

DISEÑO, DIMENSIONADO, CONSTRUCCIÓN Y MANTENIMIENTO DE OBRAS DE DRENAJE TRANSVERSAL *RIVER-FRIENDLY*

José Anastasio Fernández Yuste
Carolina Martínez Santa-María

Montes Universidad Politécnica de Madrid

DISEÑO, DIMENSIONADO, CONSTRUCCIÓN Y MANTENIMIENTO DE OBRAS DE DRENAJE TRANSVERSAL *RIVER-FRIENDLY*

Un título muy adecuado para:

- **Un curso práctico de diseño, construcción y evaluación de pasos para peces.**
- **Una Escuela de ingeniería con una indudable vocación ambiental.**
- **Un público vinculado con el diseño y/o gestión de obras hidráulicas, así como estudiantes interesados en esa temática.**
- **Un par de profesores jubilados que disfrutan trabajando en ese tema.**

Pero… si esta sesión quiere ser práctica conviene hacerse una pregunta importante:

¿Es el diseño, dimensionado, construcción y mantenimiento el principal problema al que tendrán que enfrentare los técnicos que quieran implementar los criterios de river-friendly en las ODT?

Nuestra experiencia nos dice que ¡NO!

DISEÑO, DIMENSIONADO, CONSTRUCCIÓN Y MANTENIMIENTO DE
OBRAS DE DRENAJE TRANSVERSAL *RIVER-FRIENDLY*

Una visión realista… ¡tal cómo la hemos vivido en nuestras carnes!





Nosotros (**N**) vs. Interlocutor (**I**) responsable del proyecto de infraestructura viaria

N: La alteración de la continuidad fluvial generada por las ODT es un problema ambiental muy importante y bla, bla, bla…

I: *Habla chucho que no te escucho*

N: Incorporar criterios ambientales al diseño de ODT es una práctica generalizada en otros países

I: *Y eso ¿qué normativa lo exige?*

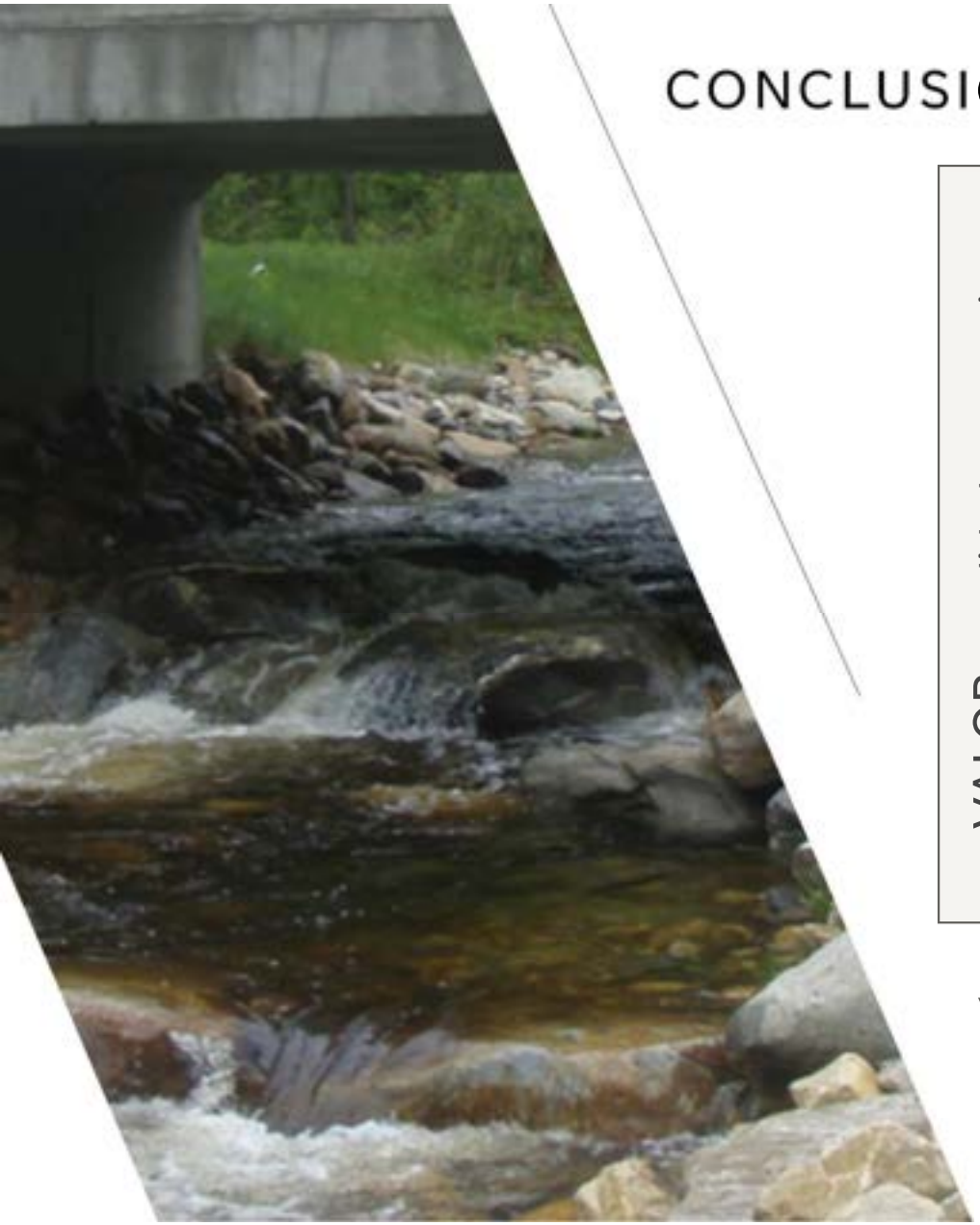


N: ¿Por qué no abordar un proyecto piloto en una pequeña obra?

I: *Venga, vale, pero eso de river-friendly ¿cómo se lleva a la práctica?, ¿es muy caro?, ¿condiciona la funcionalidad viaria?…*

N: Hay manuales. El coste, considerando el ciclo de vida de la obra, es menor que el de ODT tradicionales. La condición de *river-friendly* no repercute en la funcionalidad viaria de la ODT

I: *Bueno, me habéis convencido, pero ahora estoy muy liado. Cuando tenga tiempo para integrarlo en un proyecto lo miro con más calma y ya si eso…*



CONCLUSIONES

VALOR: Cualidad que permite emprender acciones arriesgadas o peligrosas con firmeza y decisión

- ✓ Es necesario un cambio de paradigma: Las obras de drenaje transversal (ODT), además de asegurar la transitabilidad viaria, deben ser ambientalmente funcionales, garantizando la conectividad para la biota, los sedimentos y los restos vegetales.
- ✓ Hay criterios científico-técnicos contrastados para su diseño, dimensionado y construcción, que compatibilizan su funcionalidad ambiental con la viaria.
- ✓ **Es necesario integrar esos criterios en la normativa de drenaje superficial de carreteras (Norma 5.2-IC; 2016).**
- ✓ **También en el condicionado de las autorizaciones que establezca la administración del agua al amparo de los artículos 126 bis y ter del RDPH (2023).**

❖ Si tienes oportunidad **¡aplícalo!**

ÍNDICE

Reto nº1: El agua pasa...
¿qué más quieres?

Reto nº2: Menospreciando lo pequeño...
¡no será para tanto!

Reto nº3: Cumplo todos los requerimientos legales...
¡déjame de chorradas!

Reto nº4: Normativa ambiental para ODT...
¡lo que faltaba!

Reto nº5: Diseñar y dimensionar ODT con criterios ambientales...
¿sabemos?

Reto nº6: Y yo...
¿qué puedo hacer?

RETO Nº1: EL AGUA PASA...

¿QUÉ MÁS QUIERES?



¿Qué es la CONECTIVIDAD?

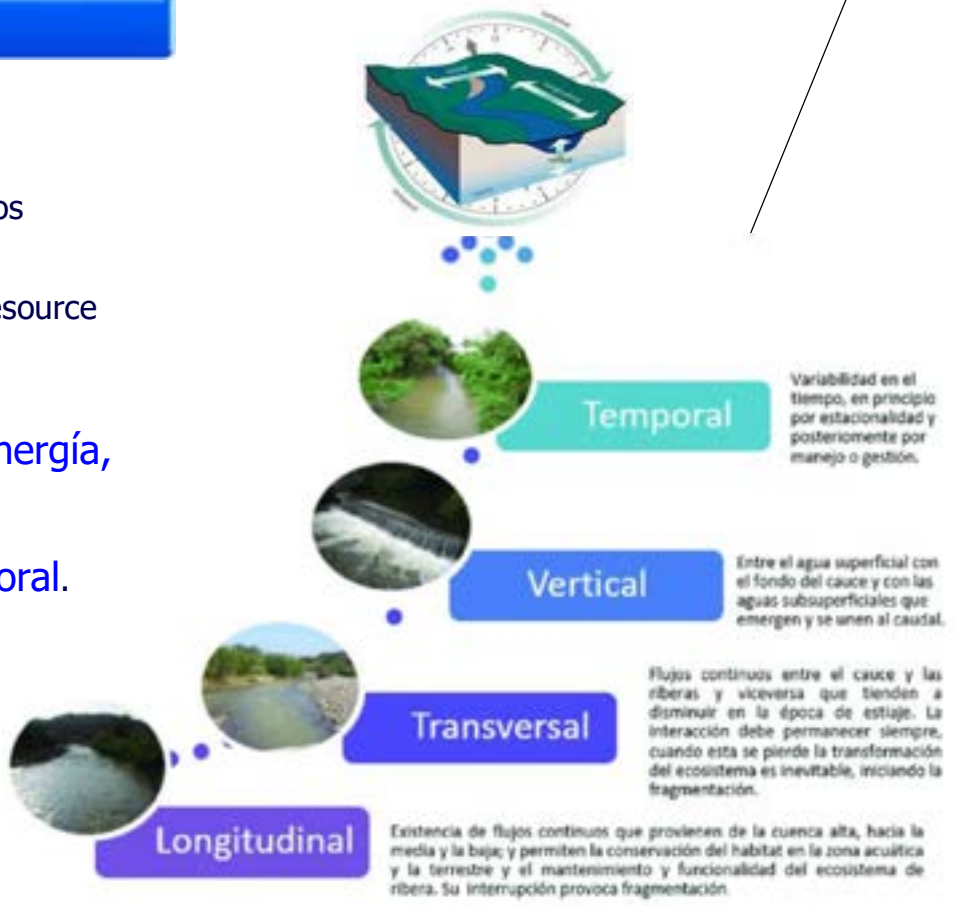


CONCEPTO

- ***Ecología del paisaje:***
  - Capacidad que ofrece un territorio para el movimiento de especies y otros flujos ecológicos (*Saura, 2014*).
  - The degree to which the landscape facilitates or impedes movement among resource patches (Taylor et al., 1993).

- ***Ecología fluvial:*** Capacidad de un sistema fluvial para transferir energía, materia y organismos (Pringle, *2003*).

- ***Dimensiones a considerar:*** Longitudinal, transversal, vertical y temporal.

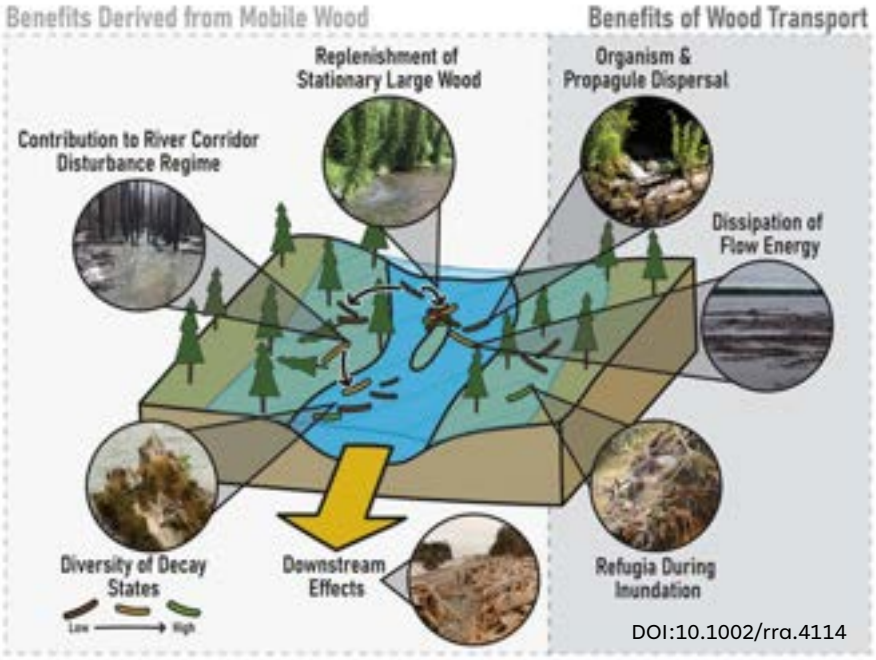


Tomado de *Ecosistemas ribereños de montaña*. 2017

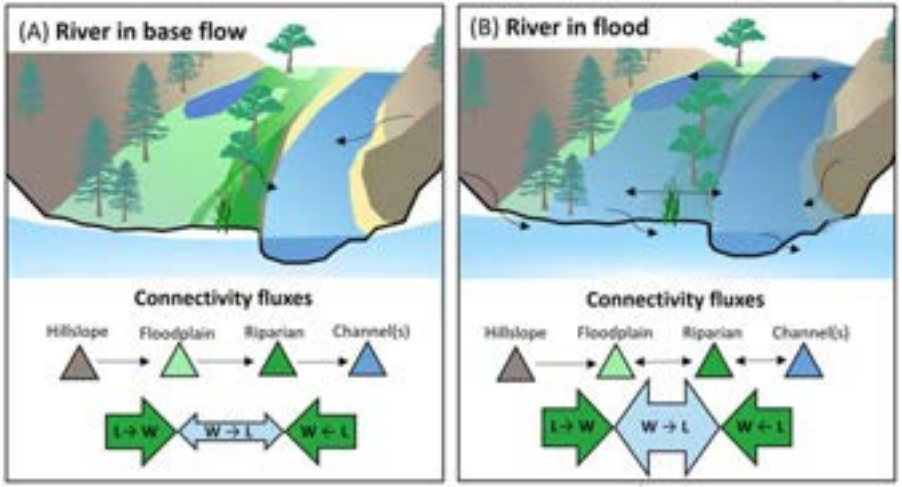
¿Es importante la CONECTIVIDAD?

La pérdida de **conectividad longitudinal** en el cauce y la ribera, **puede afectar** a componentes, procesos y funciones del ecosistema fluvial y de los terrestres asociados:

- **Biota**:
  - Cauce: ictiofauna; anfibios; reptiles; micromamíferos (desmán; rata de agua…); náyades; crustáceos…
  - Ribera: Mamíferos…
- **Dinámica sedimentaria**: Planta, sección y pendiente
- **Semillas y propágulos**
- **Restos vegetales**
- **…**



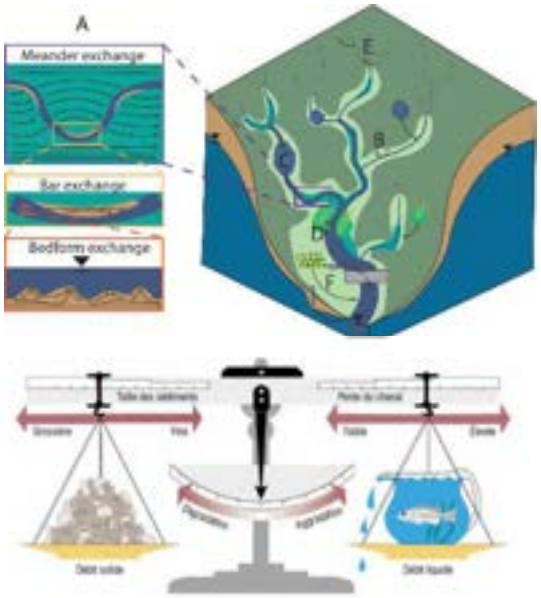
DOI:10.1002/rra.4114

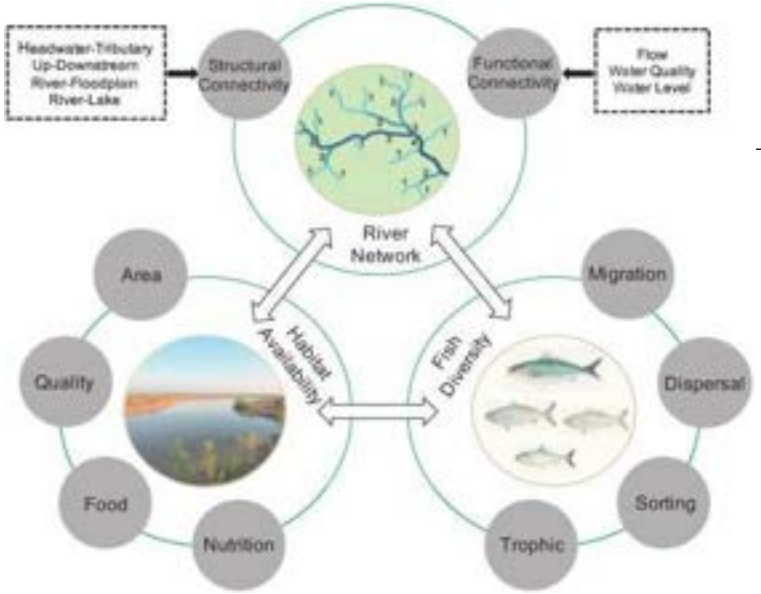


¿Es importante la CONECTIVIDAD?

Si la conectividad se interrumpe, la consecuencia es :

- **Biota**: Pérdida de hábitat; Reducción de poblaciones; Aislamiento genético; Desaparición de poblaciones





- **Dinámica sedimentaria**:
  - Desequilibrio hidro-sedimentológico, desencadenando procesos no naturales de erosión de orillas y acreción y/o incisión del lecho
  - Alteración de los procesos de disipación de energía
- **Semillas y propágulos**: Perdida de biodiversidad en cauce y ribera
- **Restos vegetales**:
  - Pérdida de refugios
  - Pérdida de diversidad en el biotopo hidráulico

¿Cómo afectan las ODT a la ictiofauna?

Causas más frecuentes de pérdida de conectividad :

- Salto excesivo a la entrada.



- Velocidad y/o turbulencia excesiva.

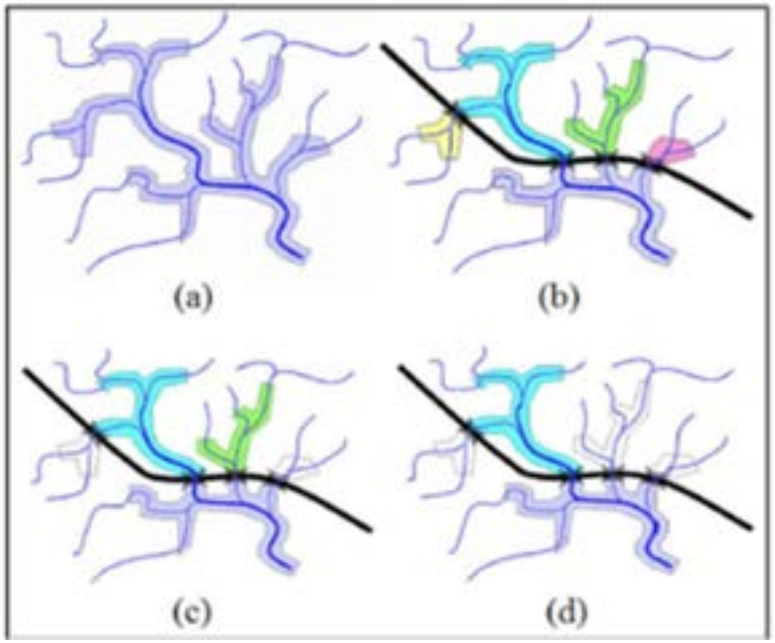




- Calado insuficiente en el interior del paso.



Consecuencia



¿Cómo afectan las ODT a otros animales?

Además de las señaladas para peces:

- Lecho artificial.
- Ausencia de paso seco.
- Falta de luz







¿Cómo afectan las ODT a sedimentos y restos vegetales?

Causas más frecuentes de pérdida de conectividad:

- Sección insuficiente.
- Alteración de la pendiente original del lecho.



Massachusetts Stream Crossings Handbook. 2015



Figure 4.8—Brewster Creek road replacement box culvert, filled to 85 percent of its rise after 1 year.

The year after construction, the new culvert also filled with sediment to about 85 percent of its rise. The stream still overflows the road frequently. A simple recognition that the crossing was located in a depositional zone, coupled with an easy road-location change to only 150 feet upstream (figure 4.7), could have avoided this problem.

