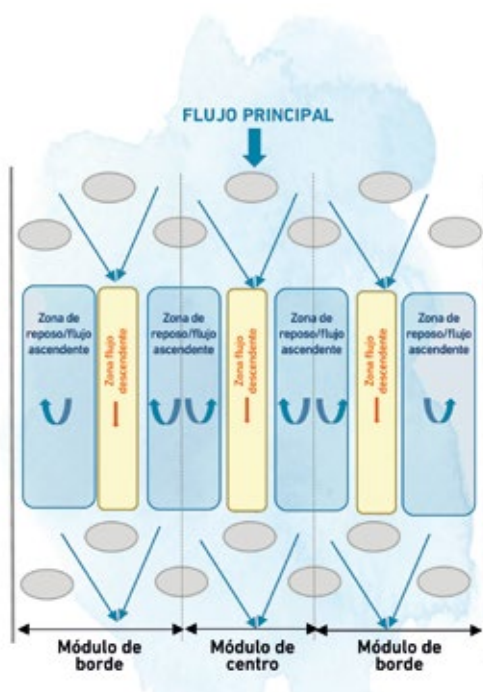


FIGURA 7

Esquema de la zonificación del flujo en las rampas de flujo ascendente con indicación de los dos tipos de módulo considerado.

A su vez, los módulos presentan dos tipologías: módulos de borde (que correspondería a los ubicados en los laterales de la rampa) y módulos de centro (los restantes) (FIGURA 8).

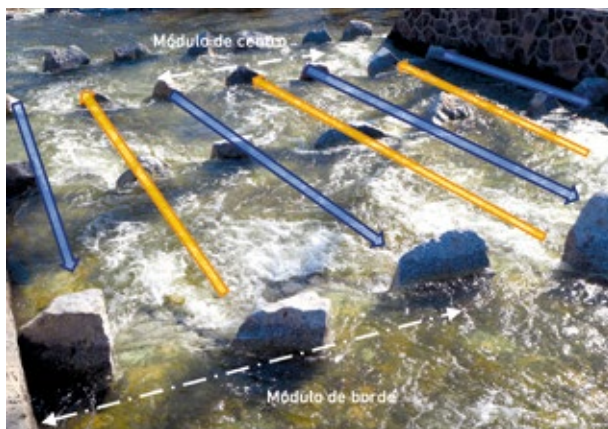


FIGURA 8

Fotografía de la rampa de El Pardo donde se visualizan los dos tipos de módulo





///

03

TRÁNSITO DE LA ICTIOFAUNA





El comportamiento descrito del flujo en este tipo de rampas, permite predecir el modo en que la ictiofauna puede realizar el tránsito con un mínimo gasto energético.

El desnivel existente entre dos estanques (Δh) no es necesario salvarlo mediante un salto, ya que el vertido es del tipo sumergido, generándose una “ventana sumergida” (FIGURA 9) que permite el paso al estanque superior sin necesidad de salto.

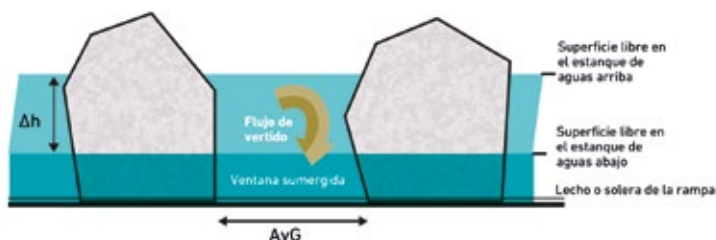


FIGURA 9

Alzado de una hilada con indicación de la ventana sumergida y de las variables: anchura de la ventana geométrica (AvG) y desnivel de la superficie libre entre dos estanques consecutivos (Δh).

También para asegurar la funcionalidad biológica de esta ventana, el valor de AvG -dado que determina la anchura de paso- debe estar sujeto a un condicionamiento ambiental, que garantice un tránsito cómodo para la ictiofauna. En epígrafes siguientes se especifican los valores recomendados para AvG . También son recomendables tamaños grandes en esta ventana para (i) reducir el riesgo de obstrucciones –que alterarían el comportamiento hidráulico anteriormente descrito- y (ii) minimizar las tareas de mantenimiento.

Respecto al tránsito de la ictiofauna por la rampa, la hipótesis que se plantea es la siguiente:



El pez utilizará las zonas de flujo ascendente para recorrer el estanque (zona azul en la FIGURA 10).

- Al abrigo del bolo encontrará una pequeña zona de descanso.
- Con un breve “sprint” atravesará la ventana (zona amarilla).
- El proceso se repite hasta la hilada siguiente y así sucesivamente.

FIGURA 10

Recorrido del pez en su ascenso por las rampas de flujo ascendente

En la **FIGURA 11** se recogen los resultados de una campaña de monitorización de la rampa de El Pardo, donde se registraron calados y velocidades en las ventanas de flujo (zona entre dos bolos) y en puntos intermedios de los módulos, tanto en la zona de flujo ascendente (sombreadas en azul) como descendente (sombreadas en amarillo).

La medición se realizó el 25 de junio de 2019 con un caudal circulante por la rampa de 2.15 m³/s, un caudal total por el río de 2.37 m³/s y de 0.23 m³/s por el vertedero del azud. El valor de Δh se estimó en aproximadamente 18 cm.

La velocidad se estimó con un molinete tipo Global Water FP101 de precisión ± 0.03 m/s y el calado con una escala graduada de precisión ± 0.5 cm.

Para cada punto de medición se presentan dos casillas: en la casilla de la izquierda se registra el valor del calado en cm y en la de la derecha la velocidad en m/s.

El sombreado en azul de la casilla de la velocidad implica flujo ascendente o con velocidad cero.

Los valores registrados permiten confirmar:

- Predominio de velocidades negativas o nulas en las zonas de reposo o flujo ascendente
- Velocidades más altas en las zonas de flujo rápido, pero siempre manteniendo valores compatibles con una capacidad media de nado de la ictiofauna (<2m/s)
- Las máximas velocidades se ubican lógicamente en las ventanas de vertido, pero siempre con valores inferiores a los 2 m/s
- Los calados para los tres tipos de ubicaciones mostraron siempre valores compatibles con la transitabilidad de la ictiofauna (≥ 20 cm)

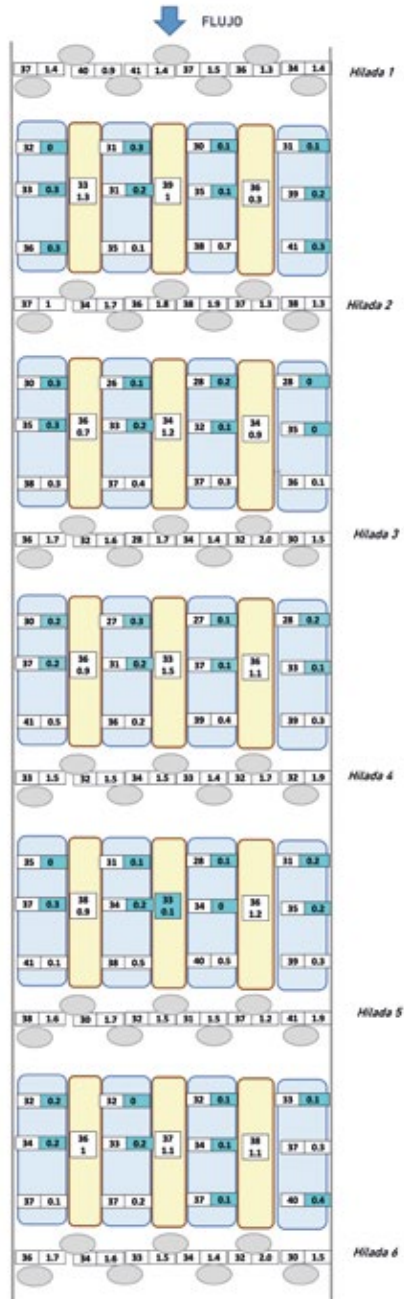


FIGURA 11. Resultados de la monitorización de calados y velocidades de la rampa de El Pardo para un caudal de 2.15 m³/s.

Además, para asegurar la efectividad biológica de la rampa, la turbulencia generada por el salto Δh , debe disiparse adecuadamente en el volumen del módulo:

$$Ec. 4 \quad Pd_m = \frac{\gamma \cdot Q_{módulo} \cdot \Delta h}{V_m}$$

(Towler, Mulligan and Haro, 2015)

siendo:

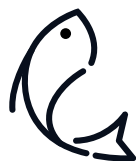
- Pd_m = Potencia disipada en el módulo
- γ = peso específico del agua (9810 N/m³)
- $Q_{módulo}$ = caudal circulante por el módulo, estimado como 2*Qv
- Δh = desnivel de agua entre dos estanques consecutivos
- V_m = volumen del módulo

El proyectista debe asegurar que la potencia disipada se encuentra por debajo de los umbrales máximos admisibles para cada especie. En posteriores epígrafes (ver 5.3.3) se presentarán las opciones de modificar la potencia disipada jugando con el ángulo de la rasante de la rampa con la horizontal (β).

TABLA 1. Referencias para la potencia disipada (Pd) máxima admisible.

VARIABLE	Valbuena Castro <i>et al.</i> , 2016		BAW/BfG, 2015	
	Ideal	Aceptable	“Barbenregion” Pte(%): 0.3-0.025	Salmónidos Pte(%): 10-0.45
Pd(W/m³)	≤150	150<Pd≤250	Pd≤200 (en rampas de piedra)	Pd≤300 (en rampas de piedra)







///

04

VARIABLES





4. 1 Introducción _

El conjunto de variables implicadas en el diseño de este tipo de rampas se recoge en el Anejo 1, donde se especifica para cada una de ellas:

- Símbolo.
- Unidades: en este Manual se ha utilizado el Sistema Internacional de Unidades (SI).
- Definición: breve definición de la variable.
- Carácter: indica si la variable es un dato de partida; una variable independiente, a fijar por el proyectista; una variable dependiente, derivada de otras previamente calculadas; un valor umbral de referencia; o un coeficiente de cálculo.
- Fase de cálculo: indica la fase de cálculo dentro del diseño en el que interviene dicha variable (Fase 1: dimensionado hidráulico; Fase 2: dimensionado geométrico; Fase 3: dimensionado para el control de la potencia a disipar en cada estanque; Fase 4: obtención del rango funcional de caudales; Fase 5: evaluación del comportamiento en régimen no uniforme).
- Condicionado: indica si la variable está sujeta a algún condicionado de carácter ambiental, hidráulico o/y geométrico.
- Recomendaciones de dimensionado: indica si existen referencias de valores mínimos, máximos u óptimos para dicha variable.

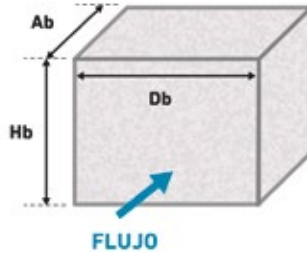
A continuación, se exponen las variables agrupadas según su ubicación: en planta, en perfil longitudinal entre dos hiladas consecutivas, en perfil longitudinal para el total de la rampa y por último, se citan otras variables para el diseño en situaciones especiales.

4.2 Variables en planta

En el diseño en planta de la rampa, el bolo, sus dimensiones y su disposición juegan, como ya se ha comentado anteriormente, un papel fundamental en el funcionamiento correcto de la rampa.

El bolo viene definido por sus tres dimensiones Db , Ab y Hb . La naturaleza de los bolos utilizados es muy variada. En tramos altos y medios, es frecuente utilizar bolos presentes en el lecho u orillas. Cuando no los hay o sus dimensiones no son adecuadas, suele utilizarse

material procedente de canteras. Menos habitual, al menos hasta ahora, es utilizar elementos prefabricados que se disponen, rellenan y anclan convenientemente para soportar las acciones del flujo. Esta opción es muy recomendable, porque (i)facilita la ejecución material, (ii)respeto las dimensiones y ubicaciones previstas en el proyecto -cosa que no siempre es fácil cuando se manejan elementos tomados del río o procedentes de cantera-, y (iii)permite un acabado que naturaliza estos elementos de la rampa.

**Db:**

- Diámetro del bolo o dimensión en la dirección transversal al flujo en la rampa. Constituye su dimensión más representativa. Es una variable independiente, a fijar por el proyectista. No obstante, el valor de Db debe ser lo suficientemente grande para que el volumen del estanque permita cumplir la condición de potencia disipada.
- Al ser Db la dimensión del bolo que frena transversalmente al flujo, se recomiendan caras planas y preferiblemente con aristas angulosas.

Ab:

- Anchura del bolo o dimensión en la dirección del flujo en la rampa. Al igual que Db es una variable independiente que, lógicamente, debe mantener una proporción con las otras dos.

Hb:

- Altura vista del bolo. Su trascendencia se explicará al revisar en el epígrafe siguiente el perfil longitudinal de la rampa, no obstante, se incluye en este apartado para tener una visión conjunta del dimensionado del bolo. Es una variable dependiente que se define en la fase de diseño geométrico, una vez completado el diseño hidráulico de la rampa.

$$Ec. 5 \quad Hb = h_1 + y + h_{az}$$

siendo:

- h_1 = calado aguas arriba del bolo
- y = diferencia de cota entre el umbral del azud (Cuaz) y CLA (Q_{RMIN}). Siendo CLA (Q_{RMIN}) la cota de lámina de agua aguas arriba del bolo de la hilada superior para Q_{RMIN} (caudal mínimo para el que la rampa debe ser funcional) (ver epígrafe 5.2)
- h_{az} = máxima altura de la lámina de agua sobre el azud compatible con el funcionamiento de la rampa sin ahogamiento de los bolos. Corresponde a la diferencia de cota entre la del punto más alto de los bolos de la hilada superior y Cuaz.

- Se ofrece una **recomendación** para el valor mínimo de H_b ($H_{b_{min}}$):

$$Ec. 6 \quad H_b \geq H_{b_{min}} = h_1 + y + 0.15$$

- Este valor mínimo garantiza, como se verá posteriormente, el funcionamiento hidráulico de la rampa para un amplio rango de caudales sin que se produzca el ahogamiento del bolo.

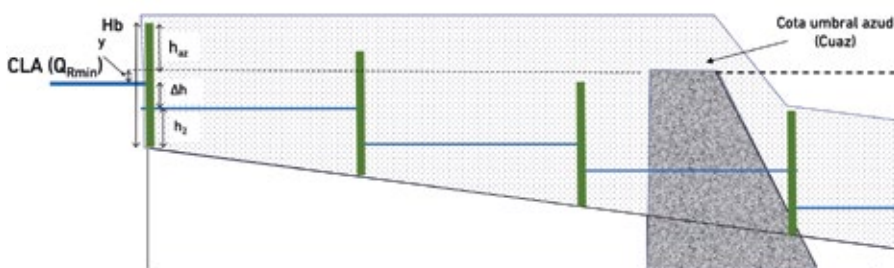


FIGURA 12

Perfil longitudinal de la rampa con indicación de las variables definitorias de la altura del bolo (H_b)

Una vez dimensionado el bolo, pasan a definirse el conjunto de variables que caracterizan la disposición de los bolos en la planta: ángulo entre dos bolos consecutivos (α), anchura de la ventana geométrica (AvG), proyección de la ventana geométrica en la dirección transversal al flujo (a), proyección de la ventana geométrica en la dirección del flujo (b), anchura de la ventana hidráulica o efectiva (AvH), anchura del módulo (Am , Amb , Amc), número de módulos (Nm), número de hiladas ($Nhil$), longitud del estanque (Le), número de estanques ($Nest$) y longitud de la rampa (L_R).

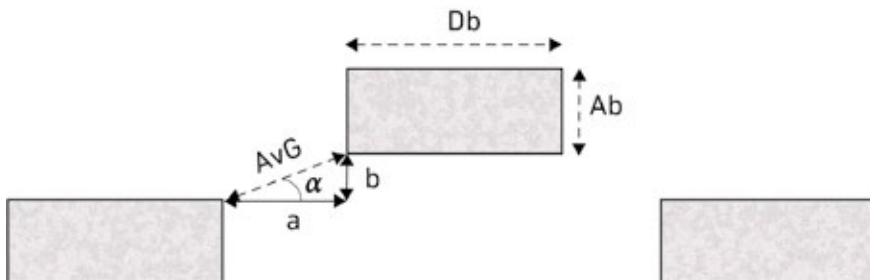


FIGURA 13

Disposición de los bolos en planta con indicación del ángulo α y las proyecciones a y b de la anchura de la ventana geométrica (AvG)

EL ángulo α , es una variable independiente, a definir por el proyectista, pero condicionada al intervalo para que se generen los flujos ascendentes: $30^{\circ} \leq \alpha \leq 45^{\circ}$ (FIGURA 13).

El hecho de que la perpendicular al eje de la ventana de flujo forme un ángulo α con la dirección del flujo, recomienda considerar la necesidad de incorporar a la ecuación 2 un coeficiente adicional que tenga en cuenta el efecto de esta angularidad sobre el caudal. Se descartó considerarlo porque aplicando las recomendaciones recogidas en el texto clásico de hidráulica del profesor Chow, el coeficiente por angularidad tendría un valor prácticamente igual a 1 salvo si $\alpha \geq 45^{\circ}$ y $AvG > 0.6m$.

La separación entre bolos o “anchura de ventana geométrica” (AvG), con sus dos proyecciones: proyección en dirección transversal al flujo (a) y proyección en la dirección del flujo (b):

$$Ec. 7 \quad a = AvG * \cos \alpha$$

$$Ec. 8 \quad b = AvG * \sen \alpha$$

AvG es una variable derivada, que depende de variables hidráulicas calculadas previamente como AvH (anchura de la ventana hidráulica) e Δh (desnivel de la lámina de agua entre dos estanques consecutivos). La relación entre ambas ya ha sido citada previamente al describir el funcionamiento hidráulico de la rampa (Ec. 1):

$$AvG = AvH + Cc * \Delta h$$

siendo Cc el coeficiente de contracción de la vena líquida para el que Marbello Pérez (2005) propone un valor de 0.2

A su vez, como AvG determina la anchura de la ventana de paso, existe un condicionado ambiental, ya que esta ventana debe ser suficientemente ancha para que el pez pueda pasar sin dificultad. Las referencias consultadas (Valbuena Castro *et al.*, 2016) y (BAW/BfG, 2015) permiten establecer las siguientes recomendaciones a este respecto:

TABLA 2. Referencias para el dimensionado de la anchura de ventana geométrica (AvG).

VARIABLE	Valbuena Castro <i>et al.</i> , 2016		BAW/BfG, 2015	
	Ideal	Aceptable	“Barbenregion” Pte(%): 0.3-0.025	Salmónidos Pte(%): 10-0.45
AvG(m)	≥ 0.2	$0.1 \leq AvG < 0.2$	AvG $\geq 3 \cdot$ Ancho del pez (Para barbo 0.25m)	

Por otro lado, también son recomendables tamaños grandes de AvG para reducir obstrucciones por flotantes y facilitar las tareas de mantenimiento.

Una vez definidas las dimensiones del bolo, la anchura del módulo (Am) varía según se trate de módulo de borde o de centro:

$$Ec. 9 \quad Amb = 2.5 * Db + 2a$$

$$Ec. 10 \quad Amc = 2 * (Db + a)$$

siendo:

- Amb = anchura del módulo de borde
- Amc = anchura del módulo de centro
- Db = diámetro del bolo o dimensión del bolo en la dirección transversal al flujo en la rampa
- a = dimensión de la ventana de flujo en dirección transversal al flujo en la rampa

Una anchura del módulo suficiente permitirá disipar adecuadamente la potencia del salto de agua. Como se refleja en las expresiones anteriores, esta anchura depende en gran medida del diámetro del bolo, por lo que la correcta selección de Db por parte del proyectista es fundamental para garantizar un correcto comportamiento del dispositivo.

El número de módulos (Nm) es también una variable independiente, a decidir por el proyectista. Obviamente, aunque el número mínimo de módulos es 1, es recomendable diseñar con 2 o más módulos.

En esta fase de selección del número de módulos conviene tener presente que, a igualdad del resto de parámetros (dimensiones del bolo, α , caudal de diseño, otras variables hidráulicas), un incremento del número de módulos supone:

- Un incremento de la anchura de la rampa
- Una disminución del caudal circulante por la ventana de flujo, lo que implica una disminución de la anchura de la ventana geométrica (AvG) que conlleva mayor dificultad física de paso para los peces y un incremento en la posibilidad de obstrucciones por flotantes.

Definido el número de módulos, es inmediato calcular la anchura de la rampa (TABLA 3).

