



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE FOMENTO

MINISTERIO
DE MEDIO AMBIENTE
Y MEDIO RURAL
Y MARINO

CEDEX
CENTRO DE ESTUDIOS
Y EXPERIMENTACIÓN
DE OBRAS PÚBLICAS

INFORME TÉCNICO

para

Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino

Secretaría de Estado de Cambio Climático

Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental

ENCOMIENDA DE GESTIÓN DE TRABAJOS DE ASISTENCIA TÉCNICA, INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO EN MATERIAS COMPETENCIA DE LA DIRECCIÓN GENERAL DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL (2009-2013)

**Actuación nº 4: Asistencia técnica, investigación y desarrollo tecnológico en
materia de evaluación ambiental estratégica (EAE)**

Guía sobre técnicas de cruce por infraestructuras lineales enterradas para la EAE de planes de infraestructuras

INFORME A4T114
TOMO ÚNICO

Clave CEDEX: 51-309-5-001

Madrid, noviembre de 2011

Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE FOMENTO

MINISTERIO
DE MEDIO AMBIENTE
Y MEDIO RURAL
Y MARINO

CEDEX
CENTRO DE ESTUDIOS
Y EXPERIMENTACIÓN
DE OBRAS PÚBLICAS

TÍTULO: ENCOMIENDA DE GESTIÓN DE TRABAJOS DE ASISTENCIA TÉCNICA, INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO EN MATERIAS COMPETENCIA DE LA DIRECCIÓN GENERAL DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL (2009-2013).

Actuación nº 4

Asistencia técnica, investigación y desarrollo tecnológico en materia de evaluación ambiental estratégica (EAE)

GUÍA SOBRE TÉCNICAS DE CRUCE POR INFRAESTRUCTURAS LINEALES ENTERRADAS PARA LA EAE DE PLANES DE INFRAESTRUCTURAS

INFORME A4T1I4

TOMO ÚNICO

CLIENTE: Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino
Secretaría de Estado de Cambio Climático
Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental

EL PRESENTE INFORME CONSTITUYE UN DOCUMENTO OFICIAL DE ESTE TRABAJO Y, DE ACUERDO CON LAS NORMAS GENERALES DEL ORGANISMO, SU ENTREGA SUPONE EL CUMPLIMIENTO DE LAS ACTUACIONES TÉCNICAS DEL MISMO REFERENTES A LA MATERIA OBJETO DEL INFORME.

VALIDEZ OFICIAL

VISTO EL CONTENIDO DEL INFORME Y SIENDO ACORDE CON LAS CLAUSULAS DEL CONVENIO DE COLABORACION CORRESPONDIENTE, SE PROPONE AUTORIZAR SU EMISIÓN.

EL DIRECTOR DEL CENTRO DE ESTUDIOS
DE TÉCNICAS APLICADAS

Fdo. Alberto Compte Anguela

AUTORIZA LA EMISIÓN DEL INFORME:

Madrid, a 30 de noviembre de 2011

EL DIRECTOR DEL CEDEX

Fdo. Mariano Navas Gutiérrez

SÓLO SON INFORMES OFICIALES DEL CENTRO DE ESTUDIOS Y EXPERIMENTACIÓN DE OBRAS PÚBLICAS (CEDEX) LOS REFRENDADOS POR SU DIRECCIÓN.

GUÍA SOBRE TÉCNICAS DE CRUCE POR INFRAESTRUCTURAS LINEALES ENTERRADAS PARA LA EAE DE PLANES DE INFRAESTRUCTURAS

Índice

1. Introducción	3
2. Técnicas de cruce de ríos.....	3
2.1 Características de las técnicas de cruce disponibles	4
2.1.1 Construcción mediante zanja sin desvío de caudal.....	4
2.1.2 Construcción mediante zanja con desvío de caudal	10
2.1.3 Construcción sin zanja.....	16
3. Principales elementos del cauce a tener en cuenta para elegir la técnica de cruce	28
3.1 Clasificación de cauces	28
3.2.1 Impactos potenciales del cruce de cauces	32
3.2.2 Efectos de las técnicas de cruce sobre el cauce.....	36
3.3 Recomendaciones en la elección de la técnica de cruce. Principales elementos del cauce a tener en cuenta	43
3.3.1 Elementos o condicionantes constructivos.....	43
3.3.2 Elementos o condicionantes medioambientales.....	51
4. Bibliografía.....	54

GUÍA SOBRE TÉCNICAS DE CRUCE POR INFRAESTRUCTURAS LINEALES ENTERRADAS PARA LA EAE DE PLANES DE INFRAESTRUCTURAS

1. Introducción

En los últimos años, la política energética de nuestro país ha propiciado la construcción de gasoductos a lo largo y ancho de la geografía nacional. Debido a las largas distancias que se necesitan para el transporte de gas y petróleo desde las zonas de producción hasta las de procesado o comercio, los proyectos de instalación de conductos enterrados pueden llegar a cruzar numerosos cursos de agua. Su afección dependerá fundamentalmente de la técnica empleada para la instalación de estas infraestructuras, así como de su posterior restauración.

Esta guía pretende servir de apoyo para la evaluación ambiental de las obras de cruce de infraestructuras lineales bajo cauce y la propuesta de medidas correctoras o de restauración de los tramos afectados. La guía consta de dos partes:

- Parte I: Técnicas de cruce de ríos
- Parte II: Técnicas de restauración de cauces

En esta primera parte se hace una revisión de los métodos empleados normalmente para la instalación de conducciones soterradas, así como de su aplicabilidad en función de los distintos condicionantes relativos a la conducción y al lugar en el que se va a llevar a cabo la obra, prestando especial atención a los principales elementos del cauce a tener en cuenta a la hora de elegir la técnica de cruce, tanto por cuestiones constructivas como por cuestiones medioambientales.

En la segunda parte se hace una revisión de los principales elementos a tener en cuenta para devolver el cauce a su estado original y garantizar su estabilidad, y se proponen diversos métodos de restauración, prestando especial atención a su aplicabilidad en función de las características del tramo y su coste. La combinación de estos aspectos junto con los tratados en la primera parte de la guía permitirá llegar a unas recomendaciones sobre las técnicas a emplear en función de las características del cauce y del cruce realizado.

2. Técnicas de cruce de ríos

Existen numerosas técnicas para ejecutar el cruce de conducciones de forma subterránea bajo cauces, bien mediante la apertura de zanjas a través del cauce, bien mediante perforación del terreno. Las más habituales son:

Construcción mediante zanja:

- Sin desvío de caudal (ejecución húmeda)
 - Mediante excavadora con arado
 - Mediante zanjadora
 - Mediante retroexcavadora



CEDEX

- Mediante dragalina
- Mediante draga
- Con desvío de caudal (ejecución seca)
 - Desvío mediante presas y obras de drenaje
 - Desvío mediante presas y bombas
 - Desvío mediante bypass de gran volumen con bombas y sumidero y bomba
 - Desvío mediante recintos estancos
 - Desvío de cauce

Construcción sin zanja:

- Hinca y perforación horizontal
- Hinca por percusión
- Perforación horizontal mediante barrena o a rotación
- Perforación horizontal dirigida
- Microtúnel

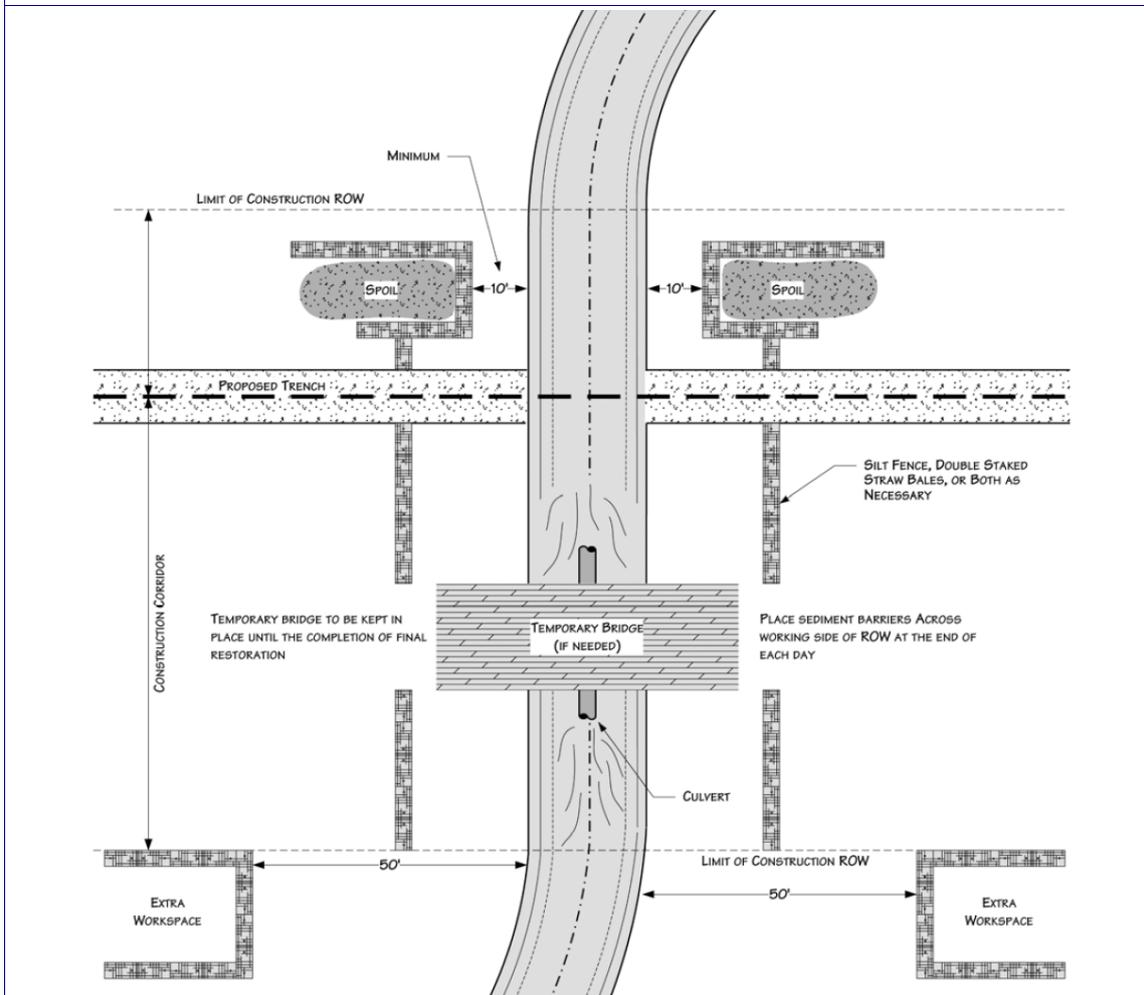
2.1 Características de las técnicas de cruce disponibles

A continuación se recoge una revisión de las principales características de cada una de ellas y de las posibilidades de aplicación.