Stream Simulation: An Ecological Approach To Providing Passage for Aquatic Organisms at Road-Stream Crossings

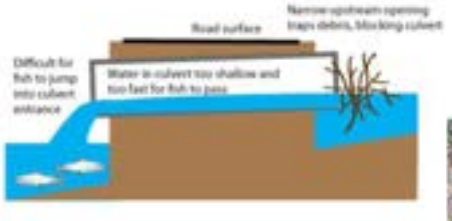


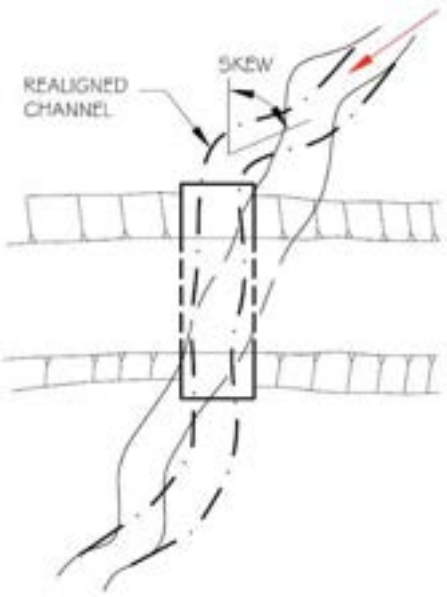


Figure 1.16—Debris and sediment at culvert inlet can be a fish barrier. Photo courtesy of Ross Taylor and Associates, McKinleyville, California.

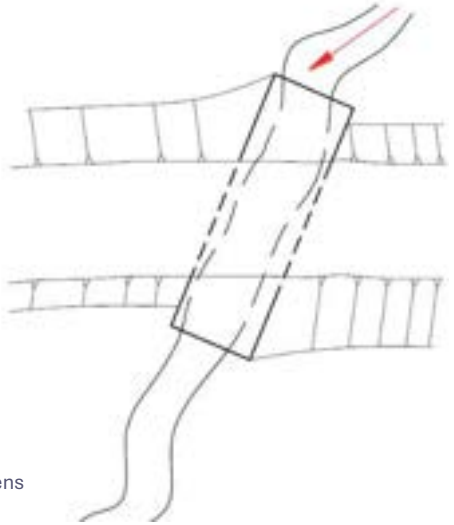
¿Cómo afectan las ODT a la dinámica morfológica?

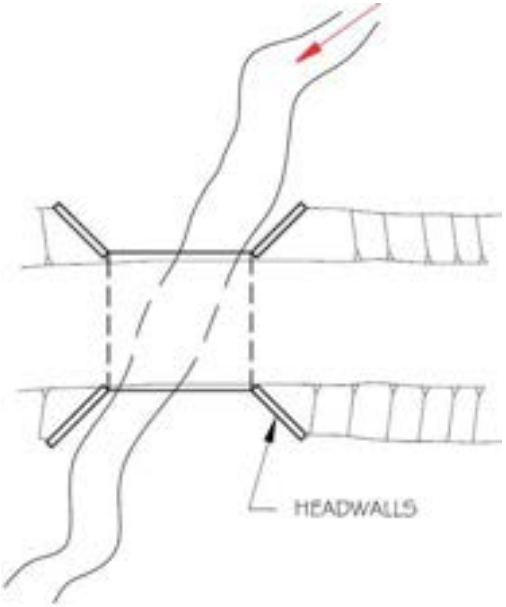
Los cursos de agua se mueven horizontal y verticalmente en un proceso de equilibrio dinámico:

- La ODT debe tener en cuenta ese dinamismo.









Fish Passage Solutions on the West Coast: Culverts, Tidegates, and Fish Screens

¿ODT y llanura de inundación?

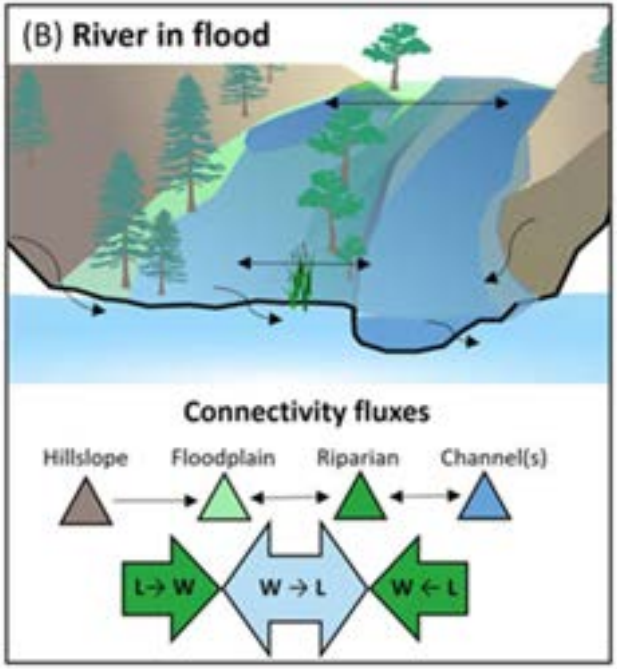
La circulación de agua, restos vegetales, sedimentos, propágulos y organismos por la llanura de inundación durante avenidas también debe considerarse:



Natural channel with
- Bankfull channel
- Flood plain
- Ecological processes







Tomada de :
Kurt Gernerd. Stream Simulation Designed Road-Stream Crossings beyond Aquatic Organism Passage

✓ **Reto nº1**: El agua pasa...
¿qué más quieres?

RETO Nº2: MENOSPRECIANDO LO PEQUEÑO

VALE, ENTENDIDO... PERO LA MAYORÍA DE LAS ODT ESTÁN SOBRE PEQUEÑOS RÍOS, ARROYOS Y CAUCES TEMPORALES

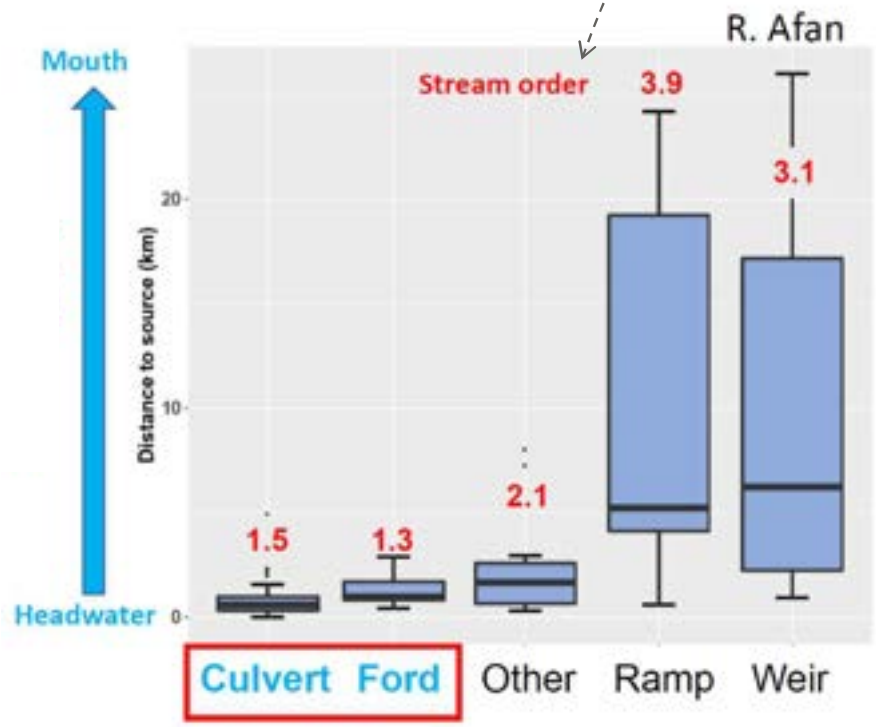
¡NO SERÁ PARA TANTO!





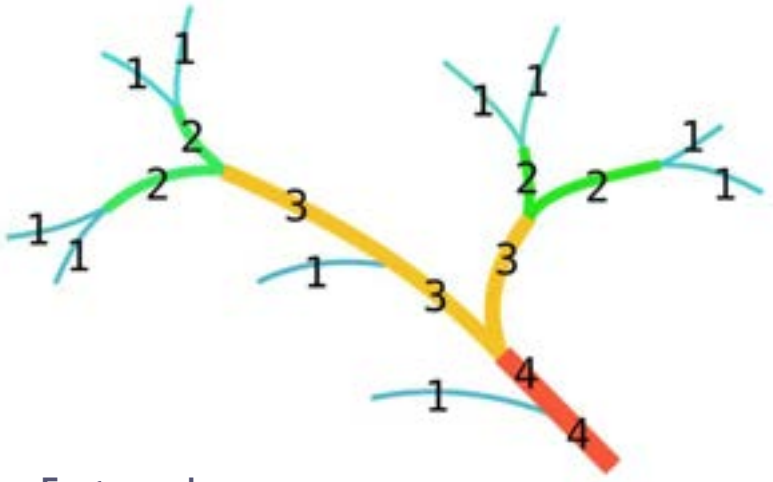
¿Es importante el problema?

¿Dónde están las ODT?



Carlos García de Leaniz, 2024

Stream order



En general:

- Las ODT están en cursos de agua pequeños
- Generalmente en cabecera, pero no siempre
- No siempre están contemplados como “masas de agua”, aunque forman parte del DPH

Consecuencia:

- La “visibilidad” social y administrativa es muy reducida
- Ambientalmente suelen pasar desapercibidos, a pesar de tener una gran relevancia

¿Es importante el problema?

¿Cuántas ODT hay?

$$N = \frac{n}{l} * L$$

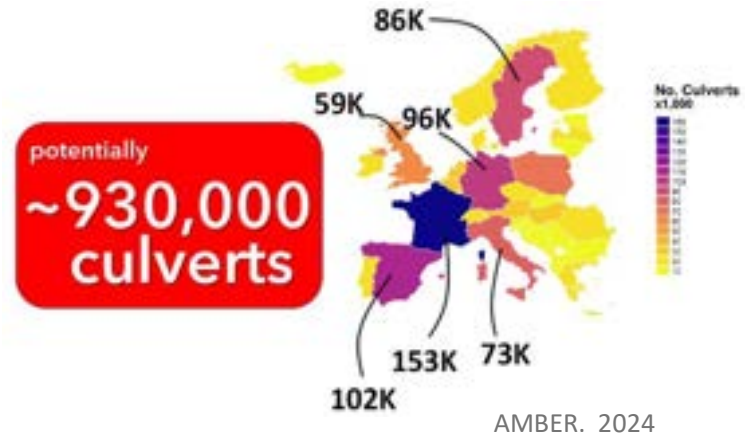
$$No.\,culverts = culvert\ dens. \bullet River\ network$$

0.125 culverts/km in 1st-2nd order streams[1]

80% of 5M km are 1st-2nd order streams[2]

$0.125 \times 0.8 \times 5 \times 10^6 =$ **0.5M culverts?**

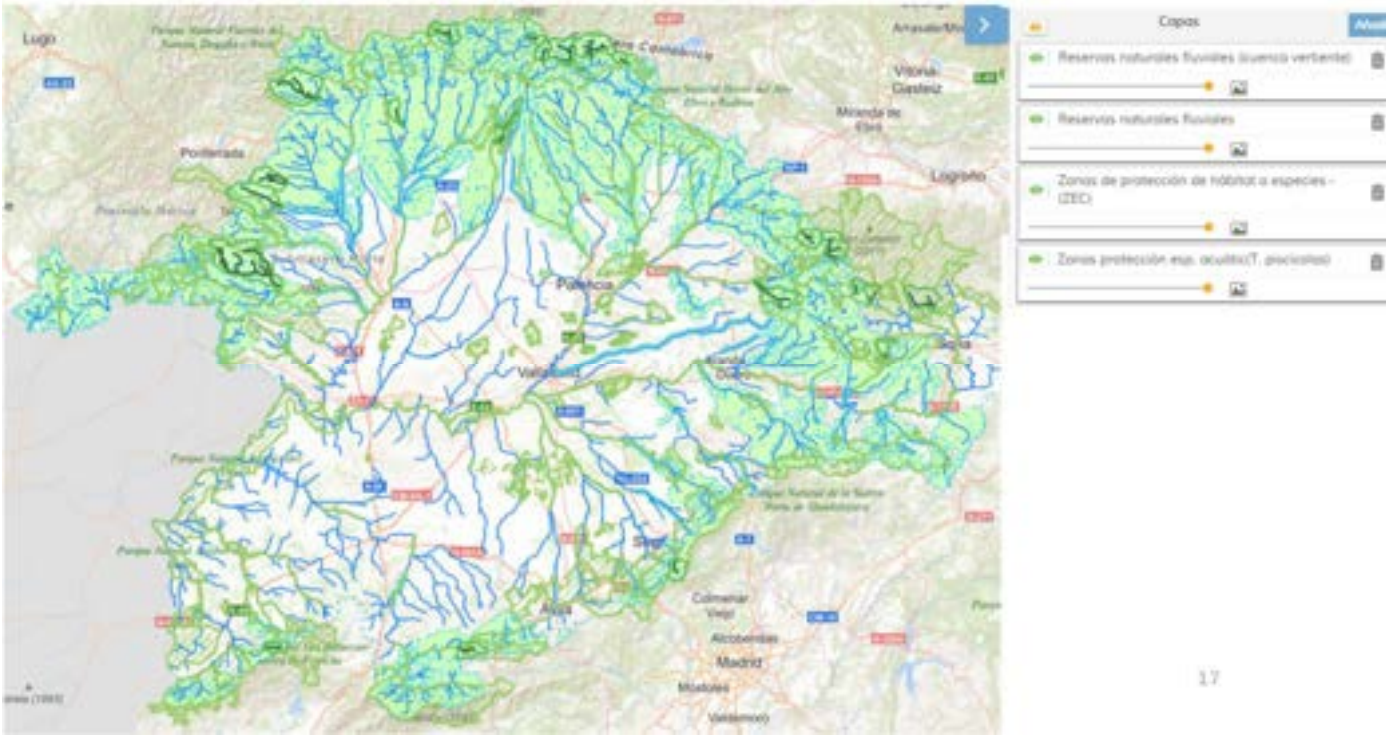
Carlos García de Leaniz, 2024



AMBER. 2024

Muchos, sí, pero… los cauces de 1er y 2º orden ¿son ambientalmente importantes?

- Baja alteración cuantitativa y cualitativa
- Importantes en la conservación de hábitats y especies
- Cruciales en la conectividad de zonas de gran valor ambiental



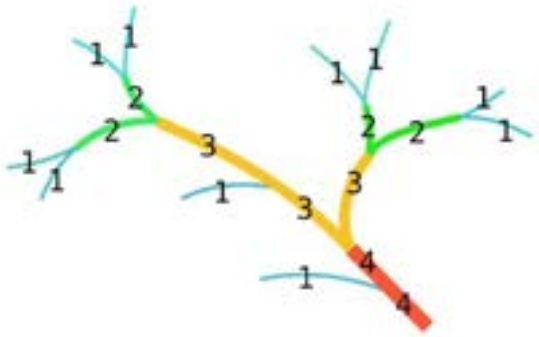




FIGURE 2. Factors That Contribute to the Biological Importance of Headwater Streams in River Networks. Attributes on the right benefit species unique to headwaters and also make headwaters essential seasonal habitats for migrants from downstream. On the left are biological contributions of headwater ecosystems to riparian and downstream ecosystems.

Meyer, J.L., Strayer, D.L., Wallace, J.B., Eggert, S.L., Helfman, G.S. and Leonard, N.E. (2007), The Contribution of Headwater Streams to Biodiversity in River Networks1. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 43: 86-103. https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2007.00008.x

Pero muchos de esos cauces de 1er y 2º orden están mucho tiempo secos…

¡NO TIENEN PECES!

- **La temporalidad es una característica ecológica, no una deficiencia funcional:** la alternancia entre períodos húmedos y secos crea un mosaico de hábitats que potencia la diversidad taxonómica y funcional.

- **Adaptaciones especializadas**: los organismos que los ocupan desarrollan rasgos de supervivencia y estrategias de comportamiento muy singulares para adecuarse a esa temporalidad.

- **Corredores ecológicos duales:**
  - En el periodo húmedo estos cauces actúan como corredores acuáticos activos que conectan diferentes partes de la red fluvial y ofrecen biotopos adecuados para la freza, alimentación, crecimiento y/o refugio.
  - Durante la fase seca, los cauces se transforman en valiosos corredores y zonas de alimentación para la fauna terrestre.

- **Relevantes para la integridad de la red fluvial:** aportan sedimentos, nutrientes, materia orgánica, organismos acuáticos y semillas y propágulos que enriquecen los cauces permanentes aguas abajo.

ODT sin funcionalidad ambiental… ¿es importante el problema?





- Sin duda, y tanto en términos absolutos como relativos.
- Su pequeño tamaño y la apariencia de permeabilidad enmascaran una realidad que tiene un altísimo potencial de afección a los ecosistemas fluviales, tanto en componentes como en procesos y funciones.











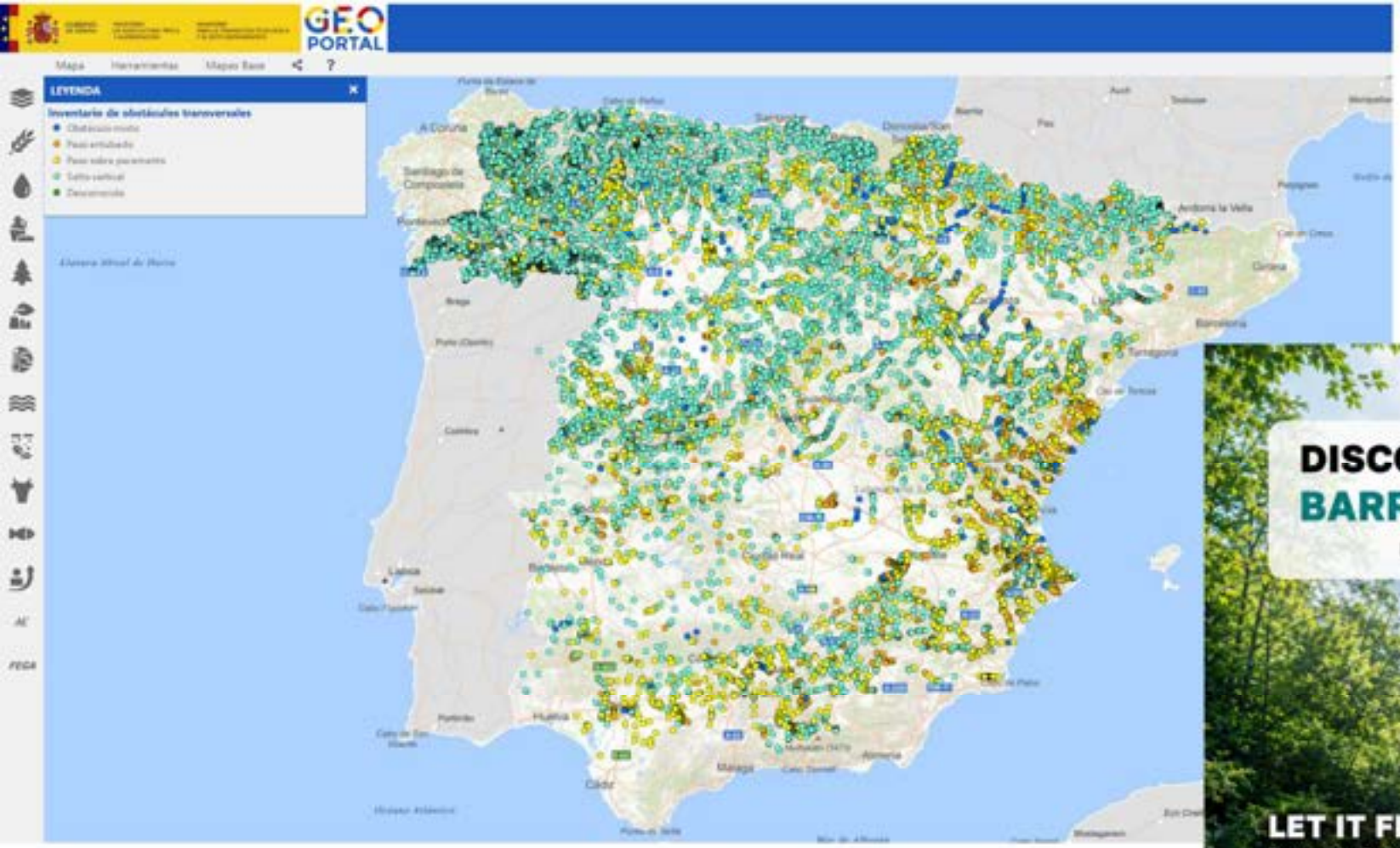
FIGURE 2. Factors That Contribute to the Biological Importance of Headwater Streams in River Networks. Attributes on the right benefit species unique to headwaters and also make headwaters essential seasonal habitats for migrants from downstream. On the left are biological contributions of headwater ecosystems to riparian and downstream ecosystems.