TABLA 3. Determinación de la anchura de la rampa en función del número de módulos

Nº MÓDULOS	TIPO DE MÓDULO		ANCHURA RAMPA(m)
	BORDE	CENTRO	
1	Único		$3 * Db + 2a$
2	2		$2*(2.5 * Db + 2a)$
3	2	1	$2*(2.5 * Db + 2a) + 2 * (Db + a)$
4	2	2	$2*(2.5 * Db + 2a) + 2 * [2 * (Db + a)]$
...			
n	2	n-2	$2*(2.5 * Db + 2a) + (n - 2) * 2 * [2 * (Db + a)]$

También es necesario definir el número de hiladas (*Nhil*), variable dependiente y que se obtiene del modo:

$$Ec. 11 \quad Nhil = entero \left(\frac{H_T - h_1}{\Delta h} \right) + 1$$

siendo:

- H_T = altura total a salvar (ver epígrafe 5.3.2)
- h_1 = calado aguas arriba del bolo (ver Figura 12)
- Δh = desnivel de la lámina de agua entre dos estanques consecutivos (ver FIGURA 12)

A lo largo de la rampa se disponen de este modo las sucesivas hiladas, espaciadas entre si una distancia *Le* o Longitud del estanque.

El valor de *Le* se obtiene como:

$$Ec. 12 \quad Le = \frac{\Delta h}{tg\beta}$$

siendo:

- Δh = desnivel de la lámina de agua entre dos estanques consecutivos
- β (grados)= ángulo de la rasante de la rampa con la horizontal (variable independiente)

El número de estanques (*Nest*) viene dado por:

$$Ec. 13 \quad Nest = Nhil - 1$$

Por último, la longitud de la rampa (L_R) es una variable dependiente:

$$Ec. 14 \quad L_R = H_R / tg\beta$$

siendo:

H_R = altura de la rampa (ver epígrafe 5.3.2)

β (grados)= ángulo de la rasante de la rampa con la horizontal (variable independiente)

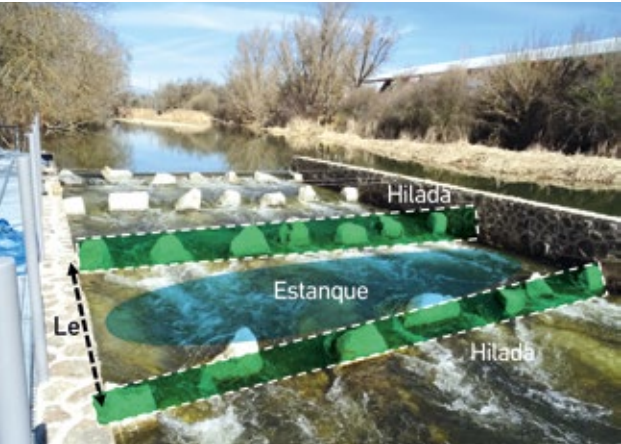


FIGURA 14
Rampa de El Pardo, donde se visualizan las variables: número de hiladas (N_{hil}) y longitud del estanque (Le)

4. 3 Variables del perfil longitudinal entre dos hiladas _

Pueden distinguirse las seis variables recogidas en la **FIGURA 15** y clasificadas según su carácter en la **TABLA 4**:

TABLA 4. Variables a considerar en el perfil longitudinal de la rampa entre dos hiladas con indicación de su carácter

VARIABLES DEL PERFIL LONGITUDINAL	
Independientes	Dependientes
• Calado aguas abajo del bolo (h_2) • Desnivel en la lámina de agua entre dos estanques consecutivos (Δh) • Ángulo de la rasante de la rampa con la horizontal (β)	• Calado aguas arriba del bolo (h_1) • Altura del bolo (H_b) • Longitud del estanque (Le)

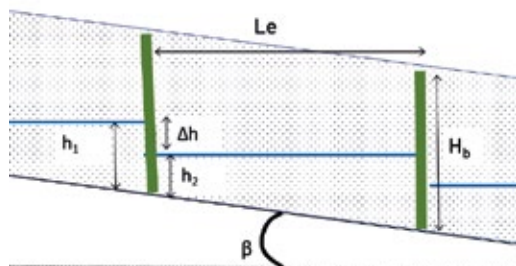


FIGURA 15
Perfil longitudinal de la rampa entre dos hiladas, con indicación de las variables a considerar

El calado aguas abajo del bolo (h_2), el desnivel en la lámina de agua entre dos estanques consecutivos (Δh) y el ángulo de la rasante de la rampa con la horizontal (β) son variables independientes y deben ser fijadas por el proyectista en la primera fase de diseño hidráulico.

La tangente de β determina la pendiente de la rampa en tanto por uno.

No obstante, están sujetas a un condicionamiento ambiental y/o geométrico y pueden establecerse unas recomendaciones previas de diseño (TABLAS 5, 6 Y 7).

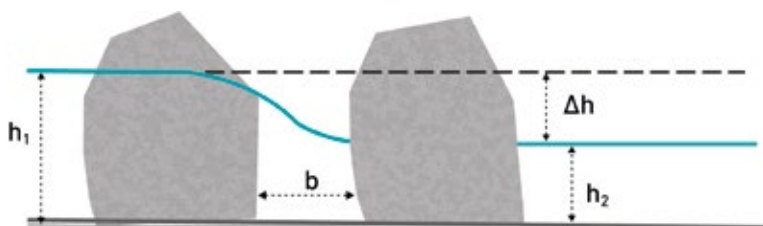


FIGURA 16
Sección longitudinal entre dos bolos consecutivos de una hilada con indicación de las variables a considerar.

TABLA 5. Trascendencia biológica y condicionamiento ambiental de Δh y h_2

VARIABLE	EFFECTO BIOLÓGICO	VALOR RECOMENDADO
$\Delta h(m)$	Determina la velocidad en la ventana de flujo: $V=(2g\Delta h)^{1/2}$ Debe ser inferior a la velocidad de sprint de la especie y estado de referencia.	Ideal ≤ 0.2 Aceptable 0.2-0.35
$h_2(m)$	Determina el calado mínimo en la rampa. Debe permitir que el pez nade con comodidad por el paso de la ventana y limitar la exposición a predadores.	Ideal ≥ 0.2 Aceptable 0.1-0.2

TABLA 6. Trascendencia y condicionado geométrico de Δh y $tg\beta$

VARIABLE	EFFECTO BIOLÓGICO	VALOR RECOMENDADO
$\Delta h(m)$	Determina el número de estanques por metro de altura a salvar ($Nest=H_b/\Delta h$), siendo H_b la altura de la rampa. Valores bajos implican un número de estanques alto a igualdad de cota a salvar. Por ejemplo, para $\Delta h=0.1m$ harían falta 10 estanques por cada metro a salvar.	≥ 0.1
$tg\beta(m)$	Determina la longitud de los estanques (Le) y, por tanto, de la rampa (L_R). La longitud de los estanques influye en el volumen del mismo (Ve) y con él en la potencia a disipar (Pd): $tg\beta \downarrow \Rightarrow Le \uparrow \Rightarrow Ve \uparrow \Rightarrow Pd \downarrow$ $Le \uparrow \Rightarrow L_R \uparrow$ Por ejemplo, $tg\beta=0.03$ implica que la rampa debe tener una longitud de 33.3 m por cada metro a salvar.	Para las rampas de piedra el valor límite más frecuente es 0.05 (5%), y la variable que condiciona ese valor suele ser la potencia a disipar (por el pequeño volumen de los estanques).

TABLA 7. Otras recomendaciones.

VARIABLE	Valbuena Castro <i>et al.</i> , 2016		BAW/BfG, 2015	
	Ideal	Aceptable	"Barbenregion" Pte(%): 0.3-0.025	Salmónidos Pte(%): 10-0.45
$\Delta h(m)$	≤ 0.2	$0.2 < \Delta h \leq 0.35$ ($v=2.6m/s$)	≤ 0.17 ($v=1.8m/s$)	≤ 0.25 ($v=2.2m/s$)
$h_2(m)$	≥ 0.2	$0.1 \leq h_2 < 0.2$	$h_2 \geq 2 \cdot \text{Long. dorso-ventral}$ (Para barbo 0.26m)	

Variables derivadas son: calado aguas arriba del bolo (h_1), altura del bolo (H_b) y longitud del estanque (Le) –estas dos últimas variables ya han sido descritas en epígrafes anteriores-, que se obtienen conforme a las expresiones:

Ec. 15 $h_1 = h_2 + \Delta h$

$$H_b = h_1 + y + h_{az}$$

$$Le = \Delta h / tg\beta$$

siendo:

h_1 = calado aguas arriba del bolo

h_2 = calado aguas abajo del bolo

Δh = desnivel en la lámina de agua entre dos estanques consecutivos

Hb = altura del bolo (altura vista)

y = diferencia de cota entre umbral del azud (Cuaz) y lámina de agua aguas arriba del bolo de la hilada superior para Q_{RMIN}

h_{az} = máxima altura de la lámina de agua sobre el azud compatible con el funcionamiento de la rampa sin ahogamiento de los bolos: diferencia de cota entre la del punto más alto de los bolos de la hilada superior y la cota del umbral del azud

β (grados)= ángulo de la rasante de la rampa con la horizontal

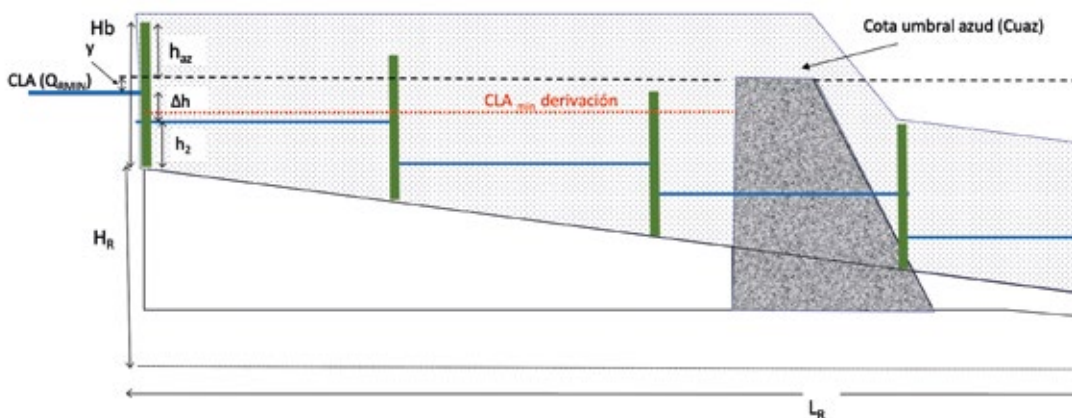
Se reproduce de nuevo la **recomendación** para el valor mínimo de Hb (Hb_{min}):

$$Hb \geq Hb_{min} = h_1 + y + 0.15$$

4. 4 Variables del perfil longitudinal del total de la rampa _

En la **FIGURA 17** se recogen, además de las variables del perfil longitudinal entre hiladas ya comentadas, las relativas al total de la rampa, y en la **TABLA 8** aparecen clasificadas según su carácter:

En las figuras que se presentan en este manual como apoyo gráfico para identificar todas las variables, la rampa se ha retranqueado respecto al azud, pero sólo parcialmente. Este



diseño no debe tomarse como una referencia absoluta. En cada caso el usuario debe ajustar su diseño a las circunstancias específicas del azud y su entorno, siempre tomando como recomendación que la entrada de los peces se sitúe lo más cerca posible del pie del azud para optimizar el efecto llamada.

TABLA 8. Variables a considerar en el perfil longitudinal del total de la rampa con indicación de su carácter

VARIABLES DEL PERFIL LONGITUDINAL		
De partida	Independientes	Dependientes
• Cota del umbral del azud (Cu_{az}) • Cota del lecho en la entrega de la rampa (Ce) • Calado mínimo aguas arriba del azud compatible con la derivación existente ($y_{min\ derivación}$)	• Máxima altura de la lámina de agua sobre el azud compatible con el funcionamiento de la rampa sin ahogamiento de los bolos (h_{az}) • Altura total a salvar (H_T)	• Altura de la rampa (H_R) • Diferencia de cota entre el calado aguas arriba de la rampa para Q_{MIN} y la cota del umbral del azud (y)

Como datos topográficos de partida necesarios para el diseño pueden citarse: la cota del umbral del azud (Cu_{az}) o en su caso del vertedero, y la cota del lecho en la entrega de la rampa (Ce). Si el azud está sometido a algún aprovechamiento es necesario, para garantizar su funcionalidad una vez construida la rampa, conocer el valor del calado mínimo aguas arriba del azud compatible con la derivación existente ($y_{min\ derivación}$), o en su defecto CLA min derivación (Cota mínima de la lámina de agua que debe haber en el paramento aguas arriba del azud para garantizar que se cumplen los requisitos de la derivación que el azud alimenta).

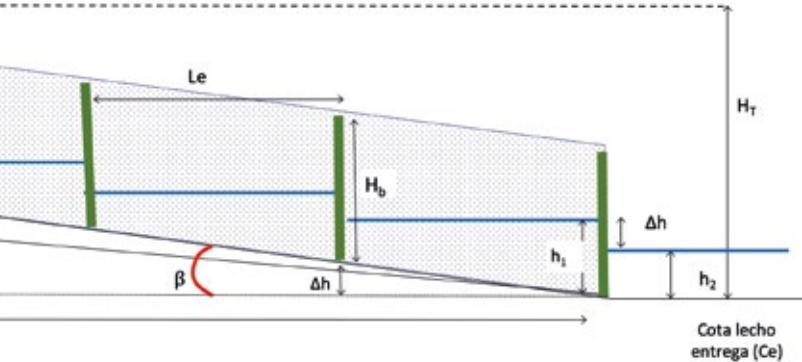


FIGURA 17
Perfil longitudinal de la rampa con indicación de las variables más representativas

Respecto a las variables independientes, juega un papel importante la máxima altura de la lámina de agua sobre el azud compatible con el funcionamiento de la rampa sin ahogamiento de los bolos (h_{az}), que se calcula como la diferencia de cota entre la del punto más alto de los bolos de la hilada superior y la cota del umbral del azud ($Cuaz$).

haz determina la altura del bolo (H_b) y, por tanto, el calado máximo aguas arriba del bolo (h_1 máx) para el que la rampa puede funcionar sin ahogamiento. Se recomienda proyectar con valores de $h_{az} \geq 0.15$ m.

La altura total a salvar (H_T) se obtiene con de los datos de partida:

$$Ec. 16 \quad H_T = Cuaz - Ce$$

Para el cálculo de las variables dependientes, altura de la rampa y diferencia de cota entre el calado aguas arriba de la rampa y la cota del umbral del azud se utilizan las expresiones:

$$Ec. 17 \quad H_R = (Nhil - 1) * \Delta h$$

$$Ec. 18 \quad y = H_T - H_R - h_1$$

siendo:

H_R = altura de la rampa (diferencia de cota en el lecho de la rampa entre el punto de entrega y el de toma).

$Nhil$ = número de hiladas de la rampa.

Δh = desnivel en la lámina de agua entre dos estanques consecutivos

y = diferencia de cota entre umbral del azud ($Cuaz$) y lámina de agua aguas arriba del bolo de la hilada superior para Q_{RMIN}

H_T = altura total a salvar

h_1 = calado aguas arriba del bolo

Para el valor de y es recomendable que $y \geq 0.1$ m, ya que a mayor valor de y , es mayor el rango de caudales que desaguan **sólo** por la rampa (ver epígrafe 5.2). El límite inferior de y viene fijado por el calado mínimo en el paramento aguas arriba del azud (CLA_{min} derivación; ver FIGURA 17), calado vinculado a la derivación para la que está construido el azud. Si es necesario, el valor de y puede ajustarse modificando los valores de h_2 e Δh .

4.5 Otras variables de diseño

Una posibilidad que se contempla para adecuar la funcionalidad del dispositivo de paso a caudales bajos es disponer un umbral de fondo o zócalo (Pena *et al.*, 2018).

La FIGURA 18 y la FIGURA 19 recogen, respectivamente, la planta y perfil longitudinal de la hilada en un módulo tal y como se han venido presentando hasta ahora (sin zócalo), y con zócalo, de altura p sobre el lecho de la rampa en la ventana de flujo.

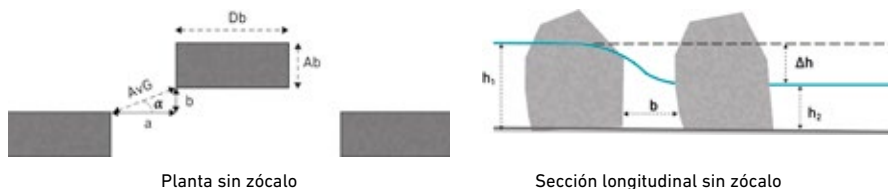


FIGURA 18

Hilada para un módulo sin zócalo: planta (izquierda) y perfil longitudinal (derecha)

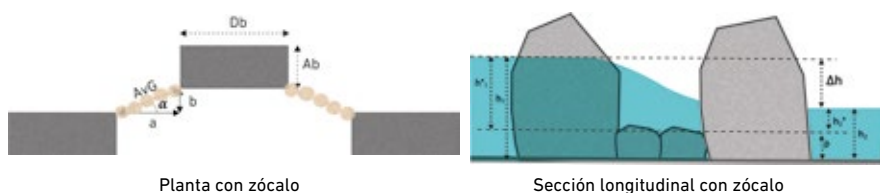


FIGURA 19

Hilada para un módulo con zócalo: planta (izquierda) y perfil longitudinal (derecha)

- Para una ventana de dimensiones dada, el zócalo permite:
- Para un caudal dado tener mayores calados en el estanque
- Para un caudal dado, aumentar el volumen del estanque (V_e) y por tanto tener mayor capacidad de disipar energía
- Mantener un calado dado en el estanque con menor caudal
- Mantener Δh dado con menor caudal

El zócalo es especialmente útil cuando el caudal mínimo a circular por la rampa es muy bajo.

Como inconveniente principal, conviene señalar que el caudal máximo que podría circular sin ahogamiento del bolo ($h_1 = Hb$) será menor que el que podría circular sin zócalo.

La ecuación de gasto (caudal de vertido por la ventana) que se contempla en el dimensionado (Fuentes-Pérez *et al.*, 2016), incorpora la altura del zócalo (p) para considerar únicamente las alturas hidráulicas efectivas: h_1^* e h_2^* .

$$Ec. 19 \quad h_1^* = h_1 - p$$

$$Ec. 20 \quad h_2^* = h_2 - p$$

$$Ec. 21 \quad Qv(p) = \frac{2}{3} * \sqrt{2g} * C_S * V_F * AvH * (h_1 - p)^{1.5}$$

$$Ec. 22 \quad C_S(p) = \beta_0 * \left[1 - \left(\frac{h_2 - p}{h_1 - p} \right)^{1.5} \right]^{\beta_1}$$

siendo:

h_1^* = calado, medido sobre el zócalo, aguas arriba del bolo

h_1 = calado aguas arriba del bolo

h_2^* = calado, medido sobre el zócalo, aguas abajo del bolo

h_2 = calado aguas abajo del bolo

p = altura del zócalo

$Qv(p)$ = caudal circulante por la ventana de flujo con zócalo

$C_s(p)$ = coeficiente de gasto en la ventana de flujo con zócalo

AvH = anchura de la ventana hidráulica

β_0 = coeficiente de cálculo (0.812)

β_1 = coeficiente de cálculo (0.335)

TABLA 9. Trascendencia hidráulica y recomendaciones para la altura del zócalo (p)

VARIABLE	EFFECTO HIDRÁULICO	VALOR RECOMENDADO
p	- La presencia del zócalo permite aumentar el valor de h_2, h_1 y del volumen del estanque (V_e) para un caudal e Δh dados. - Condiciona el valor del calado real de paso en la ventana (h_2^*)	$h_2^* = h_2 - p \geq \text{MAX}(0.1\text{m}; \text{Longitud dorso-ventral})$



///

05

DIMENSIONADO

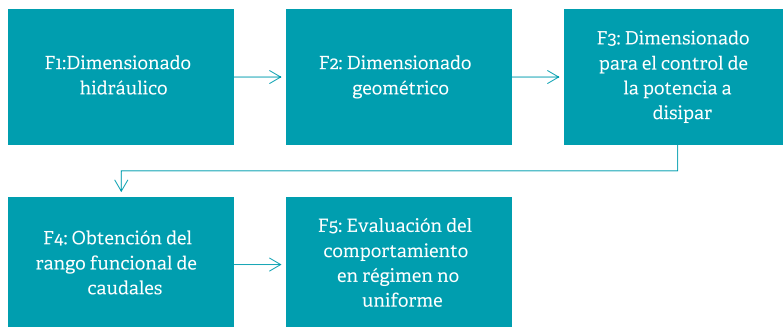




5.1 Introducción

Para el desarrollo de este bloque, se presentan en un primer epígrafe los escenarios de caudales que se van a contemplar. Cada uno de ellos conlleva consideraciones hidráulicas y geométricas que se abordarán con detalle más adelante.

A continuación, en un segundo epígrafe, se aborda el protocolo de cálculo, estructurado en cinco fases que deben desarrollarse de manera consecutiva.



En cada fase se indican los datos necesarios, la secuencia de cálculo y las recomendaciones a tener en cuenta a la hora de seleccionar los valores de proyecto para las variables obtenidas. Para facilitar la aplicación de este protocolo, se propone un caso de estudio que se irá resolviendo paso a paso a medida que se va abordando cada fase.