2.1.1 Construcción mediante zanja sin desvío de caudal

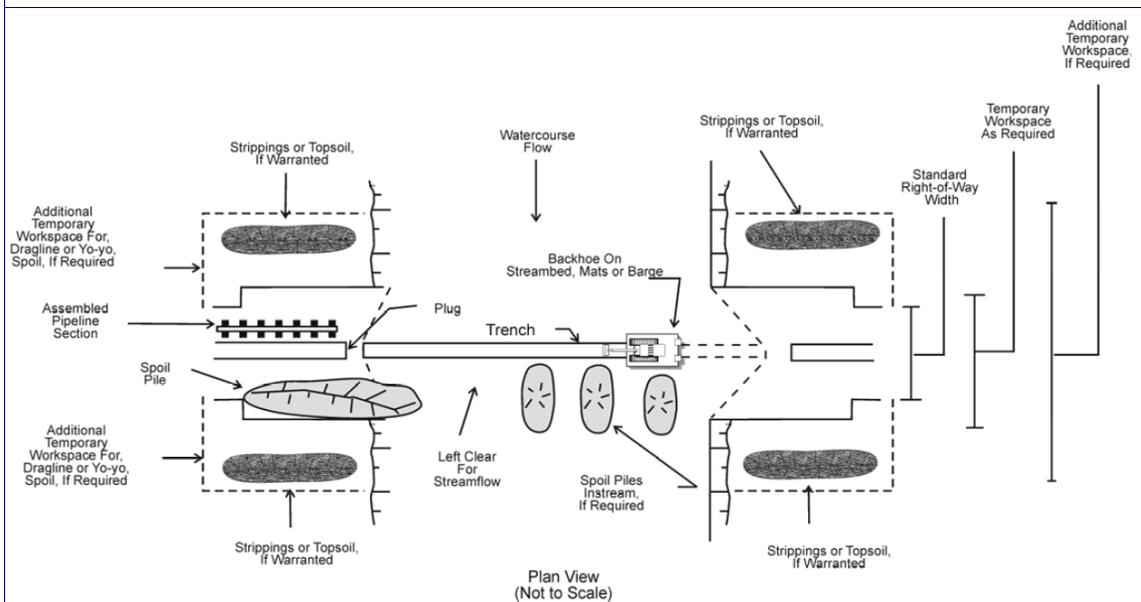
La instalación de conducciones mediante zanja sin desvío de caudal consiste en la ejecución de una excavación a cielo abierto a través del cauce en la que se instala la conducción y posteriormente se rellena con el terreno extraído de la zanja, que es apilado dentro o fuera del cauce.

Figura 1. Configuración típica de trabajo en cruce de cauces pequeños mediante zanja sin desvío de caudal



Fuente: Argonne (2007)

Figura 2. Configuración típica de trabajo en cruce de grandes cauces mediante zanja sin desvío de caudal



Fuente: CAPP, CEPA y CGA (2005)

La clasificación de métodos existentes dentro de este grupo depende de la maquinaria que se emplee para la ejecución de la zanja.

Excavadora con arado

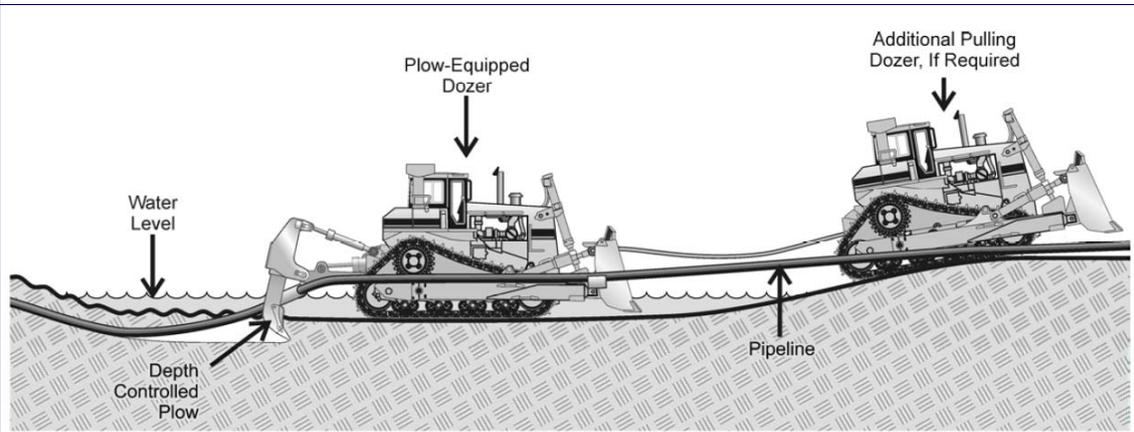
La excavadora con arado es una máquina empleada para la instalación de tuberías a la vez que se realiza la zanja, eliminando la fase de relleno y minimizando el tiempo de ejecución.

Se trata de un método rápido y de bajo coste que permite instalar tuberías de pequeño diámetro (<170 mm), a una profundidad máxima de 1 m.

Se emplea en cauces pequeños (< 10 m de ancho) sin caudal o con caudal bajo cuyo calado no supere 1 m. Es de aplicación en terrenos no cohesivos como arenas y gravas para que la zanja se vaya cerrando según se va instalando la tubería, pero presenta dificultades en lechos de cauces con bolos o roca.

Necesita riberas de pendiente baja o muy baja, por lo que normalmente se hace necesario el desmonte del terreno y la instalación de rampas para el acceso de la maquinaria al cauce.

Figura 3. Ejecución de zanja mediante excavadora con arado



Fuente: CAPP, CEPA y CGA (2005)

Zanjadora

La zanjadora realiza la apertura rápida de zanjas continuas mediante palas mecánicas que arrancan la tierra de manera regular.

Este método rápido y de bajo coste permite instalar tuberías, en función de la máquina utilizada, de un máximo de 1.400 mm de diámetro y a 6 m de profundidad.

Como en el caso anterior, se emplea en cauces pequeños de menos de 10 m de ancho con caudal nulo o bajo y cuyo calado no supere 1 m, si bien se puede aplicar en ríos de mayor anchura si se trata de cauces secos. Aunque las zanjadoras actúan en todo tipo de sustratos excepto la roca, esta técnica se usa preferiblemente en terrenos cohesivos de textura fina (limos y arcillas) para que se mantenga la zanja abierta.

El acceso de la maquinaria se ve dificultado en cauces con riberas escarpadas, por lo que su pendiente debe ser baja o muy baja, siendo normalmente necesario el desmante del terreno.

Retroexcavadora

La retroexcavadora se utiliza para la apertura de zanjas bien desde las orillas o bien trabajando en el interior del cauce.

Se trata de un método rápido y de bajo coste que permite la instalación de tuberías de cualquier diámetro a una profundidad máxima de 6 m.

El método está limitado a ríos de anchura inferior a 20 m, a menos que se trabaje dentro del cauce, como sería el caso de las ramblas, y a calados no superiores a 1,5 m, salvo que se trabaje desde barcaza. Su uso es compatible con sustratos granulares, no siendo impedimento la presencia de bolos, pero genera mucho material en suspensión con limos y arcillas, excepto si se trata de cauces secos.



Puede requerir, en función del tamaño del cauce y la tubería, el uso de varias retroexcavadoras trabajando conjuntamente.

Dragalina

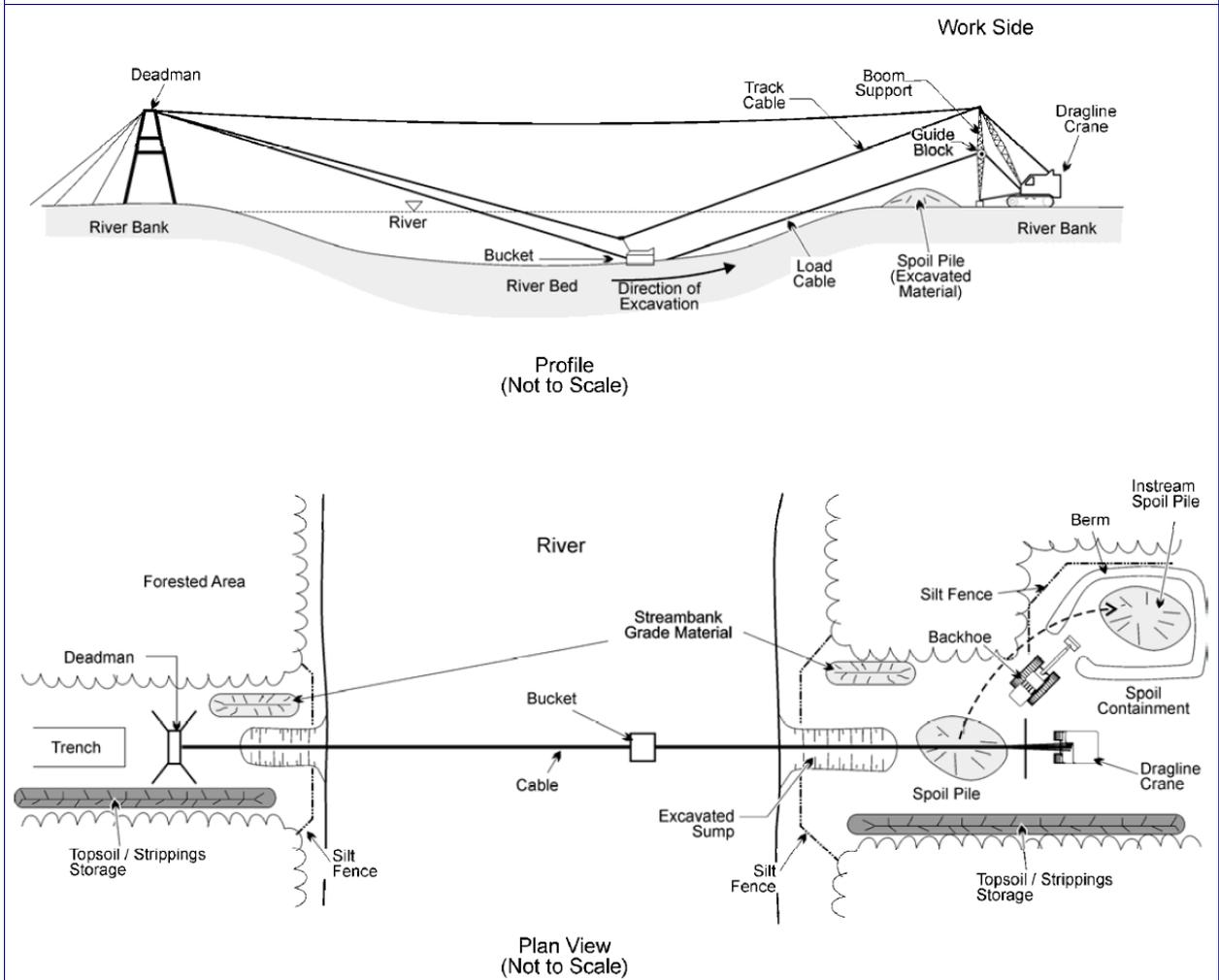
La dragalina se usa para la excavación de zanjas profundas desde las orillas del cauce, y también frecuentemente para limpiar zanjas iniciadas con retroexcavadora.

Se trata de un método lento y moderadamente caro que permite la instalación de tuberías de cualquier diámetro -pues se pueden realizar varias pasadas para ensanchar la zanja- a profundidades no superiores a 12 m desde el pie de la máquina.

Se utiliza en cauces grandes -resulta muy caro en anchos menores de 20 m- y de gran calado (no superior a 10 m). Es aplicable con sustratos no consolidados, preferentemente de arenas y gravas, pues no resulta compatible con bolos y genera mucho material en suspensión con limos y arcillas.

Las instalaciones necesarias para la aplicación de este método requieren una gran superficie, y suele ser necesario además tender los taludes del cauce. Por otra parte, el cableado podría representar un obstáculo para la navegación en el río.

Figura 4. Típica configuración de trabajo en cruce de cauces mediante dragalina



Fuente: CAPP, CEPA y CGA (2005)

Draga

Consiste en el dragado del material del lecho mediante una draga mecánica o hidráulica para la apertura de zanjas, cuyo relleno depende del transporte natural de sedimentos del cauce.