≈10%

≈90%

% respecto al número total de obstáculos transversales

¿Es importante el problema?





https://amber.international/citizen-science/

✓ **Reto nº1**: El agua pasa...
¿qué más quieres?
✓ **Reto nº2:** Menospreciando lo pequeño...
¡no será para tanto!

RETO Nº3: CUMPLO TODOS LOS REQUERIMIENTOS LEGALES...

¡DÉJAME DE CHORRADAS!

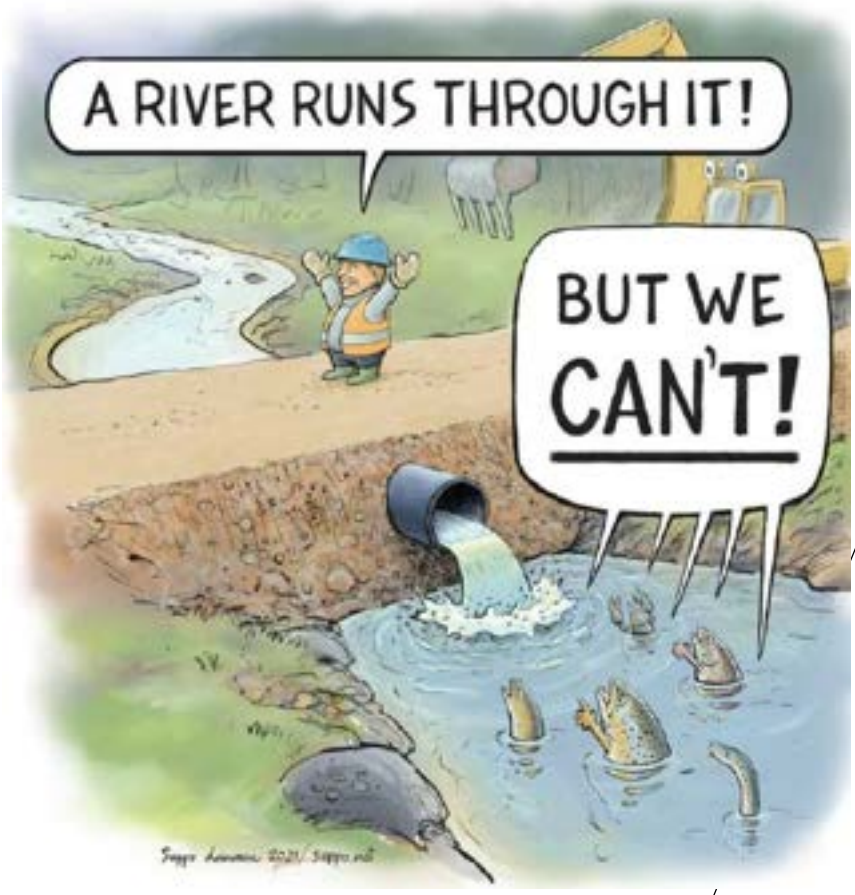


¿Qué requisitos debe cumplir una "buena" ODT?





"Buena" ¿para quién?



¿Qué requisitos debe cumplir una "buena" ODT?

BOLETÍN OFICIAL DEL ESTADO

Núm. 60 Jueves 10 de marzo de 2016 Sec. I. Pág. 18882

I. DISPOSICIONES GENERALES

MINISTERIO DE FOMENTO

2405 *Orden FOM/298/2016, de 15 de febrero, por la que se aprueba la norma 5.2 - IC drenaje superficial de la Instrucción de Carreteras.*

4.2 Criterios básicos de proyecto

El proyecto del drenaje transversal se debe abordar conforme a la sistemática que a continuación se refiere:

- Definición de la cuenca principal, del cauce y del punto de cruce.
- Cálculo del caudal de proyecto Q_P.
- Elección de tipologías y dimensionamiento del puente u ODT. Encaje geométrico en el terreno.
- Comprobación hidráulica del puente u ODT.
- Cálculo de las variables hidráulicas necesarias para la determinación de acciones en el cálculo estructural.
- Proyecto completo del puente u ODT. La representación en los planos debe incluir la lámina de agua correspondiente al caudal de proyecto, las profundidades de erosión o socavación y en los anejos a la memoria se deben incluir las curvas características de las ODT.



La respuesta del BOE

Los puentes y ODT deben perturbar lo menos posible la circulación del agua por el terreno natural, cumpliendo al paso del caudal de proyecto las condiciones de desagüe que se refieren en los apartados 4.3 y 4.4 y las condiciones que establezca la Administración Hidráulica.

1.3.2 CAUDAL DE PROYECTO

Caudal de proyecto Q_P, es aquél que se debe tener en cuenta para efectuar el dimensionamiento hidráulico de una obra, elemento o sistema de drenaje superficial de la carretera. Se considera igual al caudal máximo anual correspondiente a los periodos de retorno que se indican a continuación, determinados conforme a lo especificado en el capítulo 2:

- Drenaje de plataforma y márgenes: veinticinco años (T = 25 años), salvo en el caso excepcional de desagüe por bombeo en que se debe adoptar cincuenta años (T = 50 años).
- Drenaje transversal: se debe establecer por el proyecto en un valor superior o igual a cien años ($T \geq$ 100 años) que resulte compatible con los criterios sobre el particular de la Administración Hidráulica competente.

En el proyecto se pueden adoptar valores distintos en casos que se justifiquen de manera expresa.

¿Qué requisitos debe cumplir una "buena" ODT?

¿Sólo deben cumplir condiciones de desagüe?





En las 142 páginas de la Norma…
¡es la única mención explícita a las funcionalidades ambientales!





4.4.3.2 Secciones especiales para paso de fauna

Cuando en el proyecto se determine que es necesario facilitar el paso de fauna por una ODT se pueden proyectar secciones o dispositivos especiales que requieren un cálculo hidráulico específico, tales como:

- Canal de aguas bajas
- Obra semienterrada (lecho móvil)
- Escalas de peces
- Rampas en arquetas para pequeña fauna
- Otras

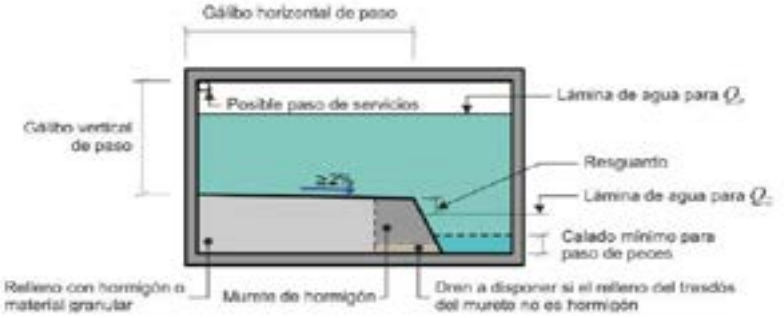


FIGURA 4.21 EJEMPLO DE SECCIÓN TRANSVERSAL ADAPTADA PARA PASO DE FAUNA

¿Qué requisitos debe cumplir una "buena" ODT?

La respuesta del BOE (Administración hidráulica)

«Artículo 126 bis. *Condiciones para garantizar la continuidad fluvial.*

1. El organismo de cuenca promoverá el respeto a la continuidad longitudinal y lateral de los cauces compatibilizándolo con los usos actuales del agua y las infraestructuras hidráulicas recogidas en la planificación hidrológica.

2. En los condicionados de las nuevas concesiones y autorizaciones o de la modificación o revisión de las existentes, que incluyan obras transversales en el cauce el organismo de cuenca exigirá la instalación y adecuada conservación de dispositivos que garanticen su franqueabilidad por la ictiofauna autóctona. Igual exigencia tendrá lugar para las obras de este tipo existentes, vinculadas a concesiones y autorizaciones que incluyan esta obligación en su condicionado o que deban incorporar tales dispositivos en aplicación de la legalidad vigente.

Se podrá prescindir temporalmente de estos dispositivos por criterios ambientales o por inviabilidad técnica, a justificar adecuadamente en cada caso. En función de la evolución ambiental del tramo o de la mejora de las técnicas, el organismo de cuenca podrá exigir su instalación cuando las condiciones así lo aconsejen.

5. Para el otorgamiento de nuevas autorizaciones o concesiones de obras transversales al cauce, que por su naturaleza y dimensiones puedan afectar significativamente al transporte de sedimentos, será exigible una evaluación del impacto de dichas obras sobre el régimen de transporte de sedimentos del cauce. En la explotación de dichas obras se adoptarán medidas para minimizar dicho impacto.

6. El organismo de cuenca, en aplicación de la legalidad vigente y de forma subsidiaria, podrá llevar a cabo actuaciones de mejora de la continuidad fluvial en infraestructuras existentes, todo ello precedido de la tramitación del procedimiento administrativo correspondiente en el que se dé la posibilidad al particular, además



BOLETÍN OFICIAL DEL ESTADO

Núm. 208 Jueves 31 de agosto de 2023 Sec. I. Pág. 121618

I. DISPOSICIONES GENERALES

MINISTERIO DE LA PRESIDENCIA, RELACIONES CON LAS CORTES Y MEMORIA DEMOCRÁTICA

18806 *Real Decreto 665/2023, de 18 de julio, por el que se modifica el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, aprobado por Real Decreto 849/1986, de 11 de abril; el Reglamento de la Administración Pública del Agua, aprobado por Real Decreto 927/1988, de 29 de julio; y el Real Decreto 9/2005, de 14 de enero, por el que se establece la relación de actividades potencialmente contaminantes del suelo y los criterios y estándares para la declaración de suelos contaminados.*

¿Qué requisitos debe cumplir una "buena" ODT?

La respuesta del BOE
(Administración hidráulica)

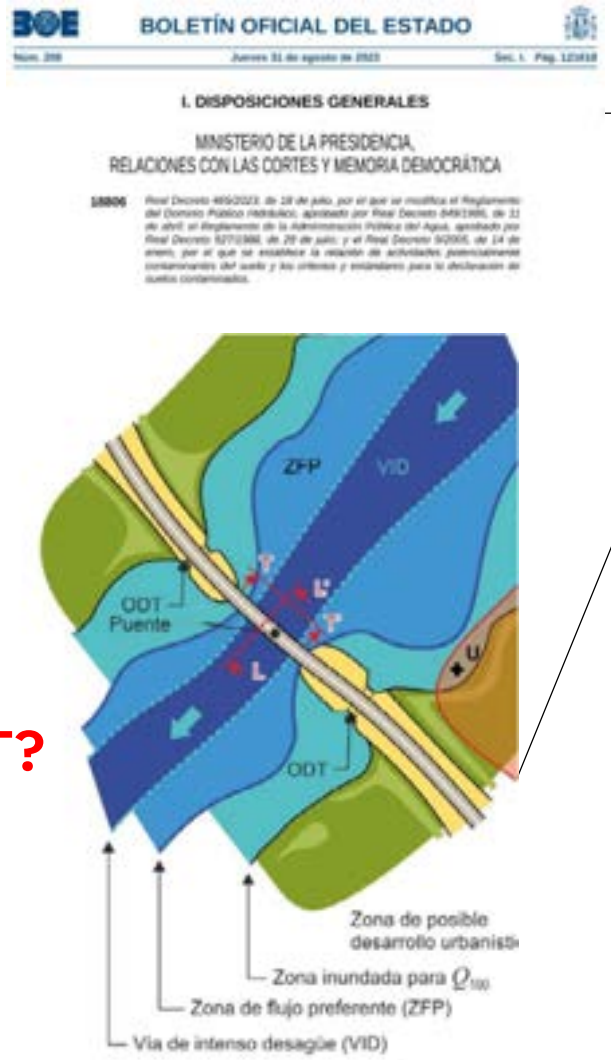
«Artículo 126 ter. *Criterios de diseño y conservación para obras de protección, modificaciones en los cauces y obras de paso.*

3. El diseño de los puentes, pasarelas y obras de drenaje transversal en las autopistas, autovías y nuevas carreteras multicarril y convencionales y de la red ferroviaria, así como de aquellas otras vías de comunicación que den acceso a instalaciones y servicios básicos para la planificación de protección civil, se realizará de forma que no se ocupe la vía de intenso desagüe con terraplenes o estribos de la estructura de paso y no se produzcan alteraciones significativas de la zona de flujo preferente, para lo cual la obra de paso se complementará con posibles obras de drenaje adicionales y pasos inferiores.

En caso necesario, podrán ubicarse pilas dentro de la vía de intenso desagüe, minimizando siempre la alteración del régimen hidráulico, y garantizando que la sobreelevación producida sea inferior a los límites establecidos en el artículo 9.2. En aquellas zonas donde pueda verse afectada la seguridad de las personas y bienes o el posible desarrollo urbanístico, la sobreelevación máxima será inferior a 10 centímetros.

4. Los puentes en caminos vecinales, vías y caminos de servicio y otras infraestructuras de baja intensidad de tráfico rodado, deberán tener, al menos, la misma capacidad de desagüe que el cauce en los tramos inmediatamente aguas arriba y aguas abajo. Asimismo, se diseñarán para no suponer un obstáculo a la circulación de los sedimentos y de la fauna piscícola, tanto en ascenso como en descenso.

¿ODT?



¿Qué requisitos debe cumplir una "buena" ODT?

La respuesta del BOE

(Administración hidráulica)

«Artículo 126 ter. *Criterios de diseño y conservación para obras de protección, modificaciones en los cauces y obras de paso.*

5. En el diseño de los drenajes transversales de las vías de comunicación se respetarán en la medida de lo posible las áreas de drenaje naturales y deberán adoptarse las medidas necesarias para limitar el incremento del riesgo de inundación que pueda derivarse.

6. En todo caso, los titulares de estas infraestructuras deberán realizar las labores de conservación necesarias que garanticen el mantenimiento de la capacidad de desagüe de la misma, para lo cual los particulares facilitarán el acceso de los equipos de conservación a sus propiedades, no pudiendo realizar actuaciones que disminuyan la capacidad de drenaje de las infraestructuras.

8. Los organismos de cuenca podrán, en su caso, exigir a los titulares de infraestructuras en las que se prevea la construcción de obras de drenaje transversal que su diseño se realice de forma que no se ocupe la zona de servidumbre de cinco metros de anchura para uso público».



BOLETÍN OFICIAL DEL ESTADO

Núm. 208 Jueves 31 de agosto de 2023 Sec. I. Pág. 121618

I. DISPOSICIONES GENERALES

MINISTERIO DE LA PRESIDENCIA, RELACIONES CON LAS CORTES Y MEMORIA DEMOCRÁTICA

18806 *Real Decreto 665/2023, de 18 de julio, por el que se modifica el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, aprobado por Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, el Reglamento de la Administración Pública del Agua, aprobado por Real Decreto 927/1988, de 29 de julio, y el Real Decreto 9/2005, de 14 de enero, por el que se establece la relación de actividades potencialmente contaminantes del suelo y los criterios y estándares para la declaración de suelos contaminados.*

¿Qué requisitos debe cumplir una “buena” ODT?





BOE
LEGISLACIÓN CONSOLIDADA

Reglamento del Dominio Público Hidráulico





NOS ENFRENTAMOS AL PEOR DE LOS PROBLEMAS:
LA CERTEZA DE NO TENER PROBLEMA

- ✓ **Reto nº1**: El agua pasa...

¿qué más quieres?

- ✓ **Reto nº2:** Menospreciando lo pequeño...

¡no será para tanto!

- ✓ **Reto nº3**: Cumplo todos los requerimientos legales...

¡déjame de chorradas!



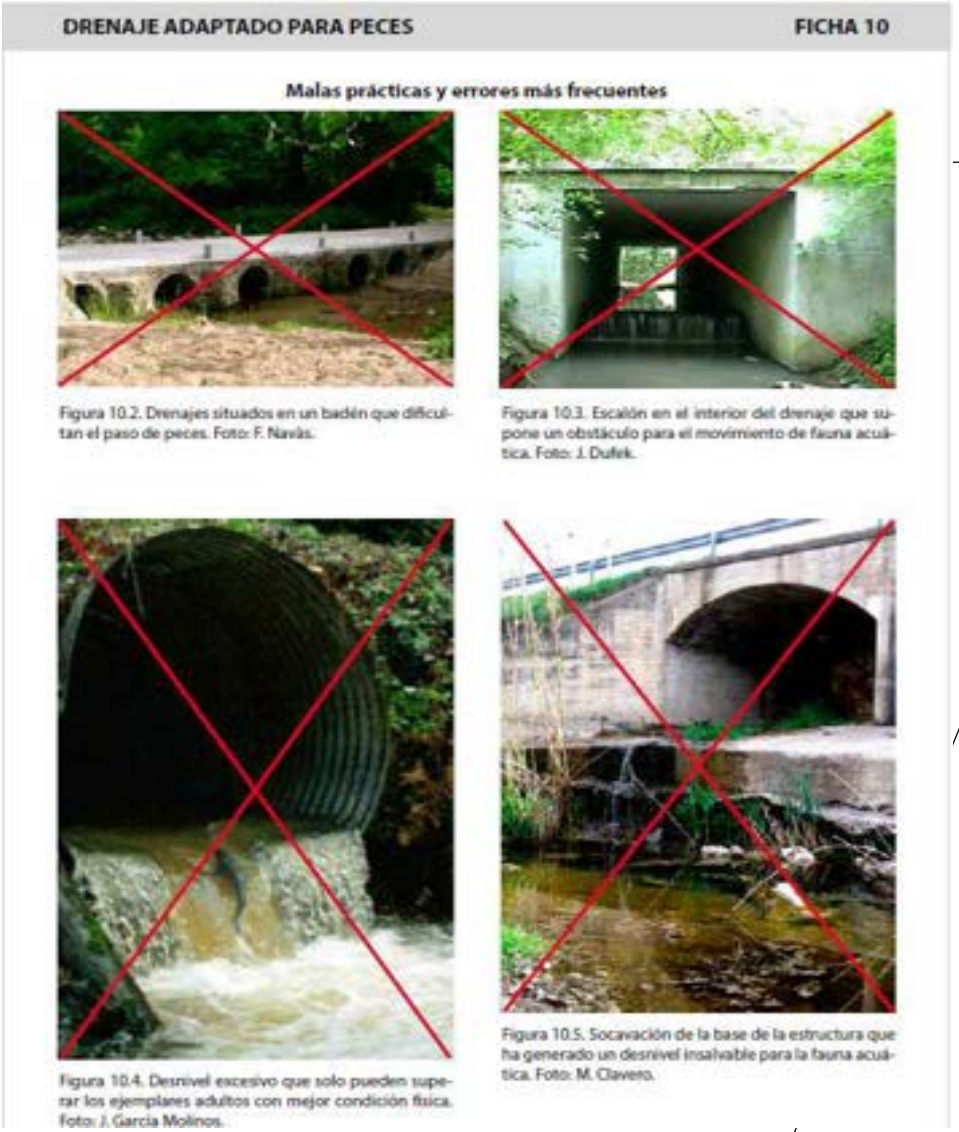
RETO Nº4: NORMATIVA AMBIENTAL PARA ODT...

¡LO QUE FALTABA!

¿Es necesario tener en cuenta la funcionalidad ambiental de las ODT?

HAY UN BUEN PRECEDENTE…





¿Es necesario tener en cuenta la funcionalidad ambiental de las ODT?

HAY UN BUEN PRECEDENTE…



¡QUE NO TIENE CONTINUIDAD!



En las imágenes de la portada hay insectos, aves, anfibios, mamíferos, reptiles, pasos para fauna terrestre… pero **¡ninguna referencia al ecosistema fluvial!**

En las 80 páginas del texto **NO** aparecen ni una sola vez ninguna de las siguientes palabras:

- ✓ Río
- ✓ Cauce
- ✓ Arroyo
- ✓ Ribera
- ✓ Ecosistema fluvial
- ✓ Peces
- ✓ Ictiofauna

¿Es necesario tener en cuenta la funcionalidad ambiental de las ODT?

Otras respuestas…

USDA FOREST SERVICE

Caring for the land and serving people



National USFS AOP "Policy"

"Protect and Restore the Physical, Biological and Chemical integrity of the nations waters" (Intent of the Clean Water Act)

Primary Design Priority:

- Aquatic organism passage and ecological connectivity is the goal and the first design priority for crossing streams that provide habitat for aquatic life.