CASO PRÁCTICO



- Caudal ecológico mínimo: $0.25 \text{ m}^3/\text{s}$
- Velocidad máxima: $2.2 \text{ m/s} \Rightarrow \Delta h \leq 0.25 \text{ m}$
- Calado mínimo: $0.2 \text{ m} \Rightarrow h_2 \geq 0.2 \text{ m}$
- Ancho de paso mínimo: $0.2 \text{ m} \Rightarrow AvG \geq 0.2 \text{ m}$
- Potencia disipada máxima: $200 \text{ W/m}^2 \Rightarrow Pd \leq 200 \text{ W/m}^2$
- Longitud del azud (L_{az}): 30 m
- Espesor en coronación (e): 0.5 m
- Cota de entrega de la rampa (C_e): 1000.8 msnm
- Cota del umbral del azud (C_{uaz}): 1002.9 msnm
- Diferencia de cota entre la del punto más alto de los bolos de la hilada superior y Cuaz (h_{az}): 0.15 m

5.2 Escenarios de caudales a considerar

Antes de abordar el dimensionado de la rampa, es conveniente presentar los escenarios para los que se considera su funcionalidad. Estos escenarios se corresponden con distintos rangos de caudales que determinan características específicas de vertido del sistema rampa-azud.

En primer lugar, hay que indicar que el caudal a considerar es el que resulta de restar al caudal circulante por el río, aguas arriba de la infraestructura [$Q_{río}$], el caudal derivado por el azud [$Q_{derivado}$]. Será ese caudal [caudal disponible: $Q_d = Q_{río} - Q_{derivado}$], el que habrá que considerar en todo el proceso de diseño y dimensionado.

De los caudales disponibles, el que tiene un papel más relevante en el dimensionado es el caudal mínimo para el que la rampa debe ser funcional [Q_{RMIN}]. Una vez fijado el período para el que la rampa debe ser franqueable, generalmente el período prerreproductivo de la especie(s) objetivo, el usuario debe establecer el valor de Q_{RMIN} teniendo en cuenta:

- El caudal ecológico mínimo fijado en la normativa del plan hidrológico de cuenca.
- El régimen de Q_d correspondiente al período de funcionalidad de la rampa. Si la serie de Q_d está disponible para un número suficiente de años, el valor de Q_{RMIN} puede estimarse como sigue:
 - Generar la curva de caudales clasificados de los Q_d diarios de la ventana temporal correspondiente al período de funcionalidad de la rampa.
 - Obtener el Q_d correspondiente al percentil de excedencia del 90% [$Q(90\%)$ -caudal que es igualado o superado el 90% de los días del período considerado-].
 - Ese caudal puede ser una buena referencia para fijar el Q_{RMIN} , porque si la rampa se dimensiona con arreglo a ese valor, se puede garantizar que, durante el período de funcionalidad, la rampa sólo dejará de ser transitable por caudales muy bajos: como promedio, el 10% de los días de ese período.

Es importante que el usuario tenga en cuenta que el dimensionado básico de la rampa se hará tomando como referencia Q_{RMIN} , por lo que debe ser especialmente cuidadoso en su determinación.

En relación con la funcionalidad, aunque ahora referida al azud, el usuario debe considerar la cota de lámina de agua mínima que debe haber en el paramento aguas arriba del azud para garantizar que se cumplen los requisitos de la derivación que el azud alimenta. Esa cota de lámina de agua [$CLA_{min, derivación}$] tiene un papel relevante en el dimensionado de la rampa.

En la FIGURA 20 puede verse la cota de lámina de agua aguas arriba de la rampa cuando $Q_d = Q_{RMIN}$, [$CLA(Q_{RMIN})$]. Se aprecia que:

- Todo el caudal circula por la rampa, ya que $CLA(Q_{RMIN})$, y por tanto la cota de lámina de agua en el paramento del azud, es menor que la cota del umbral del azud [Cu_{az}].
- $CLA(Q_{RMIN})$ debe ser mayor o igual que $CLA_{min, derivación}$, para garantizar la funcionalidad del azud.

5. Dimensionado

La diferencia entre $Cuaz$ y $CLA(Q_{RMIN})$ [$y = Cuaz - CLA(Q_{RMIN})$] determina el rango de caudales para el que todo el caudal disponible circulará por la rampa y, por tanto, no habrá vertido por el azud. Como se verá a continuación, ese valor de y juega un papel importante en el dimensionado.

ESCENARIO 1: Todo el Qd desagua por la rampa. No hay vertido por el azud.

Este escenario se presenta para un rango de caudales que va desde Q_{RMIN} hasta el caudal por encima del cual el azud empieza a verter [$Q_R(y=0)$]. La **FIGURA 20** corresponde al caso Q_{RMIN} y la **FIGURA 21** al caso $Q_R(y=0)$, caudal para el que $CLA(Q_R(y=0)) = Cuaz$.

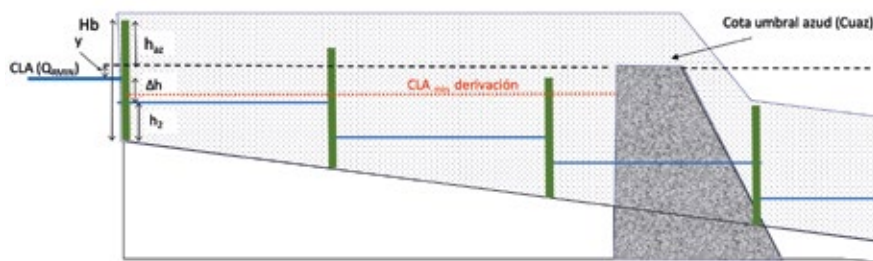


FIGURA 20

Perfil de lámina de agua cuando $Qd = Q_{RMIN}$.

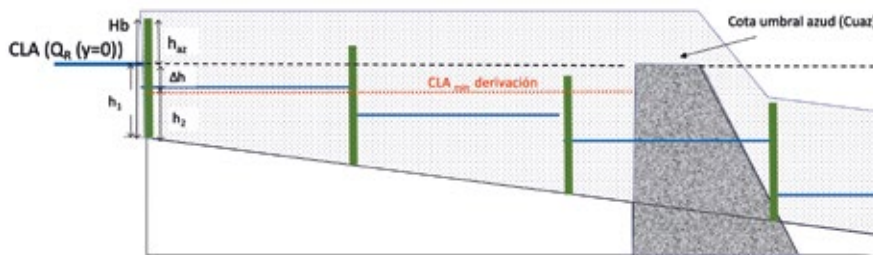


FIGURA 21

Perfil de lámina de agua cuando $Qd = Q_R(y=0)$.

Desde la óptica de la funcionalidad de la rampa, es muy importante tener presente que este escenario tiene la cualidad de generar un efecto llamada absoluto, ya que todo el Qd desagua por la rampa. Es pues muy recomendable que el rango de Qd de este escenario [$Q_{RMIN} \leq Qd \leq Q_R(y=0)$] sea lo mayor posible.

Dicho rango depende del valor de y , siendo

$$Ec. 23 \quad y = \begin{cases} = Cuaz - CLA(Q_{RMIN}) \\ \text{con } CLA(Q_{RMIN}) \geq CLA_{min \text{ derivación}} \end{cases}$$

Como se ha visto en el epígrafe 4.4, $y = H_T - H_R - h_l$. Teniendo en cuenta que $H_T = Cuaz - Ce$ es un valor dado, que $H_R = (Nhil-1) \cdot \Delta h$ y que $h_l = h_2 + \Delta h$, es evidente que $y = f(h_2, \Delta h)$. Por tanto, el rango de caudales de este escenario [$Q_{RMIN} \leq Qd \leq Q_R(y=0)$] será función de h_2 y de Δh .

Con un Q_{RMIN} dado, para que el rango de caudales de este escenario aumente, debe hacerlo y . Como y es función decreciente de h_2 y de Δh , reduciendo los valores de estas variables se aumenta el rango de caudales. Sin embargo, esta reducción tiene límites importantes: por un lado, h_2 determina el calado mínimo que los peces encontrarán en su desplazamiento por la rampa, por lo que no puede fijarse por debajo del umbral que corresponda a la especie objetivo; por otro, una reducción de Δh implica un aumento del número de hiladas y con él del número de estanques, que, para una longitud dada de la rampa, implica la disminución de la longitud del estanque y puede por tanto incrementar la potencia disipada, situándola por encima del valor máximo admisible para la especie objetivo.

Para que el usuario pueda seleccionar en cada caso el valor más adecuado de y , en el protocolo de dimensionado se contempla de manera específica su determinación.

Es importante señalar que para que este escenario se presente, es necesario que la altura vista del bolo [Hb] cumpla: $Hb \geq h_2(Q_{RMIN}) + \Delta h + y$.

Si $Hb = h_2(Q_{RMIN}) + \Delta h + y$, entonces para $Qd > Q_R(y=0)$, los bolos se anegan y los flujos ascendentes característicos de este diseño quedan comprometidos. Por eso, para evitar que los flujos ascendentes puedan desaparecer con $Qd > Q_R(y=0)$, se recomienda que $Hb = h_2(Q_{RMIN}) + \Delta h + y + h_{az}$, con $h_{az} \geq 0.15m$.

ESCENARIO 2: Hay vertido por el azud y el caudal que circula por la rampa no anega los bolos.

Este escenario se inicia cuando $Qd > Q_R(y=0)$. Para determinar el valor de Qd que acota superiormente este escenario [Q_{dMAX}], es necesario presentar dos nuevos caudales, Q_{RMAX} y $Q_{az}(h_{az})$, cuya suma determinará el valor de Q_{dMAX} :

Considérese la situación para la que la lámina de agua alcanza el borde superior del bolo (**FIGURA 22**), esto es, cuando $h_l = Hb$.

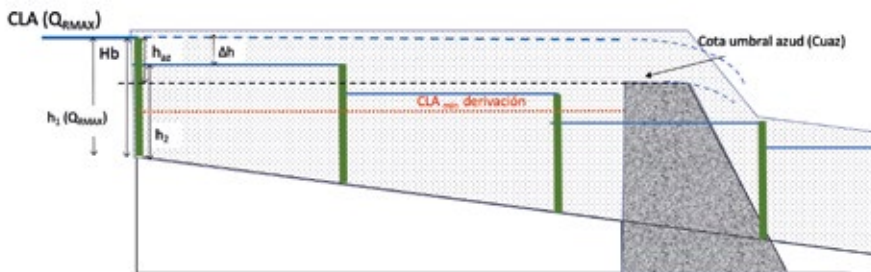


FIGURA 22

Perfil de lámina de agua cuando $Qd = Q_{RMAX} + Q_{az}(h_{az})$

Para esa hipótesis

- El caudal que circula por la rampa Q_{RMAX} es el máximo posible antes de que las hiladas de bolos se aneguen [$h_1(Q_{RMAX})=Hb$] y los flujos ascendentes característicos de este diseño queden comprometidos².
- El caudal que vierte el azud, determinado por su ecuación de gasto [$Q_{az}(y_{az})$], será $Q_{az}(h_{az})$, ya que cuando por la rampa circula Q_{RMAX} , se cumple $y_{az} = h_{az}$
- Ecuación de gasto del azud³:

$$Ec. 24 \quad Q_{az}(y_{az}) = 1.7 * C_{s_{az}} * y_{az}^{1.5} * L_{az}$$

$$Ec. 25 \quad C_{s_{az}} = \begin{cases} 0,75 + \frac{0,1}{e/y_{az}} & \text{si } \frac{e}{y_{az}} > 3 \\ 0,7 + \frac{0,185}{e/y_{az}} & \text{si } \frac{e}{y_{az}} \leq 3 \end{cases}$$

siendo

y_{az} = diferencia de cota entre la lámina de agua arriba del azud y el umbral del azud.

e = espesor en coronación del azud

L_{az} = longitud del azud

Por tanto, el máximo valor de Qd para el que no se produce ahogamiento de los bolos es:

$$Ec. 26 \quad Qd_{MAX} = Q_{RMAX} + Q_{az}(h_{az})$$

A diferencia del **ESCENARIO 1**, para el rango de caudales de este escenario [$Q_{RMAX} \leq Qd \leq Qd_{MAX}$], el desagüe se produce tanto por la rampa como por el azud. El efecto de llamada absoluto que la rampa tenía en el escenario anterior, no se mantiene en éste, por lo que el usuario debe considerar la conveniencia de una escotadura en el azud, próxima al pie de la rampa, para mejorar el efecto llamada.

Para favorecer la entrada de los peces en la rampa, es recomendable que esa entrada se encuentre lo más cerca posible del pie del azud. La rampa que se muestra en las fotografías que acompañan a este texto se diseñó con este criterio.

² Es posible que por encima de ese caudal la rampa siga siendo funcional para el paso de peces, pero su comportamiento hidráulico debe estudiarse, para esa nueva situación, con las ecuaciones adecuadas. Este escenario no se contempla en este Manual.

³ Se propone el uso de la ecuación que, tomando como referencia la fórmula de Bazin para un vertedero rectangular de pared delgada sin contracción lateral, aplica un coeficiente de reducción función de e/y . El usuario puede considerar cualquier otra ecuación que, a su juicio, mejor se adapte a las características de vertido de su caso.

En las figuras que sirven de apoyo gráfico para identificar todas las variables, la rampa se ha retranqueado respecto al azud, pero sólo parcialmente. Este diseño no debe tomarse como una referencia. En cada caso el usuario debe ajustar su diseño a las circunstancias específicas del azud y su entorno, siempre tomando como recomendación que la entrada de los peces se sitúe, como ya se ha indicado, lo más cerca posible del pie del azud.

ESCENARIO 3: El caudal que circula por la rampa anega los bolos

Este escenario se presenta cuando $Qd > Qd_{MAX}$. Como ya se ha indicado, en estas circunstancias los flujos secundarios responsables de generar el flujo ascendente se debilitan o desaparecen. El hecho de que estos flujos ascendentes no se presenten, no implica que la rampa deje de ser funcional ya que esa funcionalidad está vinculada a que se satisfagan las condiciones de transitabilidad definidas a partir de los umbrales que, para la especie objetivo, fijen los valores de velocidad máxima, calado mínimo, potencia disipada máxima, etc.

Sin embargo, el estudio hidráulico de esas variables requiere la aplicación de hipótesis y ecuaciones que escapan del alcance de este Manual. Este escenario no será analizado en este texto.

En la **TABLA 10** se presenta un resumen de las características de los escenarios descritos.

TABLA 10. Rango de caudales para cada uno de los escenarios considerados para el dimensionado de la rampa

ESCENARIO	DESAGÜE de Qd	RANGO DE CAUDALES Qd	OBSERVACIONES
1	Sólo por rampa.	$Q_{RMIN} \leq Qd \leq Q_R (y=0)$	El efecto llamada de la rampa es absoluto. El rango de caudales crece con el valor de y , que es función de h_2 e Δh . A su vez, el valor de y condiciona la altura vista del bolo.
2	Por rampa y azud. No hay ahogamiento de bolos.	$Q_R (y=0) < Qd \leq \underbrace{Q_{RMAX} + Q_{az} (h_{az})}_{Qd_{MAX}}$ RAMPA RAMPA AZUD	El efecto llamada de la rampa está condicionado por el vertido del azud. Es conveniente considerarlo una escotadura junto a la rampa para reforzarlo. El rango de caudales crece con el valor de h_{az} . El valor de h_{az} también condiciona la altura vista del bolo.
3	Por rampa y azud. Hay ahogamiento de bolos.	$Qd_{MAX} = Q_{RMAX} + Q_{az} (h_{az}) < Qd$	No se puede garantizar el flujo ascendente, aunque la rampa puede ser funcional para el remonte de los peces. Este escenario no se estudia en este Manual.

5.3 Protocolo de cálculo

Antes de presentar el protocolo de dimensionado es conveniente hacer unas consideraciones previas:

- El dimensionado se hará considerando régimen uniforme, asumiendo que para un caudal dado -constante-, en todas las hiladas los calados aguas arriba y abajo de los bolos $[h_1; h_2]$ (FIGURA 21) son los mismos y constantes.
- Posteriormente, y ya dimensionada la rampa, se evaluará el comportamiento en régimen no uniforme para casos singulares.
- Para que el dimensionado sea más versátil, el procedimiento que se presenta a continuación contempla un rango admisible amplio⁴, tanto de calados mínimos como de velocidades máximas en las ventanas de paso:
 - Los calados mínimos se presentan inmediatamente aguas abajo de cada hilada $-h_2-$, y se consideran valores comprendidos entre 0.1 m y 0.4 m
 - Como estimación de velocidades máximas se asume:

$$Ec. 27 \quad v_{max} = \sqrt{2g\Delta h}$$

Se consideran valores de Δh comprendidos entre 0.1 m y 0.35 m, que se corresponden, respectivamente, con de 1.4 m/s y 2.6 m/s

El protocolo que se propone para el dimensionado se articula en cinco fases o etapas secuenciales:

Fase 1

Dimensionado hidráulico: Dados Q_{RMIN} , AvG_{min} , y asumiendo un número de módulos (Nm), se obtendrán combinaciones de pares de valores $(h_2; \Delta h)$ $[0.1 \leq h_2 \leq 0.4; 0.1 \leq \Delta h \leq 0.35]$ para los que el AvG^5 correspondiente sea $\geq AvG_{min}$

Fase 2

Dimensionado geométrico: En esta fase, utilizando los pares de valores determinados en la fase anterior, se obtendrán y (diferencia de cota entre umbral del azud y lámina de agua aguas arriba del bolo de la hilada superior para Q_{RMIN}), H_R (diferencia de cota, en el lecho de la rampa, entre el punto de entrega y el de toma), número de hiladas $-N_{hil}-$, número de estanques $-N_{est}-$ y altura vista del bolo $-H_b-$.

⁴ El rango de valores de valores h_2 e Δh $[0.1 \leq h_2 \leq 0.4; 0.1 \leq \Delta h \leq 0.35]$ que se contempla es más amplio que el establecido como valores recomendables. Se amplía el rango para ofrecer al usuario opciones que pudiesen aparecer al considerar especies y/o circunstancias singulares.

⁵ Es muy recomendable asignar valores de AvG grandes para reducir obstrucciones y tareas de mantenimiento. No deberían aceptarse valores inferiores a 0.1 m, y es recomendable que $AvG \geq 0.2$ m.

Fase 3**Dimensionado para el control de la potencia a disipar en cada estanque:**

Considerando el rango de pendientes que el usuario establezca, se obtendrán, para cada una de ellas, los valores de las longitudes del estanque y rampa, así como los volúmenes de estanque y la potencia disipada, comprobando para ésta última variable si satisface los umbrales correspondientes a la especie objetivo.

Fase 4

Obtención del rango funcional de caudales: Con las dimensiones ya establecidas en las fases anteriores, se determinan los caudales $Q_R(y=0)$, Q_{RMAX} y $Q_{az}(h_{az})$, para así determinar el rango funcional de caudales:

- Desagüe solo por rampa: $Q_{RMIN} \leq Qd \leq Q_R(y=0)$

- Desagüe por rampa y azud: $Q_R(y=0) < Qd \leq Qd_{MAX}$

Fase 5

Evaluación del comportamiento en régimen no uniforme: El caso que en régimen no uniforme puede comprometer en mayor medida la funcionalidad, es cuando por la rampa circula Q_{RMAX} . Para ese caso se evaluarán las velocidades en las ventanas de paso, para así verificar si sus valores están por debajo del umbral que corresponde a la especie objetivo.

En las tres primeras fases del dimensionado, el caudal que se considera es Q_{RMIN} . En la fase 4 se contemplan $Q_R(y=0)$, Q_{RMAX} y $Q_{az}(h_{az})$, y para la quinta Q_{RMAX} .

Si en una fase el usuario no encuentra valores que satisfagan sus necesidades, tendrá que ir a la fase(s) anterior(es) para reajustar las variables sobre las que puede tomar decisiones.

Para facilitar la aplicación de este protocolo, se ofrece una aplicación que permite resolver de manera amigable toda la secuencia.

A continuación, se presentan con detalle los cálculos correspondientes a cada fase.

5.3.1 FASE 1. DIMENSIONADO HIDRÁULICO.**¿Qué hace falta?**

Q_{RMIN} , $AvGmin$, y asumir el número de módulos (Nm)

¿Qué se obtiene?

Combinaciones de pares de valores $(h_2; \Delta h)$ $[0.1 \leq h_2 \leq 0.4; 0.1 \leq \Delta h \leq 0.35]$ para los que el AvG correspondiente sea $\geq AvG_{min}$

¿Para qué sirve?

Estas alternativas de diseño se utilizan para, en la fase 2, seleccionar la más conveniente para los valores que determinan las características geométricas de la rampa.