Se trata de una técnica costosa que permite la instalación de tuberías de cualquier diámetro y a gran profundidad (según bibliografía, hasta 50 m desde la superficie del agua).

Se utiliza normalmente en cauces grandes, resultando muy caro en anchos menores de 20 m, y de gran calado. Es de aplicación en cauces con sustrato sin consolidar, presentando dificultades en sustratos granulares gruesos (bolos).



Es un método recomendado cuando es necesario controlar el transporte de sólidos en suspensión, pues el material excavado no se acumula dentro del río, sino que se deposita en las márgenes o sobre barcazas.

2.1.2 Construcción mediante zanja con desvío de caudal

En estos métodos se realiza un desvío del caudal circulante por el cauce para ejecutar la excavación y colocar la conducción en seco. La clasificación de métodos dentro de este grupo depende del modo en el que se lleve a cabo el desvío del caudal.

Presas y obras de drenaje

Este método consiste en construir dos pequeñas presas, aguas arriba y aguas abajo de la zanja en la que se va a alojar el conducto, mientras que el caudal se deriva por una o varias obras de drenaje que atraviesan las dos presas y pasan sobre la zanja.

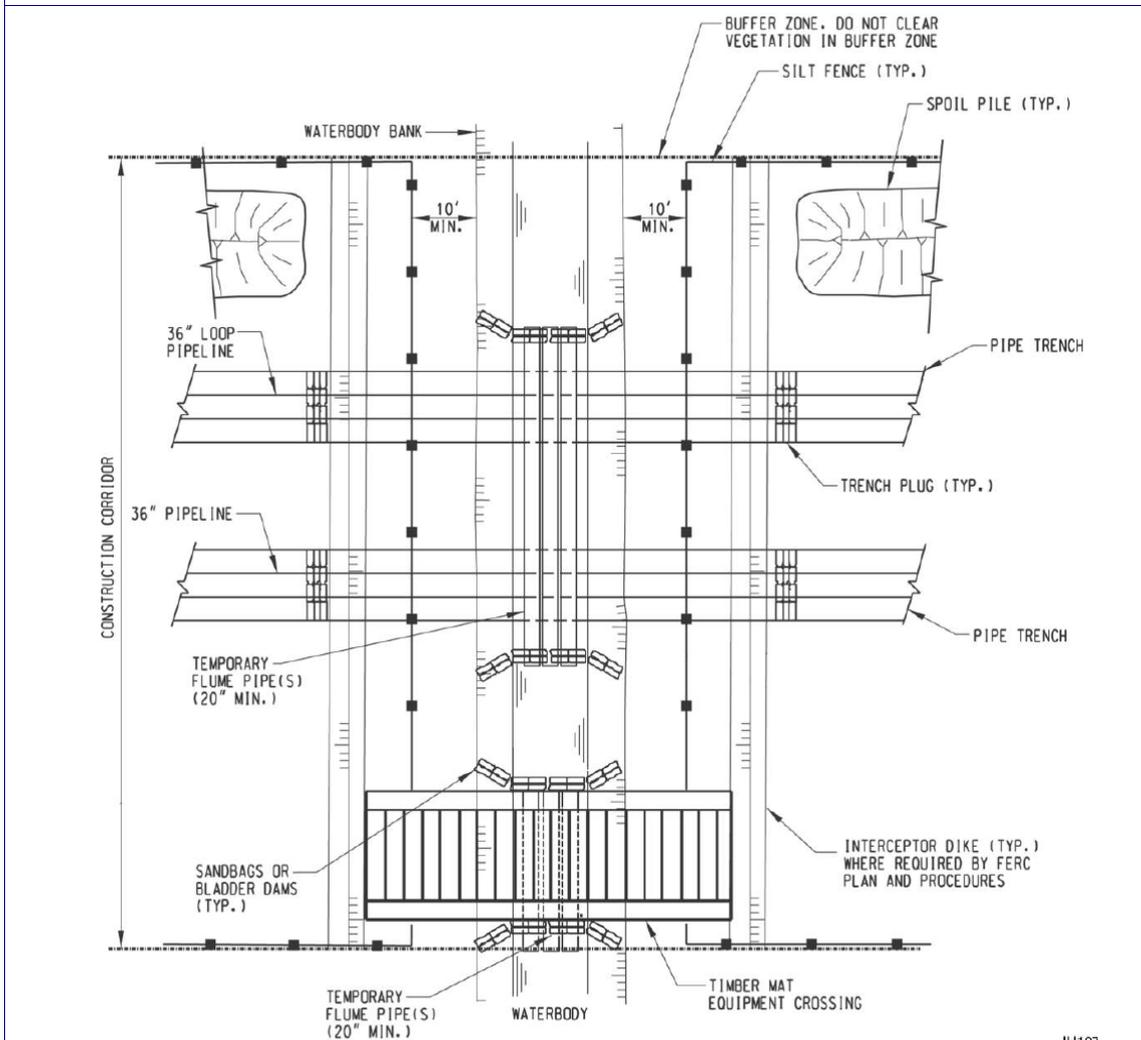
Las obras de drenaje normalmente son vainas de acero, que tienen que ser autoportantes para poder realizar la zanja bajo las mismas, y su colocación ha de ser anterior a la excavación, no debiéndose retirar hasta que no se haya completado totalmente la instalación del conducto. Las presas se deben construir con materiales que no produzcan transporte de sedimentos, tales como sacos terreros, grava limpia con un revestimiento plástico, conductos plásticos rellenos de agua, etc.

Se trata de un método de construcción lento y moderadamente caro que permite la instalación de tuberías de cualquier diámetro y a cualquier profundidad.

Se puede utilizar en cauces de cualquier tamaño, si bien se recomienda en ríos pequeños, ya que está limitado, debido al tamaño de las obras de drenaje, a caudales de 2 ó 3 m³/s (lo habitual es usarlo para caudales menores de 1 m³/s). No obstante, usando múltiples drenajes se puede llegar hasta 20 m³/s, e incluso combinarse con el uso de bombas. Es de aplicación en lechos de todo tipo de materiales, siendo compatible con sustratos consolidados, aunque lo normal es usarlo en suelos cohesivos, pues en sustratos permeables gruesos podría dar lugar a filtraciones que dificultan la excavación de la zanja.

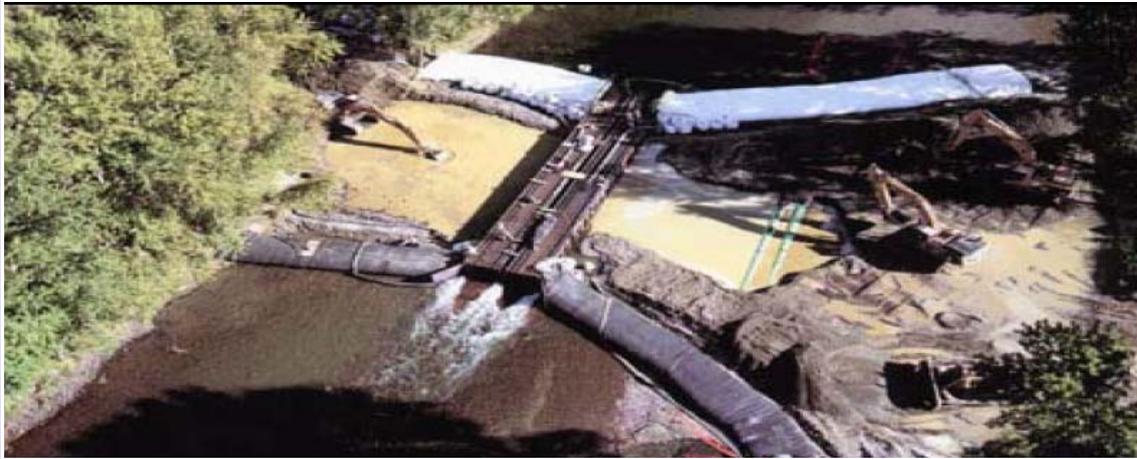
Necesita además un tramo de río recto para instalar las obras de drenaje, y con cauce y orillas bien definidos para la colocación de las presas.

Figura 5. Típica configuración de trabajo en cruce de cauces por desvío de caudal mediante presas y obras de drenaje



Fuente: Argonne (2007)

Figura 6. Presas formadas con conductos plásticos rellenos de agua en cruce de cauces por desvío de caudal mediante presas y obras de drenaje



Fuente: AquaDam

Presas y bombas

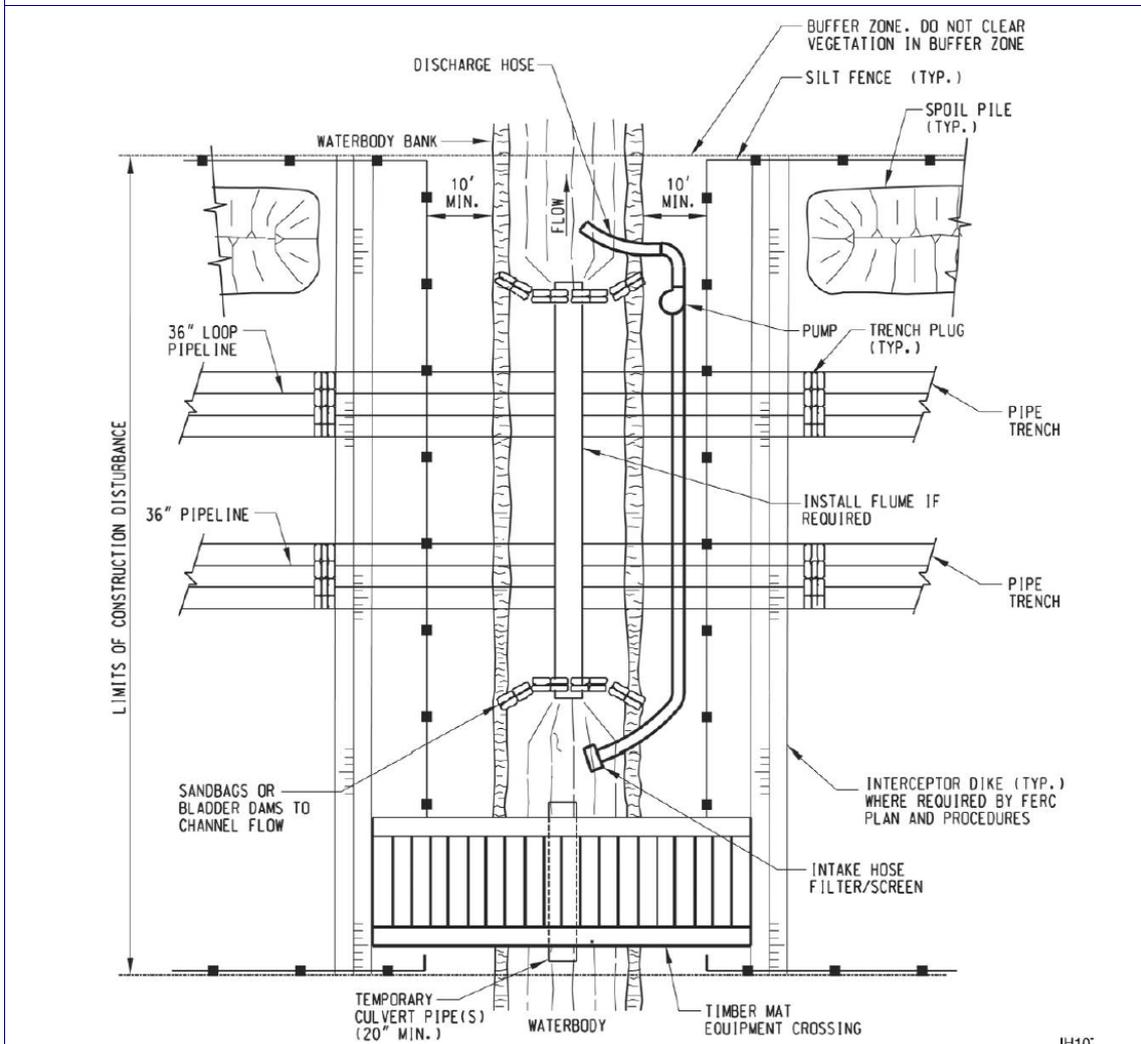
Este método consiste en construir dos pequeñas presas, aguas arriba y aguas abajo de la zanja en la que se va a alojar el conducto, realizándose el desvío mediante bombas que toman el caudal aguas arriba de las presas y lo desaguan aguas abajo. Como en el caso anterior, las presas se deben realizar con materiales que no produzcan transporte de sedimentos, tales como sacos terreros, grava limpia con un revestimiento plástico, conductos plásticos rellenos de agua, etc.