Other Design Considerations:

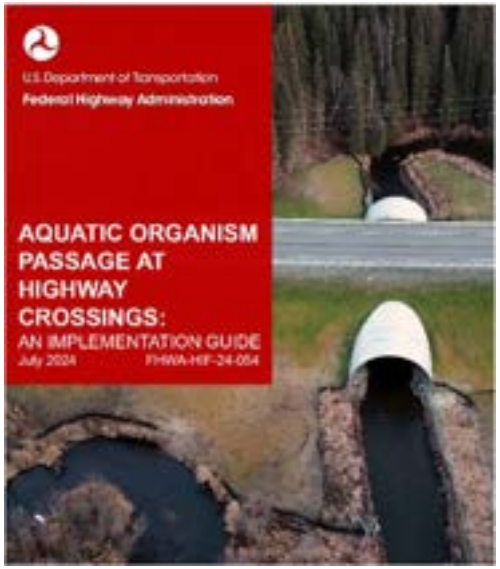
- Minimizing the consequences of plugging and overtopping, including the ability to prevent stream diversion.
- Sufficient hydraulic capacity, including the requirement that headwater depth does not cause pressurized flow at the maximum flood.
- Maximize benefits while minimizing life cycle cost.

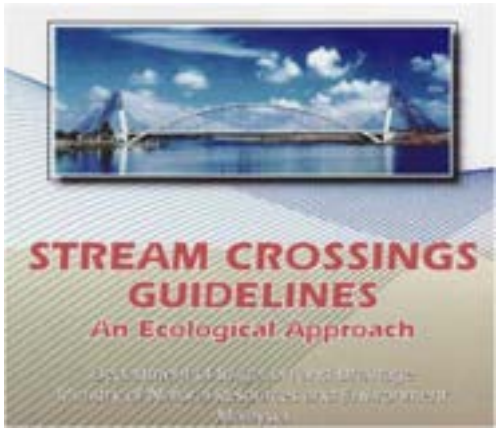
Kurt Gernerd. Stream Simulation Designed Road-Stream Crossings beyond Aquatic Organism Passage

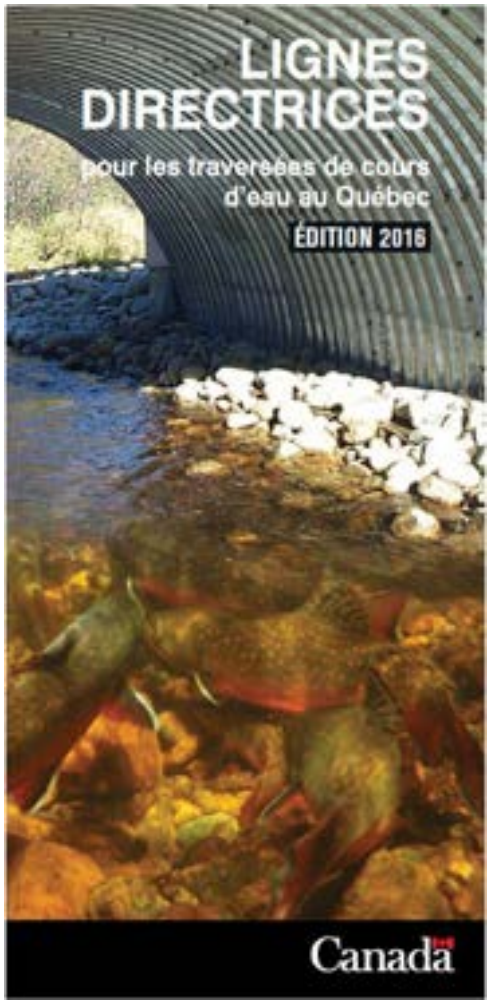
¿Es necesario tener en cuenta la funcionalidad ambiental de las ODT?

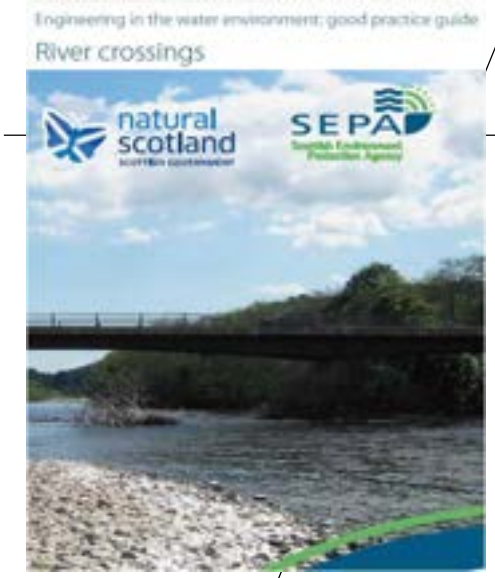
Otras respuestas… **idesde organismos públicos!**

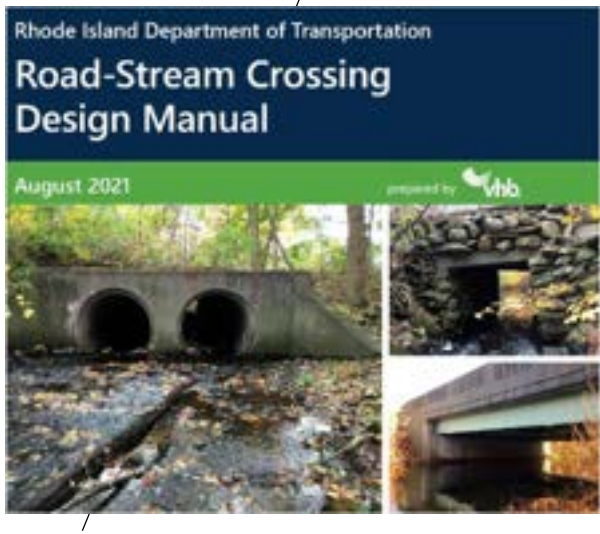












¿Es necesario tener en cuenta la funcionalidad ambiental de las ODT?

Otras respuestas… **idesde organismos públicos!**

AQUATIC ORGANISM PASSAGE
MONITORING & ASSESSMENT PROTOCOL
(aopMAP)

FIELD MANUAL

Version 4.0

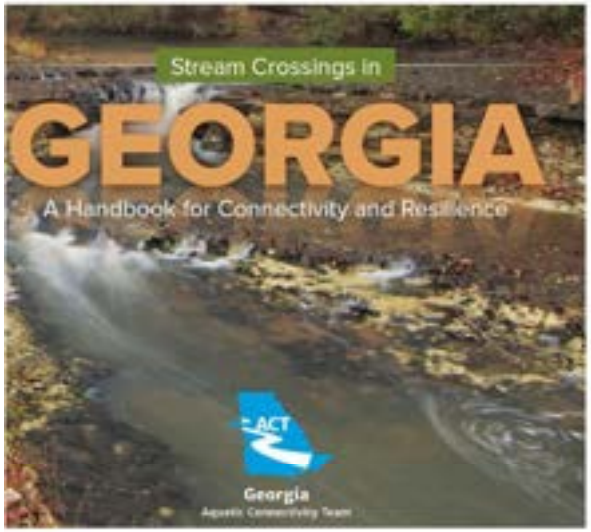
August 1, 2024



TRANSPORTATION RESEARCH SYNTHESIS

TRS 1302
Published March 2013

CULVERT DESIGNS FOR AQUATIC ORGANISM PASSAGE: CULVERT DESIGN PRACTICES INCORPORATING SEDIMENT TRANSPORT



Sétra

Note d'information

Auteurs : CETE de l'Est
ONEMA

décembre 2013

Petits ouvrages hydrauliques et continuités écologiques
Cas de la faune piscicole

RÉSEAU FERRÉ DE FRANCE

ONEMA

POUR UNE TRANSPARENCE HYDRO-ECOLOGIQUE DES LIGNES NOUVELLES FERROVIAIRES

PRINCIPES DE PRISE EN COMPTE DES COURS D'EAU ET DES ZONES HUMIDES









Juin 2014

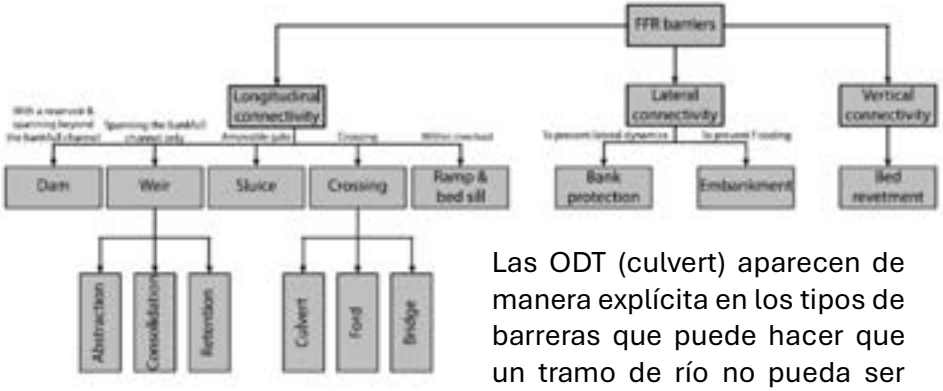
¿Es necesario tener en cuenta la funcionalidad ambiental de las ODT?

Otras respuestas… **idesde organismos públicos!**



Annex 2. Overview of FFR relevant barrier types with their key attributes and impacts

Figure 9 - High-level overview of barrier types to be considered in the FFR assessment



Las ODT (culvert) aparecen de manera explícita en los tipos de barreras que puede hacer que un tramo de río no pueda ser considerado de flujo libre.

Type	**CROSSING STRUCTURES**
Sub-type	**General Description**

Definition

Crossing structures include a broad range of transversal barrier types (see sub-types below)with widely variable impacts on connectivity.

Type	**CROSSING STRUCTURES**
Sub-type	**Culvert**

Definition

A culvert is a structure aimed at carrying a stream or river under an obstruction (often secondary roads, forest tracks or railways). It varies in form from round and elliptical to box-shaped.

Use: carrying a stream or river under an obstruction

Impacts on longitudinal/lateral/vertical connectivity

Longitudinal connectivity always to be considered, but its relevance in relation to sediment transport and fish mobility needs to be assessed case by case, depending in the size and design of the structure.

Negligible impact on lateral connectivity.

Local impact on vertical connectivity.

Pictures



Round (left) and box-shaped (right) culverts

EL REGLAMENTO EUROPEO DE RESTAURACIÓN DE LA NATURALEZA PLANTEA ALCANZAR EN 2030 **25000** KILÓMETROS DE RÍOS DE FLUJO LIBRE.

EN LA ESTRATEGIA NACIONAL DE RESTAURACIÓN DE RÍOS, ESPAÑA SE COMPROMETE A CONTRIBUIR CON **3000** KILÓMETROS.

¿Es necesario tener en cuenta la funcionalidad ambiental de las ODT?



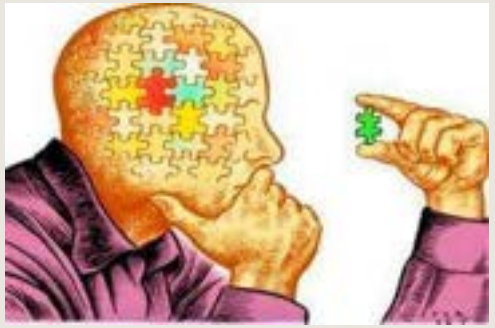
UN ALTO EN EL CAMINO: QUÉ SABEMOS Y QUÉ PODEMOS HACER

Sabemos que:

- ✓ Las ODT concebidas únicamente con criterios de funcionalidad viaria pueden afectar muy negativamente a la "*salud*" de los ecosistemas fluviales.
- ✓ Es un problema importante.
- ✓ La legislación vigente no contempla, para su diseño y cálculo, la aplicación de criterios que garanticen la funcionalidad ambiental de las ODT.

¿Qué podemos hacer?

- ✓ Hacer llegar al "*legislador*" la necesidad de que incorpore en la normativa y en las autorizaciones la consideración de criterios ambientales en el diseño y dimensionado de ODT.
- ✓ Incorporar en nuestros diseños de ODT la funcionalidad ambiental.
- ✓ En la fase de construcción y mantenimiento, velar porque esa funcionalidad se garantice.



- ✓ **Reto nº1**: El agua pasa...
¿qué más quieres?
- ✓ **Reto nº2:** Menospreciando lo pequeño...
¡no será para tanto!
- ✓ **Reto nº3**: Cumplo todos los requerimientos legales...
¡déjame de chorradas!
- ✓ **Reto nº4**: Normativa ambiental para ODT...
¡lo que faltaba!



RETO Nº5: DISEÑAR Y DIMENSIONAR ODT CON CRITERIOS AMBIENTALES...

¿SABEMOS?

¿Cómo diseñar ODT con criterios ambientales?

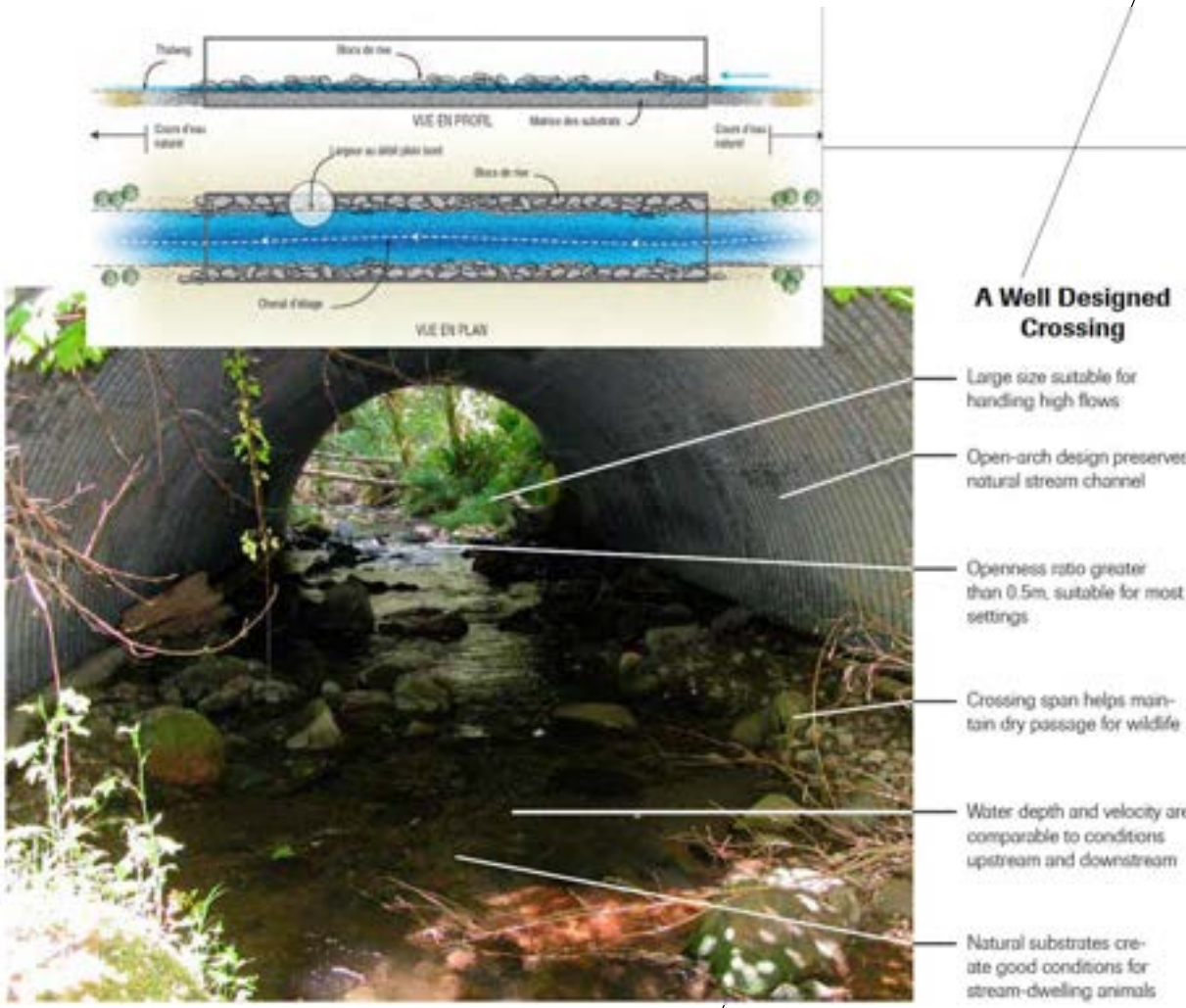
Criterio de diseño ambiental:

Mimetizar lo más fielmente posible la ODT con el curso natural.

- Más ancha que el cauce natural adyacente, con paso seco para caudales ordinarios.
- Lecho natural continuo y dinámicamente estable.
- Morfología y perfiles longitudinal y transversal similares a los del curso natural.

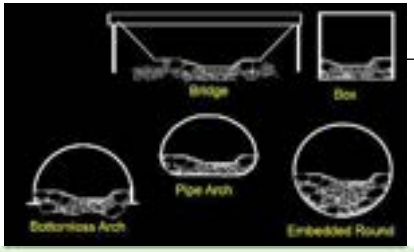
Se complementa con verificación hidráulica:

- Requerimientos de las especies objetivo:
  - Para Q“bajos”: calado ODT>calado mínimo
  - Para Q”altos”: velocidad ODT<velocidad máxima
- Estabilidad del lecho para el caudal de proyecto.



¿Cómo <u>diseñar</u> ODT con criterios ambientales?





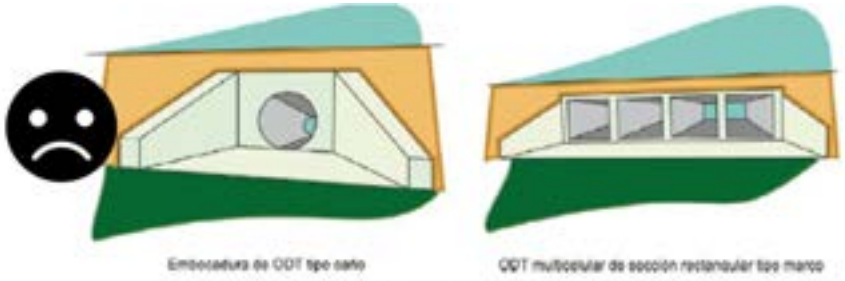
BOE BOLETÍN OFICIAL DEL ESTADO

Núm. 60 Jueves 10 de marzo de 2016 Sec.

I. DISPOSICIONES GENERALES

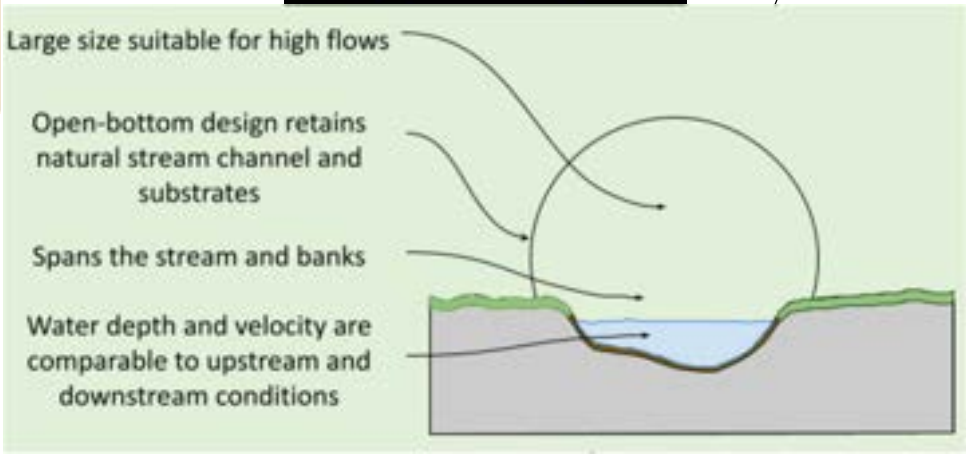
MINISTERIO DE FOMENTO

2405 *Orden FOM/298/2016, de 15 de febrero, por la que se aprueba la norma 5.2 - IC drenaje superficial de la Instrucción de Carreteras.*



Embocadura de ODT tipo caño ODT multicelular de sección rectangular tipo marco

FIGURA 4.1.- EJEMPLOS DE PUENTES Y ODT



Recommendations for Aquatic Organism Passage at Maryland Road-Stream Crossings. 2021

¡Un cambio de concepto radical!

¿Cómo <u>diseñar</u> ODT con criterios ambientales?