5.3.1.a Secuencia de cálculo:

a.1.- Dado Q_{RMIN} -establecido a partir del estudio hidrológico de caudales de la ventana temporal para la que se debe garantizar la funcionalidad de la rampa-, y asumido un número de módulos - Nm -, se calcula:

- El número de ventanas que tendrá cada hilada - $2*Nm$ -

- El caudal a desaguar por cada ventana: $Qv = \frac{Q_{RMIN}}{2*Nm}$

a.2.- Para cada combinación (h_2 ; Δh):

- Se calcula h_1 [$h_1 = h_2 + \Delta h$] y el coeficiente de gasto Cs :

$$Cs(h_2; \Delta h) = \beta_0 * \left[1 - \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^{1.5} \right]^{\beta_1} \quad \beta_0 = 0.812; \quad \beta_1 = 0.335$$

- Con los correspondientes valores h_1 y Cs , se calcula AvH despejando de la Ec. 2:

$$AvH(h_2; \Delta h) = \frac{3}{2} * \frac{Q_v}{C_s * h_1^{1.5} * \sqrt{2g}}$$

a.3.- Se calculan los valores de $AvG(h_2; \Delta h) = AvH(h_2; \Delta h) + 0.2 * \Delta h$. Recuerdese que se asume una contracción del flujo en la ventana tal que la anchura hidráulica efectiva es un 20% de Δh menor que la anchura geométrica.

a.4.- Se aceptan sólo los valores de $AvG(h_2; \Delta h)$ que cumplen $Avh(h_2; \Delta h) \geq AvG_{min}$

a.5.- Si en a.4 no se obtienen valores de (h_2 ; Δh) aceptables, o siéndolos el usuario no los considera adecuados⁶, se modifica el número de módulos⁷ y se repite la secuencia de cálculo. Si con un sólo módulo no hay valores de $AvG(h_2; \Delta h)$ aceptables, o habiéndolos el proyectista no los considera adecuados, hay una alternativa de diseño que se desarrolla en el epígrafe 5.3.6.



⁶ Δh determina el número de estanques por metro de altura a salvar ($n^{\circ} \text{estanques} = H_n / \Delta h$). Valores bajos de Δh implican un número de estanques alto a igualdad de cota a salvar; valores altos conllevan velocidades altas en la ventana de flujo. h_2 determina el calado mínimo en la rampa y debe permitir que el pez afronte con comodidad el paso por la ventana, limitando la exposición a predadores; valores altos implican altura vista del bolo alta.

⁷ Si los valores de h_2 aceptables en a.4 son bajos, pueden aumentarse disminuyendo el número de módulos y, si son altos, se pueden disminuir aumentándolos.

5.3.1.b Ejemplo:

Se presentan de nuevo los datos disponibles para el desarrollo del caso práctico.

CASO PRÁCTICO

- Caudal ecológico mínimo: $0.25\text{ m}^3/\text{s}$
- Velocidad máxima: $2.2\text{ m/s} \Rightarrow \Delta h \leq 0.25\text{ m}$
- Calado mínimo: $0.2\text{ m} \Rightarrow h_2 \geq 0.2\text{ m}$
- Ancho de paso mínimo: $0.2\text{ m} \Rightarrow AvG \geq 0.2\text{ m}$
- Potencia disipada máxima: $200\text{ W/m}^2 \Rightarrow Pd \leq 200\text{ W/m}^2$
- Longitud del azud (Laz): 30 m
- Espesor en coronación (e): 0.5 m
- Cota de entrega de la rampa (Ce): 1000.8 msnm
- Cota del umbral del azud (Cuaz): 1002.9 msnm
- Diferencia de cota entre la del punto más alto de los bolos de la hilada superior y Cuaz (haz): 0.15 m

Para esta fase 1:

DATOS:

- $Q_{RMIN}=0.25\text{ m}^3/\text{s}$
- $AvG_{min}=0.2\text{ m}$
- Se inicia esta fase considerando disponer 2 módulos y ventanas de flujo sin zócalo ($p=0$)

RESULTADOS:

Se obtiene la TABLA 11 que recoge las combinaciones de (h_2 ; Δh) que ofrecen valores de $AvG \geq AvG_{min}$

Valores de Av GEOMÉTRICA(m)					
h ₂ (m)					
Δh(m)	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4
0.1	0.23				
0.12	0.20				
0.15					
0.17					
0.2					
0.22					
0.25					
0.3					
0.32					
0.35					

TABLA 11. Combinaciones de (h_2 ; Δh) que, con dos módulos y para $Q_{RMIN}=0.25\text{ m}^3/\text{s}$, ofrecen valores de $AvG \geq AvG_{min} \geq 0.2\text{ m}$

El valor más alto de Δh válido (0.12m), es muy bajo respecto al máximo compatible con la velocidad máxima de la especie objetivo ($\Delta h_{max}=0.25\text{ m} \Rightarrow V_{max}=2.2\text{ m/s}$). Asumirlo implica 8 hiladas por cada metro a salvar.

Se descarta ese valor y se rehacen los cálculos asumiendo ahora un único módulo.

RESULTADOS PARA 1 MÓDULO:

La **TABLA 12** recoge los resultados obtenidos para esta hipótesis.

Valores de Av GEOMÉTRICA(m)					
h_2 (m)					
Δh (m)	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4
0.1	0.43	0.36	0.31	0.27	0.24
0.12	0.39	0.33	0.29	0.25	0.23
0.15	0.33	0.29	0.25	0.23	0.21
0.17	0.31	0.27	0.24	0.22	
0.2	0.28	0.25	0.22	0.20	
0.22	0.26	0.23	0.21		
0.25	0.24	0.22	0.20		
0.3	0.22	0.20			
0.32	0.22				
0.35	0.21				

TABLA 12. Combinaciones de $(h_2; \Delta h)$ que, con un módulo y para $Q_{RMIN}=0.25m^3/s$, ofrecen valores de $AvG \geq AvGmin \geq 0.2m$

Se aprecia como el rango de combinaciones de $h_2; \Delta h)$ que ofrecen valores de $AvG \geq AvGmin$ es mucho más amplio. Con el recuadro en azul se han señalado los que, además, cumplen los requisitos de velocidad inferior a la máxima ($\Delta h \leq 0.25m$) y calado superior al mínimo ($h_2 \geq 0.2m$) para la especie objetivo del ejemplo.

5.3.2 FASE 2. DIMENSIONADO GEOMÉTRICO.**¿Qué hace falta?**

Cota de entrega de la rampa (Ce), cota del umbral del azud ($Cuaz$), que determinan la altura total a salvar ($H_T = Cuaz - Ce$), y la diferencia de cota entre la del punto más alto de los bolos de la hilada superior y $Cuaz$ (h_{az}).

¿Qué se obtiene?

Seleccionando $(h_2; \Delta h)$ de los valores determinados en la fase anterior, se obtendrán y -diferencia de cota entre umbral del azud y lámina de agua aguas arriba de la rampa-, H_R -altura de la rampa-, número de hiladas - N_{hil} -, número de estanques - N_{est} - y altura vista del bolo - H_b -.

¿Para qué sirve?

Para definir características geométricas básicas de la rampa.

5.3.2.a Secuencia de cálculo:

a.1.- Seleccionados $(h_2; \Delta h)$, con el correspondiente valor de AvG , y dados los valores de $H_T = Ce - Cuaz$ y h_{az}^8 , se obtiene:

- Anchura de la ventana hidráulica: $AvH = AvG - 0.2 * \Delta h$
- N° de hiladas: $N_{hil} = \text{entero} \left(\frac{H_T - h_1}{\Delta h} \right) + 1$

⁸ h_{az} determina la altura vista del bolo (H_b) y, por tanto, el calado máximo aguas arriba del bolo (h_{1MAX}) para el que la rampa puede funcionar sin ahogamiento, calado al que corresponde el Q_{RMAX} . Cuanto mayor sea h_{az} , mayor será el rango funcional de caudales de la rampa, pero valores altos de h_{az} implican valores altos de H_b . Se recomienda $h_{az} \geq 0.15m$.

- N° de estanques: $Nest = Nhil - 1$
- Altura de la rampa: $H_R = (Nhil - 1) * \Delta h$
- Diferencia de cota entre la lámina de agua aguas arriba de la rampa y el umbral del azud⁹: $y = H_T - H_R - h_1$, debiendo cumplir $Cuaz - y \geq CLA_{min}$ derivación
- Altura vista del bolo: $Hb = h_1 + y + h_{az}$

a.2.- Si los valores de Hb obtenidos en el paso anterior no son adecuados, se repite el paso a.1 con otros valores aceptables de h_z ; Δh ; AvG .

5.3.2.b Ejemplo:

DATOS:

- Cota de entrega de la rampa: $Ce = 1000.8$
- Cota del umbral del azud: $Cuaz = 1002.9$
- Diferencia de cota entre la del punto más alto de los bolos de la hilada superior y $Cuaz$: $h_{az} = 0.15m$
- De la tabla resultado de la fase anterior, se selecciona la combinación $h_z = 0.2m$ $\Delta h = 0.25m$ (lo que supone una $V_{max} = 2.2 m/s$), que corresponden a los valores extremos aceptables para cada una de esas variables. Los resultados así obtenidos nos darán una idea de las características de la rampa para estos valores extremos.

RESULTADOS:

Diferencia de cota entre umbral del azud y lámina de agua aguas arriba de la rampa:
 $y = 0.15m$ Valor aceptable para que el rango de caudales vertido sólo por rampa sea significativo.

Anchura de la ventana hidráulica:	$AvH = 0.19m$
Calado aguas arriba del bolo:	$h_1 = 0.45m$
Altura total a salvar:	$H_T = 2.1m$
Altura de la rampa:	$H_R = 1.5m$
Número de hiladas:	$Nhil = 7$
Número de estanques:	$Nest = 6$
Altura vista del bolo:	$Hb = 0.75m$

5.3.3 FASE 3. DIMENSIONADO PARA EL CONTROL DE LA POTENCIA A DISIPAR EN CADA ESTANQUE.

¿Qué hace falta?

Los valores del diámetro del bolo o dimensión del bolo en la dirección transversal al flujo en la rampa (Db), anchura del bolo o dimensión del bolo en la dirección del flujo en la rampa (Ab) y el ángulo que define la alineación entre dos bolos consecutivos (α).

⁹ Cuanto mayor sea y , mayor será el rango de caudales que desagua sólo por la rampa [$Q_{RMIN} \leq Qd \leq Q_R(y=0)$], rango para el que el efecto llamada es absoluto. Se recomienda $y \geq 0.1m$

Con ellos que se podrá determinar la anchura del módulo, tanto de borde (Amb) como de centro (Amc).

El rango de pendientes ($tg\beta$) para el que se estudiará la potencia disipada.

¿Qué se obtiene?

Para cada una de las pendientes consideradas, los valores de las longitudes del estanque (Le) y rampa (L_R), así como los volúmenes de módulo (V_m) y la potencia disipada (Pd), tanto para módulo borde como módulo centro

¿Para qué sirve?

Para seleccionar la pendiente de la rampa con la que se cumpla la condición de potencia disipada máxima que el usuario determine.

5.3.3.a Secuencia de cálculo:

a.1.- Dados Db^{10} , Ab^{11} y α^{12} , se obtiene:

- Dimensión de la ventana de flujo en dirección transversal al flujo en la rampa:

$$a = AvG * \cos\alpha$$

- Dimensión de la ventana de flujo en dirección del flujo en la rampa:

$$b = AvG * \sin\alpha$$

- Anchos de los módulos de borde y centro:

$$Amb = 2.5 * Db + 2a; Amc = 2 * (Db + a)$$

a.2.- Para un rango de pendientes de la rampa¹³ [$0.03 \leq tg\beta \leq 0.07$], se obtiene:

- Longitud del estanque: $Le = \frac{\Delta h}{tg\beta}$

- Longitud de la rampa: $L_R = \frac{H_R}{tg\beta}$

- Volúmenes de los módulos de borde y de centro:

$$Ec. 28 \quad Vmb = Amb * Le * h_0$$

$$Ec. 29 \quad Vmc = Amc * Le * h_0$$

¹⁰ El valor de Db condiciona la anchura del estanque y con ella su volumen, que a su vez juega un papel esencial en la potencia disipada. Debe tener un valor suficientemente grande -aunque proporcionado con H_b -, para que el volumen del estanque permita cumplir la condición de potencia disipada.

¹¹ El valor de Ab debe establecerse de manera que resulte proporcionado con los valores de Db y H_b .

¹² Deben respetarse los valores de α recomendados [$30^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$] para que se produzcan los flujos secundarios necesarios para que se creen las zonas de flujo ascendente.

¹³ La pendiente de la rampa determina la longitud de los estanques y, por tanto, de la rampa. La longitud de los estanques influye en el volumen y con él en la potencia disipada: $tg\beta \downarrow \Rightarrow Le \uparrow \Rightarrow Vm \uparrow \Rightarrow Pd \downarrow$

$$Le \uparrow \Rightarrow L_R \uparrow$$

siendo el calado medio en el estanque h_0

$$\text{Ec. 30 } h_0 = \frac{h_1 + h_2}{2}$$

Potencia disipada en los módulos de borde y centro:

$$\text{Ec. 31 } Pd_{mb} = \frac{\gamma \cdot Q_{\text{módulo}} \cdot \Delta h}{V_{mb}}$$

$$\text{Ec. 32 } Pd_{mc} = \frac{\gamma \cdot Q_{\text{módulo}} \cdot \Delta h}{V_{mc}}$$

siendo $Q_{\text{módulo}} = 2 \cdot Q_v$

- a.3.- El usuario selecciona la pendiente en función de los requerimientos de potencia disipada máxima adecuada para la especie objetivo¹⁴, y teniendo en cuenta la longitud de rampa que esa pendiente reclama.

5.3.3.b Ejemplo:

DATOS:

- Dimensión del bolo en la dirección transversal al flujo: $Db = 0.55\text{m}$
- Anchura del bolo: $Ab = 0.45\text{m}$
- $\alpha = 40^\circ$

RESULTADOS:

Para un único módulo, su anchura viene dada por: $Am = 3Db + 2a$

$$\checkmark Am = 2.02\text{m}$$

En la **TABLA 13** se recogen los resultados de las longitudes del estanque (Le), de la rampa (L_R), volumen de módulo (V_m) y potencia disipada (Pd), para el rango de pendientes considerado $[0.03 \leq \text{tg}\beta \leq 0.07]$.

tg β	$L_R(\text{m})$	$Le(\text{m})$	Módulo	
			$V_m(\text{m}^3)$	$P_{dis}(\text{w/m}^3)$
0.07	21.4	3.57	2.3	261.0
0.06	25.0	4.17	2.7	223.7
0.05	30.0	5.00	3.3	186.4
0.04	37.5	6.25	4.1	149.1
0.03	50.0	8.33	5.5	111.8

TABLA 13. Para $Db=0.55\text{m}$, longitudes del estanque (Le), de la rampa (L_R), volumen de módulo (V_m) y potencia disipada (Pd), para el rango de pendientes $0.03 \leq \text{tg}\beta \leq 0.07$.

¹⁴ La potencia disipada es una medida indirecta de las turbulencias y la incorporación de aire que conllevan -en la literatura se suele referir a esto como "aguas blancas"- . La presencia de dichas "aguas blancas" es un factor que limita la transitabilidad de los dispositivos de paso. En el protocolo de cálculo presentado, los cálculos de potencia disipada se hacen para el conjunto del módulo. Sin embargo, para el caso de rampa de flujo ascendente, es evidente que las "aguas blancas" se concentran en las zonas de velocidades altas, mientras que en las zonas de reflujo su presencia es mucho menor, zonas que, lógicamente, escogerá el pez para el remonte. Es pues razonable asumir que el valor de potencia disipada máxima (**TABLA 1**) podrá ser, para este tipo de rampas, mayor que los valores recomendados para dispositivos de paso en los que las turbulencias se presentan de manera homogénea.

5. Dimensionado

Teniendo en cuenta que para la especie objetivo $Pd(W/m^3) \leq 200$, la mayor pendiente posible sería del 5%, con una longitud de rampa de 30m.

Para valorar otras opciones, se repiten los cálculos para un Db mayor:

DATOS:

- Dimensión del bolo en la dirección transversal al flujo: **$Db = 0.65m$**
- Anchura del bolo: $Ab = 0.45m$
- $\alpha = 40^\circ$

RESULTADOS:

✓ $Am = 2.32m$

Para el nuevo valor de Db , la **TABLA 14** recoge los resultados de las longitudes del estanque (Le), de la rampa (L_R), volumen de módulo (Vm) y potencia disipada (Pd), para el rango de pendientes considerado $[0.03 \leq tg\beta \leq 0.07]$.

tg β	$L_R(m)$	$Le(m)$	Módulo	
			$Vm(m^3)$	$Pdis(w/m^3)$
0.07	21.4	3.57	2.7	227.3
0.06	25.0	4.17	3.1	194.8
0.05	30.0	5.00	3.8	162.3
0.04	37.5	6.25	4.7	129.9
0.03	50.0	8.33	6.3	97.4

TABLA 14. Para $Db=0.65m$, longitudes del estanque (Le), de la rampa (L_R), volumen de módulo (Vm) y potencia disipada (Pd), para el rango de pendientes $0.03 \leq tg\beta \leq 0.07$.

Para $Db=0.65m$, la pendiente puede llegar al 6%, con una longitud de la rampa de 25m.

Se aceptan estos valores para el dimensionado final.

5.3.4 FASE 4. OBTENCIÓN DEL RANGO FUNCIONAL DE CAUDALES.

¿Qué hace falta?

Los valores de H_b , h_{az} , Δh , Nm y $tg\beta$ obtenidos en las fases anteriores considerando Q_{RMIN} y el espesor en coronación del azud (e) y su longitud (L_{az}).

¿Qué se obtiene?

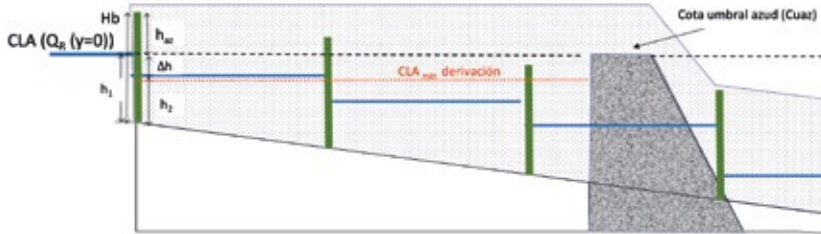
Manteniendo la hipótesis de régimen uniforme, para la rampa dimensionada, obtener los caudales $Q_R(y=0)$, Q_{RMAX} y $Q_{az}(h_{az})$

¿Para qué sirve?

Para determinar el rango de caudales en la rampa para los que es funcional $[Q_{RMIN} \leq Q_{RAMPA} \leq Q_{RMAX}]$, el rango para el que Qd es desagüado sólo por la rampa $[Q_{RMIN} \leq Qd \leq Q_R(y=0)]$ y el Qd máximo para el que es funcional la rampa $[Qd_{MAX} = Q_{RMAX} + Q_{az}(h_{az})]$

5.3.4.a Secuencia de cálculo para $Q_R(y=0)$:

En la FIGURA 21 se presentó la situación de la lámina de agua para el caso ahora considerado. Se representa de nuevo aquí para facilitar la interpretación de la secuencia de cálculo propuesta.



- a.1.- Para los valores de Hb , h_{az} ya asumidos, se calculan los nuevos valores de h_1 y h_2 . Δh no es necesario recalcarlo ya que en régimen uniforme varía.

$$h_1(y=0) = Hb - h_{az}$$

$$h_2(y=0) = h_1(y=0) - \Delta h$$

- a.2.- Con las ecuaciones 2 y 3 se calcula Q_v y C_s , y conocido el número de módulos y con él el número de ventanas, se obtiene el caudal en la rampa $Q_R(y=0) = Q_v(y=0) \cdot 2Nm$

- a.3.- Para la pendiente seleccionada en la fase 3, se calcula la potencia disipada para el módulo.

- a.4.- Si el valor de la potencia disipada es mayor que el máximo admisible para la especie objetivo, el usuario puede volver al paso a.3 de la fase 3 para seleccionar otra pendiente con la que dimensionar la rampa.

5.3.4.b Ejemplo:

DATOS:

$$- Hb = 0.75 \text{ m}$$

$$- h_{az} = 0.15$$

$$- \Delta h = 0.25 \text{ m}$$

$$- Nm = 1$$

$$- tg\beta = 0.06$$

RESULTADOS:

$$\checkmark h_1[Q_R(y=0)] = 0.6 \text{ m}$$

$$\checkmark h_2[Q_R(y=0)] = 0.35 \text{ m}$$

$$\checkmark Q_R(y=0) = 0.355 \text{ m}^3/\text{s}$$

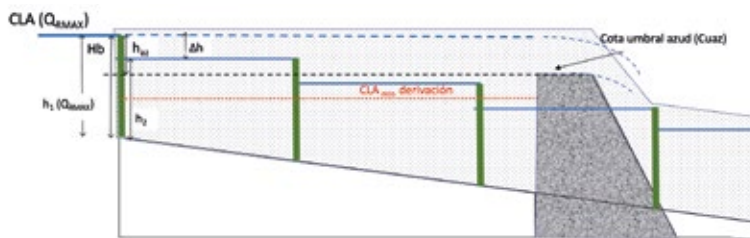
			Módulo	
$tg\beta$	$L_R(\text{m})$	$L_e(\text{m})$	$V_m(\text{m}^3)$	$P_{dis}(\text{w}/\text{m}^3)$
0.07	21.4	3.57	3.9	221.0
0.06	25.0	4.17	4.6	189.5
0.05	30.0	5.00	5.5	157.9
0.04	37.5	6.25	6.9	126.3
0.03	50.0	8.33	9.2	94.7

TABLA 15. Para $Q_R(y=0)=0.355 \text{ m}^3/\text{s}$, volumen de módulo (V_m) y potencia disipada (P_d), para el rango de pendientes $0.03 \leq tg\beta \leq 0.07$

Como para la pendiente seleccionada (6%), la potencia disipada sigue siendo inferior a la máxima establecida para la especie objetivo, no es necesario redimensionar.