Se trata de un método de construcción lento y moderadamente caro que permite la instalación de tuberías de cualquier diámetro y a cualquier profundidad.

Aunque se puede usar en ríos de cualquier tamaño, se recomienda en cauces pequeños, pues está limitado por la capacidad de bombeo a caudales menores a 1 m³/s. Como en el caso anterior, es de aplicación en lechos de todo tipo de materiales, siendo compatible con sustratos consolidados, aunque lo normal es usarlo en suelos cohesivos pues en sustratos permeables gruesos puede dar lugar a filtraciones que dificultan la excavación de la zanja.

El método se usa en ríos con cauce y orillas bien definidos, pudiendo ser empleado en tramos curvos o meandriformes.

Figura 7. Típica configuración de trabajo en cruce de cauces por desvío de caudal mediante presas y bombas



Fuente: Argonne (2007)

Bypass de gran volumen con bombas y sumidero y bomba

Consiste en la realización de una excavación en el cauce desde la que se realiza un bypass de gran parte del caudal del río hasta la zona situada aguas abajo de la zanja.

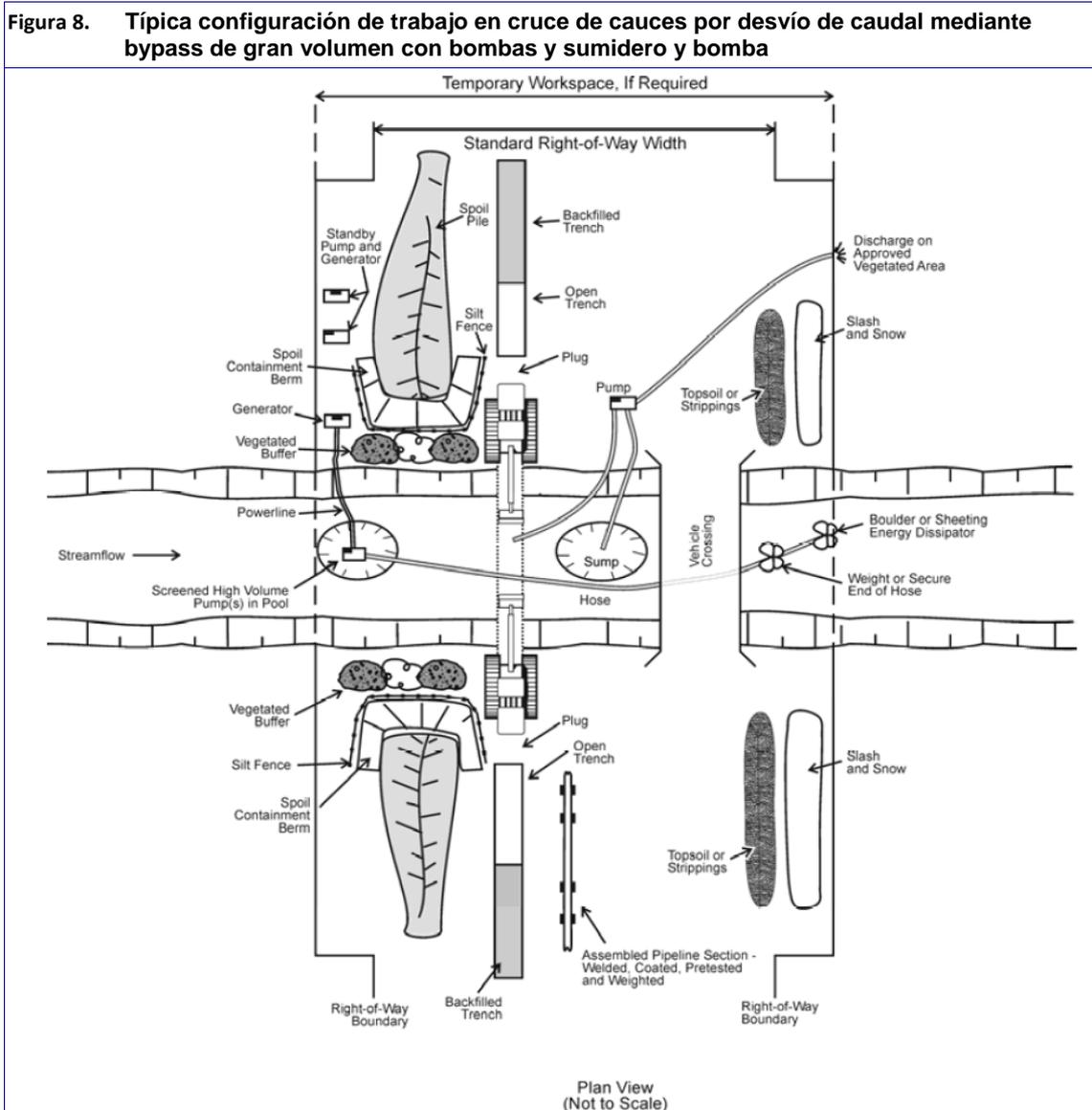
Por otra parte, para mantener seca la zona de trabajo, aguas abajo del cruce de la conducción se crea un sumidero en el lecho del que se bombea el agua con sedimentos en suspensión hacia una zona con vegetación tupida u otro dispositivo de filtración. No es necesaria por tanto la construcción de presas, pero sí realizar excavaciones en el lecho.

Se trata de un método de construcción lento y moderadamente caro que permite la instalación de tuberías de cualquier diámetro y a cualquier profundidad.

Aunque se puede usar en ríos de cualquier tamaño, está limitado, como en el caso anterior, a caudales menores a 1 m³/s, por lo que se recomienda en cauces pequeños.

Es de aplicación en cauces de todo tipo de materiales, pero se desaconseja totalmente en lechos rocosos por la dificultad para abordar su posterior restauración.

También puede emplearse en tramos curvos y ríos meandriformes.



Fuente: CAPP, CEPA y CGA (2005)

Recintos estancos

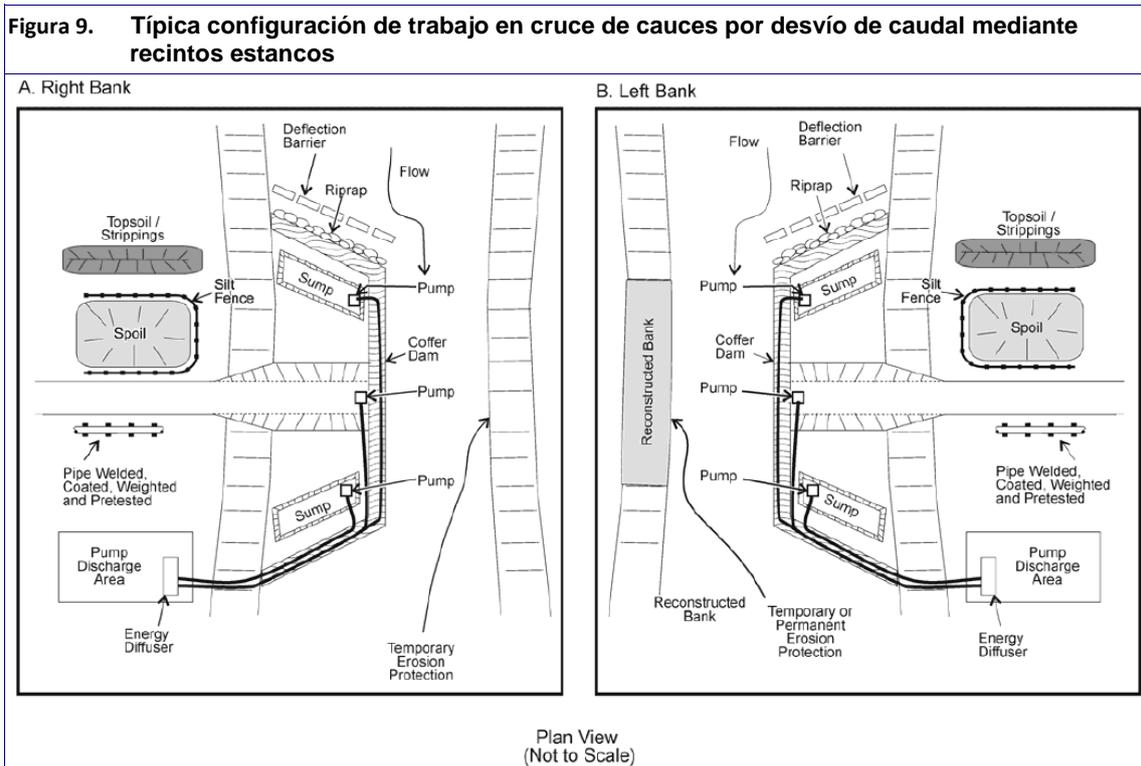
Consiste en la instalación de un dique en una orilla del cauce, que se adentra aproximadamente dos terceras partes dentro del mismo, para crear un recinto estanco en el que se instala la conducción, bien en seco, bombeando las aguas fuera del

recinto, o bien en húmedo. Posteriormente se elimina la presa y se actúa de la misma forma en la otra orilla. Las presas que crean los recintos estancos pueden estar formadas por sacos terreros, tablestacas, barreras de mediana rellenas con rocas, conductos plásticos rellenos de agua, etc.

Se trata de un método de construcción lento y caro, que permite la instalación de tuberías de cualquier diámetro y a cualquier profundidad.

Se recomienda en cauces de tamaño moderado a grande en los que no pueden ser aplicados los métodos de desvío con obras de drenaje o bombeo. El método es compatible con todo tipo de sustratos, incluso consolidados, si bien funciona mejor en terrenos cohesivos, ya que en sustratos permeables gruesos puede dar lugar a filtraciones que dificultan la excavación de la zanja.

Necesita mucho espacio y conlleva una importante alteración del terreno. Además, para su aplicación se necesita un tramo con orillas no abruptas. Por otra parte, puede ser empleado en ríos trenzados.