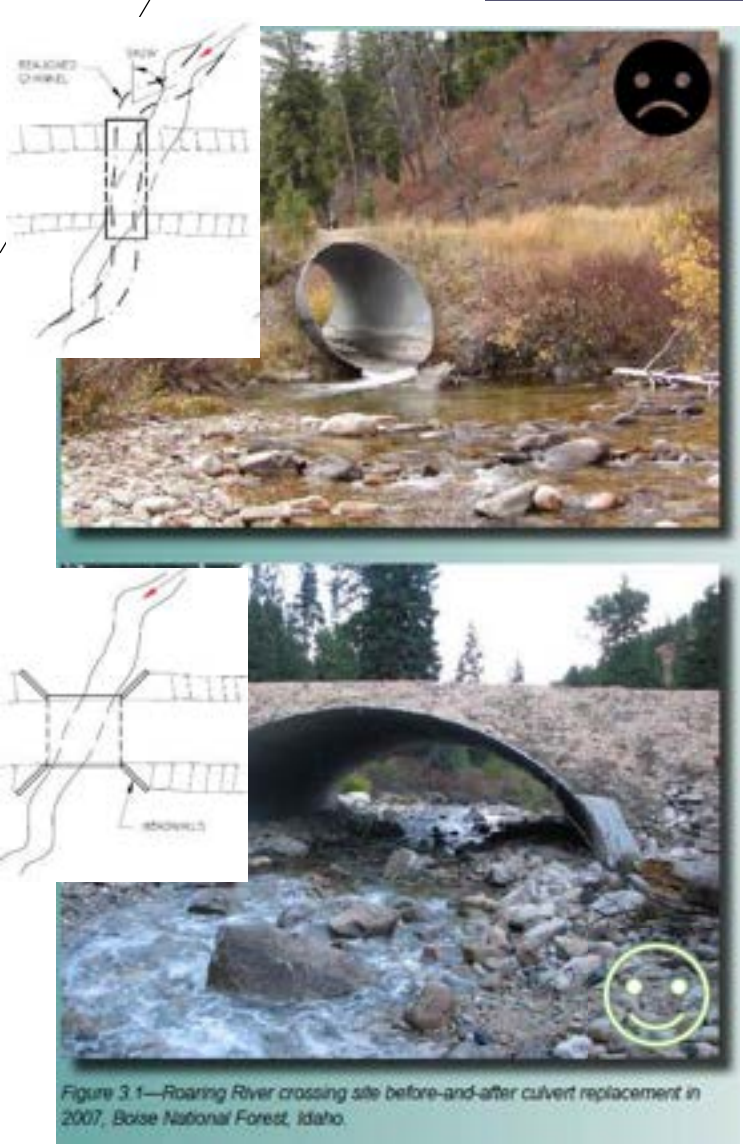


Figure 3.1—Roaring River crossing site before-and-after culvert replacement in 2007, Boise National Forest, Idaho.







AHORA UN PASO IMPORTANTE:

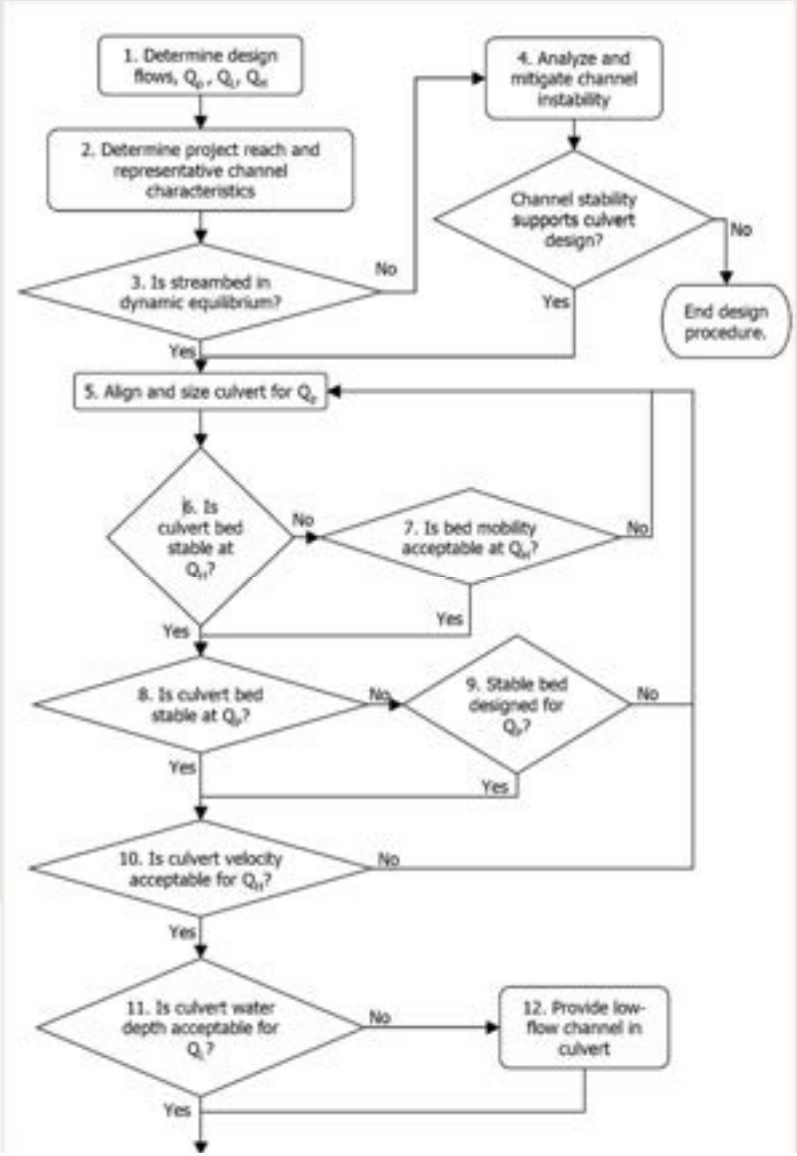
DE ¿CÓMO DISEÑAR ODT CON CRITERIOS AMBIENTALES?

A ¿CÓMO **DIMENSIONAR** ODT CON CRITERIOS AMBIENTALES?



- Transitabilidad biota
- Transitabilidad sedimentos y restos vegetales
- Mantener dinámica geomorfológica

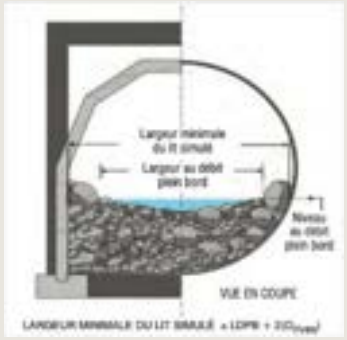
¿ES POSIBLE **DIMENSIONAR** ODT **COMPATIBILIZANDO** CRITERIOS DE FUNCIONALIDAD VIARIA Y AMBIENTALES?





1. Estimar los caudales a considerar para el dimensionado
   - Q_P= caudal de proyecto (T=100 años)
   - Q_L= caudal de aguas bajas para el periodo de migración prerreproductiva de la especie objetivo
   - Q_H= caudal de aguas altas para el periodo de migración prerreproductiva de la especie objetivo
2. Caracterizar el tramo donde se situará la ODT y evaluar su equilibrio dinámico
3. Predimensionar la ODT
4. Verificar la estabilidad del lecho
5. Verificar la transitabilidad de la ictiofauna para Q_L y Q_H

¿CÓMO **DIMENSIONAR** ODT CON CRITERIOS AMBIENTALES?



Mimetizar lo más fielmente posible la ODT con el curso natural.



1. **Caracterizar en campo el cauce (anchura; pendiente; lecho…) y evaluar su equilibrio dinámico**

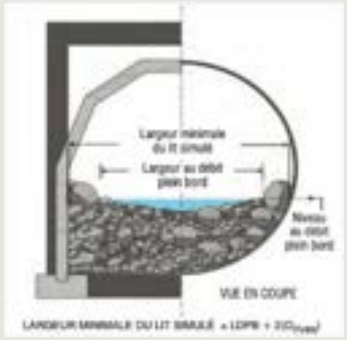
2. **Estimar los caudales de diseño considerando funcionalidad viaria y ambiental**
   a) **Caudal de proyecto según norma 5.2-IC (Q_P)**
   b) **Especies objetivo:**
      - **Requisitos de transitabilidad -calado mínimo (y_{min}) y velocidad máxima (v_{max})-**
      - **Periodo prerreproductivo -u otro periodo de funcionalidad-**
      - **Definir los caudales de aguas altas (Q_H) y bajas (Q_L) [p.e. caudales para los percentiles de excedencia del 10% y 90%. Con ese criterio se garantiza la transitabilidad para el 80% del periodo considerado]**

3. **Dimensionado ambiental**
   3.0 Criterios de aplicación
   3.1 Definir la geometría en planta, sección y perfil longitudinal
   3.2 Seleccionar el marco
   3.3 Establecer espesor del lecho
   3.4 Dimensionar el cauce de aguas bajas
   3.5 Comprobar la condición de calado mínimo: cuando el calado en el cauce de aguas bajas es y_{min} se debe cumplir que $Q(y_{min}) \leq Q_L$
   3.6 Comprobar la condición de velocidad máxima: cuando el caudal que circula por la ODT es Q_H se debe cumplir que $v(Q_H) \leq v_{max}$

4. **Comprobar norma 5.2-IC para Q_P**

5. **Comprobar la estabilidad del lecho para $Q_{bankfull}$ y movilidad aceptable para Q_P**

¿CÓMO **DIMENSIONAR** ODT CON CRITERIOS AMBIENTALES?



Mimetizar lo más fielmente posible la ODT con el curso natural.





No hay tiempo para abordar todos los detalles

1. **Caracterizar en campo el cauce (anchura; pendiente; lecho…) y evaluar su equilibrio dinámico**
2. **Estimar los caudales de diseño considerando funcionalidad viaria y ambiental**
   a) **Caudal de proyecto según norma 5.2-IC (Q_P)**
   b) **Especies objetivo:**
      - **Requisitos de transitabilidad -calado mínimo (y_{min}) y velocidad máxima (v_{max})-**
      - **Periodo prerreproductivo -u otro periodo de funcionalidad-**
      - **Definir los caudales de aguas altas (Q_H) y bajas (Q_L)**
3. **Dimensionado ambiental**
   - **3.0 Criterios de aplicación**
   - **3.1 Definir la geometría en planta, sección y perfil longitudinal**
   - **3.2 Seleccionar el marco**
   - **3.3 Establecer espesor del lecho**
   - **3.4 Dimensionar el cauce de aguas bajas**
   - **3.5 Comprobar la condición de calado mínimo: cuando el calado en el cauce de aguas bajas es y_{min} se debe cumplir que $Q(y_{min}) \leq Q_L$**
   - **3.6 Comprobar la condición de velocidad máxima: cuando el caudal que circula por la ODT es Q_H se debe cumplir que $v(Q_H) \leq v_{max}$**
4. **Comprobar norma 5.2-IC para Q_P**
5. **Comprobar la estabilidad del lecho para $Q_{bankfull}$ y movilidad aceptable para Q_P**

Lo analizamos a continuación

Indicamos el procedimiento

Lo podéis trabajar con un **CASO PRÁCTICO –guiado paso a paso-** apoyado por una hoja de cálculo

¿CÓMO **DIMENSIONAR** ODT CON CRITERIOS AMBIENTALES?

1. CARACTERIZAR EN CAMPO EL CAUCE:



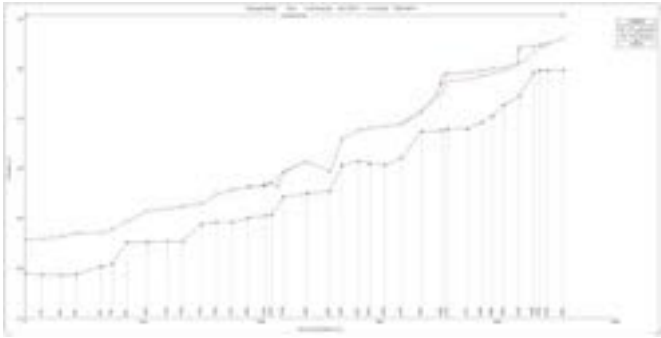
Tomada de : *Gubernick R. 2022*

❑ Anchura

- $Anch_{BF}$= Anchura del bankfull o de cauce lleno (m)
  - Para su determinación en campo se recomienda utilizar los criterios propuestos en [1] y [2].
- $Anch_{CA}$= Anchura del cauce activo (m)
  - Se entiende por cauce activo el que muestra signos de dinámica sedimentaria: barras, vegetación riparia pionera y reciente, depósitos o erosiones recientes…
- Es preferible utilizar el criterio de bankfull

❑ Pendiente

- Pte= Pendiente del lecho original (m/m)
  - Como los valores son bajos –habitualmente se expresan en tanto por mil-, la estimación de la pendiente del cauce debe hacerse considerando una longitud mínima de entre 100 y 200m, estacionando nivel y mira en puntos homólogos de la sección –por ejemplo, el thalweg-.
  - Es muy recomendable hacer varias mediciones con distintas distancias –dentro del rango propuesto-, para así tener información con la que poder establecer una pendiente representativa del tramo.



[1] https://www.waterboards.ca.gov/water_issues/programs/swamp/docs/cwt/guidance/413.pdf

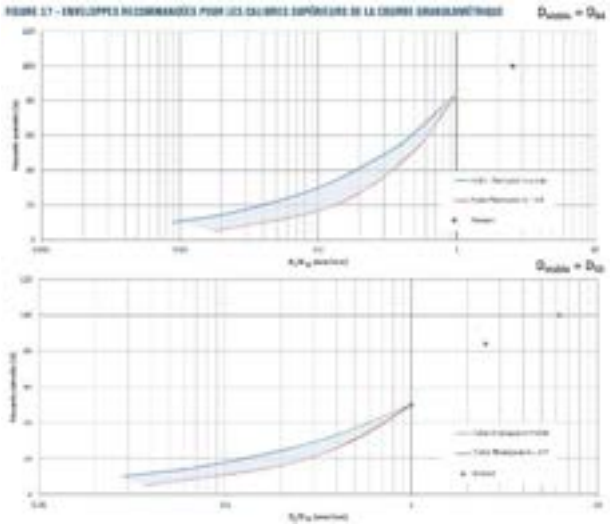
[2] https://www.dirtandgravel.psu.edu/sites/default/files/PA%20Program%20Resources/Program%20Specific%20Resources/Reference%20Material/Bankfull_Guidance.pdf

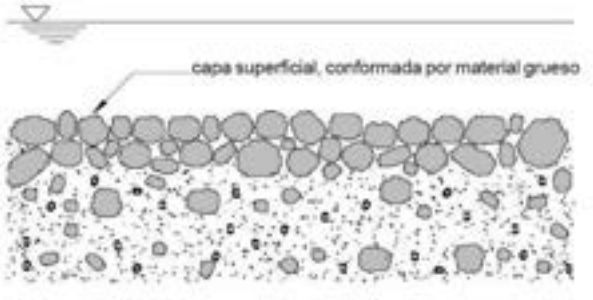
¿CÓMO **DIMENSIONAR** ODT CON CRITERIOS AMBIENTALES?

1. CARACTERIZAR EN CAMPO EL CAUCE:

❑ Lecho

- Considerar una longitud del cauce de, al menos, 20 veces su anchura. Tras su inspección, seleccionar un tramo representativo de las características granulométricas observadas
- Para establecer la superficie de muestreo, el número de elementos a medir y el tratamiento de los datos, es recomendable utilizar [1] y [2].
- Determinar el diámetro máximo del material del lecho -D_{max} (m)- y un diámetro con el que asignar una rugosidad (n de Manning).
- Evaluar la existencia de acorazamiento.





[1] https://www.fs.usda.gov/biology/nsaec/assets/rmrs-gtr-74samplingsurfandsubsufpartszdist.pdf

[2] https://www.foretprivee.ca/wp-content/uploads/2016/05/Lignes_dir_traversees_QC_2016-MPO.pdf

¿CÓMO **DIMENSIONAR** ODT CON CRITERIOS AMBIENTALES?

1. CARACTERIZAR EN CAMPO EL CAUCE

❑ Evaluar el equilibrio dinámico del tramo donde se situará la ODT

- ✓ Si el tramo donde se situará la ODT no está en equilibrio dinámico, es recomendable replantear el punto de cruce del arroyo.
- ✓ Si no es posible el cambio, considerar **ODT muy amplias** que permitan acoger los cambios morfológicos.

❖ En *Culvert desing for aquatic organism passage (2010)* se pueden encontrar criterios para identificar **signos de desequilibrio**. A continuación, se indican los dos más frecuentes:



- **Perfil longitudinal: Degradación del cauce por incisión**
  - "Escalones" bien definidos, con taludes prácticamente verticales.
  - En general, la erosión tiene un carácter remontante.

- **Sección transversal: Inestabilidad/erosión de los taludes de orilla**
  - Orillas con pendientes pronunciadas, superficie "fresca" sin vegetación leñosa, barras recién formadas inmediatamente aguas abajo de la zona erosionada y pozas de socavación al pie.
  - Es frecuente la presencia de pies caídos, bloques desprendidos y grietas de tracción a lo largo de la cabeza del talud de orilla.

❖ Estudio fotogramétrico histórico de la dinámica morfológica del tramo



¿CÓMO **DIMENSIONAR** ODT CON CRITERIOS AMBIENTALES?

2. ESTIMAR LOS CAUDALES A CONSIDERAR PARA EL DIMENSIONADO:

❶ **Funcionalidad viaria**

❷ **Integridad ambiental del curso de agua afectado**

El proyecto debe contemplar:

❶ Los criterios hidráulicos que garanticen la **capacidad para evacuar el caudal de proyecto** (Norma 5.2-IC): **T=100 años**

- *¿Tiene sentido exigir un caudal de proyecto de T=100 años cuando se trata de vías forestales, agropecuarias y/o de ocio?*
  - Si se asume un T=50 años la probabilidad de que ese caudal sea igualado o superado al menos una vez en 20 años es del 33%

RIESGO DE EXCEDENCIA (%) DURANTE LA VIDA UTIL PARA DIVERSOS PERIODOS DE RETORNO

Periodo de retorno (años)	Años de vida útil				
	10	20	25	50	100
10	65.13%	87.84%	92.82%	99.48%	99.99%
15	49.84%	74.84%	82.18%	96.82%	99.90%
20	40.13%	64.15%	72.26%	92.31%	99.41%
25	33.52%	55.80%	63.96%	87.01%	98.31%
50	18.29%	33.24%	39.65%	63.58%	86.74%
100	9.56%	18.21%	22.22%	39.50%	63.40%
500	1.98%	3.92%	4.88%	9.3%	18.14%
1000	1.00%	1.98%	2.47%	4.88%	9.52%
10000	0.10%	0.20%	0.25%	0.50%	0.75%

¿CÓMO **DIMENSIONAR** ODT CON CRITERIOS AMBIENTALES?

2. ESTIMAR LOS CAUDALES A CONSIDERAR PARA EL DIMENSIONADO:

❶ **Funcionalidad viaria**

❷ **Integridad ambiental del curso de agua afectado**

El proyecto debe contemplar:

❶Los criterios hidráulicos que garanticen la **capacidad para evacuar el caudal de proyecto** (Norma 5.2-IC): **T=100 años**

❷Los criterios adicionales que garanticen la **conectividad para biota, sedimentos, GRV y también su compatibilidad con la dinámica morfológica.**

- Para la conectividad de la ictiofauna hay que considerar caudales altos y bajos HABITUALES durante el periodo de desplazamiento prerreproductivo.
- Se suelen establecer a partir de la curva de caudales clasificados del periodo prerreproductivo, considerando los percentiles de excedencia del 10% para caudales altos y 90% para los bajos.
- Para la conectividad de sedimentos y dinámica morfológica el caudal de referencia debe ser el de cauce lleno (bankfull). En este caso el periodo de retorno oscila entre 3 y 5 años.

Objetivos distintos…

- Caudales de proyecto **¡distintos!**
- Criterios de diseño y dimensionado **¡distintos!**

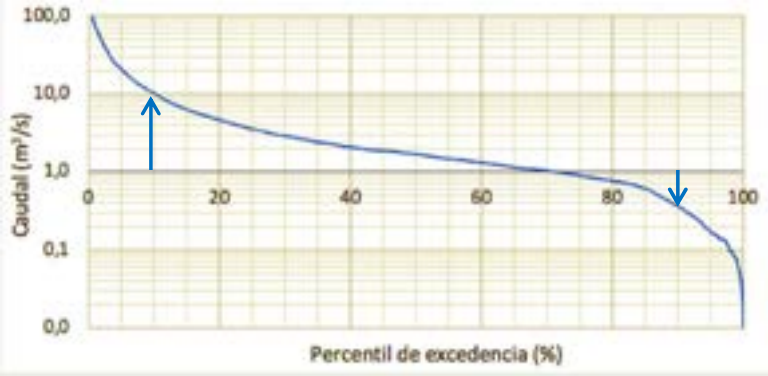


¿CÓMO **DIMENSIONAR** ODT CON CRITERIOS AMBIENTALES?