5.3.4.C Secuencia de cálculo para Q_{RMAX} , $Q_{az}(h_{az})$ y Qd_{MAX}

En la FIGURA 22 se presentó la situación de la lámina de agua para el caso ahora considerado. Se representa de nuevo aquí para facilitar la interpretación de la secuencia de cálculo expuesta.



- c.1.- Se calculan los nuevos valores de h_1 y h_2 , ya que en régimen uniforme Δh no varía.

$$h_1(Q_{RMAX}) = Hb$$

$$h_2(Q_{RMAX}) = h_1(Q_{RMAX}) - \Delta h$$

- c.2.- Con las ecuaciones 2 y 3 se calcula C_s y Q_v , y sabiendo el número de módulos y con él el número de ventanas, se obtiene el caudal en la rampa $Q_{RMAX} = Q_v(Q_{RMAX}) \cdot 2Nm$

- c.3.- Para la pendiente seleccionada, se calcula la potencia disipada para el módulo.

- c.4.- Si el valor de la potencia disipada es mayor que el máximo admisible para la especie objetivo, el usuario puede volver al paso a.3 de la fase 3 para seleccionar otra pendiente con la que dimensionar la rampa.

- c.5.- Conocido el espesor en coronación del azud (e) y su longitud (L_{az}), se calcula el caudal que vierte el azud para una carga $y_{az} = h_{az}$:

$$Q_{az}(y_{az}) = 1.7 \cdot C_{s_{az}} \cdot y_{az}^{1.5} \cdot L_{az}$$

$$\text{siendo: } C_{s_{az}} = \begin{cases} 0,75 + \frac{0,1}{e/y_{az}} & \text{si } \frac{e}{y_{az}} > 3 \\ 0,7 + \frac{0,185}{e/y_{az}} & \text{si } \frac{e}{y_{az}} \leq 3 \end{cases}$$

- c.6.- Se obtiene $Qd_{MAX} = Q_{RMAX} + Q_{az}(h_{az})$

5.3.4.d Ejemplo:

DATOS:

- Para la rampa, los mismos que los utilizados antes para calcular $Q_r(y=0)$
- Para el azud:
 - Espesor en coronación: $e=0.5m$
 - Longitud del azud: $L_{az}=30m$

RESULTADOS:

- ✓ $h_1(Q_{RMAX}) = 0.75\text{m}$
- ✓ $h_2(Q_{RMAX}) = 0.5\text{m}$
- ✓ $Q_{RMAX} = 0.46\text{ m}^3/\text{s}$
- ✓ $Q_{az}(h_{az}) = 2.31\text{ m}^3/\text{s}$
- ✓ $Qd_{MAX} = 2.77\text{ m}^3/\text{s}$

tgβ	L _R (m)	L _e (m)	Módulo	
			V _m (m ³)	P _{dis} (w/m ³)
0.07	21.4	3.57	5.2	219.8
0.06	25.0	4.17	6.1	188.4
0.05	30.0	5.00	7.3	157.0
0.04	37.5	6.25	9.1	125.6
0.03	50.0	8.33	12.1	94.2

TABLA 16. Para $Q_{RMAX}=0.46\text{ m}^3/\text{s}$, volumen de módulo (V_m) y potencia disipada (P_d), para el rango de pendientes $0.03 \leq \text{tg}\beta \leq 0.07$

Para la pendiente seleccionada (6%), la potencia disipada sigue siendo inferior a la máxima establecida para la especie objetivo. No es necesario redimensionar.

El rango de caudales para los que la rampa dimensionada es funcional, se resume en la **TABLA 17**.

TABLA 17. Rango de caudales para los que la rampa dimensionada es funcional

ESCENARIO	DESAGÜE de Qd	RANGO DE CAUDALES Qd	VALORES OBTENIDOS (m ³ /s)
1	Sólo por rampa.	$Q_{RMIN} \leq Qd \leq Q_R(y=0)$	$Q_{RMIN} = 0.25$ $Q_R(y=0) = 0.35$
2	Por rampa y azud. No hay ahogamiento de bolos.	$Q_R(y=0) < Qd \leq \overbrace{Q_{RMAX} + Q_{az}(h_{az})}^{Qd_{MAX}}$ RAMPa RAMPa AZUD	$Q_{RMAX} = 0.46$ $Q_{az}(h_{az}) = 2.31$ $Qd_{MAX} = 2.77$

Si el usuario dispone de la curva de caudales clasificados para el período prerreproductivo -o el periodo para el que se quiera valorar la funcionalidad de la rampa-, puede obtener los percentiles de excedencia que corresponden a los caudales Q_{RMIN} y Qd_{MAX} .

Sea A% el percentil de excedencia correspondiente¹⁵ a Q_{RMIN} y B% el correspondiente a Qd_{MAX} .

El porcentaje de tiempo que, como promedio, la rampa será funcional dentro del período considerado es: A%-B%.

El número de días que, como promedio, la rampa será funcional dentro del período considerado es: [(A%-B%)*Número de días del período]/100.

¹⁵ El caudal Q_{RMIN} es igualado o superado, como promedio, el A% de los días del período considerado.

5.3.5 FASE 5. EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO EN RÉGIMEN NO UNIFORME.

Qué hace falta?

El dimensionado de la rampa obtenido en las fases anteriores.

Q_{RMAX}

¿Qué se obtiene?

Los valores de velocidad en las ventanas de flujo de cada hilada, asumiendo la hipótesis de régimen no uniforme.

¿Para qué sirve?

Para evaluar el comportamiento en régimen no uniforme de la rampa y valorar su funcionalidad en esta situación.

5.3.5.a Introducción

En las fases anteriores, con la hipótesis de régimen uniforme, y para cada uno de los tres caudales considerados [Q_{RMIN} ; $Q_R(y=0)$; Q_{RMAX}], se ha obtenido, para cada caso, el valor de h_2 que, por asumirse régimen uniforme, se acepta constante en todas las hiladas.

Pero ¿qué pasa si ese valor cambia en la hilada inferior?

Esta situación es muy plausible, ya que, aunque se disponga de un estanque adicional que permita un cierto control entre la última hilada y el río, los calados en dicho estanque estarán condicionados por el caudal circulante en el río y por las condiciones de contorno en el tramo del río inmediato aguas abajo de la rampa, condiciones que no son fáciles de controlar y que están sometidas a los cambios propios de la dinámica fluvial.

Si h_2 toma en la hilada de aguas abajo un valor distinto al que corresponde a régimen uniforme (h_2^U), cambian los valores de h_2 en el resto de hiladas, y con ellos, se producen cambios en Δh . Por tanto, los valores de calados mínimos en la rampa y velocidades máximas cambian respecto a los valores correspondientes a régimen uniforme (recuérdese que el calado mínimo viene dado por h_2 y que $v_{max} = \sqrt{2g\Delta h}$, lo que puede comprometer la funcionalidad del dispositivo de paso).

Por tanto, es importante considerar en el dimensionado de la rampa la hipótesis de flujo no uniforme (Fuentes-Pérez *et al.*, 2016; Fuentes-Pérez *et al.*, 2018).

En la FIGURA 23 se presenta la situación con flujo uniforme (U) y los dos casos que pueden manifestarse para ese mismo caudal, pero con flujo no uniforme. Las hiladas de la rampa se numeran de aguas arriba a aguas abajo.

- M1: cuando el valor de h_2 en la hilada n es mayor que el que corresponde a régimen uniforme [$h_{2,n}^{noU} > h_2^U$].
- M2: cuando el valor de h_2 en la hilada n es menor que el que corresponde a régimen uniforme [$h_{2,n}^{noU} < h_2^U$].

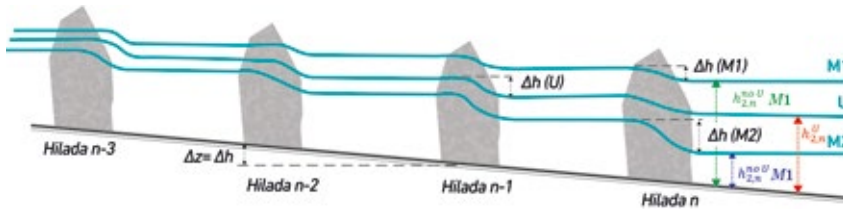


FIGURA 23

Perfiles de lámina de agua en régimen uniforme (U), $[\Delta h(U) = \Delta z]$, y no uniforme con remanso tipo M2 $[\Delta h(M2) > \Delta z]$, y remanso tipo M1 $[\Delta h(M1) < \Delta z]$

En ambos casos, el sistema tiende, aguas arriba, al valor h_2 del régimen uniforme, que alcanzará dependiendo del número de hiladas y del valor absoluto de la diferencia entre $h_{2,n}^{no U}$ y h_2^U : $[ABS(h_{2,n}^{no U} - h_2^U)]$

Considerando la funcionalidad de la rampa, la situación más comprometida es M2, ya que los valores de Δh que se generan en las hiladas inferiores son mayores que el valor de Δh del régimen uniforme $[\Delta h(M2) > \Delta h(U) > \Delta h(M1)]$. Recuérdese que Δh determina la velocidad máxima que puede esperarse en la ventana de flujo, por tanto, $V_{max}(M2) > V_{max}(U) > V_{max}(M1)$, al menos en las hiladas inferiores.

Puede entonces ocurrir que la rampa deje de ser funcional: $V_{max}(M2) > V_{max}$ (especie objetivo).

5.3.5.b Recomendaciones para el estanque de encuentro

Para evitar que esta situación se presente o, al menos conseguir que la probabilidad de que ocurra se acote, es muy importante disponer un estanque final -estanque de encuentro- que vincule la rampa con el cauce del río controlando el valor de $h_{2,n}$.

Ese vínculo debe establecerse de manera que, cuando se presente una situación del tipo M2, favorezca que $ABS(h_{2,n}^{no U} - h_2^U)$ no sea muy grande.

En el diseño del estanque final o de encuentro, es recomendable:

- Una longitud del orden de 1.5 o 2 veces la de los estanques de la rampa -para ofrecer una holgada capacidad de disipación de energía-, ofreciendo a la ictiofauna un punto de inicio cómodo para el ascenso de la rampa.
- Lecho horizontal dispuesto, al menos, 0.3 metros por debajo de la cota del lecho del río. De esta forma se cuenta con un volumen para posibles sedimentos, que permite distanciar las tareas de mantenimiento y aporta una profundidad adicional que mejora el resguardo de los peces frente a predadores.
- Para delimitarlo, utilizar bolos que en su cota superior alcancen, al menos, la cota de la lámina de agua h_2^U de la hilada inferior correspondiente al caudal $Q_R(y=0)$.
- En el 50% de las ventanas de flujo de este estanque debe reducirse su capacidad de desagüe entre un 20 y un 30%. Esta reducción puede conseguirse disminuyendo la anchura de la ventana en ese porcentaje respecto a la que presentan las ventanas de la rampa.

- Si esa opción no es aconsejable -porque podría dificultar la entrada de los peces y/o limitar la capacidad de autolimpieza del estanque-, podría disponerse un zócalo (ver apartado 5.3.6) que reduzca en ese porcentaje la capacidad de desagüe. Se garantiza así que, para todo el rango $[Q_{RMIN} \leq Qd \leq Q_R(y=0)]$, los valores de $h_{2,n}^{no U}$ condicionados por el estanque de encuentro, serán siempre mayores o iguales que el valor correspondiente en régimen uniforme, lo que implica que se presentará una situación M1 ó U.

5.3.5.c Escenarios para la evaluación

Para evaluar la funcionalidad de la rampa en régimen no uniforme, el usuario debe definir los escenarios para los que desea hacer esa evaluación.

Si el estanque de encuentro se ha dimensionado siguiendo las indicaciones recogidas, es razonable asumir que para el rango de caudales $Q_{RMIN} \leq Qd \leq Q_R(y=0)$, de presentarse régimen no uniforme, se daría para la situación M1, con lo que no se plantearían problemas de transitabilidad.

La situación más comprometida podría ocurrir para caudales comprendidos en el rango $Q_R(y=0) < Qd \leq Qd_{MAX}$, ya que, en ese rango, aunque hay vertido por el azud, el calado en el cauce no garantiza que en el estanque de encuentro se alcancen calados suficientes como para excluir la posibilidad de que se presente un régimen no uniforme tipo M2 (ver FIGURA 23)

El caso más desfavorable -entendiendo como tal aquel en el que el valor de Δh será máximo en la hilada inferior-, se corresponde con la siguiente hipótesis:

- Por la rampa circula el caudal máximo del rango: $Q = Q_{RMAX}$.
- En la hilada inferior, el valor de $h_{2,n}^{no U}$ será igual al que en régimen uniforme corresponde al caudal $Q_R(y=0)$: $h_{2,n}^{no U}(Q_{RMAX}) = h_2^U(Q_R(y=0))$

Este valor de $h_{2,n}^{no U}$ en la hilada inferior $[h_2^U(Q_R(y=0))]$ está garantizado si se ha seguido la recomendación del tamaño de los bolos que delimitan el estanque de encuentro. Es un valor muy conservador, porque implica asumir que cuando $Qd = Qd_{MAX}$, el calado en la última hilada de la rampa es igual al que cuando sólo vierte la rampa con $Qd = Q_R(y=0)$. En consecuencia, los resultados obtenidos asumiendo esta hipótesis sitúan la evaluación holgadamente del lado de la seguridad.

Una hipótesis menos estricta es asumir $h_{2,n}^{no U}(Q_{RMAX}) > h_2^U(Q_R(y=0))$. Puede utilizarse:

$$h_{2,n}^{no U}(Q_{RMAX}) = 0.6 - 0.8 * h_2^U(Q_{RMAX})$$

siempre que, lógicamente, el valor de $h_{2,n}^{no U}(Q_{RMAX})$ así obtenido sea mayor que $h_2^U(Q_R(y=0))$.

Los valores de $h_2^n(Q_{RMAX})$ y $h_2^U(Q_R(y=0))$ se han obtenido en la fase 4.

5.3.5.d Secuencia de cálculo para Q_{RMAX} en régimen no uniforme:

El procedimiento a seguir requiere de la aplicación de las fórmulas ya conocidas:

$$Qv = \frac{2}{3} * \sqrt{2g} * Cs * AvH * (h_1)^{1.5}$$

$$\text{con y } h_1 = h_2 + \Delta h; \quad Cs = \beta_0 * \left[1 - \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^{1.5} \right]^{\beta_1} \quad \beta_0 = 0.812 \quad \beta_1 = 0.335$$

El caudal que debe evacuar cada ventana de flujo es un valor fijo: $Q_{RM\Delta V} = Q_{RM\Delta X} / n^\circ \text{ ventanas}$

En cada hilada i [$i=n^\circ$ de la hilada, siendo 1 la hilada situada más aguas arriba y n la de más aguas abajo], se conocerá el valor de $h_{2,i}$ obtenido a partir de los cálculos de la hilada $i+1$. Los bolos que delimitan el estanque de encuentro no se consideran como hiladas de la rampa.

Paso 1: Para la hilada inferior (hilada n), el valor de $h_{2,n}^{no U}(Q_{RM\Delta X})$ lo debe suponer el usuario considerando las alternativas ofrecidas en el epígrafe anterior:

$$Ec. 33 \quad h_{2,n}^{no U}(Q_{RM\Delta X}) = \begin{cases} 0.6 - 0.8 * h_2^U(Q_{RM\Delta X}) \\ h_2^U(Q_R(y=0)) \end{cases}$$

Paso 2: El valor de $\Delta h_n^{no U}$ se obtiene resolviendo por aproximaciones sucesivas la ecuación 2, dando valores de $\Delta h_n^{no U}$ hasta que se cumpla:

$$ABS[Qv(h_{2,n}^{no U}, \Delta h_n^{no U}) - Q_{RM\Delta V}] \leq \text{umbral} \text{ (a establecer por el usuario).}$$

Una vez obtenido $\Delta h_n^{no U}$ se estima la velocidad máxima en la ventana de la hilada n :
 $V_{max,n} = \sqrt{2g * \Delta h_n^{no U}}$

Paso 3: A continuación, se estima el valor Δh en la siguiente hilada ($\Delta h_{n-1}^{no U}$):

- Se calcula $h_{2,n-1}^{no U} = (h_{2,n}^{no U} + \Delta h_n^{no U}) - \Delta h^U$, siendo Δh^U el seleccionado en la fase 1 y que se corresponde con Δz (FIGURA 23).
- Se resuelve la ecuación 2, para $h_{2,n-1}^{no U}$ dando valores de $\Delta h_{n-1}^{no U}$ hasta que se cumpla $ABS[Qv(h_{2,n-1}^{no U}, \Delta h_{n-1}^{no U}) - Q_{RM\Delta V}] \leq \text{umbral}$.
- Una vez obtenido $\Delta h_{n-1}^{no U}$ se estima la velocidad máxima en la ventana de la hilada $n-1$: $V_{max,n-1} = \sqrt{2g * \Delta h_{n-1}^{no U}}$

Paso 4: Se repite ese proceso hacia aguas arriba, hasta llegar a la hilada superior (hilada 1).

De esta forma, el usuario puede obtener todos los valores de $\Delta h_i^{no U}$ $i=1 \dots n$ y las correspondientes velocidades $V_{max,i}$ $i=1 \dots n$. Así podrá valorar la funcionalidad de la rampa en régimen no uniforme considerando las capacidades de nado de la especie(s) objetivo *versus* $V_{max,i}$ $i=1 \dots n$

5.3.5.e Ejemplo:

DATOS:

- Se considera la hipótesis más desfavorable para el calado aguas abajo de la última hilada: $h_{2,n}^{no U}(Q_{RM\Delta X}) = h_2^U(Q_R(y=0)) = 0.35\text{m}$

RESULTADOS:

En la TABLA 18 se presentan los resultados correspondientes a los valores de $h_{2,i}^{no U}(Q_{RM\Delta X})$, $h_{1,i}^{no U}(Q_{RM\Delta X})$, Δh_i y $V_{max,i}$ ($i=1 \dots n$). Se han resaltado en rojo los valores de $V_{max,i}$ que no cumplen con el condicionado establecido para la especie objetivo.

En la FIGURA 24 se representan los valores de Δh_i .

HILADA (i)	X	h_2 (m)	h_1 (m)	Δh (m)	v (m/s)
n=7	25,0	0,35	0,70	0,35	2,6
6	20,9	0,45	0,73	0,28	2,4
4	12,5	0,49	0,75	0,26	2,3
2	4,2	0,50	0,75	0,25	2,3
1	0,0	0,50	0,75	0,25	2,2
2	4,2	0,50	0,21	0,25	2,2
1	0,0	0,50	0,20	0,25	2,2

TABLA 18. Valores de los calados aguas abajo (h_2) y arriba (h_1) del bolo, Δh y la velocidad. Corresponden a régimen no uniforme, circulando Q_{RMAX} y con $h_{2,n}^{no\ U}(Q_{RMAX}) = h_2^U(Q_R(y=0)) = 0.35m$



FIGURA 24 Evolución de valores de Δh a lo largo de la rampa para régimen no uniforme circulando Q_{RMAX} y con $h_{2,n}^{no\ U}(Q_{RMAX}) = h_2^U(Q_R(y=0)) = 0.35m$ (Los puntos se corresponden con la situación de las hiladas de bolos)

Se repiten los cálculos para una hipótesis menos conservadora, asumiendo que el caudal vertido por el azud contribuye a elevar la lámina de agua en el estanque de encuentro

DATOS:

- $h_{2,n}^{no\ U}(Q_{RMAX}) = 0.8 * h_2^U(Q_{RMAX}) = 0.4m$
- Para la condición $ABS[Qv(h_{2,n}^{no\ U}, \Delta h_n^{no\ U}) - Q_{RMAXV}] \leq \text{umbral}$, se ha considerado umbral=0.003m

RESULTADOS:

En la TABLA 19 se presentan los resultados correspondientes a los valores de $h_{2,n}^{no\ U}(Q_{RMAX})$, $h_{1,n}^{no\ U}(Q_{RMAX})$, Δh_n y $Vmax,n$. Se han resaltado en rojo los valores de $Vmax,n$ que no cumplen con el condicionado establecido para la especie objetivo.