Fuente: CAPP, CEPA y CGA (2005)

Desvío de cauce

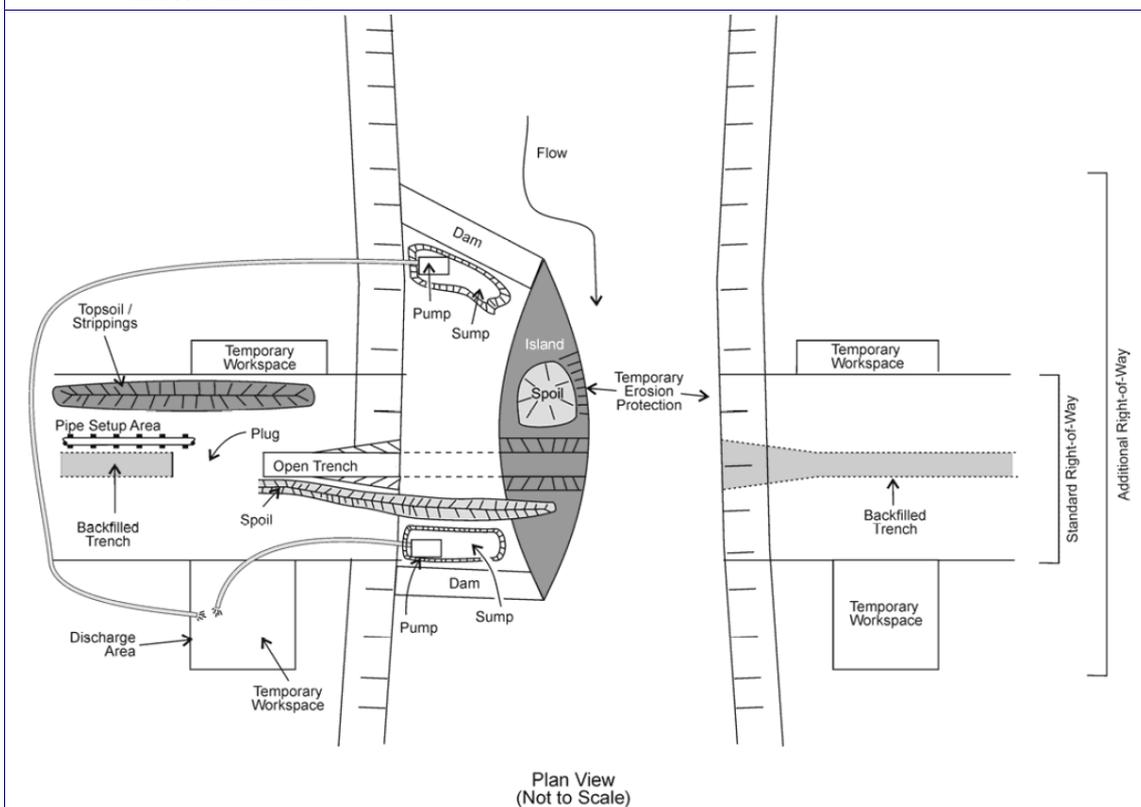
Consiste en desviar la corriente, bien por los cauces secundarios del río, bien a través de un cauce abandonado, o bien mediante la construcción de uno nuevo. Para realizar el desvío se pueden utilizar escolleras, tablestacas o conductos plásticos rellenos de agua, y puede ser necesario revestirlo o utilizar conductos flexibles para evitar la erosión al incrementarse la velocidad del agua.

Se trata de un método de construcción lento y caro que permite la instalación de tuberías de cualquier diámetro y a cualquier profundidad.

Se recomienda en cauces de tamaño moderado a grande en los que no pueden ser aplicados los métodos de desvío con obras de drenaje o bombeo. El método, que es compatible con todo tipo de sustratos, si bien en sustratos de elevada permeabilidad puede dar lugar a filtraciones que dificultan la excavación de la zanja. Además, es preferible que el cauce utilizado para el desvío no tenga sustratos finos para evitar generar material en suspensión.

Normalmente necesita una preparación del terreno y desmontes extensivos, por lo que puede dar lugar a importantes daños en las orillas y zonas adyacentes. Además, el cauce de desvío tiene que ser rellenado, estabilizado y restaurado tras las obras.

Figura 10. Típica configuración de trabajo en cruce de cauces por desvío de caudal mediante desvío de cauce



Fuente: CAPP, CEPA y CGA (2005)

2.1.3 Construcción sin zanja

Se trata de técnicas que permiten la instalación de conducciones sin realizar apertura de zanjas, sino perforando el terreno por debajo del lecho. Por lo general, suelen tener un elevado coste pero son de interés en cauces de gran anchura o elevada sensibilidad medioambiental.

Existen dos tipos de técnicas según la forma de realizar la perforación: la perforación horizontal dirigida y la perforación horizontal.

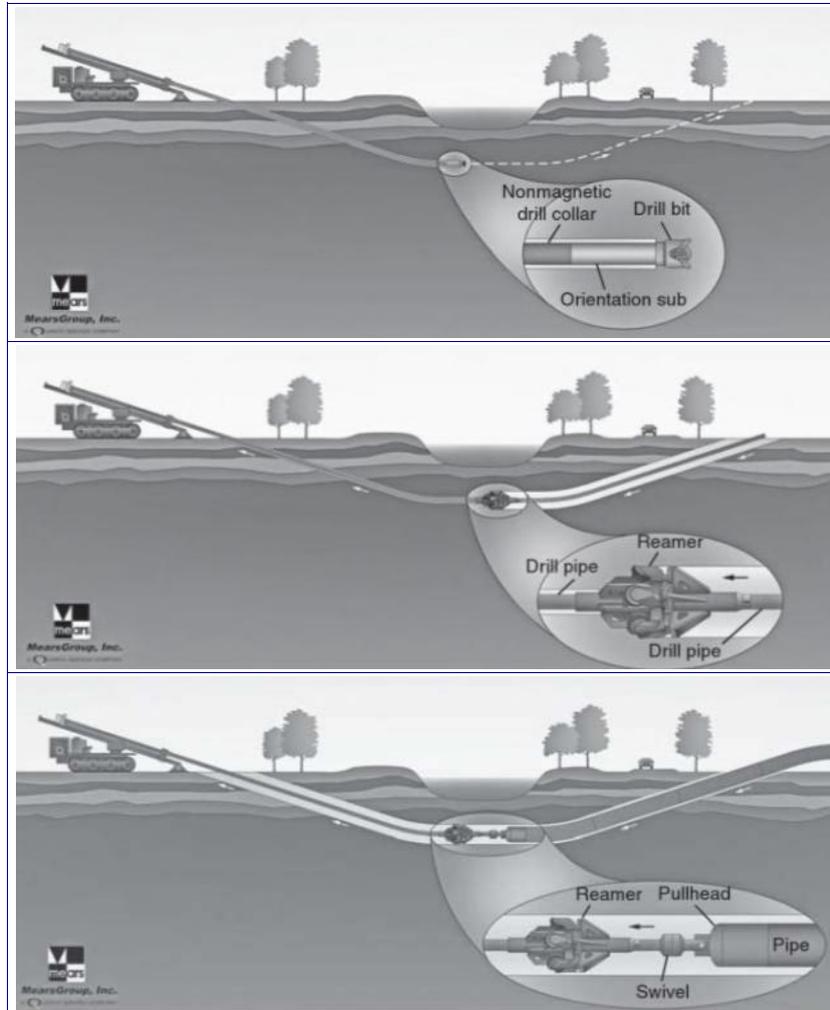
Perforación horizontal dirigida

Consiste en la excavación y la colocación de tubería con una trayectoria curva en un proceso que consta de tres fases:

1. Se realiza un taladro piloto que sorte el obstáculo, en este caso el cauce, siguiendo el trazado previamente planificado. La sonda de guiado envía su posición al perforista, que ejecuta las acciones de guiado necesarias, modificando el giro y el empuje sobre el útil de perforación.
2. Una vez que el taladro piloto llega a su objetivo se sustituye allí el útil de perforación por un ensanchador de tamaño adecuado al diámetro de la conducción a instalar y se procede a recoger el varillaje de perforación arrastrando el ensanchador a lo largo de todo el taladro piloto. En ciertas ocasiones los ensanchados estarán constituidos por sucesivas pasadas de herramientas cada vez mayores.
3. La tercera fase es similar a la anterior, en cuanto a que se procede a repasar el taladro con un ensanchador, aunque en general de perfil menos agresivo, también llamado compactador. Unido a él, a través de una pieza de giro libre que impida dañarla, se tira de la conducción, que queda así instalada bajo el obstáculo. El ensanchado y la instalación pueden en ocasiones ser simultáneos.

Para la perforación se utiliza un fluido de bentonita y/o polímero con agua, que permite eliminar los detritus de la perforación mientras se lleva a cabo la misma, mantener abierto y estable el taladro, controlar las pérdidas por filtración y realizar el sostenimiento de las paredes del taladro.

Figura 11. Fases de la perforación horizontal dirigida: fase 1 - perforación de taladro piloto (arriba); fase 2 - ensanchado del taladro (centro), y fase 3 - instalación del conducto (abajo)



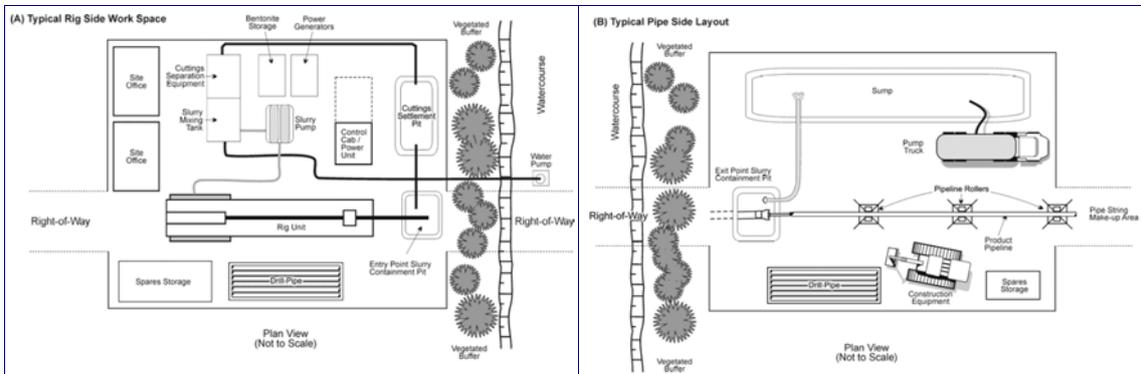
Fuente: Najafi (2010)

Se trata de un sistema lento y moderadamente caro pero muy en alza en los últimos años por su coste cada vez más bajo y mínimo impacto ambiental. Permite alcanzar longitudes de hasta 3.000 m con diámetros de tubería de 200 a 1.600 mm a cualquier profundidad, siendo habitual que los trazados tengan curvas en alzado.

Se puede usar en cauces de cualquier tamaño y en todo tipo de materiales, aunque puede presentar dificultades con bolos, y es de aplicación en zonas con taludes inestables.

El método requiere espacio adicional para las instalaciones, y la trayectoria de la perforación está limitada por el ángulo de entrada y salida, que suele estar entre los 10° y 20°.

Figura 12. Típica configuración de trabajo en la perforación horizontal dirigida: plataforma lateral de trabajo (izquierda) y plataforma de trabajo en punto de salida (derecha)



Fuente: CAPP, CEPA y CGA (2005)

Perforación horizontal

Consiste en la excavación de una sección circular y la colocación de tubería mediante empuje desde un pozo de ataque hasta un pozo de retirada. El sistema está compuesto por los siguientes elementos:

- Pozo de ataque: debe tener un espacio suficiente para alojar todos los componentes de la hinca y proteger la zona de trabajo. El muro de reacción es generalmente de hormigón armado y se encuentra dentro del pozo en la zona contraria al emboquille de hinca, que debe tener capacidad para resistir los empujes previstos para colocar la conducción.
- Sistema de perforación: es el elemento que realiza la excavación del túnel.
- Sistema de empuje principal: consiste en una serie de cilindros hidráulicos que empujan los tramos de tubería a través de una corona para repartir esfuerzos.
- Pozo de retirada: debe tener dimensiones suficientes para retirar el sistema de perforación utilizado.