2. ESTIMAR LOS CAUDALES A CONSIDERAR PARA EL DIMENSIONADO:

- **Q_P**= caudal de proyecto (T=100 años o inferior)
  - ✓ Usar los criterios recogidos en la Norma 5.2-IC

- Establecer especie(s) objetivo y el período a considerar para garantizar la transitabilidad
  - **Q_L**= caudal de aguas bajas para el periodo de migración prerreproductiva de la especie objetivo
  - **Q_H**= caudal de aguas altas para el periodo de migración prerreproductiva de la especie objetivo
  - ✓ ¿Hay disponible una estación de aforo?
    - SI→ Generar la curva de caudales clasificados para el periodo considerado y estimar Q_L=Q(P90%) y Q_H=Q(P10%)
    - NO→ El tramo ¿tiene alteraciones significativas del régimen natural de caudales?
      - NO→ Usar serie de caudales mensuales de SIMPA para generar la curva de caudales clasificados para el periodo considerado y estimar Q(P90%) y Q(P10%)
      - SI→ Usar los caudales ecológicos mínimos y de crecida establecidos en la normativa del Plan de cuenca



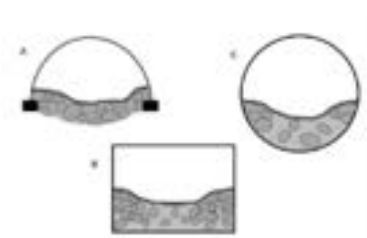
¿CÓMO **DIMENSIONAR** ODT CON CRITERIOS AMBIENTALES?

3. DIMENSIONAR

3.0 Criterios de aplicación

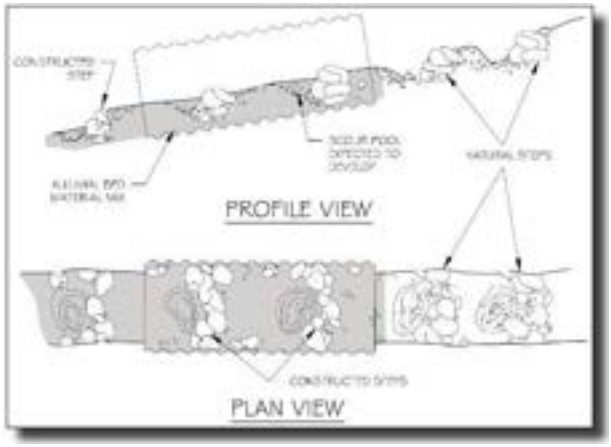
Aplicable para:

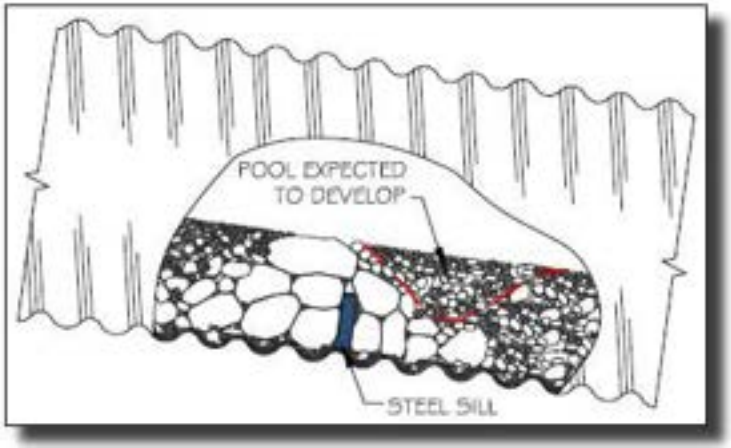
- Pendiente del cauce≤3%
- Longitud ODT<30m



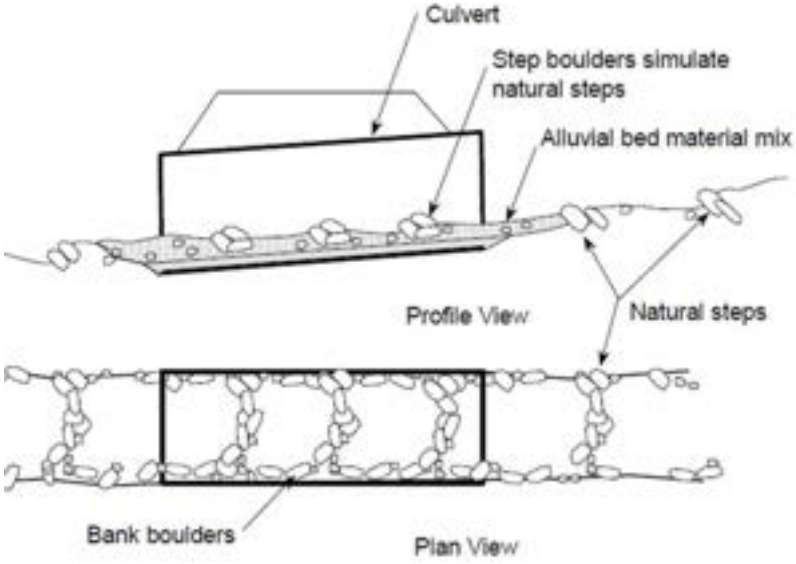


Para pendientes importantes (Pte>3-4%), considerar la incorporación de formas de lecho asociadas a esas pendientes (p.e. salto-poza).





Guidelines for the Design of Stream/Road Crossings for Passage of Aquatic Organisms in Vermont. 2009



¿CÓMO **DIMENSIONAR** ODT CON CRITERIOS AMBIENTALES?

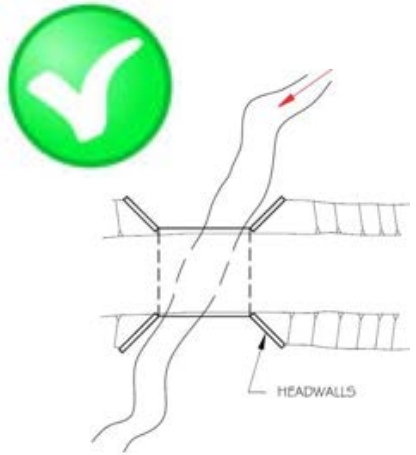
3. DIMENSIONAR LA ODT

3.1. Planta: La ODT debe estar alineada con la planta natural del arroyo para:

- ✓ Minimizar la alteración del curso del agua.
- ✓ Garantizar la estabilidad de la ODT cuando se produzcan los movimientos en planta del cauce.
- ✓ Contribuir a mantener la conectividad para biota, sedimentos y restos vegetales.
- ✓ Reducir los costes de mantenimiento a lo largo de la vida útil de la obra.









Engineering in the water environment: good practice guide - river crossings. 2010

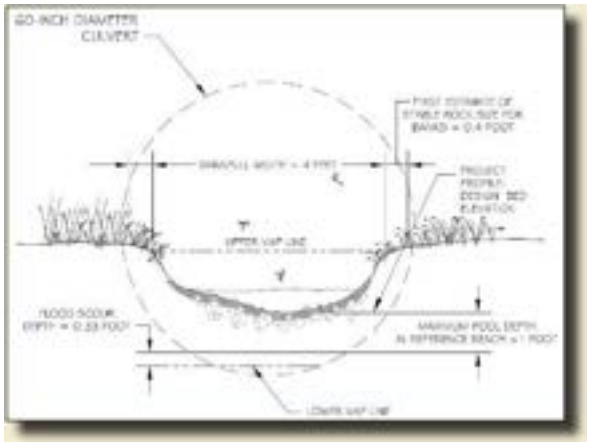
¿CÓMO **DIMENSIONAR** ODT CON CRITERIOS AMBIENTALES?

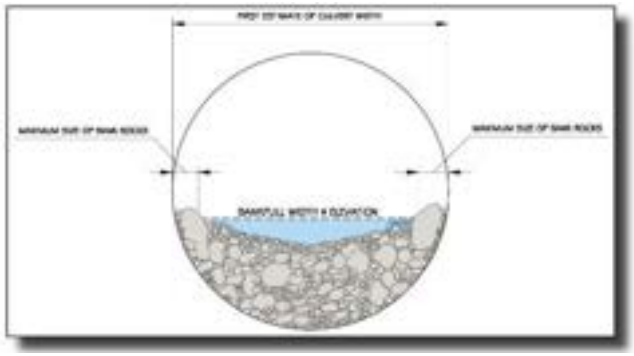


3. DIMENSIONAR

3.1. Sección y perfil longitudinal

- Más ancha que el cauce natural adyacente, con paso seco para caudales ordinarios.
- Lecho natural continuo y dinámicamente estable.
- Granulometría y perfiles longitudinal y transversal similares a los del curso natural.

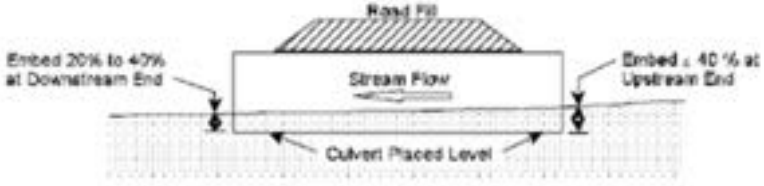




Dimensionado ambiental: (Modificado de Bates, 2002. State of California. Resources Agency Department of Fish and Game)

- **Anchura ODT:**
  - ✓ ≥1,2*anchura de bankfull
  - ✓ ≥1,5*ancho activo del cauce

- **Base ODT:**
  - ✓ Pendiente nula (0%)
  - ✓ Parcialmente enterrada en el lecho del río



- **Lecho en ODT:**
  - ✓ Geometría y granulometría similar a la del cauce natural, conformando un cauce de aguas bajas.
  - ✓ Espesor lecho en la sección de salida>= MAX(2*Dmax; 20% de la altura interior de la ODT)
  - ✓ Espesor lecho en la sección de entrada: Garantizar pendiente similar a la del cauce natural y no más de un 40% de la altura interior de la ODT
  - ✓ Si hay coraza, asegurar que la capa superficial se repone con el mismo material y en esa misma situación.

¿CÓMO **DIMENSIONAR** ODT CON CRITERIOS AMBIENTALES?

Un caso singular pero muy importante: ACORAZAMIENTO DEL LECHO

¿Cómo sabemos cuando un río tiene coraza?

- ✓ Presenta una capa superficial con clastos gruesos y granulometría homogénea.
- ✓ Inmediatamente debajo, la granulometría es mucho más heterogénea, con presencia de materiales mucho más finos.
- ✓ Es un proceso **natural**, que se presenta únicamente en ríos de gravas con granulometrías de lecho muy heterométricas.





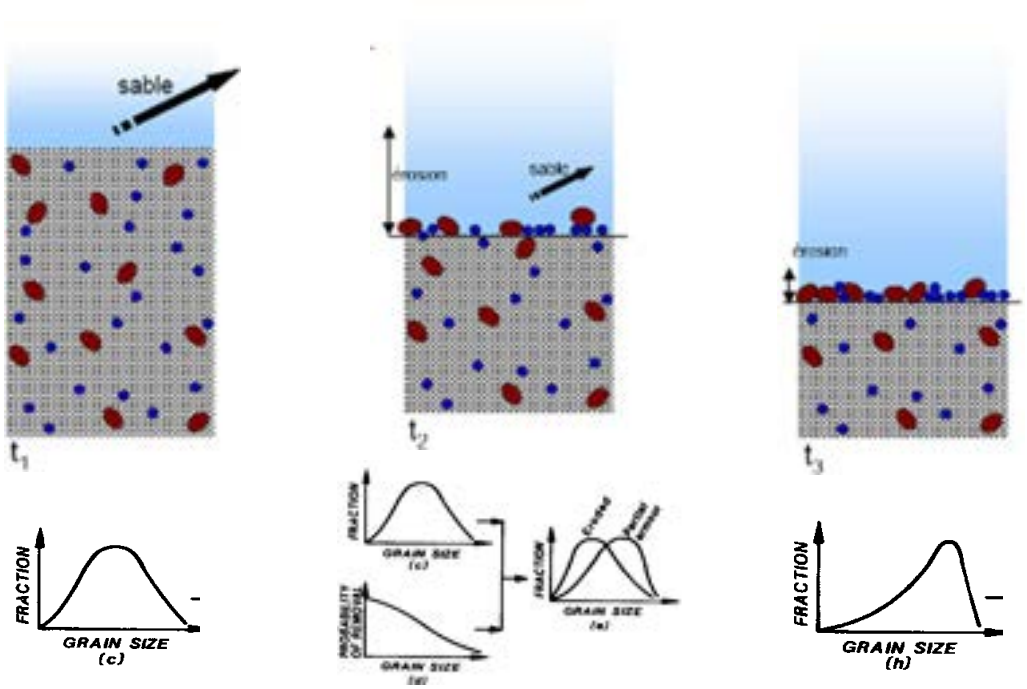
¿CÓMO **DIMENSIONAR** ODT CON CRITERIOS AMBIENTALES?

Un caso singular pero muy importante: ACORAZAMIENTO DEL LECHO

¿Cómo se genera?

- T1: Cuando el lecho presenta el material heterométrico, las avenidas ordinarias se llevan los de granulometría más fina, dejando los más gruesos.
- T2: Avenidas con mayores cortantes van eliminando los materiales de tamaño mediano.
- T3: Finalmente en la superficie quedan sólo los clastos de mayor tamaño; aquellos que las avenidas recientes más intensas no han sido capaces de movilizar. Debajo de esa "coraza" queda el material original.







¿CÓMO **DIMENSIONAR** ODT CON CRITERIOS AMBIENTALES?

Un caso singular pero muy importante: ACORAZAMIENTO DEL LECHO

¿Cómo actuar durante la construcción?

- Retirar el material del cauce haciendo acopio por capas.
- Reponerlo sobre la ODT manteniendo la disposición original.

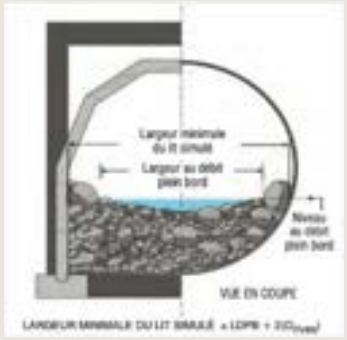






Massachusetts Stream Crossings Handbook. 2010

¿CÓMO **DIMENSIONAR** ODT CON CRITERIOS AMBIENTALES?



Mimetizar lo más fielmente posible la ODT con el curso natural.





No hay tiempo para abordar todos los detalles

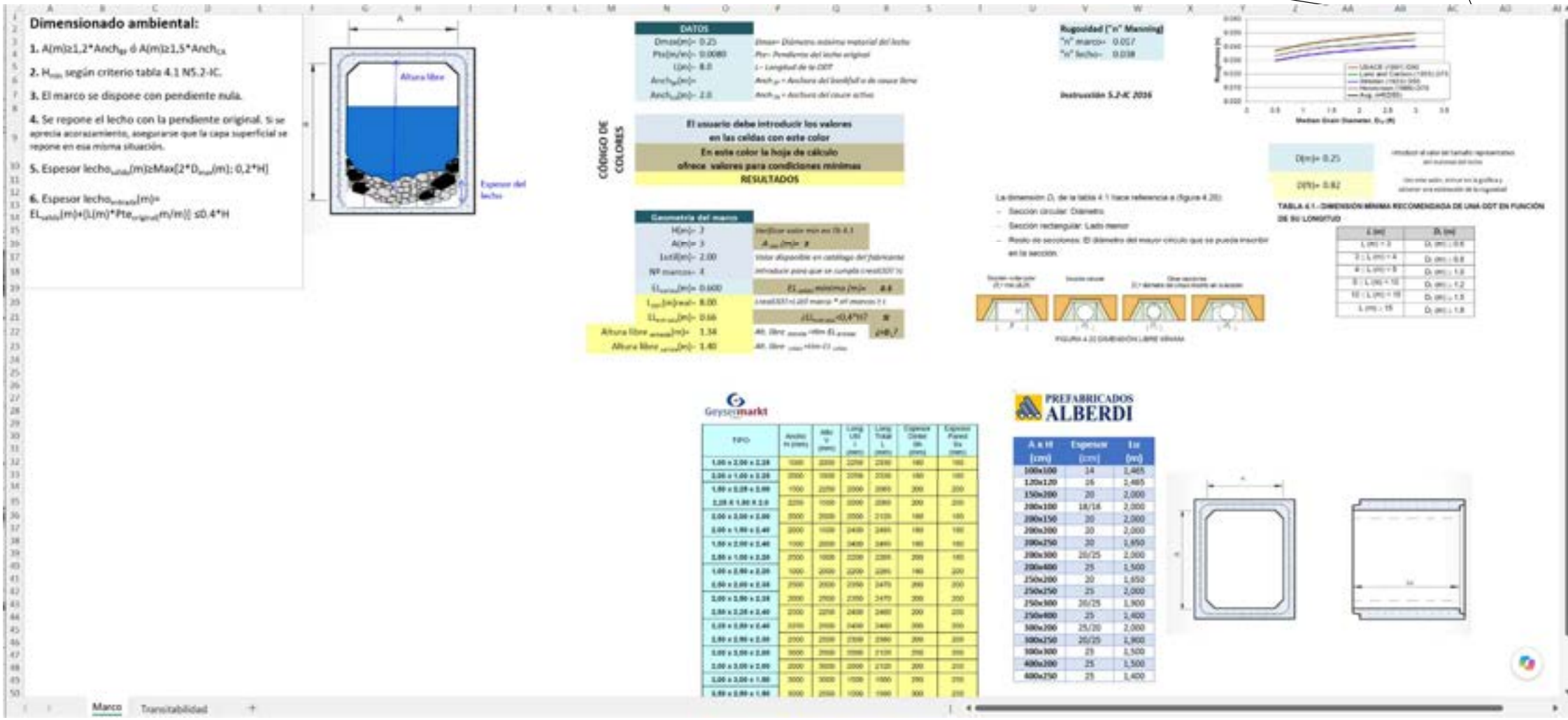
1. Caracterizar en campo el cauce (anchura; pendiente; lecho…) y evaluar su equilibrio dinámico
2. Estimar los caudales de diseño considerando funcionalidad viaria y ambiental
   a) Caudal de proyecto según norma 5.2-IC (Q_P)
   b) Especies objetivo:
      - Requisitos de transitabilidad -calado mínimo (y_{min}) y velocidad máxima (v_{max})-
      - Periodo prerreproductivo -u otro periodo de funcionalidad-
      - Definir los caudales de aguas altas (Q_H) y bajas (Q_L)
3. Dimensionado ambiental
   3.0 Criterios de aplicación
   3.1 Definir la geometría en planta, sección y perfil longitudinal
   3.2 Seleccionar el marco
   3.3 Establecer espesor del lecho
   3.4 Dimensionar el cauce de aguas bajas
   3.5 Comprobar la condición de calado mínimo: cuando el calado en el cauce de aguas bajas es y_{min} se debe cumplir que $Q(y_{min}) \leq Q_L$
   3.6 Comprobar la condición de velocidad máxima: cuando el caudal que circula por la ODT es Q_H se debe cumplir que $v(Q_H) \leq v_{max}$
4. **Comprobar norma 5.2-IC para Q_P**
5. **Comprobar la estabilidad del lecho para $Q_{bankfull}$ y movilidad aceptable para Q_P**

} Indicamos el procedimiento

Lo podéis trabajar con un **CASO PRÁCTICO –paso a paso-** apoyado por una hoja de cálculo

COMPLEMENTO: Libro excel

CASO PRÁCTICO



COMPLEMENTO: Libro excel

Funcionalidad ambiental:

1. Como caudales para verificación de la funcionalidad ambiental, se consideran los correspondientes a los percentiles de excedencia del 10% y 90% del período de uso por la especie(s) de referencia.