HILADA (i)	X	h_2 (m)	h_1 (m)	Δh (m)	v (m/s)
n=7	25,0	0,4	0,71	0,31	2,5
6	20,9	0,46	0,74	0,28	2,3
5	16,7	0,49	0,74	0,26	2,3
4	12,5	0,49	0,75	0,25	2,2
3	8,3	0,50	0,75	0,25	2,2
2	4,2	0,50	0,75	0,25	2,2
1	0,0	0,50	0,75	0,25	2,2

TABLA 19. Valores de los calados aguas abajo (h_2) y arriba (h_1) del bolo, Δh y la velocidad. Corresponden a régimen no uniforme, circulando Q_{RMAX} y con $h_{2,n}^{no\ U}(Q_{RMAX}) = 0.8 * h_2^U(Q_{RMAX}) = 0.4m$. En rojo los valores de $Vmax,n$ que no cumplen con el condicionado establecido para la especie objetivo.

En la FIGURA 25 se representan los valores de Δh_i .



FIGURA 25

Evolución de valores de Δh a lo largo de la rampa para régimen no uniforme circulando Q_{RMAX} y con $h_{2,n}^{no U}(Q_{RMAX}) = 0.8 * h_2^U(Q_{RMAX}) = 0.4m$ (Los puntos se corresponden con la situación de las hiladas de bolos)

Aunque para esta hipótesis también se supera la V_{max} en las tres últimas hiladas, a diferencia de la anterior, sólo en la última la velocidad supera más de un 10% el valor máximo. Podría darse por aceptable el dimensionado.

5.3.6 DIMENSIONADO PARA EL CASO DE VENTANA DE FLUJO CON UMBRAL DE FONDO O ZÓCALO.

Cuando Q_{RMIN} es bajo, puede ocurrir que, incluso con un solo módulo, no se obtengan valores de diseño de h_2 suficientes para superar el umbral establecido para la especie objetivo.

En esos casos, para una AvG dada, la disposición de un umbral de fondo o zócalo (ver FIGURA 26) puede permitir:

- Para una caudal dado, generar calados mayores.
- Mantener un calado dado con menor caudal.

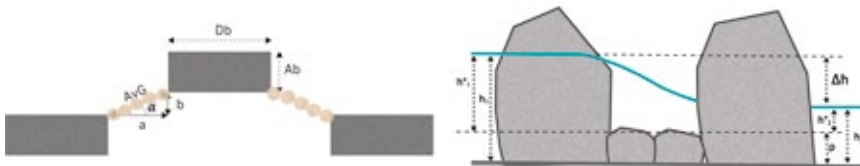


FIGURA 26

Vista en planta y alzado lateral de módulo con zócalo entre bolos.

Sin embargo, si se dispone ese zócalo, el caudal Q_{RMAX} será menor que el que podría circular en esa misma rampa sin zócalo, con lo que el rango de caudales de funcionalidad de la rampa disminuye.

También condiciona el valor del calado real de paso en la ventana de flujo: $h_2^* = h_2 - p$, que debe establecerse de manera que $h_2^* \geq \text{Max}(0.1\text{m}; \text{Longitud dorso} - \text{ventral})$

5.3.6.a Secuencia de cálculo

El protocolo de cálculo es análogo al presentado anteriormente. La única salvedad es que la ecuación que permite cuantificar el caudal en la ventana de gasto debe incluir el valor de la altura del zócalo (p) (Fuentes-Pérez *et al.*, 2016):

$$Qv(p) = \frac{2}{3} * \sqrt{2g} * Cs * AvH * (h_1 - p)^{1.5}$$
$$Cs(p) = \beta_0 * \left[1 - \left(\frac{h_2 - p}{h_1 - p} \right)^{1.5} \right]^{\beta_1} \quad \beta_0 = 0.812 ; \quad \beta_1 = 0.335$$

5.3.5.e Ejemplo:

Fase 1:

En la fase 1 de dimensionado, se descartó disponer dos módulos en la rampa: se obtuvo la TABLA 11 que recoge las combinaciones de (h_2 ; Δh) que ofrecen valores de $AvG \geq AvG_{min}$. El valor más alto de Δh válido ($\Delta h=0.12\text{m}$) era muy bajo respecto al máximo compatible con la velocidad máxima de la especie objetivo ($\Delta h_{max}=0.25\text{m} \Rightarrow V_{max}=2.2\text{m/s}$). Asumirlo implicaba 8 hiladas por cada metro a salvar.

Ahora se valorará la posibilidad de construirla con dos módulos, disponiendo un zócalo en las ventanas de flujo.

Asumiendo una **altura de zócalo (p) de 0.1m**, y para **dos módulos**, el rango de combinaciones de (h_2 ; Δh) que ofrecen valores de los valores de $AvG \geq AvG_{min}$ es mucho más amplio (TABLA 20).

Valores de Av GEOMÉTRICA(m)					
		h ₂ (m)			
Δh(m)	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4
0.1	0.36	0.28	0.23		
0.12	0.31	0.25	0.20		
0.15	0.26	0.21			
0.17	0.24				
0.2	0.21				
0.22					
0.25					
0.3					
0.32					
0.35					

TABLA 20. Combinaciones de (h_2 ; Δh) que, con dos módulos, zócalo de 0.1 m y para $Q_{RMIN}=0.25\text{m}^3/\text{s}$, ofrecen valores de $AvG \geq AvG_{min} \geq 0.2\text{m}$

En lo que sigue, se destacarán en negrita los valores de las variables que resulten distintos de los obtenidos en el caso de un solo módulo.

Fase 2:**DATOS:**

- $C_e=1000.8$
- $C_{uaz}=1002.9$
- $h_{az}=0.15\text{m}$
- De la tabla resultado de la fase anterior, se selecciona la combinación:
 $h_2=0.2\text{m}$; **$\Delta h=0.2\text{m}$** (lo que supone $V_{max}=2\text{m/s}$)

RESULTADOS:

Diferencia de cota entre umbral del azud y lámina de agua aguas arriba de la rampa:

$y=0.1\text{m}$. Valor aceptable para que en rango de caudales vertido sólo por rampa sea significativo.

Calado aguas arriba del bolo:	$h_1=0.4\text{m}$
Altura total a salvar:	$H_T=2.1\text{m}$
Altura de la rampa:	$H_R=1.6\text{m}$
Número de hiladas:	$N_{hil}=9$
Número de estanques:	$N_{est}=8$
Altura vista del bolo:	$H_b=0.65\text{m}$

Fase 3:**DATOS:**

- Dimensión del bolo en la dirección transversal al flujo: **$Db=0.55\text{m}$**
- Anchura del bolo: $Ab=0.45\text{m}$
- $\alpha=40^\circ$

RESULTADOS:

✓ **$Amb=1.7\text{m}$**

En la **TABLA 21** se recogen los resultados de las longitudes del estanque (L_e), de la rampa (L_R), volumen de módulo (V_m) y potencia disipada (P_d), para el rango de pendientes considerado [$0.04 \leq \text{tg}\beta \leq 0.08$].

Módulo BORDE				
$\text{tg}\beta$	$L_R(\text{m})$	$L_e(\text{m})$	$V_m(\text{m}^3)$	$P_{dis}(\text{W}/\text{m}^3)$
0.08	20.0	2.50	1.3	192.7
0.07	22.9	2.86	1.5	168.6
0.06	26.7	3.33	1.7	144.5
0.05	32.0	4.00	2.0	120.4
0.04	40.0	5.00	2.5	96.3

TABLA 21. Para $Db=0.55\text{m}$, longitudes del estanque (L_e), de rampa (L_R), volumen de módulo (V_m) y potencia disipada (P_d), para el rango de pendientes $0.04 \leq \text{tg}\beta \leq 0.08$

Teniendo en cuenta que para la especie objetivo $P_d(\text{W}/\text{m}^3) \leq 200$, la mayor pendiente posible sería del **8%**, con una longitud de rampa de **20m**.

Fase 4:**a) Secuencia de cálculo para $Q_R(y=0)$** **DATOS:**

- $Hb = 0.65\text{m}$

- $h_{az} = 0.15\text{m}$

- $\Delta h = 0.2\text{m}$

- $Nm = 2$

- $\text{tg}\beta = 0.08$

RESULTADOS:

- ✓ $h_1[Q_R(y=0)] = 0.5\text{m}$
- ✓ $h_2[Q_R(y=0)] = 0.3\text{m}$
- ✓ $Q_R(y=0) = 0.357\text{ m}^3/\text{s}$

Módulo BORDE				
$\text{tg}\beta$	$L_R(\text{m})$	$L_e(\text{m})$	$Vm(\text{m}^3)$	$Pdis(w/\text{m}^3)$
0.08	20.0	2.50	1.7	206.5
0.07	22.9	2.86	1.9	180.7
0.06	26.7	3.33	2.3	154.9
0.05	32.0	4.00	2.7	129.0
0.04	40.0	5.00	3.4	103.2

TABLA 22. Para $Q_R(y=0)=0.357\text{ m}^3/\text{s}$, volumen de módulo (Vm) y potencia disipada (Pd), para el rango de pendientes $0.04 \leq \text{tg}\beta \leq 0.08$

Como para la pendiente seleccionada (8%), la potencia disipada es sólo un 3% mayor que la máxima admisible, se asume que no es necesario redimensionar.

b) Secuencia de cálculo para Q_{RMAX} , $Q_{az}(h_{AZ})$ y Qd_{MAX} **DATOS:**

- Para la rampa los mismos que los utilizados antes para calcular $Q_R(y=0)$ en el paso anterior.
- Para el azud:
 - Espesor en coronación: $e=0.5\text{m}$
 - Longitud del azud: $L_{az}=30\text{m}$

RESULTADOS:

- ✓ $h_1(Q_{RMAX}) = 0.65\text{m}$
- ✓ $h_2(Q_{RMAX}) = 0.45\text{m}$
- ✓ $Q_{RMAX} = 0.53\text{ m}^3/\text{s}$
- ✓ $Q_{az}(h_{az}) = 2.31\text{ m}^3/\text{s}$
- ✓ $Qd_{MAX} = 2.84\text{ m}^3/\text{s}$

Módulo BORDE				
tgβ	L _R (m)	Le(m)	V _m (m ³)	P _{dis} (w/m ³)
0.08	20.0	2.50	2.3	221.0
0.07	22.9	2.86	2.7	193.4
0.06	26.7	3.33	3.1	165.8
0.05	32.0	4.00	3.7	138.1
0.04	40.0	5.00	4.7	110.5

TABLA 23. Para $Q_{RMAX}=0.53 \text{ m}^3/\text{s}$, volumen de módulo (V_m) y potencia disipada (P_d), para el rango de pendientes $0.04 \leq \text{tg}\beta \leq 0.08$

Para la pendiente seleccionada (8%), la potencia disipada supera sensiblemente la máxima establecida para la especie objetivo. Es necesario reducir la pendiente de la rampa, aumentar la anchura del estanque o ambas cosas.

Se asume una pendiente del 7%, sin más modificaciones, para la que se cumple, en todos los escenarios, la condición de potencia disipada máxima admisible.

Fase 5:

DATOS:

- Se considera la hipótesis más desfavorable para el calado aguas abajo de la última hilada: $h_{2,n}^{no U}(Q_{RMAX}) = h_2^U Q_R(y = 0) = 0.3\text{m}$

RESULTADOS:

En la TABLA 24 se presentan los resultados correspondientes a los valores de $h_{2,i}^{no U}(Q_{RMAX})$, $h_{1,i}^{no U}(Q_{RMAX})$, Δh_i y $V_{max,i}$ ($i=1 \dots n$).

En la FIGURA 27 se representan los valores de Δh_i .

HILADA (i)	X	h_2 (m)	h_1 (m)	Δh (m)	v(m/s)
n=9	23,0	0,3	0,53	0,23	2,1
8	20,0	0,33	0,54	0,21	2,0
7	17,2	0,34	0,55	0,21	2,0
6	14,3	0,35	0,55	0,20	2,0
5	11,5	0,35	0,55	0,20	2,0
4	8,6	0,35	0,55	0,20	2,0
3	5,7	0,35	0,55	0,20	2,0
2	2,9	0,35	0,55	0,20	2,0
1	0,0	0,35	0,55	0,20	2,0

TABLA 24. Para régimen no uniforme, dos módulos con zócalo, Q_{RMAX} y $h_{2,n}^{no U}(Q_{RMAX}) > h_2^U Q_R(y = 0)$, se presentan, para cada hilada, los valores de los calados aguas abajo (h_2) y arriba (h_1) del bolo, Δh y la velocidad correspondiente.



FIGURA 27
Para régimen no uniforme, dos módulos con zócalo, Q_{RMAX} y $h_{2,0}^u(Q_{RMAX}) > h_{2,0}^u(Q_R(y=0)) = 0.3m$, evolución de valores de Δh a lo largo de la rampa.

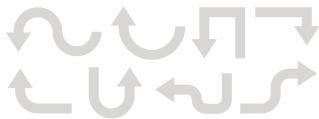
En ninguna hilada se supera la V_{max} (2.2m/s): el dimensionado puede aceptarse.

5.3.7 RESUMEN DEL DIMENSIONADO

Se presenta a continuación, de nuevo, los datos del caso, y los valores de las variables obtenidos para las dos opciones consideradas en el dimensionado:

CASO PRÁCTICO

- Caudal ecológico mínimo: $0.25\text{ m}^3/\text{s}$
- Velocidad máxima: $2.2\text{ m/s} \Rightarrow \Delta h \leq 0.25\text{m}$
- Calado mínimo: $0.2\text{m} \Rightarrow h_2 \geq 0.2\text{m}$
- Ancho de paso mínimo: $0.2\text{m} \Rightarrow AvG \geq 0.2\text{m}$
- Potencia disipada máxima: $200\text{W/m}^3 \Rightarrow Pd \leq 200\text{W/m}^3$
- Longitud del azul (L_{az}): 30m
- Espesor en coronación (e): 0.5m
- Cota de entrega de la rampa (C_e): 1000.8 msnm
- Cota del umbral del azul (C_{uaz}): 1002.9 msnm
- Diferencia de cota entre la del punto más alto de los bolos de la hilada superior y C_{uaz} (h_{az}): 0.15m





5. Dimensionado

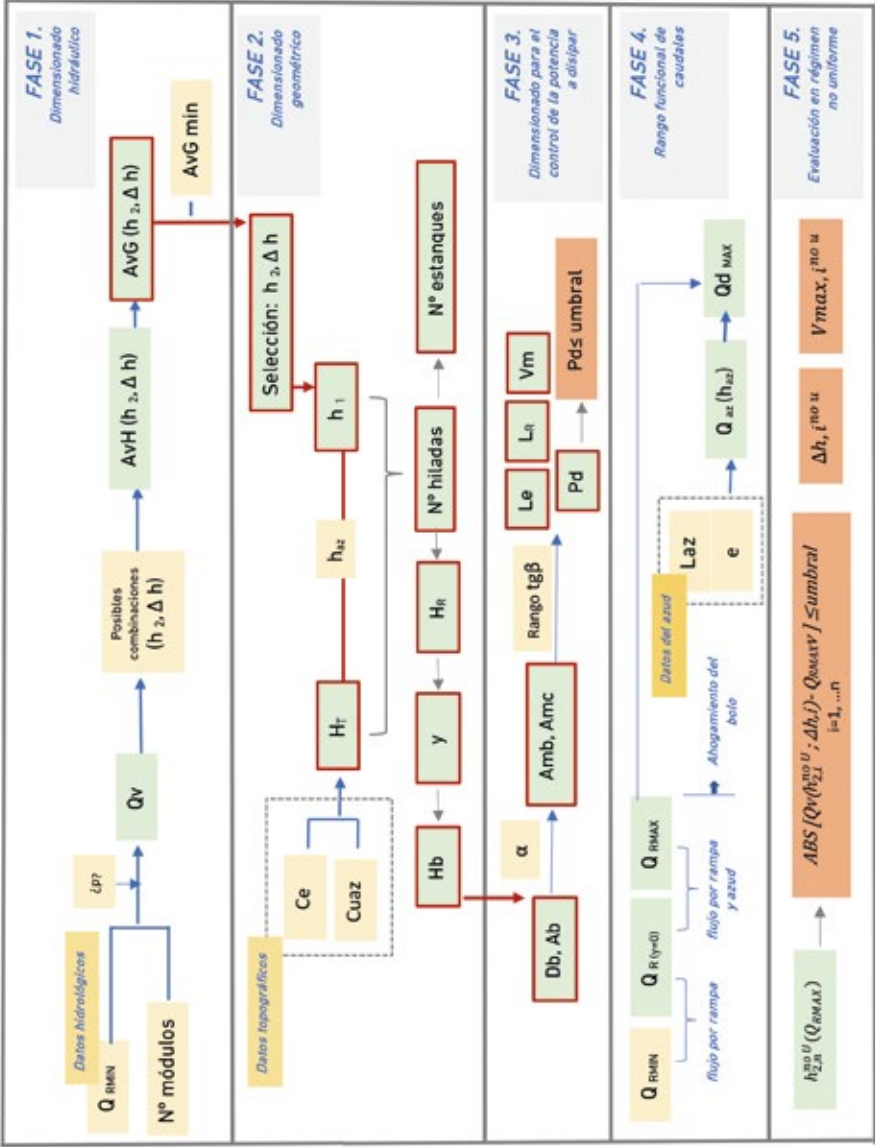
VARIABLE	Número de módulos	
	1 sin zócalo	2 con zócalo
p(m)	0	0.1
h ₂ (m)	0.2	0.2
Δh(m)	0.25	0.2
h _{az} (m)	0.15	0.15
V _{max} (m/s)	2.2	2
AvG(m)	0.24	0.21
AvH(m)	0.19	0.17
h ₁ (m)	0.45	0.4
y(m)	0.15	0.1
H _r (m)	2.1	2.1
H _a (m)	1.5	1.6
Nhil	7	9
Nest	6	8
Hb(m)	0.75	0.65
Db(m)	0.65	0.55
Ab(m)	0.45	0.45
α(°)	40	40
tgβ	0.06	0.07
Am(m)	2.32	
Amb(m)		1.7
A _{rampa} (m)	2.32	3.4
Le(m)	4.2	2.9
L _r (m)	25	23
Pd(w/m³)	195	169

TABLA 25. Valores de las variables obtenidos para $Q_{RMIN}=0.25m^3/s$ y las dos opciones consideradas en el dimensionado (1 módulo sin zócalo y 2 módulos con zócalo).

VARIABLE	Número de módulos	
	1 sin zócalo	2 con zócalo
Q _{RMIN} (m³/s)	0.25	0.25
Q _R (y=0)(m³/s)	0.35	0.36
Q _{RMAX} (m³/s)	0.46	0.53
Q _{az} (h _{az})(m)	2.31	2.31
Q _{dMAX} (m³/s)	2.77	2.84

TABLA 26. Valores de los caudales que definen los distintos rangos de funcionalidad de la rampa para las dos opciones consideradas en el dimensionado (1 módulo sin zócalo y 2 módulos con zócalo)

5.3.8 DIAGRAMA DE FLUJO







REFERENCIAS

06



- Baki, A. B. M. *et al.* (2017a) 'Rock-weir fishway I: flow regimes and hydraulic characteristics', *Journal of Ecohydraulics*. Taylor & Francis, 2(2), pp. 122–141. doi: 10.1080/24705357.2017.1369182.
- Baki, A. B. M. *et al.* (2017b) 'Rock-weir fishway II: design evaluation and considerations', *Journal of Ecohydraulics*. Taylor & Francis, 2(2), pp. 142–152. doi: 10.1080/24705357.2017.1369183.
- Baudoin, J. *et al.* (2015) 'Assessing the passage of The ICE protocol for ecological continuity Concepts , design and application', *The French National Agency for Water and Aquatic Environments*, p. 200.
- BAW/BfG (2015) 'Guideline Upstream Fishways on German Federal Waterways', p. 85.
- Bretón, F. *et al.* (2013) 'Flow in nature-like fishway and its relation to fish behaviour', *Canadian Journal of Civil Engineering*, 40(6), pp. 567–573. doi: 10.1139/cjce-2012-0311.
- Cassan, L. and Laurens, P. (2016) 'Design of emergent and submerged rock-ramp fish passes', *Knowledge & Management of Aquatic Ecosystems*, (417), p. 45. doi: 10.1111/jcmm.13761.
- Cooper, A. R. *et al.* (2017) 'Assessment of dam effects on streams and fish assemblages of the conterminous USA', *Science of the Total Environment*. Elsevier B.V., 586, pp. 879–889. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.02.067.
- Dodd, J. R., Cowx, I. G. and Bolland, J. D. (2017) 'Efficiency of a nature-like bypass channel for restoring longitudinal connectivity for a river-resident population of brown trout', *Journal of Environmental Management*. Elsevier Ltd, 204, pp. 318–326. doi: 10.1016/j.jenvman.2017.09.004.
- FAO/DVWK (2002) *Fish Passes: Design, Dimensions and Monitoring, Fish passes. Desing, dimensions and monitoring*. Edited by FAO. Rome.
- Franklin, P. *et al.* (2018) *Fish Passage Guidelines for structures up to 4 metres*. Edited by National Institute of Water & Atmospheric Research. Hamilton.
- Fuentes-Pérez, J. F. *et al.* (2016) 'Non-uniform hydraulic behavior of pool-weir fishways: A tool to optimize its design and performance', *Ecological Engineering*. Elsevier B.V., 86, pp. 5–12. doi: 10.1016/j.ecoleng.2015.10.021.
- Fuentes-Pérez, J. F. *et al.* (2017) 'Villemonte's approach: A general method for modeling uniform and non-uniform performance in stepped fishways', *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems*, (418). doi: 10.1051/kmae/2017013.
- Fuentes-Pérez, J. F. *et al.* (2018) '3D modelling of non-uniform and turbulent flow in vertical slot fishways', *Environmental Modelling and Software*, 99, pp. 156–169. doi: 10.1016/j.envsoft.2017.09.011.