Hasta hace unos años los trazados con estos métodos eran casi todos rectilíneos, si bien actualmente los sistemas de guiado permiten la ejecución de curvas.

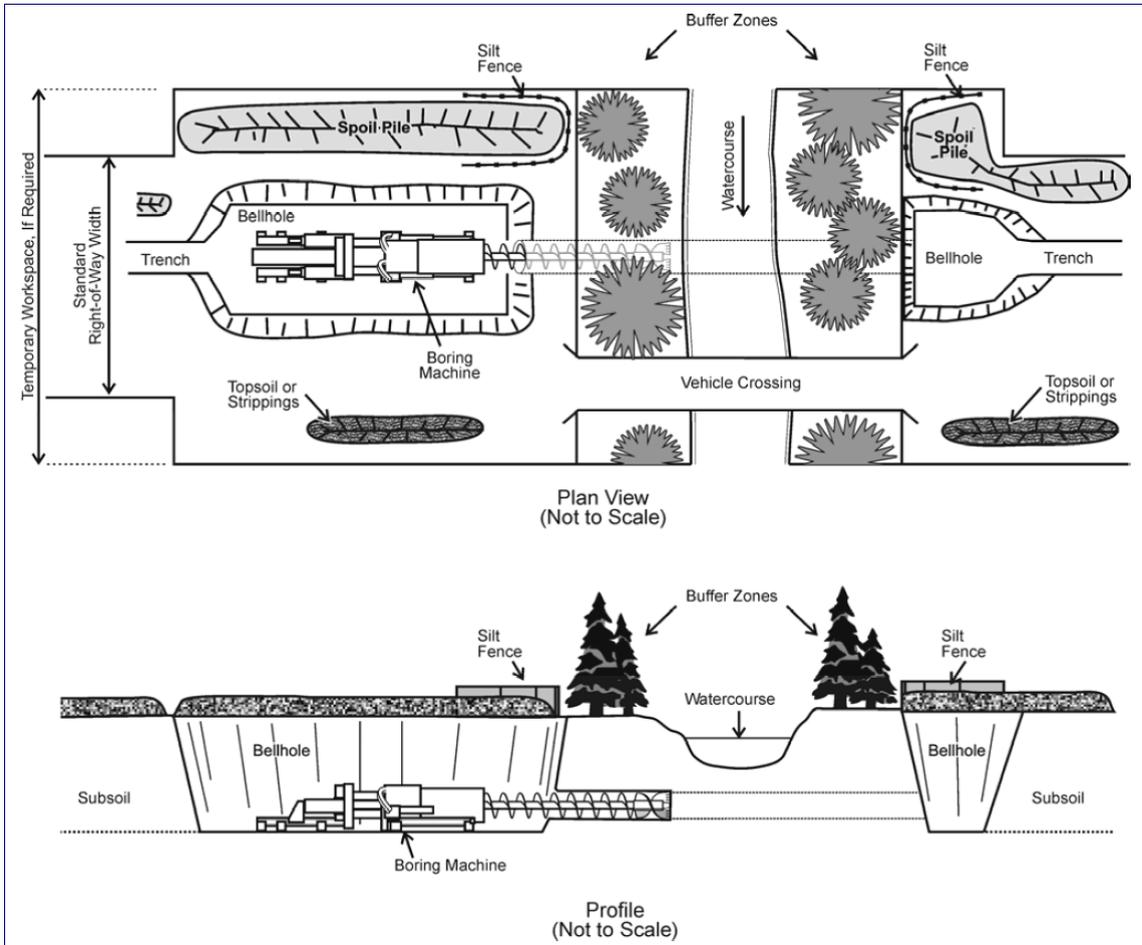
Para disminuir el rozamiento entre el terreno y el conducto se utilizan distintos lubricantes en función del tipo de terreno, siendo los más utilizados los lodos poliméricos y bentoníticos.

Cuando se termina la ejecución de una hinca de tubería se realiza la inyección del trasdós para rellenar el espacio anular existente entre el terreno y el tubo con el fin de evitar que se produzcan asentamientos en la superficie y que queden huecos. Para la inyección se usa una lechada o suspensión de cemento estable.

Las tuberías a emplear para la perforación horizontal tienen unos requerimientos diferentes a aquellas que se colocan en zanja, ya que deberán soportar las fuerzas de

empuje que se ejercen sobre ellas. Éstas pueden ser de hormigón armado, hormigón polímero, poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV), gres o arcilla vitrificada y acero.

Figura 13. Típica configuración de trabajo con la hinc y perforación horizontal



Fuente: CAPP, CEPA y CGA (2005)

En función de los sistemas de perforación se distinguen los siguientes casos particulares:

- Mediante empuje hidráulico con escudo
- Por percusión (*Pipe ramming*)
- Mediante barrena o a rotación (*Auger boring*)
- Microtúnel

Mediante empuje hidráulico con escudo

Con un sistema similar al de las tuneladoras convencionales, consiste en una cabeza de avance (escudo) que genera un frente de excavación mientras expulsa el material

que va rompiendo, y por detrás de esta cabeza avanzan los tubos gracias a unos gatos hidráulicos que empujan sobre el último de ellos.

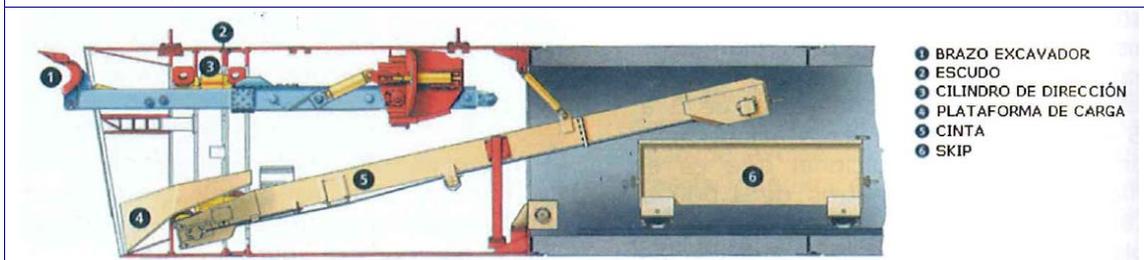
Las tuneladoras escudadas que se pueden utilizar son las que figuran en la siguiente tabla:

Tipo de escudo	Método de excavación	Estabilización del frente
Escudo con frente abierto	Manual (martillo picador, etc.)	Únicamente de tipo "pasivo" (máquina parada)
	Semimecanizado (cuchara, rozadora, martillo pesado, etc.)	
	Mecanizado (rueda de corte)	
Escudo con frente cerrado	Rueda presurizada	Aire comprimido
		Equilibrio de Presión de Tierras (EPB)
		Lodos bentoníticos (Hidroescudos)

El sistema de perforación con escudo con frente abierto consiste en excavar al amparo de un escudo metálico sin necesidad de soportar el frente de excavación, puesto que éste es estable, es decir, de terreno cohesivo incluso rocoso y sin presencia de agua.

El rango de diámetros para este sistema de hinca es de 1.200 a 3.500 mm de diámetro interior, puesto que hay que tener en cuenta que habrá personal trabajando dentro del escudo.

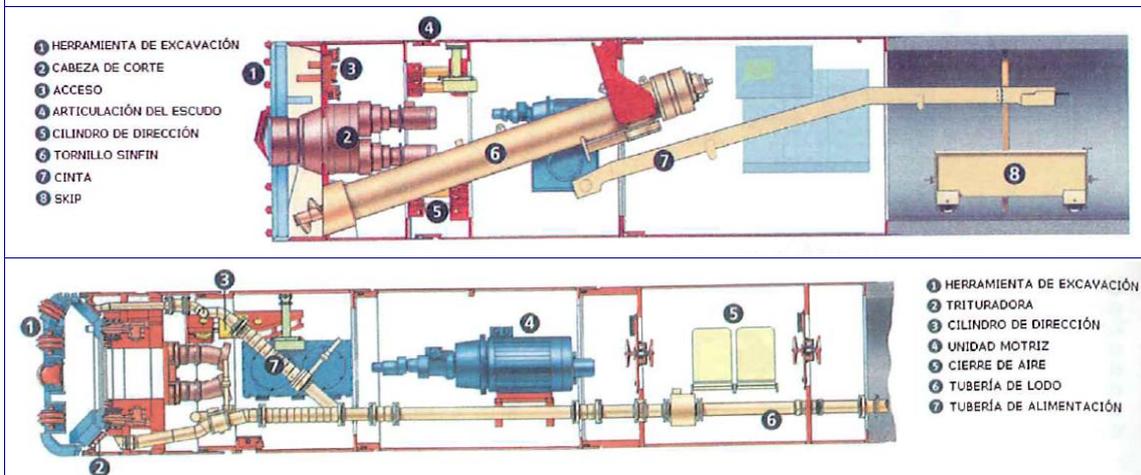
Figura 14. Esquema de escudo con frente abierto para hinca



Fuente: López Jimeno *et al.* (2011)

El sistema de perforación con escudo con frente cerrado consiste en excavar al amparo de un escudo metálico que soporta el frente de excavación. Las máquinas de tipo EPB se utilizan en arenas, arcillas y limos, mientras que los hidroescudos se usan para la excavación de terrenos no cohesivos, arenas gruesas y gravas, bajo el nivel freático. Su rango de aplicación se puede extender a los terrenos cohesivos e incluso a las rocas si se utilizan herramientas de corte y aditivos adecuados. El rango de diámetros para tipo EPB para hinca va de 1.500 a 3.500 mm de diámetro interior, y en el caso de hidroescudos de 250 mm a 3.500 mm.

Figura 15. Esquema de EPB (arriba) y esquema de hidroescudo (abajo)



Fuente: López Jimeno *et al.* (2011)

Cuando la distancia entre el pozo de ataque y retirada es demasiado grande para acometer la hinca únicamente con el equipo de empuje principal o cuando el rozamiento del terreno con el tubo se prevé que pueda impedir la terminación de la hinca sin contar con un empuje adicional, se usan estaciones intermedias. Estas estaciones intermedias se colocan entre dos tubos, y constan de unos cilindros hidráulicos que se colocan en el perímetro de un escudo de acero que tiene el mismo diámetro que los tubos adyacentes.

En general, se trata de un sistema muy caro -pues necesita maquinaria y equipos especializados- que permite la instalación de tuberías de 250 mm a 3.500 mm de diámetro a cualquier profundidad.

Es de aplicación en cauces de cualquier tamaño y, en función de la maquinaria empleada, tanto por encima como por debajo del nivel freático en todo tipo de materiales, aunque puede presentar dificultades con bolos.

El método requiere espacio adicional para las instalaciones, principalmente para los pozos de ataque y retirada.

Por percusión (Pipe ramming)

Es un caso particular de hinca y perforación horizontal típicamente empleado en el cruce de cauces. Consiste en la colocación de tuberías metálicas o camisas con un martillo que, mediante empuje neumático, va creando la perforación por percusión por delante de la tubería, evacuándose los detritus a través de la misma mediante aire comprimido o agua a presión.

Se trata de un método rápido y caro, aunque más económico que el túnel y el microtúnel si se realiza en las condiciones adecuadas, que permite la instalación de conducciones de 100 mm a 1.400 mm de diámetro a cualquier profundidad.