2. Se dispone un cauce de aguas bajas que se dimensionará para garantizar la transitabilidad con el Q90%.

3. Se asume régimen uniforme: es de aplicación la fórmula de Manning.

4. Se debe satisfacer la condición de calado mínimo para el Q90% y la de velocidad máxima para el Q10%.

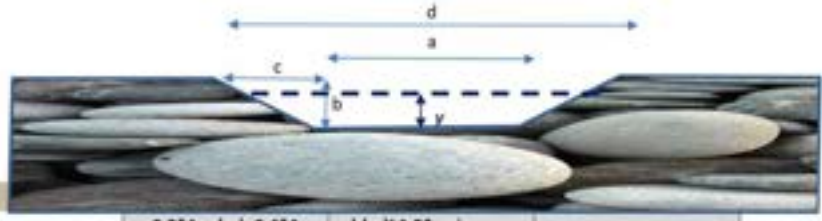
Geometría del marco
H(m)= 2
A(m)= 3
EL_{salida}(m)= 0.6
L_{CCC}(m)real= 8
$EL_{entrada}$(m)= 0.66
Altura libre $_{entrada}$(m)= 1.34

Especie(s) objetivo
ymin(m)= 0.35
vmax(m/s)= 1.8

El usuario debe introducir los valores
Valores para condiciones mínimas
RESULTADOS

AGUAS BAJAS
Q90%(m^3/s)= 0.4
Geometría cauce
a(m)= 0.75
b(m)= 0.55
c(m)= 0.8
d(m)= 2.4
c:b= 1.5 NO CUMPLE
Calado normal y(m)= 0.35

Sección ENTRADA
GEOMETRÍA HIDRÁULICA
Sm(m^2)= 0.44
Pm(m)= 1.99
Rh(m)= 0.22
VARIABLES HIDRÁULICAS
v(m/s)= 0.86
Q(m^3/s)= 0.38 CUMPLE
F= 0.47



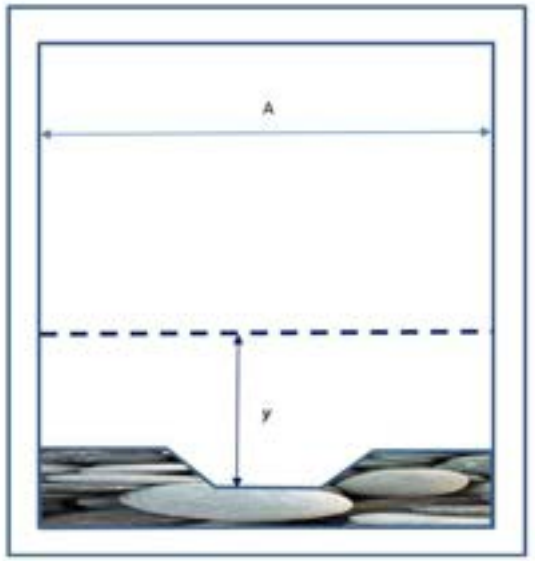
Recomendaciones:	0.2*A<a(m)<0.4*A		b(m)≥1.5*$ymin_{especie}$	c(m)≥1.5*b
	0.6	1.2	0.53	

A(m)= 3

AGUAS ALTAS
Q10%(m^3/s)= 3.8
Geometría cauce
A(m)= 3

Altura libre entrada(m)= 1.34
Calado normal y(m)= 0.8 MODIFICAR

Sección ENTRADA
GEOMETRÍA HIDRÁULICA
Sm(m^2)= 1.60
Pm(m)= 3.84
Rh(m)= 0.42
n= 0.035
VARIABLES HIDRÁULICAS
vmax(m/s)= 1.8 v(m/s)= 1.42 CUMPLE
Q10%(m^3/s)= 3.8 Q(m^3/s)= 2.27 NO CUMPLE
F= 0.51



COMPLEMENTO: Asistente

CASO PRÁCTICO

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE MONTES, FORESTAL Y DEL MEDIO NATURAL

GRADO EN INGENIERÍA DEL MEDIO NATURAL

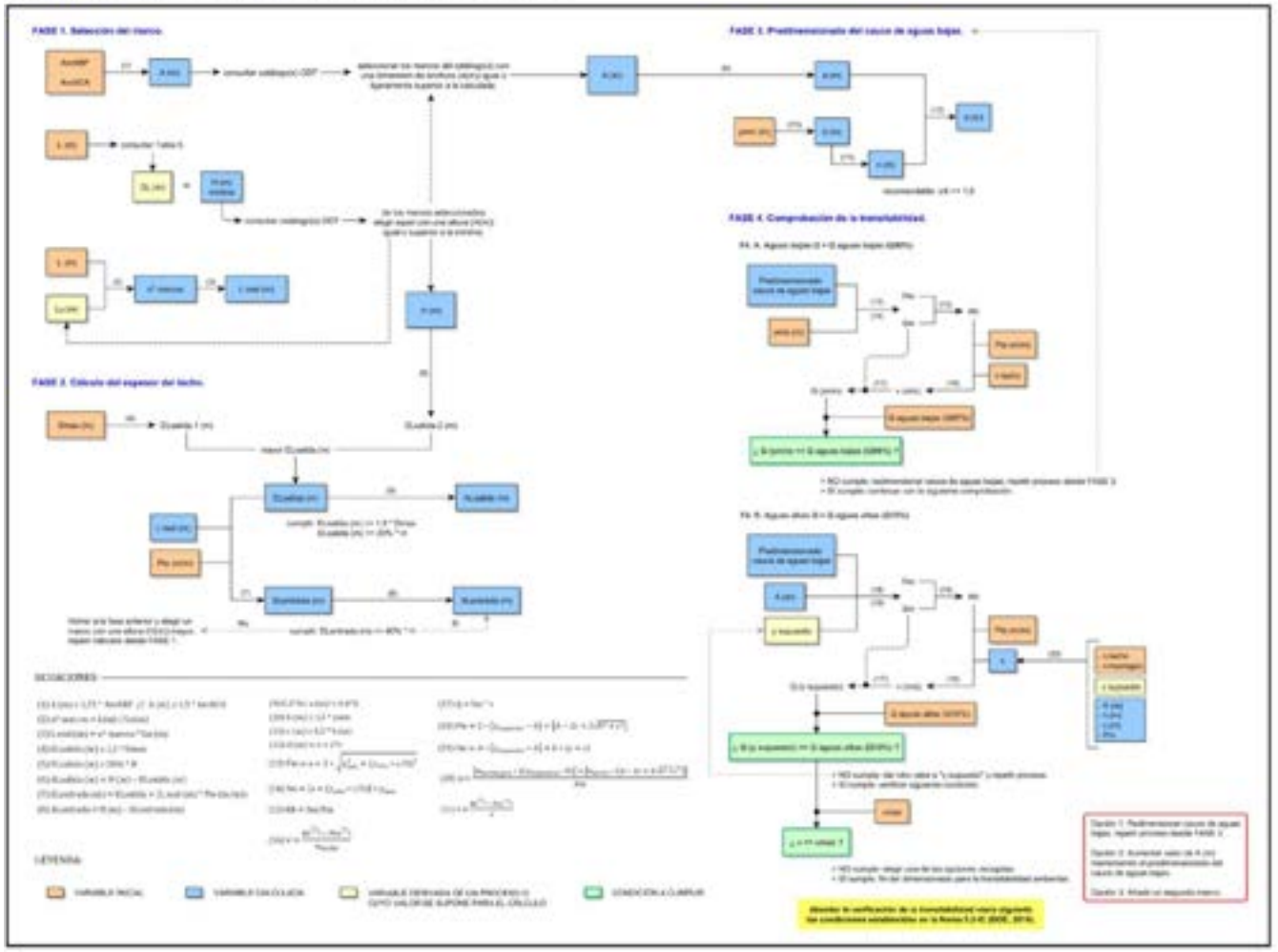
PROYECTO FIN DE GRADO

GUÍA METODOLÓGICA Y ASISTENTE DE CÁLCULO (PYTHON) PARA EL DIMENSIONADO AMBIENTAL DE OBRAS DE DRENAJE TRANSVERSAL (ODT)

INÉS CACHÓN FLÓREZ

AÑO 2023

DIAGRAMA DE FLUJO DEL DIMENSIONADO AMBIENTAL DE UNA ODT





CASO PRÁCTICO: Datos

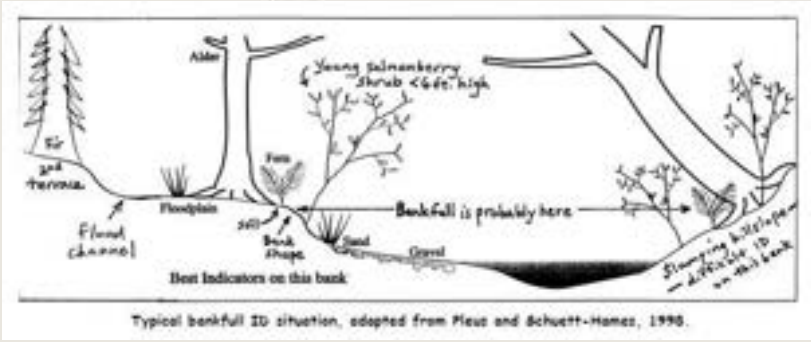
CAUCE:

$Anch_{BF}$ (Anchura de bankfull)= 2,3 m

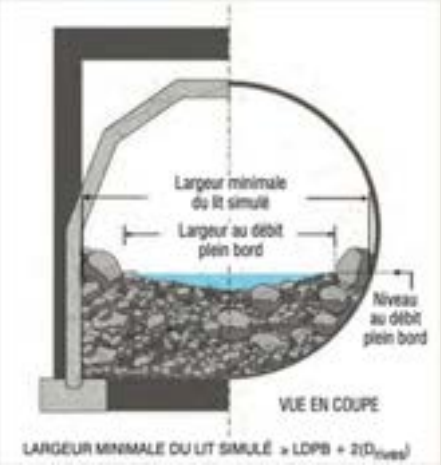
Pte (Pendiente del lecho original)= 0,005 m/m

D_{max} (Diámetro máximo material del lecho)= 0,3 m

Información en anteproyecto: L(Longitud ODT)= 7,5 m



Typical bankfull ID situation, adapted from Pleus and Schuett-Hames, 1998.



ESPECIE OBJETIVO:

Barbo común (*Luciobarbus bocagei* L.)

Calado mínimo (y_{min})= 0,25 m

Velocidad máxima ($v_{max)}$= 1,8 m/s

Migración prerreproductiva: abril – junio

$Q_{L[Q10\%]}$= 0,3 m^3/s

$Q_{H[Q90\%]}$= 3,2 m^3/s



3.2 Seleccionar el marco

DATOS	
Dmax(m)= 0.3	*Dmax= Diámetro máximo material del lecho*
Pte(m/m)= 0.0050	*Pte= Pendiente del lecho original*
L(m)= 7.5	*L= Longitud de la ODT*
$Anch_{BF}$(m)= 2.3	*$Anch_{BF}$= Anchura del bankfull o de cauce lleno*

1) Establecer la anchura: A(m)

i. $A(m) \geq 1{,}2 * Anch_{BF}(m)$ [$A(m) \geq 1{,}5 * Anch_{CA}$]

ii. Con el valor obtenido, seleccionar los marcos del catálogo que tienen esa dimensión igual o ligeramente superior.

2) Establecer la altura: H(m)

i. En la tabla 4.1, entrar con el valor de L (longitud de la obra de drenaje) y obtener D_L. Esa cifra indica el valor de H_{min}.

ii. De los marcos seleccionados en 1.ii, elegir el que tiene una H superior a H_{min}. (El marco irá parcialmente enterrado)

iii. Comprobar que con esa H se garantiza la cota de rasante establecida en el proyecto.

Geometría del marco	
H(m)= 2	*Verificar valor min en Tb 4.1*
A(m)= 3	$A_{min}(m)$= 2.76
Lutil(m)= 2.00	*Valor disponible en catálogo del fabricante*
Nº marcos= 4	*Introducir para que se cumpla LrealODT≥L*
L_{corr}(m)real= 8.00	*LrealODT=Lútil marco * nº marcos ≥ L*

PREFABRICADOS ALBERDI

A x H (cm)	Dintel (cm)	Lu (m)
100x100	14	1,465
120x120	16	1,465
150x200	20	2,000
200x100	18/16	2,000
200x150	20	2,000
200x200	20	2,000
200x250	20	1,650
200x300	20/25	2,000
200x400	25	1,500
250x200	20	1,650
250x250	25	2,000
250x300	20/25	1,900
250x400	25	1,400
300x200	25/20	2,000
300x250	20/25	1,900
300x300	25	1,500
400x200	25	1,500
400x250	25	1,400

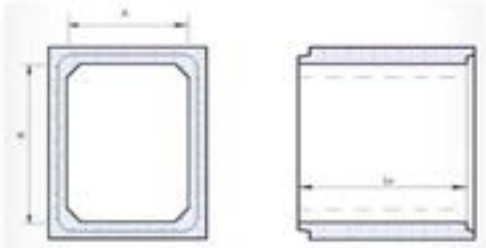


TABLA 4.1.- DIMENSIÓN MÍNIMA RECOMENDADA DE UNA ODT EN FUNCIÓN DE SU LONGITUD Norma 5.2_IC

L (m)	D_L (m)
L (m) < 3	D_L (m) ≥ 0,6
3 ≤ L (m) < 4	D_L (m) ≥ 0,8
4 ≤ L (m) < 5	D_L (m) ≥ 1,0
5 ≤ L (m) < 10	D_L (m) ≥ 1,2
10 ≤ L (m) < 15	D_L (m) ≥ 1,5
L (m) ≥ 15	D_L (m) ≥ 1,8

3.3 Establecer el espesor del lecho

DATOS:

Pte (m/m)= 0,005

D_{max}(m)= 0,30

$L_{real\ ODT}$(m)= 8

CONDICIONADO:

i. **Espesor del lecho a la salida de la ODT:**

$EL_{salida}(m) \geq Max[2*D_{max}(m); 0,2*H(m)]$

ii. **Espesor del lecho a la entrada de la ODT**:

$EL_{entrada}(m)=EL_{salida}(m)+[L(m)*Pte(m/m)]$

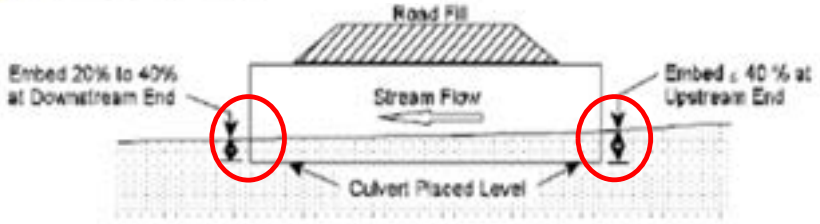
iii. **Altura libre a la entrada de la ODT**:

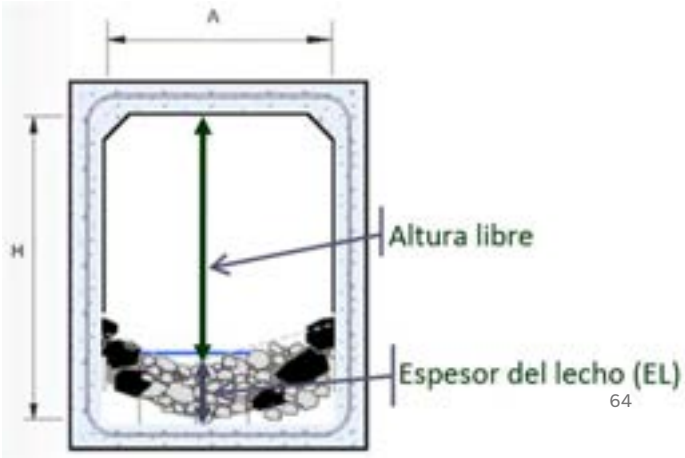
$EL_{entrada}(m)=\leq 0,4*H(m)$

RECUERDA:

- ✓ El marco se dispone con pendiente nula.
- ✓ Se repone el lecho con la pendiente original.
- ✓ Si se apreció acorazamiento, asegurar que la capa superficial se repone en esa misma situación.

Geometría del marco	
H(m)= 2	Verificar valor min en Tb 4.1
A(m)= 3	$A_{min}(m)$= 2.76
Lutil(m)= 2.00	Valor disponible en catálogo del fabricante
Nº marcos= 4	Introducir para que se cumpla LrealODT≥L
EL_{salida}(m)= 0.60	EL_{salida} mínimo (m)= 0.6
L_{ODT}(m)real= 8.00	LrealODT=Lútil marco * nº marcos ≥ L
$EL_{entrada}$(m)= 0.64	¿$EL_{entrada}$<0,4*H? SI
Altura libre $_{entrada}$(m)= 1.36	Alt. libre $_{entrada}$=Hm-$EL_{entrada}$
Altura libre $_{salida}$(m)= 1.40	Alt. libre $_{salida}$=Hm-EL_{salida}





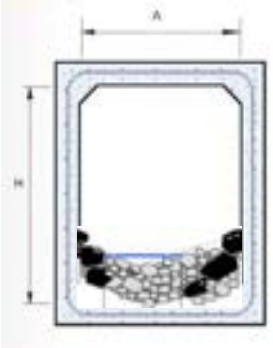
3.4 Dimensionar el cauce de aguas bajas

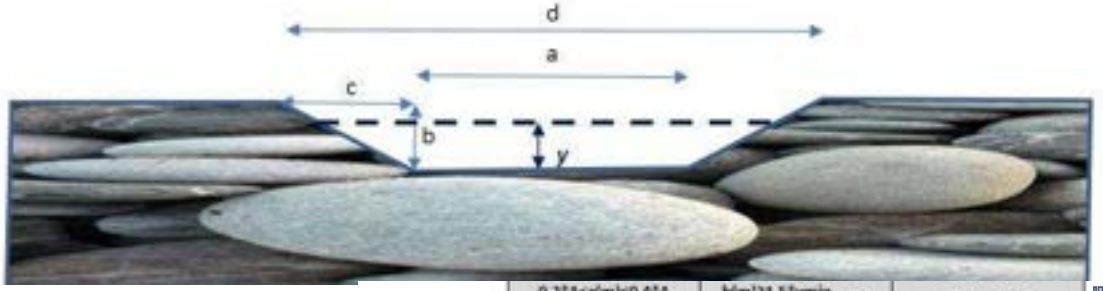
CASO PRÁCTICO

OBJETIVO: Cuando circule el caudal Q(90%) el calado en el cauce de aguas bajas debe ser mayor o igual al mínimo requerido por la especie objetivo ($y \geq y_{min}$)

CRITERIOS PARA DIMENSIONADO AMBIENTAL:

GEOMETRÍA: Se considera una sección trapezoidal centrada en el marco para oferecer dos vías de paso seco con aguas bajas.





Recomendaciones:	0.2*A<a(m)<0.4*A		b(m)≥1.5*ymin especie	c(m)≥1.5*b
	0.6	1.2	0.38	

A(m)= 3

Y_{MIN} Barbo= 0,25m

Geometría del marco
H(m)= 2
A(m)= 3

DIMENSIONADO

Geometría cauce	
a(m)= 0.9	
b(m)= 0.4	
c(m)= 0.8	
d(m)= 2.5	
c:b= 2.0	CUMPLE

Dimensionado prévio: ¡RECOMENDACIONES!

i. Anchura en la base (a): se establece dentro de un rango proporcional a la anchura de la ODT.
0,2*A<a<0,4*A

ii. Altura (b) de, al menos, 1,5 veces el calado mínimo establecido para la especie objetivo.
b≥1,5*y_{min}



iii. Pendiente del talud menor o igual que 1V:1,5H
c/b≥1,5

RECOMENDACIONES

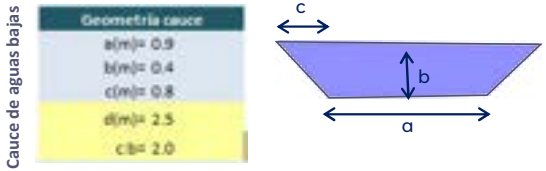
iv. A la hora de asignar valores, no olvidar que son cifras que hay que establecer dentro de la ODT y con los materiales del lecho. En la práctica es recomendable plantear dimensiones en múltiplos de 5 centímetros.

3.5 Comprobar la condición de calado mínimo para Q_L

CASO PRÁCTICO

OBJETIVO: Verificar que cuando en el **cauce de aguas bajas** se presenta un **calado igual al mínimo** requerido por la especie ($y=y_{min}$), el **caudal que circula es menor o igual que Q(90%)**.

¡Se asegura que para Q=Q(90%) y>y_{min}!



HIPÓTESIS DE CÁLCULO: El agua circula en **régimen uniforme** (calado normal)

Se aplica la ecuación de Manning, asumiendo que el calado es igual al mínimo para garantizar el tránsito de la especie objetivo (**y_{min}=y**)

1. Para ese calado (y_{min}), y con el dimensionado del cauce de aguas bajas, se calcula Sm, Pm y Rh

$$Sm = [a + (y_{min} * {}^{c}/_{b})] * y_{min};\ Pm = a + 2 * \sqrt{y_{min}^2 + (y_{min} * {}^{c}/_{b})^2};\ Rh = \frac{Sm}{Pm}$$

2. Con los valores obtenidos se calcula la velocidad

$$v = \frac{R_h^{2/3} * Pte^{1/2}}{n};\ Pte = Pendiente\ del\ lecho\ ;\ n = rugosidad\ del\ lecho$$

3. Con la velocidad y la superficie mojada se calcula el caudal $Q(y_{min})=Sm*v$

4. El caudal así obtenido -$Q(y_{min})$- es el mínimo necesario para garantizar un calado en la ODT igual al mínimo necesario para el tránsito de la especie objetivo. **Si $Q(y_{min})$ es menor o igual que Q90% se da por válido el dimensionado del cauce de aguas bajas**.