- Fuller, M. R., Doyle, M. W. and Strayer, D. L. (2015) 'Causes and consequences of habitat fragmentation in river networks', *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1355(1), pp. 31–51. doi: 10.1111/nyas.12853.
- Marbello Pérez, R. (2005) 'Vertederos y Calibración de Vertederos de Medida, Universidad Nacional de Colombia', in *Manual de prácticas de laboratorio de hidráulica*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, p. 315.
- McIntyre, P. B. et al. (2015) *Conservation of migratory fishes in freshwater ecosystems, Conservation of Freshwater Fishes*. Edited by G. Closs, M. Krkosek, and J. Olden. Cambridge University Press. doi: 10.1017/cbo9781139627085.012.
- Mooney, D. M., Holmquist-Johnson, C. L. and Broderick, S. (2007) *Rock ramp design guidelines, US Department of the Interior*. Denver, Colorado: Bureau Reclamation Technical Service Center. Available at: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Rock+Ramp+Design+Guidelines#0%5Cnhttp://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Rock+ramp+design+guidelines#0>.
- Muraoka, K., Nakanishi, S. and Kayaba, Y. (2017) 'Boulder arrangement on a rocky ramp fishway based on the swimming behavior of fish', *Limnologica - Ecology and Management of Inland Waters*. Elsevier GmbH., 62, pp. 188–193. doi: 10.1016/j.limno.2017.02.004.
- O'Connor, J., Mallen-Cooper, M. and Stuart, I. (2015) *Performance, Operation and Maintenance Guidelines for Fishways and Fish Passage Works*. Technical Report Series No. 262 for the Water and Catchments Group, Department of Environment, Land, Water and Planning.
- Pedescoll et al. (2019) 'Performance of a Pool and Weir Fishway for Iberian Cyprinids Migration: A Case Study', *Fishes*, 4(3), p. 45. doi: 10.3390/fishes4030045.
- Pena, L. et al. (2018) 'Conversion of vertical slot fishways to deep slot fishways to maintain operation during low flows: Implications for hydrodynamics', *Sustainability (Switzerland)*, 10(7). doi: 10.3390/su10072406.
- Santos, J. M. et al. (2012) 'Ecohydraulics of pool-type fishways: Getting past the barriers', *Ecological Engineering*. Elsevier B.V., 48, pp. 38–50. doi: 10.1016/j.ecoleng.2011.03.006.
- Sanz-Ronda, F. J. et al. (2013) 'Pasos para peces : escalas y otros dispositivos de paso', *Notas técnicas del CIREF*, 7, p. 17.
- Tran, T. D. et al. (2016) 'Modelling nature-like fishway flow around unsubmerged obstacles using a 2D shallow water model', *Environmental Fluid Mechanics*. Springer Netherlands, 16(2), pp. 413–428. doi: 10.1007/s10652-015-9430-3.
- U.S. Fish and Wildlife Service (2017) *Fish Passage Engineering Design Criteria*. Hadley, Massachusetts: USFWS, Northeast Region R5.
- United States Department of Agriculture (2007) *Technical Supplement 14N Fish Passage and Screening Design, Stream Restoration Design Part 654, National Engineering Handbook*.
- Valbuena Castro, J. et al. (2016) *Manual para la evaluación de la funcionalidad de pasos para peces de estanques*. Valladolid: Confederación Hidrográfica del Duero.
- Wang, R. (2008) *Aspects of Design and Monitoring of Nature-Like Fish Passes and Bottom Ramps*. München: Technischen Universität München. Available at: <https://www.wb.bgu.tum.de/fileadmin/w00boi/www/Publikationen/Berichtshefte/Band118.pdf> (Accessed: 8 November 2018).



A1



ANEJOS

ANEJO I VARIABLES Y ECUACIONES



ANEJO 1: Variables y ecuaciones

Variables

SÍMBOLO	UNIDAD	DEFINICIÓN	CARÁCTER
a	m	Dimensión de la ventana de flujo en dirección transversal al flujo en la rampa	dependiente
Ab	m	Anchura del bolo o dimensión del bolo en la dirección del flujo en la rampa	independiente
Am	m	Anchura del módulo	dependiente
Amb	m	Anchura del módulo de borde	dependiente
Amc	m	Anchura del módulo de centro	dependiente
Arama	m	Anchura de la rampa	dependiente
AvG	m	Anchura de la ventana geométrica	dependiente
AvH	m	Anchura de la ventana hidráulica	dependiente
b	m	Dimensión de la ventana de flujo en la dirección del flujo en la rampa	dependiente
Cc		Coefficiente de contracción de la vena líquida.	coeficiente de cálculo
Ce	m	Cota del lecho en la entrega de la rampa	dato de partida
CLA min derivación	m	Cota mínima de la lámina de agua que debe haber en el paramento aguas arriba del azud para garantizar que se cumplen los requisitos de la derivación que el azud alimenta	dato de partida
CLA (Q_{RMIN})	m	Cota de lámina de agua aguas arriba de la rampa cuando circula Q_{RMIN}	dependiente
CLA (Q_{RMAX})	m	Cota de lámina de agua aguas arriba de la rampa cuando circula Q_{RMAX}	dependiente
CLA ($Q_R (y=0)$)	m	Cota de lámina de agua aguas arriba de la rampa cuando circula $Q_R (y=0)$	dependiente
$C_{s_{az}}$		Coefficiente de gasto en el azud	coeficiente de cálculo
C_s		Coefficiente de gasto en la ventana de flujo	coeficiente de cálculo
Cuaz	m	Cota del umbral del azud	dato de partida
Db	m	Diámetro del bolo o dimensión del bolo en la dirección transversal al flujo en la rampa	independiente
e	m	Espesor del azud en coronación	dato de partida
h_0	m	Calado medio en el estanque	dependiente
h_1	m	Calado aguas arriba del bolo	dependiente
$h_1 (Q_{RMIN})$	m	Calado aguas arriba del bolo para un Q_{RMIN} dado	dependiente
$h_{1\text{ máx}} = h_1 (Q_{RMAX})$	m	Calado máximo aguas arriba del bolo para asegurar que la rampa funciona sin ahogamiento- corresponde a un caudal por la rampa Q_{RMAX}	dependiente

	FASE DE CÁLCULO					CONDICIONADO	RECOMENDACIÓN
	1 Dim. hidráu.	2 Dim. geom.	3 Dim. Pot disip.	4 Rango func caudal.	5 Rég no unifor.		
			X				
		X					
			X				
			X				
			X				
	X					Ambiental: paso de la ictiofauna Geométrico: no obturación	Ideal: $AvG \geq 0.2$ Aceptable: $0.1 \leq AvG < 0.2$
	X						
			X				
	X						Valor habitual 0.2.
		X					
				X			
				X			
				X			
				X			
	X			X			
		X					
		X					
				X			
			X				
	X						
					X		
				X			

SÍMBOLO	UNIDAD	DEFINICIÓN	CARÁCTER
h_1^*	m	Calado, medido sobre el zócalo, aguas arriba del bolo	dependiente
h_2	m	Calado aguas abajo del bolo	independiente
h_2^U	m	Calado aguas abajo del bolo en la hilada n correspondiente a régimen uniforme para un Q_{RMIN} dado	
$h_{2,n}^{no U}$	m	Calado aguas abajo del bolo en la hilada n correspondiente a régimen no uniforme	
h_{az}	m	Diferencia de cota entre la del punto más alto de los bolos de la hilada superior y la cota del umbral del azud	independiente
h_2^*	m	Calado, medido sobre el zócalo, aguas abajo del bolo	dependiente
Hb	m	Altura del bolo (altura vista)	dependiente
Hb _{min}	m	Altura del bolo mínima	Umbral de referencia
H _R	m	Altura de la rampa. Corresponde a la diferencia de cota en el lecho de la rampa entre el punto de entrega y el de toma.	dependiente
H _T	m	Altura total a salvar	dependiente
Laz	m	Longitud del azud	dato de partida
Le	m	Longitud del estanque	dependiente
L _R	m	Longitud de la rampa	dependiente
Nest		Número de estanques	dependiente
Nhil		Número de hiladas	dependiente
Nm		Número de módulos	independiente
p	m	Altura del zócalo	independiente
Pd	w/m ³	Potencia disipada	dependiente
Pdm	w/m ³	Potencia disipada en el módulo	dependiente
Pd _{mb}	w/m ³	Potencia disipada en módulo de borde	dependiente
Pd _{mc}	w/m ³	Potencia disipada en módulo de centro	dependiente
Q _{az}	m ³ /s	Caudal que desagua el azud	dependiente
Q _{az} (h _{az})	m ³ /s	Caudal que desagua el azud cuando circula Q _{RMAX} por la rampa	dependiente
Q _{az} (y _{az})	m ³ /s	Caudal que desagua el azud para una carga sobre su vertedero y _{az}	dependiente
Qd	m ³ /s	Caudal disponible en el río. Corresponde a la diferencia entre Q río y Q derivado	dato
Qd _{MAX}	m ³ /s	Caudal disponible en el río cuando circula por la rampa Q _{RMAX}	dependiente

	FASE DE CÁLCULO					CONDICIONADO	RECOMENDACIÓN
	1 Dim. hidráu.	2 Dim. geom.	3 Dim. Pot disip.	4 Rango func caudal.	5 Rég no unifor.		
	X						
	X					Ambiental: paso de la ictiofauna Geométrico: no obturación	Ideal: $h_2 \geq 0.2$ Aceptable: $0.1 \leq h_2 < 0.2$
					X		
					X		
		X		X		Hidráulico: no ahogamiento del bolo	$h_{az} \geq 0.15$
	X						
		X					$Hb \geq Hb_{min}$
		X					$Hb_{min} = h_1 + y + 0.15$
		X					
		X					
				X			
			X				
			X				
		X					
		X					
	X						
		X				Hidráulico Biológico	$h_2^* = h_2 - p \geq \text{Máx} (0.1; \text{long dorso-ventral})$
			X				$Pd \leq 150$
			X				$Pdm \leq 150$
			X				$Pdmb \leq 150$
			X				$Pdmc \leq 150$
				X			
				X			
				X			
				X			
				X			



SÍMBOLO	UNIDAD	DEFINICIÓN	CARÁCTER
Q derivado	m ³ /s	Caudal derivado en el azud para los usos existentes	dato
Q módulo	m ³ /s	Caudal circulante por el módulo	dependiente
Q río	m ³ /s	Caudal circulante por el río aguas arriba de la rampa	dato
Q _{RMIN}	m ³ /s	Caudal mínimo para el que la rampa debe ser funcional. Es el caudal considerado para las tres primeras fases de dimensionado	independiente
Q _{RMAX}	m ³ /s	Caudal máximo circulante por la rampa por encima del cual los bolos se anegan	dependiente
Q _R (y=0)	m ³ /s	Caudal circulante por la rampa para y=0, o caudal por encima del cual el azud empieza a verter	dependiente
Qv	m ³ /s	Caudal circulante por la ventana de flujo	dependiente
Ve	m ³	Volumen del estanque	dependiente
Vm	m ³	Volumen del módulo	dependiente
Vmax	m/s	Velocidad máxima en la ventana de flujo	dependiente
Vmax,i ^{no u}	m/s	Velocidad máxima en la ventana de flujo correspondiente a la hilada i, en el supuesto de régimen no uniforme y para el caudal Q _{RMAX}	dependiente
Vmb	m ³	Volumen del módulo de borde	dependiente
Vmc	m ³	Volumen del módulo de centro	dependiente
y	m	Diferencia de cota entre umbral del azud (Cuaz) y lámina de agua aguas arriba del bolo de la hilada superior para Q _{RMIN}	dependiente
y _{az}	m	Diferencia de cota entre la lámina de agua en el río para Q > Q _R (y=0) y el umbral del azud	dependiente
y _{min derivación}	m	Calado mínimo aguas arriba del azud compatible con la derivación existente	dato de partida
α	grados	Ángulo que define la alineación entre dos bolos consecutivos	independiente
β	grados	Ángulo de la rasante de la rampa con la horizontal	independiente
β ₀		Coefficiente para la estimación del gasto en la ventana de flujo	coeficiente de cálculo
β _i		Coefficiente para la estimación del gasto en la ventana de flujo	coeficiente de cálculo
γ	N/m ³	Peso específico del agua	
Δh	m	Desnivel en la lámina de agua entre dos estanques consecutivos	independiente
Δh,i ^{no u}	m	Desnivel en la lámina de agua entre dos estanques consecutivos correspondiente a la hilada i, en el supuesto de régimen no uniforme y para el caudal Q _{RMAX}	dependiente
Δz	m	Diferencia de cota del lecho entre dos hiladas consecutivas	dependiente

	FASE DE CÁLCULO					CONDICIONADO	RECOMENDACIÓN
	1 Dim. hidráu.	2 Dim. geom.	3 Dim. Pot disip.	4 Rango func caudal.	5 Rég no unifor.		
				X			
			X				
				X			
				X			
				X			
				X			
	X						
			X				
			X				
	X			X			
					X		
			X				
			X				
				X			$y \geq 0.1$
				X			
				X			
			X				$30^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$
			X				
	X						$\beta_0 = 0.812$
	X						$\beta_1 = 0.335$
			X				$\gamma = 9810$
	X					Biológico Geométrico	Ideal: $\Delta h \leq 0.2$ Aceptable: $0.2 \leq \Delta h < 0.35$
					X		
					X		

Ecuaciones

Ec. 1	$AvH = AvG - Cc * \Delta h$	20
Ec. 2	$Qv = \frac{2}{3} * \sqrt{2g} * C_S * AvH * (h_1)^{1.5}$	20
Ec. 3	$C_S = \beta_0 * \left[1 - \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^{1.5} \right]^{\beta_1}$	20
Ec. 4	$Pd_m = \frac{\gamma * Q \text{ módulo } \Delta h}{v_m}$	29
Ec. 5	$Hb = h_1 + y + h_{az}$	34
Ec. 6	$Hb \geq Hb_{min} = h_1 + y + 0.15$	35
Ec. 7	$a = AvG * \cos \alpha$	36
Ec. 8	$b = AvG * \sen \alpha$	36
Ec. 9	$Amb = 2.5 * Db + 2a$	37
Ec. 10	$Amc = 2 * (Db + a)$	37
Ec. 11	$Nhil = \text{entero} \left(\frac{H_T - h_1}{\Delta h} \right) + 1$	38
Ec. 12	$Le = \frac{\Delta h}{tg \beta}$	38
Ec. 13	$Nest = Nhil - 1$	38
Ec. 14	$L_R = \frac{H_R}{tg \beta}$	39
Ec. 15	$h_1 = h_2 + \Delta h$	41
Ec. 16	$H_T = Cuaz - Ce$	44
Ec. 17	$H_R = (Nhil - 1) * \Delta h$	44
Ec. 18	$y = H_T - H_R - h_1$	44

Ec. 19	$h_1^* = h_1 - p$	45
Ec. 20	$h_2^* = h_2 - p$	45
Ec. 21	$Qv(p) = \frac{2}{3} * \sqrt{2g} * C_{S\text{ VF}} * AvH * (h_1 - p)^{1.5}$	45
Ec. 22	$C_S(p) = \beta_0 * \left[1 - \left(\frac{h_2 - p}{h_1 - p} \right)^{1.5} \right]^{\beta_1}$	45
Ec. 23	$y = \begin{cases} = Cuaz - CLA(Q_{RMIN}) \\ \text{con } CLA(Q_{RMIN}) \geq CLA_{min} \text{ derivación} \end{cases}$	51
Ec. 24	$Q_{az}(y_{az}) = 1.7 * C_{S_{az}} * y_{az}^{1.5} * Laz$	53
Ec. 25	$C_{S_{az}} = \begin{cases} 0,75 + \frac{0,1}{e/y_{az}} & \text{si } \frac{e}{y_{az}} > 3 \\ 0,7 + \frac{0,185}{e/y_{az}} & \text{si } \frac{e}{y_{az}} \leq 3 \end{cases}$	53
Ec. 26	$Qd_{max} = (Q_{RMAX} + Q_{az}(h_{az}))$	53
Ec. 27	$v_{max} = \sqrt{2g\Delta h}$	55
Ec. 28	$Vmb = Amb * Le * h_0$	61
Ec. 29	$Vmc = Amc * Le * h_0$	61
Ec. 30	$h_0 = \frac{h_1 + h_2}{2}$	62
Ec. 31	$Pd_{mb} = \frac{\gamma * Q_{módulo} * \Delta h}{Vmb}$	62
Ec. 32	$Pd_{mc} = \frac{\gamma * Q_{módulo} * \Delta h}{Vmc}$	62
Ec. 33	$h_{2,n}^{no\ U}(Q_{RMAX}) = \begin{cases} 0.6 - 0.8 * h_2^U(Q_{RMAX}) \\ h_2^U(Q_R(y=0)) \end{cases}$	70





A2



ANEJOS

ANEJO II RAMPA DE “EL PARDO”





A2

En este Anejo se detalla el proceso seguido y las variables obtenidas en el diseño de la Rampa de “El Pardo”, primera rampa de flujo ascendente construida.

1 Introducción _

La rampa de El Pardo forma parte del conjunto de medidas contempladas en el Proyecto de restauración fluvial del río Manzanares en el entorno del Real Sitio de El Pardo (<http://restauracionfluvialriomanzanares.es/>).

Dicho proyecto se redactó en 2016 gracias al impulso de la Dirección General del Agua del Ministerio de Agricultura, Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (MAPAMA) y de la Confederación Hidrográfica del Tago, en el marco del Plan PIMA Adapta (Plan de Impulso al Medio Ambiente para la Adaptación al Cambio Climático en España).

El tramo de actuación comprendía dicho río desde aguas abajo de la presa de El Pardo hasta su entrada en Madrid (cruce con la M-40) con una longitud total de 8.4 km más los 7 km del tramo bajo del arroyo de la Trofa, principal tributario por la margen derecha.

El proyecto incluía actuaciones de índole muy diversa (mejora del hábitat fluvial, de la calidad del agua, del ecosistema ribereño, de variables hidromorfológicas, de uso social, etc.). Una de las medidas más emblemáticas era la construcción de una rampa para peces en un azud existente conocido como azud del “Campo de Golf” o azud del “El Pardo”. Dicha rampa fue diseñada por los autores de este Manual y construida a principios de 2019 por la empresa TRAGSA.

En la **FIGURA 28** se recoge la ubicación del azud de El Pardo, con coordenadas ETRS 89 UTM H30 N (X: 433.856,86 Y:4.486.220,33).



FIGURA 28

Localización del azud de El Pardo: vista general del tramo del río Manzanares donde se ubica el azud (izquierda). Detalle de la ubicación (derecha)

El azud fue diseñado para abastecer de agua a una balsa contraincendios ubicada en el Monte de El Pardo. La FIGURA 29 corresponde al azud en su estado inicial. En la margen izquierda de la fotografía se observa la compuerta de toma y la caseta con el grupo de impulsión.

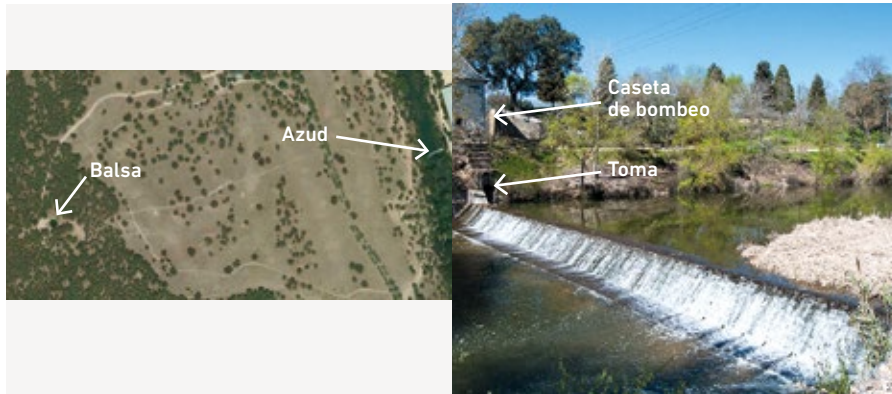


FIGURA 29

Estado inicial del azud de El Pardo (derecha) y ubicación relativa de la balsa contra incendios y la caseta de bombeo (izquierda)

2 Objetivos y solución propuesta _

El Proyecto de restauración fluvial del río Manzanares en el entorno del Real Sitio de El Pardo, contemplaba para este azud una actuación con un doble objetivo y un condicionante principal:

- Objetivo 1: permeabilizar el obstáculo para la ictiofauna
- Objetivo 2: reducir el remanso generado aguas arriba (cuya longitud se evaluó en unos 1.1 km)
- Condicionante: mantener la funcionalidad de la toma

La solución elegida fue igualmente doble y asegurando el condicionante:

- Solución 1: construir un **dispositivo de paso tipo rampa de rocas** para reducir el efecto barrera. En epígrafes posteriores se detalla el diseño de la misma.
- Solución 2: rebajar la cota del umbral del azud para aminorar el efecto remanso. Como resultado de los estudios hidromorfológicos se estimó **un rebaje de 0.5 m en la cota del umbral del azud**, en una longitud de 7.2 m.
- Condicionante: se asegura la funcionalidad de la toma mejorando la instalación existente. El rebaje del azud supuso una modificación en la cota de la toma de la derivación para que siguiese garantizando su funcionalidad. Como nueva cota se propuso:

$$CLA_{\text{min derivación}} = Cuaz - 0.37m$$

siendo *Cuaz*, la cota del umbral del azud una vez rebajado

La **FIGURA 30** muestra la situación actual del azud y las **FIGURA 31** y **FIGURA 32** la situación actual y original del remanso generado.