Es de aplicación en ríos de hasta 100 m de anchura (aunque se encarece mucho en el caso de cauces muy anchos) y en todo tipo de suelos, preferiblemente en suelos impermeables de textura fina para evitar filtraciones, pudiendo ser necesario el uso de bombas para drenar el agua desde el pozo de ataque a los terrenos colindantes. Puede presentar dificultades con bolos y roca.

Este método se aplica normalmente en cauces en los que el nivel freático sea bajo para mantener el túnel seco, y en los que no haya incisión y los taludes laterales tengan una pendiente suave, para evitar excavar pozos de ataque y retirada muy profundos.

Mediante barrena o a rotación (Auger Boring, AB)

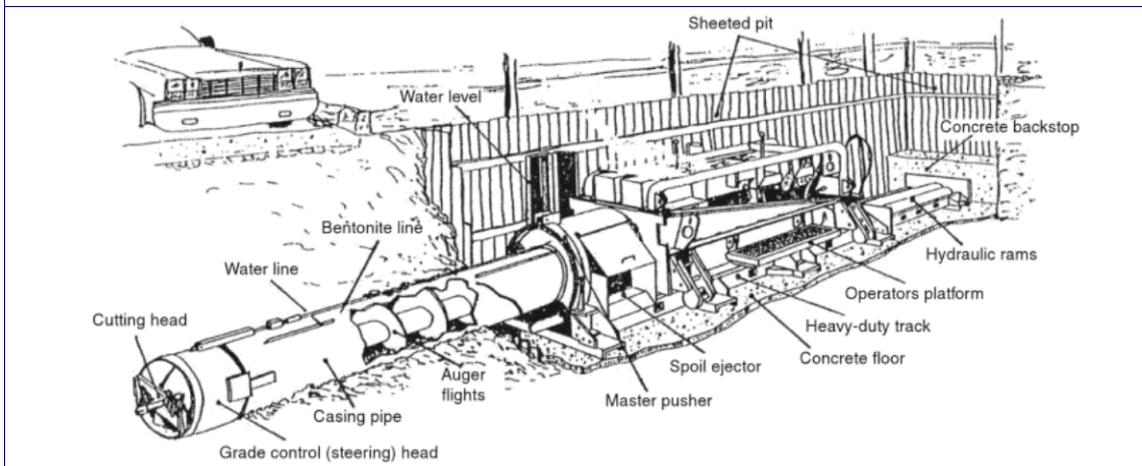
Es otro caso particular de hinc y perforación horizontal normalmente utilizado en el cruce de cauces. Este tipo de perforación consiste en realizar el corte del terreno con una cabeza de perforación que se introduce en la tubería y va unos centímetros adelantada a la misma para ir excavando, mientras que el escombros es extraído por un tornillo sinfín. El tipo de cabeza de perforación dependerá del tipo de terreno, pudiendo ser similar a la de una rozadora o a una rueda de corte de una tuneladora de roca.

Se trata de un método rápido y caro, aunque más económico que el túnel y el microtúnel si se realiza en las condiciones adecuadas, que permite la instalación de tuberías de 300 mm a 1.500 mm de diámetro a cualquier profundidad.

Es de aplicación en ríos de hasta 180 m de anchura, y aunque tradicionalmente se utilizaba únicamente para suelos o rocas blandas, en los últimos años se ha extendido a rocas duras por la evolución de la maquinaria, por lo que es aplicable en todo tipo de suelos. No obstante, su uso es preferible en suelos impermeables de textura fina para evitar filtraciones, pudiendo ser necesario el uso de bombas para drenar el agua desde el pozo de ataque a los terrenos colindantes. Además, presenta dificultades con bolos y roca, e incluso con gravas si el conducto a instalar es de pequeño diámetro.

Este método se aplica normalmente en cauces en los que el nivel freático sea bajo para mantener el túnel seco, y en los que no haya incisión y los taludes laterales tengan una pendiente suave, para evitar excavar pozos de ataque y retirada muy profundos.

Figura 16. Esquema de perforación horizontal mediante barrena o a rotación



Fuente: Najafi (2010)

Microtúnel

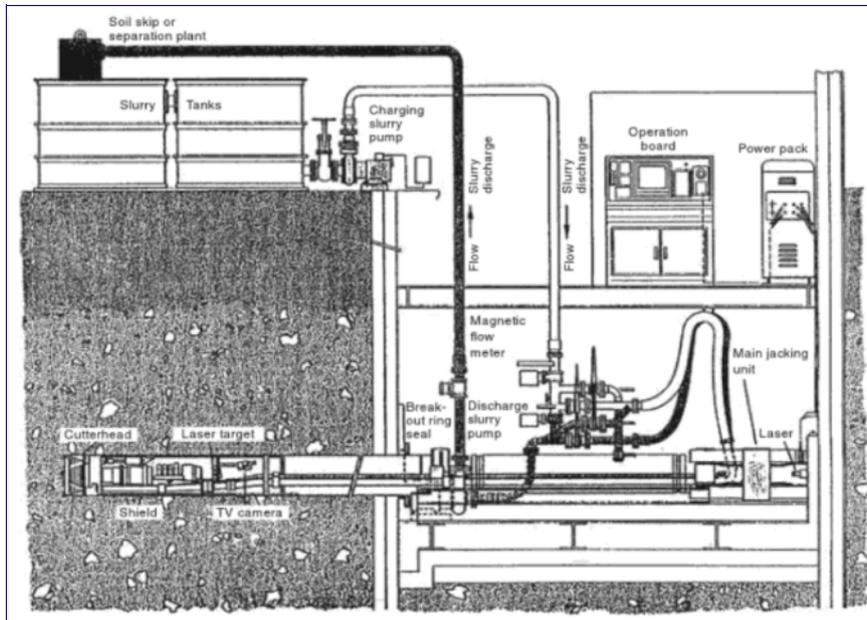
Se incluyen como microtúneles los túneles de pequeño diámetro ejecutados mediante las mismas técnicas de excavación indicadas para el túnel pero mediante control remoto, es decir, sin intervención humana en el interior (salvo en caso de averías, mantenimiento, etc.) sino pilotado desde el exterior.

Se trata de un sistema muy caro -pues necesita maquinaria y equipos especializados- que permite la instalación de tuberías a cualquier profundidad. Existe cierta indefinición para situar el rango de diámetros de los microtúneles, considerándose en EE.UU. el límite superior en tuberías de diámetro interior de 1.000 mm.

Es de aplicación tanto por encima como por debajo del nivel freático en cauces de cualquier tamaño, normalmente con una anchura mayor de 10 m, y de todo tipo de materiales, aunque puede presentar dificultades con bolos.

El método requiere espacio adicional para las instalaciones, principalmente para los pozos de ataque y retirada y para almacenar los lodos de perforación.

Figura 17. Esquema de perforación con microtúnel



Fuente: Najafi (2010)

2.2 Consideraciones prácticas para la aplicación de las técnicas de cruce

Tal y como se recoge en el apartado anterior, existen numerosas técnicas para la instalación de conducciones soterradas en el cruce con cursos de agua. Las posibilidades de aplicación de unas u otras dependen de numerosos factores, entre los que se encuentran las características de la tubería a instalar y la naturaleza del terreno, sin olvidar las relativas al cauce que se pretende cruzar.

En lo que a las características de la conducción se refiere, la elección se ve limitada por el diámetro de la tubería, pues si bien existen técnicas de cruce que permiten instalar conducciones de cualquier diámetro, en otras la maquinaria presenta limitaciones en este sentido. Además, no todas las maquinarias permiten colocar las conducciones a cualquier profundidad.

En la siguiente tabla se incluye un resumen de las técnicas de cruce existentes y sus limitaciones en cuanto a la instalación de la conducción:



CEDEX

Tabla 2. Aplicabilidad de las técnicas de cruce en función del diámetro de la conducción y la profundidad máxima de instalación

Técnica de cruce		Diámetro de conducción (mm)	Profundidad máxima de instalación (m)
Cruce con zanja sin desvío de caudal	Excavadora con arado	< 170 mm	< 1 m
	Zanjadora	< 1400 mm	< 6 m
	Retroexcavadora	Cualquier diámetro	< 6 m
	Dragalina	Cualquier diámetro	< 12 m desde pie de máquina
	Draga	Cualquier diámetro	< 50 m desde superficie de agua
Cruce con zanja con desvío de caudal	Presas y obras de drenaje	Cualquier diámetro	Cualquier profundidad
	Presas y bombas	Cualquier diámetro	Cualquier profundidad
	Bypass de gran volumen con bombas	Cualquier diámetro	Cualquier profundidad
	Recintos estancos	Cualquier diámetro	Cualquier profundidad
	Desvío de cauce	Cualquier diámetro	Cualquier profundidad
Cruce sin zanja	Hinca y perforación horizontal	250 a 3.500 mm	Cualquier profundidad
	Hinca por percusión	100 a 1.400 mm	Cualquier profundidad
	Perf. horizontal mediante barrena o a rotación	300 a 1.500 mm	Cualquier profundidad
	Perforación horizontal dirigida	200 a 1.600 mm	Cualquier profundidad
	Microtúneles	< 1.000 mm	Cualquier profundidad

Por otra parte, la naturaleza del terreno resulta uno de los principales condicionantes para la elección de la técnica de cruce, debido principalmente a las dificultades que puede suponer atravesar determinados materiales. No se trata tanto de la dureza de los mismos, pues hoy en día la maquinaria utilizable con materiales consolidados está adaptada tanto a las rocas blandas como a las duras, sino a la granulometría de los materiales presentes en el cauce.

En la siguiente tabla se muestra la aplicabilidad de las distintas técnicas en función de los materiales presentes en el cauce:

Tabla 3. Aplicabilidad de las técnicas de cruce en función de los materiales presentes en el cauce

Técnica de cruce		Material en el cauce					
		Arcillas	Limos	Arenas	Gravas	Bolos	Roca
Cruce con zanja sin desvío de caudal	Excavadora con arado	–	–	X	X	O	–
	Zanjadora	X	X	–	–	–	–
	Retroexcavadora	+	+	X	X	X	–
	Dragalina	+	+	X	X	–	–
	Draga	X	X	X	X	O	–
Cruce con zanja con desvío de caudal	Presas y obras de drenaje	X	X	X	X	X	X
	Presas y bombas	X	X	X	X	X	X
	Bypass de gran volumen con bombas	X	X	X	X	X	–
	Recintos estancos	X	X	X	X	X	X
	Desvío de cauce	X	X	X	X	X	X
Cruce sin zanja	Hinca y perforación horizontal	X	X	X	X	O	X
	Hinca por percusión	X	X	X	X	O	O
	Perf. horizontal mediante barrena o a rotación	X	X	X	X	O	O
	Perforación horizontal dirigida	X	X	X	X	O	X
	Microtúneles	X	X	X	X	O	X

- x Método adecuado
- o Método posible pero con dificultades
- + Método posible pero con gran producción de sedimentos en suspensión
- Método no aplicable

Fuente: elaboración propia

Conviene aclarar que, desde el punto de vista de su comportamiento geotécnico, los límites entre las distintas clases de materiales no se sitúan en el 50% de su composición, tal como se aplica, por ejemplo, en estudios sedimentológicos. En el caso de materiales de granulometría fina (limos y arcillas), caracterizados por tener un tamaño inferior a 0,074 mm (materiales que pasan por el tamiz 200 de la serie UNE), es suficiente con que un material contenga un porcentaje del orden del 20 al 40% de finos para que su estructura granular se vea alterada por esa proporción de finos y tenga un comportamiento “cohesivo”.