5. En caso contrario se **redimensiona el cauce de aguas bajas** y se vuelve a verificar su validez.

3.5 Comprobar la condición de calado mínimo para Q_L (Continuación)

CASO PRÁCTICO



ESPECIE OBJETIVO:

- **Barbo común** (*Luciobarbus bocagei*)
- Calado mínimo (y_{min})= **0,25 m**
- Velocidad máxima (v_{max})= **1,8 m/s**
- Migración prerreproductiva: abril – junio
- Q10%= **3,2 m³/s**
- Q90%= **0,3 m³/s**

1. Para y_{min}, calcular Sm, Pm y Rh

$$Sm = \left[a + (y_{min} * {}^{c}/_{b})\right] * y_{min}$$

$$Pm = a + 2 * \sqrt{y_{min}^2 + \left(y_{min} * {}^{c}/_{b}\right)^2}$$

$$Rh = \frac{Sm}{Pm}$$

2. Calcular la velocidad

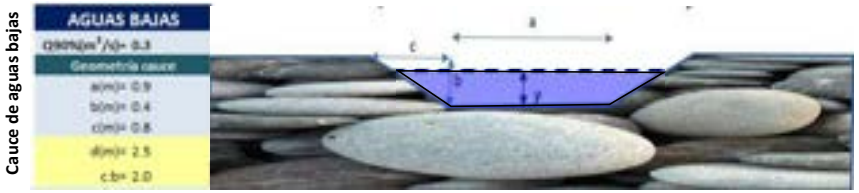
$$v = \frac{{R_h}^{2/3} * Pte^{1/2}}{n};$$

3. Calcular el caudal

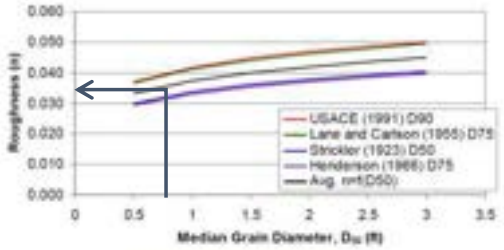
$$Q(y_{min}) = Sm * v$$

4. Comprobar $Q(y_{min}) \leq Q90\%$

5. En caso contrario se redimensiona el cauce de aguas bajas y se vuelve a verificar su validez.



n= 0,035



Calado normal y(m)= 0.25	
Sección ENTRADA	
GEOMETRÍA HIDRÁULICA	
Sm(m²)= 0.35	
Pm(m)= 2.02	
Rh(m)= 0.17	
VARIABLES HIDRÁULICAS	
v(m/s)= 0.63	
Q(m³/s)= 0.22	CUMPLE
F= 0.40	

D(m)= 0.25	Introducir el valor del tamaño representativo del material del lecho
D(ft)= 0.82	Con este valor, entrar en la gráfica y obtener una estimación de la rugosidad

Estimación de "n" en cauces de gravas, cantos y/o bolos

3.6 Comprobar la condición de V_{MAX} para Q_H

CASO PRÁCTICO

ESPECIE OBJETIVO:

- **Barbo común** (*Luciobarbus bocagei*)
- Calado mínimo (y_{min})= **0,25 m**
- Velocidad máxima (v_{max})= **1,8 m/s**
- Migración prerreproductiva: abril – junio
- Q10%= **3,2 m³/s**
- Q90%= **0,3 m³/s**

AGUAS ALTAS	
Q10%(m^3/s)=	3.2
Geometría cauce	
A(m)=	3
Altura libre entrada(m)=	1.36



OBJETIVO: Verificar que **cuando por la ODT circula el caudal Q10%, la velocidad es menor o igual que la máxima** admitida para el tránsito de la especie objetivo (v_{max}).

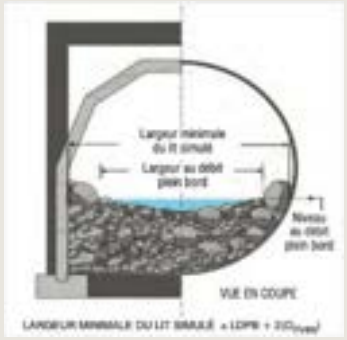
HIPÓTESIS DE CÁLCULO: El agua circula en **régimen uniforme** (calado normal)

1. Suponer un calado (y):
   a) Calcular la superficie mojada, el perímetro mojado y el radio hidráulico
   b) Estimar la velocidad (Manning) $v=Rh^{2/3}*Pte^{1/2}/n$

      La rugosidad de la sección se estima ponderando cada valor (lecho; paredes) por la longitud correspondiente.
2. Calcular Q(y)= Sm*v
3. Repetir los pasos 1 y 2 hasta que Q(y) sea igual o algo mayor que Q10%
4. Comprobar que la velocidad que corresponde a Q(y) es menor o igual que v_{max}
5. Si no se cumple, redimensionar el marco y repetir todos los cálculos.

Calado normal y(m)= 0.9			
	Sección ENTRADA		
	GEOMETRÍA HIDRÁULICA		
	Sm(m^2)= 2.18		
	Pm(m)= 4.19		
	Rh(m)= 0.52		
Rugosidad ("n" Manning)	n= 0.030		
	VARIABLES HIDRÁULICAS		
vmax(m/s)= 1.8	v(m/s)= 1.50	CUMPLE	
Q10%(m^3/s)= 3.2	Q(m^3/s)= 3.27	CUMPLE	
	F= 0.51		

¿CÓMO **DIMENSIONAR** ODT CON CRITERIOS AMBIENTALES?



Mimetizar lo más fielmente posible la ODT con el curso natural.





No hay tiempo para abordar todos los detalles

1. Caracterizar en campo el cauce (anchura; pendiente; lecho…) y evaluar su equilibrio dinámico
2. Estimar los caudales de diseño considerando funcionalidad viaria y ambiental
   a) Caudal de proyecto según norma 5.2-IC (Q_P)
   b) Especies objetivo:
      - Requisitos de transitabilidad -calado mínimo (y_{min}) y velocidad máxima (v_{max})-
      - Periodo prerreproductivo -u otro periodo de funcionalidad-
      - Definir los caudales de aguas altas (Q_H) y bajas (Q_L)
3. Dimensionado ambiental

   3.0 Criterios de aplicación
   3.1 Definir la geometría en planta, sección y perfil longitudinal
   3.2 Seleccionar el marco
   3.3 Establecer espesor del lecho
   3.4 Dimensionar el cauce de aguas bajas
   3.5 Comprobar la condición de calado mínimo: cuando el calado en el cauce de aguas bajas es y_{min} se debe cumplir que $Q(y_{min}) \leq Q_L$
   3.6 Comprobar la condición de velocidad máxima: cuando el caudal que circula por la ODT es Q_H se debe cumplir que $v \leq v_{max}$
4. **Comprobar norma 5.2-IC para Q_P**
5. **Comprobar la estabilidad del lecho para $Q_{bankfull}$ y movilidad aceptable para Q_P** } Indicamos el procedimiento

4. Comprobar condicionado Norma 5.2-IC para Q_P

CASO PRÁCTICO

… ¿y si no cumple con un marco?



- ✓ Disponer los necesarios, pero uno de ellos debe tener funcionalidad ambiental (Q_L; Q_H).



- ✓ Los demás contribuirán a satisfacer los requisitos de evacuación del caudal de proyecto Q_P (T=100 años)



Engineering in the water environment: good practice guide. River crossings 2010



Culvert Design for Aquatic Organism Passage. 2010

5. Comprobar la estabilidad del lecho para $Q_{Bankfull}$

CRITERIO DEL CORTANTE CRÍTICO O DE INICIO DEL MOVIMIENTO:

El lecho es estable si: Cortante que ejerce el flujo < Cortante de inicio del movimiento del material del lecho (Cortante crítico)

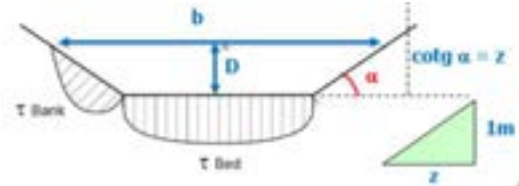
$\tau_{flujo}\ (N/m^2) = \gamma * R_H(m) * S(m/m)$ **<** $\tau_{crítico\ lecho}\ (N/m^2) = 728 * D(m)$

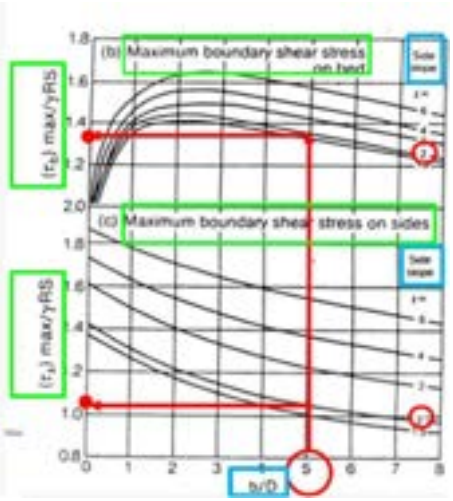
Depende de la geometría del cauce y del caudal circulante

Depende del tamaño del material del lecho considerado

γ = Peso específico de agua con sedimentos;
R_H = Radio hidráulico;
S = Pendiente de la línea de energía del flujo (~pendiente del cauce)

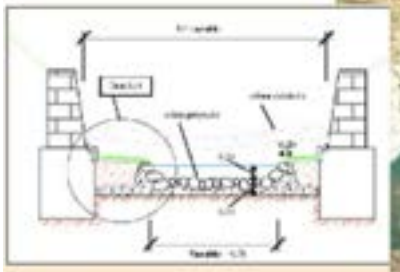
D= Diámetro del material del lecho







Si no cumple, plantear fijar el lecho con mortero, manteniendo las características granulométricas naturales de la capa superior







CASO PRÁCTICO



- La parte más compleja es recrear el lecho en el marco







- Con frecuencia no hay altura disponible para el empleo de maquinaria… ¿a mano?



- Otras alternativas:
  - Antes de instalar cada módulo en la ubicación de la ODT, disponer el lecho natural recibiéndolo con mortero
  - Usar marcos articulados, disponiendo el lecho natural antes de ensamblar la parte superior











Pero con eso de la funcionalidad ambiental, las ODT… ¡serán mucho más caras!



MESBOAC aims to match the culvert width with natural stream dimensions, while maintaining sediment balance (sediment in = sediment out). In addition to burying the culvert bottom below the streambed, it also provides a low-flow channel that is important for late season migrations which occur from August to November. MESBOAC has the advantage of not requiring analysis

Como promedio, el incremento de coste en la ejecución material es sólo del 10%

Table 4.4. Cost Comparison

Location	Culvert cost (dollars)		Difference	Difference as percent
	In-place	MESBOAC		
Aitkin (Snake R. Trib.)	32512.2	35429	2916.8	9
Cass (Leavitts Lake Channel)				
Cottonwood (So. F. Watonwan)	71795	74754	2959	4
Cottonwood (Unnamed)	73043.6	77423	4379.4	6
Fillmore (Donaldson Cr.)	167095.6	188604	21508.4	13
Fillmore (Duschee)	121885.4	123323.2	1437.8	1
Fillmore (Money Cr.)	83188	88942.4	5754.4	7
Jackson (Little Sioux)	81811.8	77894	-3917.8	5
Kandiyohi (CD27)	62914.6	78828.4	15913.8	25
Lincoln (Unnamed trib.)				
Lincoln (Yellow Medicine)				
Meeker (Unnamed)	29197	38920.4	9723.4	33
Mille Lacs (Mike Drew)	39041.8	42084.6	3042.8	8
Mille Lacs (Tibbets Brook)	20178.2	22370	2191.8	11
St. Louis (Stanley Creek)				



Flood Effects on Road-Stream Crossing Infrastructure: Economic and Ecological Benefits of Stream Simulation Designs

Gillespie N, Unthank A, Anderson P et al. See more

Fisheries (2014) 39(2) 62-76

DOI: 10.1080/03632415.2013.874527

Los costes de construcción de ODT diseñadas con criterios ambientales son ligeramente superiores (entre un 9 % y un 22 %), pero los costes del ciclo de vida son menores.

En los costes del ciclo de vida deben considerarse, además de los de construcción:

- Mantenimiento
- Reparación
- Interrupción del tráfico

ÍNDICE

Reto nº1: El agua pasa...
¿qué más quieres?

Reto nº2: Menospreciando lo pequeño...
¡no será para tanto!

Reto nº3: Cumplo todos los requerimientos legales...
¡déjame de chorradas!

Reto nº4: Normativa ambiental para ODT...
¡lo que faltaba!

Reto nº5: Diseñar y dimensionar ODT con criterios ambientales...
¿sabemos?

Reto nº6: Y yo...
¿qué puedo hacer?

RETO Nº6: Y YO...

¿QUÉ PUEDO HACER?

ODT con funcionalidad ambiental en España (2026)



Sabemos que las ODT deben dimensionarse considerando también criterios ambientales

Sabemos que hay criterios científico-técnicos que permiten diseñar y dimensionar con esos criterios

Sabemos que, considerando el ciclo de vida de las ODT, las construidas con criterios ambientales no son más caras



- ✓ Transmitir este mensaje
- ✓ Aprovechar oportunidades de financiación
- ✓ Generar ejemplos de buenas prácticas y difundirlos
- ✓ Fomentar la publicación de guías y manuales



Algún día podremos tener en España cosas como estas...

AOP Locations implemented across the U.S.

Celebrating 1,000 Culverts - A Grand ReOpening for Fish



U.S. Department of Transportation
Federal Highway Administration

About Programs Resources Briefing Room Contact Search FHWA

INFRASTRUCTURE INVESTMENT AND JOBS ACT

FHWA Home / Infrastructure Investment and Jobs Act / Fact Sheets / Culvert AOP Program

Home | Overview | Funding | Assistance / Local Support | Fact Sheets | Guidance / Regs



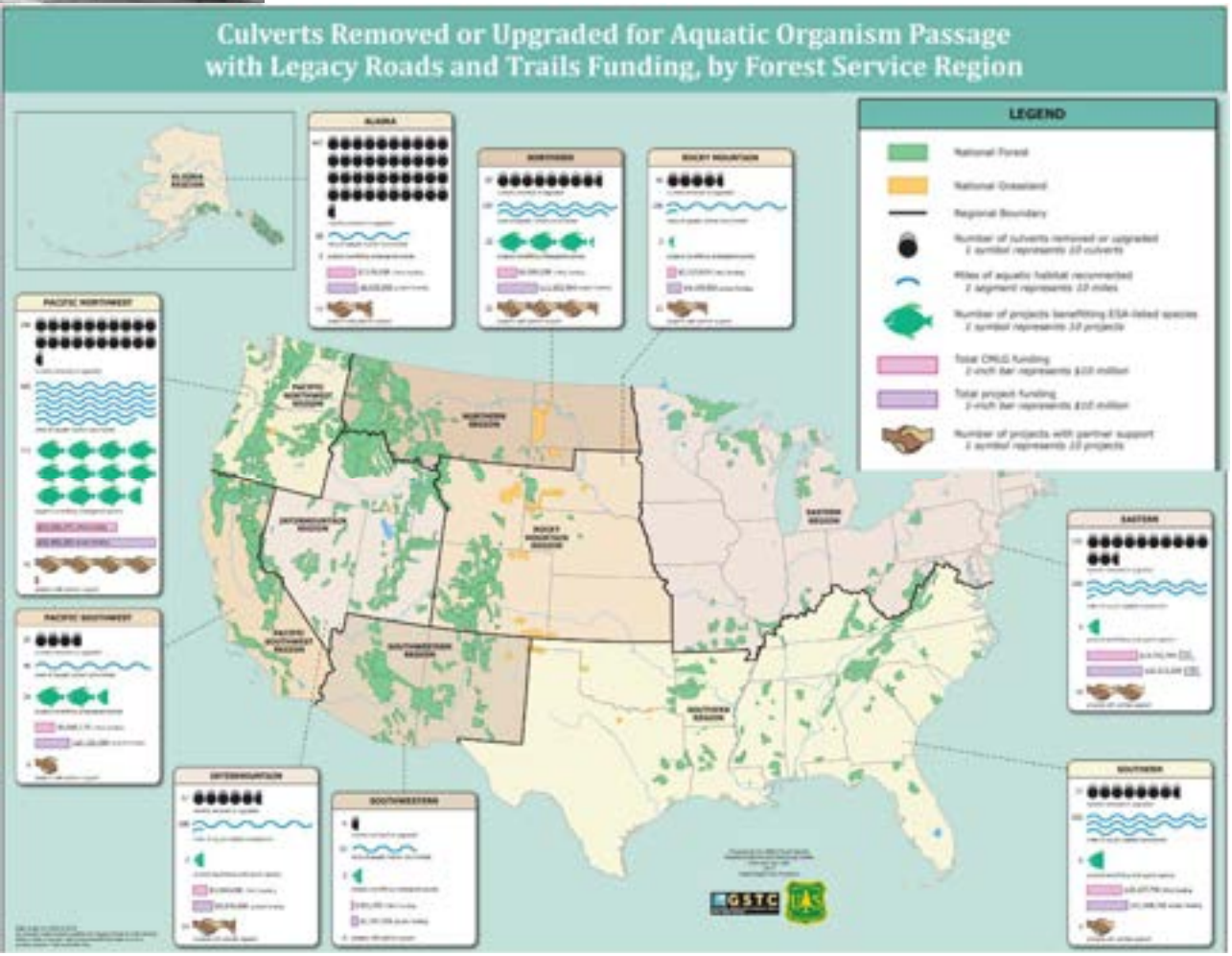
National Culvert Removal, Replacement, and Restoration Grants (Culvert AOP Program[1])

	FAST Act (extension)	Infrastructure Investment and Jobs Act (IIJA)				
Fiscal year (FY)	2021	2022	2023	2024	2025	2026
Advance appropriation (General Fund)	---	$200M	$200M	$200M	$200M	$200M
Total IIJA funding (FY22-26)	---	**$200M**	**$200M**	**$200M**	**$200M**	**$200M**
Subject to future appropriation	---	$800M	$800M	$800M	$800M	$800M





Algún día podremos tener en España cosas como estas...





http://usfs.maps.arcgis.com/apps/MapSeries/index.html?appid=c001b7d3212845129086ad7a88a6e775

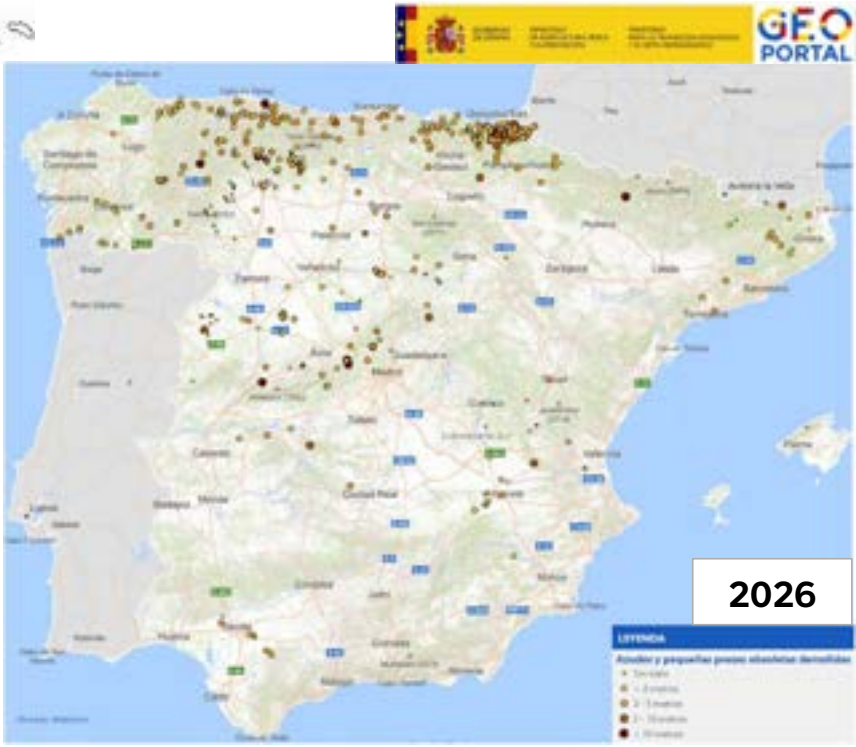


UN EJEMPLO **ESPERANZADOR**

El caso de la demolición de azudes y pequeñas presas



2005





LA CONCLUSIÓN

Si tienes oportunidad ¡aplícalo!

- ✓ **No importa el tamaño** de la intervención.
- ✓ **Busca apoyos** en la sociedad y en la administración.
- ✓ En el proyecto, dedicar fondos para el **seguimiento y evaluación de resultados**: se aprende tanto de los aciertos como de los errores.
- ✓ **¡Difunde y visibiliza!** No hay mejor embajador que un buen ejemplo.
- ✓ Los primeros pasos son siempre los que más cuestan… ¡y los más **necesarios**!

¿Quién dijo que esto era fácil?

¡ÁNIMO VALIENTES!



¡MUCHAS GRACIAS!

DISEÑO, DIMENSIONADO, CONSTRUCCIÓN Y MANTENIMIENTO DE OBRAS DE DRENAJE TRANSVERSAL *RIVER-FRIENDLY*

¡ÁNIMO VALIENTES!

José Anastasio Fernández Yuste
Carolina Martínez Santa-María

Montes Universidad Politécnica de Madrid