FIGURA 30

Situación actual con la rampa de peces y el rebaje del umbral del azud



FIGURA 31

Imagen obtenida con un vuelo dron (2019) donde se observa el remanso aguas arriba del azud en la situación actual y las nuevas islas emergidas.



FIGURA 32

Imagen obtenida con un vuelo dron (2017) donde se observa la situación inicial del remanso

3 Condicionantes del diseño de la rampa _

El condicionante principal ha sido citado previamente:

- La derivación existente debe seguir garantizándose para la nueva cota del umbral del azud y se hace necesaria una modernización de las infraestructuras de derivación y bombeo (canal lateral, compuerta, válvula de pie en la aspiración, mangote, ...). Sin embargo, debido a que las derivaciones son muy puntuales y escasas (sólo en la campaña de incendios, y en ocasiones sólo para el llenado inicial de la balsa), el caudal derivado no se tendrá en consideración en la estimación del caudal disponible en el río.

Otros condicionantes del diseño de la solución adoptada son:

- Localización del rebaje:** el rebaje del azud debe realizarse próximo a la rampa, para favorecer el efecto llamada de la ictiofauna en situaciones de desagüe por el vertedero generado.
- El barbo fue seleccionado como la especie objetivo de la rampa¹⁶.
- Periodo funcional:** la rampa se diseñó para ser funcional en el periodo prerreproductivo de los ciprinidos (abril -junio).
- El tramo está sometido a un régimen de caudales mínimos según el vigente Plan de Cuenca (ver **TABLA 27**).

TABLA 27. Caudales ecológicos mínimos trimestrales en m³/s para el horizonte 2015 en la masa estratégica Río Manzanares desde Embalse de el Pardo hasta Arroyo de la Trofa (BOE n° 89 de 2014)

Caudales ambientales en m ³ /s			
Oct-Dic	Ene-Mar	Abr-Jun	Jul-Sep
0.82	0.93	0.97	0.49

- El rango de caudales disponibles es muy limitado, al tratarse de un tramo fuertemente regulado, ubicado aguas abajo de las presas de Santillana y de El Pardo e inmediatamente aguas arriba de la población de Madrid, lo que motiva una fuerte laminación de los caudales máximos.
- Ubicación de la rampa:** los condicionantes de acceso de maquinaria durante la obra determinaron la ubicación de la rampa en la margen derecha, contigua al nuevo canal de derivación para la toma de bombeo.

También se consideró conveniente el retranqueo de la rampa respecto al azud dadas las peculiaridades morfológicas del tramo aguas abajo de la obra. Esta circunstancia refuerza el efecto "llamada de la escala" al ubicarse la entrada a la rampa próxima al desagüe del aliviadero del azud.

- La presencia de una losa aguas abajo del azud, hizo necesario disponer de una alineación de bolos exterior a la misma (denominada hilada de control), que redirigiese el flujo vertido por el aliviadero del azud y reforzarse el efecto llamada.
- El intenso uso social del tramo confiere a la actuación a diseñar una nueva dimensión educativa y de concienciación de la población, que deberá ser tenida en cuenta para incluir un conjunto de actuaciones complementarias (mirador, paneles informativos, etc.).

¹⁶ El estudio preliminar de la ictiofauna realizado en el marco del proyecto de restauración indicaba como especies autóctonas un predominio de las especies de la familia CYPRINIDAE, como es el caso del barbo común (*Luciobarbus bocagei*) y el gobio (*Gobio lozanoi*). Se constató la presencia de numerosas exóticas, como el también ciprinido alburno (*Alburnus alburnus*), y dentro de la familia CENTRARCHIDAE, se constataron el pez sol (*Lepomis gibbosus*) y el Black-bass o perca americana (*Micropterus salmoides*), dentro de la familia ICTALURIDAE, el pez gato (*Ameiurus melas*) y de la familia POECILIIDAE, la gambusia (*Gambusia holbrooki*).

En la **FIGURA 33** puede observarse la disposición en planta de la obra ya finalizada.



FIGURA 33
Vista aérea de la obra ya finalizada (vuelo dron 2019)

4 Diseño de la rampa _

FASE PRELIMINAR: ESTIMACIÓN DE Q_{RMIN}

Para la estimación del caudal de diseño Q_{RMIN} y siguiendo las recomendaciones de este Manual se llevó a cabo un estudio de los caudales circulantes en el tramo durante el período de funcionalidad de la rampa.

El tramo se ubica en una masa de agua estratégica donde esta implementado el régimen de caudales ecológicos. La información facilitada por la Confederación Hidrográfica del Tajo permitió conocer los caudales reales circulantes en el periodo actual. Para el periodo de funcionalidad de la rampa, los caudales ambientales vertidos por la presa de El Pardo son muy superiores a los mínimos mostrados en la **TABLA 27**, estimándose como **caudal de diseño 1.15 m³/s**.

Los restantes datos de partida se resumen en el cuadro siguiente;

Datos de partida	• Velocidad máxima: $2.2\text{ m/s} \Rightarrow \Delta h \leq 0.25\text{ m}$ • Calado mínimo: $0.2\text{ m} \Rightarrow h_z \geq 0.2\text{ m}$ • Ancho de paso mínimo: $0.2\text{ m} \Rightarrow AvG \geq 0.2\text{ m}$ • Potencia disipada máxima: $200\text{ W/m}^3 \Rightarrow Pd \leq 200\text{ W/m}^3$ • Longitud del azud (Laz): 7.2m (zona del rebaje) • Espesor en coronación(e): 1m • Cota de entrega de la rampa (Ce): 599 msnm • Cota del umbral del azud (Cuaz): 600.15 msnm • Diferencia de cota entre la del punto más alto de los bolos de la hilada superior y Cuaz (h_{az}): 0.25m
-------------------------	--

FASE 1. DIMENSIONADO HIDRÁULICO**DATOS:**

- $Q_{RMIN}=1.15\text{m}^3/\text{s}$
- $AvG_{min}=0.2\text{m}$
- Se inicia esta fase considerando disponer 3 módulos y ventanas de flujo sin zócalo ($p=0$)

RESULTADOS:

Se obtienen las combinaciones de $(h_2; \Delta h)$ que ofrecen valores de $AvG \geq AvG_{min}$ y se selecciona $\Delta h=0.15\text{m}$ y $h_2=0.2\text{m}$ con $AvG=0.5\text{m}$

FASE 2. DIMENSIONADO GEOMÉTRICO**DATOS:**

- Cota de entrega de la rampa: $Ce=599\text{msnm}$
- Cota del umbral del azud rebajado: $Cuaz=600.15\text{msnm}$
- Diferencia de cota entre la del punto más alto de los bolos de la hilada superior y $Cuaz: h_{az}=0.25\text{m}$

RESULTADOS:

Anchura de la ventana hidráulica: 0.47m

Diferencia de cota entre umbral del azud y lámina de agua aguas arriba de la rampa:

$$y=0.05\text{m}$$

Calado aguas arriba del bolo: $h_t=0.35\text{m}$

Altura total a salvar: $H_T=1.15\text{m}$

Altura de la rampa: $H_R=0.75\text{m}$

Número de hiladas: $N_{hil}=6$

Número de estanques: $N_{est}=5$

Altura vista del bolo: $Hb_{min}=0.65\text{m}$

FASE 3. DIMENSIONADO PARA EL CONTROL DE LA POTENCIA A DISIPAR**DATOS:**

- Se selecciona $Hb=0.80\text{m}$
- Dimensión del bolo en la dirección transversal al flujo: $Db=0.80\text{m}$
- Anchura del bolo: $Ab=0.60\text{m}$
- $\alpha=30^\circ$

RESULTADOS:

- ✓ $Am_{borde} = 2.8m$
- ✓ $Am_{centro} = 2.4m$
- ✓ $Ancho\ total\ rampa = 8.2m$
- ✓ $tg\beta = 0.04$
- ✓ $L_R = 19\ m$
- ✓ $Le = 3.7\ m$
- ✓ $V_{mb} = 2.9\ m^3$
- ✓ $V_{mc} = 2.5\ m^3$
- ✓ $Pd_{mb} = 191\ w/m^3$
- ✓ $Pd_{mc} = 222\ w/m^3$ ¹⁷
- ✓ $V_{max} = 1.72\ m/s$

FASE 4. RANGO FUNCIONAL DE CAUDALES

a) Cálculo para $Q_R(y=0)$

DATOS:

- $Hb = 0.8m$
- $h_{az} = 0.25m$
- $\Delta h = 0.15m$
- $Nm = 3$
- $tg\beta = 0.04$

RESULTADOS:

- ✓ $h_1[Q_R(y=0)] = 0.40m$
- ✓ $h_2[Q_R(y=0)] = 0.25m$
- ✓ $Q_R(y=0) = 1.35\ m^3/s$
- ✓ $Pd_{mb} = 190\ w/m^3$
- ✓ $Pd_{mc} = 221\ w/m^3$ (Ver pie de página ¹⁷)

¹⁷ La potencia disipada es una medida indirecta de las turbulencias y la incorporación de aire que conllevan -en la literatura se suele referir a esto como "aguas blancas"- . La presencia de dichas "aguas blancas" es un factor que limita la transitabilidad de los dispositivos de paso. En el protocolo de cálculo presentado, los cálculos de potencia disipada se hacen para el conjunto del módulo. Sin embargo, para el caso de rampa de flujo ascendente, es evidente que las "aguas blancas" se concentran en las zonas de velocidades altas, mientras que en las zonas de reflujo su presencia es mucho menor, zonas que, lógicamente, escogerá el pez para el remonte. Es pues razonable asumir que el valor de potencia disipada máxima (TABLA 1) podrá ser, para este tipo de rampas, mayor que los valores recomendados para dispositivos de paso en los que las turbulencias se presentan de manera homogénea.

b) Cálculo para Q_{RMAX} , $Q_{az}(h_{az})$ y Qd_{MAX}

DATOS:

- Para la rampa, los mismos que los utilizados antes para calcular $Q_R(y=0)$
- Para el azud:
- Espesor en coronación: $e=1\text{ m}$
- Longitud del azud en el rebaje: $L_{az}=7.2\text{ m}$

RESULTADOS:

- ✓ $h_1(Q_{RMAX})=0.8\text{ m}$
- ✓ $h_2(Q_{RMAX})=0.65\text{ m}$
- ✓ $Q_{RMAX}=3.1\text{ m}^3/\text{s}$
- ✓ $Q_{az}(h_{az})=2.4\text{ m}^3/\text{s}$
- ✓ $Qd_{MAX}=5.5\text{ m}^3/\text{s}$
- ✓ $Pd_{mb}=195\text{ w/m}^3$
- ✓ $Pd_{mc}=226\text{ w/m}^3$ (Ver pie de página 17)

El rango de caudales para el que la rampa dimensionada es funcional, se resume en la

TABLA 28.

TABLA 28. Rango de caudales para el que la rampa dimensionada es funcional

ESCENARIO	DESAGÜE de Qd	RANGO DE CAUDALES Qd	VALORES OBTENIDOS (m^3/s)
1	Sólo por rampa.	$Q_{RMIN} \leq Qd \leq Q_R(y=0)$	$Q_{RMIN}=1.15$ $Q_R(y=0)=1.35$
2	Por rampa y azud. No hay ahogamiento de bolos.	$Q_R(y=0) < Qd \leq \overbrace{Q_{RMAX} + Q_{az}(h_{az})}^{Qd_{MAX}}$ RANPA RANPA AZUD	$Q_{RMAX}=3.1$ $Q_{az}(h_{az})=2.4$ $Qd_{MAX}=5.5$

FASE 5. COMPROBACIÓN EN RÉGIMEN NO UNIFORME

DATOS:

- Se considera la hipótesis para el calado aguas abajo de la última hilada:

$$h_{2,n}^{no\ U}(Q_{RMAX}) = 0.6 - 0.8 * h_2^U(Q_{RMAX})$$

Siendo $h_2^U(Q_{RMAX})=0.65\text{ m}$ y considerando una reducción del 70%, se obtiene

$$h_{2,n}^{no\ U}(Q_{RMAX}) = 0.455\text{ m}$$

RESULTADOS:

En la **TABLA 29** se presentan los resultados correspondientes a los valores de $h_{2,i}^{no U}(Q_{RMAX})$, $h_{1,i}^{no U}(Q_{RMAX})$, Δh_i y $V_{max,i}$ ($i=1 \dots n$). Todas las velocidades estimadas cumplen el condici-
onado establecido para la especie objetivo.

TABLA 29. Resultados correspondientes a la comprobación en régimen no uniforme

hilada	h_2 (m)	h_1 (m)	Δh (m)	v (m/s)
6	0,455	0,705	0,250	1,95
5	0,555	0,748	0,193	1,83
4	0,598	0,769	0,171	1,78
3	0,619	0,781	0,162	1,76
2	0,631	0,789	0,158	1,76
1	0,639	0,793	0,154	1,74

RESUMEN DE VARIABLES

Se presenta a continuación, un resumen del conjunto de variables (**TABLA 30**).

TABLA 30. Resumen de variables de diseño

VARIABLES	VALOR
Nº módulos	3
p (m)	0
h_2 (m)	0.2
Δh (m)	0.15
h_{az} (m)	0.25
V_{max} (m/s)	1.7
AvG (m)	0.5
AvH (m)	0.47
h_1 (m)	0.35
y (m)	0.05
H_t (m)	1.15
H_b (m)	0.75
Nhil	6
Nest	5
Hb (m)	0.8
Db (m)	0.8
Ab (m)	0.60
α (°)	30
$tg\beta$	0.04
Amb (m)	2.8
Amc (m)	2.4

A_{rampa} (m)	8.2
L_e (m)	3.7
L_R (m)	19
Pd_{mb} (w/m³)	191
Pd_{mc} (w/m³)	222
Q_{RMIN} (m³/s)	1.15
Q_R (y=0) (m³/s)	1.35
Q_{RMAX} (m³/s)	3.1
Q_{az} (h_{az}) (m³/s)	2.4
Qd_{MAX} (m³/s)	5.5

5 Otras consideraciones

a) Estanque de encuentro

Para el diseño del estanque de encuentro (**FIGURA 34**) se siguieron las recomendaciones recogidas en este Manual.

- Una longitud del orden del 1.5-2 veces la de los estanques de la rampa (L_e= 3.7m): se adoptó una longitud de 6 m.
- Lecho horizontal dispuesto 0.3 metros por debajo de la cota del lecho del río.
- Para delimitarlo, se utilizaron bolos que en su cota superior alcanzan, al menos, la cota de la lámina de agua de la hilada inferior correspondiente al caudal Q_R(y=0) = 0.25m. En este caso se utilizaron bolos con altura vista de 0.5 m.
- En el 50% de las ventanas de flujo de este estanque se redujo su capacidad de desagüe entre un 20 y un 30%. Esta reducción se consiguió disminuyendo la anchura de la ventana en ese porcentaje respecto a la que presentan las ventanas de la rampa. En este caso se consideraron anchuras de ventana de 0.45m en los bordes del estanque más próximos al desagüe del aliviadero, para reforzar el efecto llamada en esta zona.

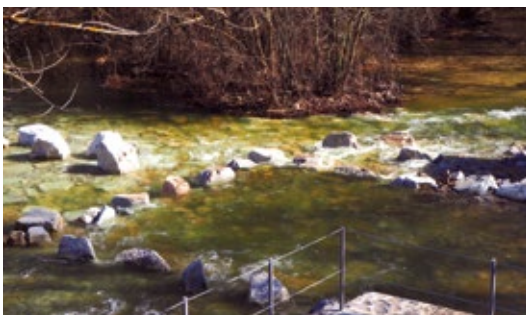


FIGURA 34
Estanque de encuentro

b) Hilada de control

Como se comentó anteriormente fue necesario disponer una hilada de control (**FIGURA 35**) en la losa ubicada aguas abajo del azud en la zona del aliviadero, con el objetivo de redireccionar el flujo evacuado por el vertedero del azud favoreciendo el efecto llamada. Se utilizaron bolos de dimensiones sensiblemente superiores a los del estanque de encuentro con ventanas más amplias.

En la **FIGURA 36** se muestra una imagen de la rampa tomada desde un dron, en la cual se visualiza claramente el estanque de encuentro y la hilada de control.



FIGURA 35. Hilada de control



FIGURA 36
Vista aérea de la rampa y azud en la situación actual

c) Adecuación de la toma

Se construyó un canal lateral para la toma, con una compuerta de regulación en la entrada y una rejilla de protección (**FIGURA 37**).

Se sustituyó también la tubería de aspiración ampliando su longitud a la nueva cota de derivación.



FIGURA 37
Vista del canal de derivación (izquierda) y de la compuerta de entrada (derecha)

d) Función social

Para favorecer la función social, educativa y de divulgación, en la margen derecha del río se dispuso un mirador con carteles informativos sobre la actuación.

e) Integración ambiental

El lecho de la rampa (**FIGURA 38**) se naturalizó con materiales de granulometría diversa y los muros laterales se encacharon en piedra (**FIGURA 39**).



FIGURA 38. Lecho naturalizado de la rampa.



FIGURA 39. Vista de la rampa con los muros laterales encachados

f) Seguimiento

Por último, comentar que la rampa está siendo monitorizada para diferentes condiciones de caudal con el objetivo de realizar un seguimiento que permita conocer el funcionamiento, corroborar la secuencia de cálculo propuesta y extrapolar resultados para futuras actuaciones (**FIGURA 40**).

g)



FIGURA 40

Campaña de monitoreo para la estimación de calados y velocidades

6 Reportaje fotográfico _



FIGURA 41. Construcción del acceso a la rampa en la margen derecha



FIGURA 42
Demolición parcial del azud para vaciado del remanso y construcción de la atagüa



FIGURA 43
Detalle de la construcción de la base de la rampa



FIGURA 44
Colocación de los bolos en la rampa



FIGURA 45

Comprobación de la disposición relativa de bolos en la hilada



FIGURA 46

Hormigonado del lecho de la rampa



FIGURA 47

Encachado del lecho de la rampa



FIGURA 48

Puesta en funcionamiento de la rampa con el equipo técnico y de ejecución material (de izquierda a derecha, Javier Carpio, Manuel Oliva y Luis Carlos Arias)



FIGURA 49

Tareas previas a la construcción del estanque de encuentro



FIGURA 50

Disposición de los elementos de la hilada de control



FIGURA 51
Imagen de la rampa para el escenario Q_{RMIN}



FIGURA 52
Imagen de la rampa para el escenario ($Q_{RMIN}-Q_R$ ($y=0$))



FIGURA 53
Imagen de la rampa para el escenario $Q_d > Q_R$ ($y=0$)

MANUAL DE **DISEÑO Y CÁLCULO** DE RAMPAS CON FLUJO ASCENDENTE

La recuperación de la conectividad longitudinal de nuestros ríos debe ser entendida hoy en día como un ineludible compromiso que la sociedad tiene que asumir, y al que desde la ingeniería se debe contribuir ofreciendo soluciones cada vez más eficientes.

Con ese objetivo y en el marco del Proyecto CIPRIBER, este Manual se presenta como una herramienta técnica en la que gestores y profesionales del medio fluvial puedan basarse para dimensionar un nuevo tipo de dispositivo de paso, variante de las rampas de roca convencionales: la “rampa de flujo ascendente”.

Sobre los autores

José Anastasio Fernández Yuste y Carolina Martínez Santa-María son Doctores Ingenieros de Montes. Profesores en la E.T.S. de Ingenieros de Montes, Forestal y del Medio Natural de la Universidad Politécnica de Madrid. Además de contribuir a la formación hidráulica y fluvial de muchas generaciones de ingenieros, han colaborado con profesionales del ámbito de la gestión y la ecología fluvial, participando en proyectos, congresos, reuniones científicas y técnicas, ofreciendo en artículos y libros los resultados de esas colaboraciones.

El Manual que ahora ve la luz, es un fiel reflejo de ese espíritu de aprendizaje permanente de los autores, un texto que nace con la esperanza de incorporar de manera sistematizada las lecciones aprendidas en nuestros ríos.