La dificultad de los métodos de cruce sin zanja en bolos depende de la relación entre los diámetros de perforación y del bolo, incrementándose con diámetros de perforación pequeños y bolos grandes. Incluso en los métodos de perforación mediante barrena o a rotación, si el conducto a instalar es de pequeño diámetro, pueden producirse dificultades al perforar con gravas.

Por otra parte, en los métodos de desvío con presas, recintos estancos o diques se podrían producir filtraciones cuando el lecho del cauce es de tipo granular, lo que dificulta la excavación de la zanja.

También es necesario prestar especial atención en los métodos sin zanja al nivel freático, que tiene que ser bajo en el caso de la perforación horizontal mediante empuje hidráulico con escudo con frente abierto, por percusión y mediante barrena o a rotación.

3. Principales elementos del cauce a tener en cuenta para elegir la técnica de cruce

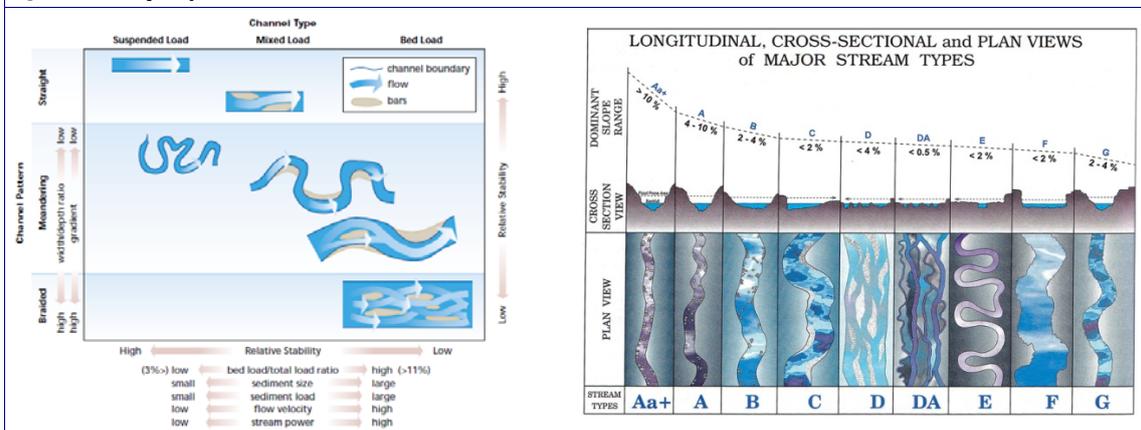
A la hora de elegir la técnica para la instalación de una conducción soterrada en un río hay que tener en cuenta ciertos elementos del cauce que van a ser determinantes para optar por una u otra. Por un lado, habrá que tener en cuenta aspectos de tipo hidromorfológico, como su anchura y calado, la granulometría del lecho, la pendiente de las orillas, etc., y por otro, habrá que prestar especial atención a los efectos negativos que pueden tener las obras sobre el cauce, así como a la sensibilidad medioambiental del tramo, teniendo en cuenta la presencia de hábitats y especies de interés así como su capacidad de recuperación tras las perturbaciones.

En este apartado se propone una clasificación de cauces que facilitará la selección de la técnica de cruce, y se lleva a cabo una revisión de los efectos de las obras sobre el medio hídrico, revisión que permitirá conocer, en función de la técnica empleada, cómo se ven afectados los cauces y sus ecosistemas asociados, para finalmente llegar a unas recomendaciones prácticas en la elección de la técnica de cruce.

Clasificación de cauces

Los ríos pueden ser clasificados de muy diversas formas, por ejemplo en función de los materiales sobre los que discurren, su dinámica, su sinuosidad, su energía, su temporalidad, etc. Existen además numerosas clasificaciones que combinan varios de estos factores, como las que aparecen en la siguiente figura:

Figura 18. Ejemplos de sistemas de clasificación de ríos



Visto el número de técnicas de cruce existente y que la posibilidad de aplicación de unas u otras depende en gran medida de las características del cauce, es interesante establecer una clasificación que facilite la toma de decisiones, y que se podrá emplear además en la elección de la técnica de restauración del mismo en caso de que ésta fuese necesaria.

Para establecer dicha clasificación habrá que tener en cuenta los siguientes elementos relativos al río:

- Régimen hidrológico
- Naturaleza de los materiales del lecho y márgenes

- Geometría del tramo
- Pendiente del cauce
- Estabilidad del lecho
- Estado de conservación y valores singulares

La clasificación en función de estos elementos resulta esencial tanto para determinar la técnica de cruce como la técnica para devolver el cauce a su estado original y garantizar su estabilidad, por lo que sería de gran interés que el promotor completara con carácter previo a la ejecución de la obra una ficha con la caracterización del cauce según estos elementos.

Régimen hidrológico

La clasificación del río en función del régimen hidrológico es imprescindible, entre otras razones, para determinar la época en la que llevar a cabo las obras y seleccionar la técnica de cruce más adecuada, así como para dimensionar las instalaciones necesarias en el caso del uso de técnicas con desvío de caudal.

En función de su temporalidad los ríos se clasificarán en:

- Permanentes, que son aquellos cursos fluviales que en presentan agua fluyendo, de manera habitual, durante todo el año en su cauce.
- Temporales o estacionales, que son aquellos cursos fluviales que presentan una marcada estacionalidad, caracterizada por presentar bajo caudal o permanecer secos en verano, fluyendo agua, al menos, durante un periodo medio de 300 días al año.
- Intermitentes y efímeros, que son aquellos cursos fluviales que presentan una elevada temporalidad, fluyendo agua durante un periodo medio comprendido entre 100 y 300 días al año, o en los que tan sólo fluye agua superficialmente de manera esporádica, en episodios de tormenta, durante un periodo medio inferior a 100 días al año.

También habría que atender a la naturalidad del régimen, pues en tramos regulados la presencia de presas aguas arriba puede dificultar la recuperación del lecho e influir en aspectos como la socavación por la alteración del régimen hidrológico e hidráulico del río. Por lo tanto habrá que distinguir entre:

- Tramos regulados
- Tramos sin regular

Pero también resulta necesario aportar algunos datos característicos, como el caudal medio, el caudal en estiaje y los caudales punta probables durante las obras.

Geometría del tramo

La geometría del cauce, en concreto la anchura y el calado del tramo, la pendiente de las márgenes y riberas, y su trazado, también resulta determinante en la técnica de cruce a emplear, así como en su restauración.

En función de su anchura se ha de distinguir entre:



- Cauces pequeños, con anchura de cauce lleno (bankfull) menor de 10 m.
- Cauces medianos, con anchura de cauce lleno entre 10 y 20 m.
- Cauces grandes, con anchura de cauce lleno de más de 20 m.

En función del calado habrá que diferenciar:

- Tramos poco profundos, con calado inferior a 1 m.
- Tramos de profundidad moderada, con calado entre 1 m y 1,5 m.
- Tramos profundos, con calado superior a 1,5 m.

Atendiendo a la pendiente de las márgenes y las riberas, se distinguirá entre cuatro categorías:

- Pendiente muy baja, menor de 15°
- Pendiente baja, entre 15° y 35°
- Pendiente moderada, entre 35° y 45°
- Pendiente alta, mayor de 45°

En cuanto a su trazado o morfología en planta, los tipos básicos serían:

- Ríos rectos
- Ríos sinuosos
- Ríos meandriformes
- Ríos trenzados¹

Naturaleza de las márgenes y el lecho

Como ya se ha visto en apartados anteriores, el sustrato del lecho y las márgenes de acceso al cauce debe ser identificado y evaluado para determinar la técnica a emplear en el cruce, principalmente por las dificultades que puede suponer para su aplicación o el uso de determinada maquinaria ya indicadas anteriormente. Así, para la aplicación de técnicas sin zanja, como la perforación horizontal dirigida, puede incluso ser necesaria una evaluación geotécnica detallada de las condiciones subsuperficiales.

En función de la naturaleza de las márgenes y el lecho se propone la siguiente clasificación de los cauces:

- Homogéneos (cauce y márgenes de la misma naturaleza):
 - Rocosos:
 - Rocas duras
 - Rocas blandas
 - Materiales con consistencia de suelos:
 - Finos (predominantemente cohesivos)
 - Gruesos (predominantemente granulares):

¹ A no confundir con los anastomosados, no incluidos en la clasificación por ser poco frecuentes en España.

- Con bolos
- Sin bolos
- Heterogéneos (cauce y márgenes de distinta naturaleza):
 - Lecho con consistencia de suelos y márgenes rocosas
 - Lecho rocoso y márgenes con consistencia de suelos

Dentro de este último grupo habría que contemplar todas las posibilidades en función de las tipologías dadas para los cauces homogéneos.

Pendiente del cauce

Otro aspecto a considerar, de menor relevancia para la elección de la técnica de cruce pero a tener muy en cuenta en la restauración del tramo es la pendiente del cauce, pues está relacionada directamente con la velocidad del agua y con la capacidad que tiene el flujo para transportar sedimentos. Así, se puede distinguir entre:

- Ríos de cabecera, de pendiente alta (> 4%) y por tanto velocidades elevadas, que se corresponden normalmente con tramos de alta y media montaña.
- Ríos de cuenca media, de pendiente moderada (2 - 4%) y en los que la velocidad disminuye, correspondientes a tramos de baja montaña o piedemonte, y entre los que se encuentran normalmente los ríos trenzados.
- Ríos de cuenca baja y de planicies aluviales, de pendiente baja (< 2%) y por tanto velocidades lentas, que se corresponden con tramos bajos, principalmente ríos divagantes y meandriformes.

Estabilidad del lecho

La estabilidad del lecho es otro factor de gran relevancia, más que por la técnica de cruce a elegir, porque condiciona la colocación de la conducción y la restauración del tramo. En función de la estabilidad del lecho se puede distinguir entre:

- Tramos con estabilidad estática, en los que la corriente es capaz de transportar sedimentos pero no mover las partículas o elementos de las orillas, y son por ejemplo aquellos que tienen márgenes rocosos o suelos de alta cohesión.
- Tramos con estabilidad dinámica, que son aquellos en los que se dan desplazamientos laterales continuos, con erosión en las márgenes exteriores y depósito de sedimentos en las interiores, pero en los que las variaciones de la corriente, materiales del fondo y de las orillas y los sedimentos transportados han formado una pendiente y una sección transversal que se mantienen en el tiempo.
- Tramos inestables, que no alcanzan a estabilizar su pendiente, por lo que la planta y el perfil pueden sufrir importantes modificaciones en el tiempo.

Estado de conservación de los ecosistemas y valores singulares

No hay que olvidar como elemento fundamental del cauce el estado de conservación de los ecosistemas del tramo y los valores singulares del mismo, ya que constituyen una importante limitación a la técnica de cruce a emplear y son determinantes en su



posterior restauración, pues con ésta se pretende llegar a las condiciones anteriores a la obra. Por lo tanto, habrá que prestar especial atención a los siguientes elementos:

- Estado de conservación de la vegetación de ribera
- Estado de conservación de la fauna acuática
- Presencia de hábitats y especies singulares

Para determinar el estado de conservación de la vegetación habrá que valorar aspectos como la continuidad longitudinal y transversal del bosque de ribera, su composición y estructura y la capacidad de regeneración natural. Para ello se recomienda usar alguno de los índices de calidad existentes, como el QBR, el RFV o el RQI, y que normalmente clasifican el estado del bosque de ribera en las 5 clases propuestas por la Directiva Marco del Agua: muy bueno, bueno, moderado, deficiente o malo.

Efectos de las obras de cruce en los cauces

El cruce de ríos y arroyos por infraestructuras lineales soterradas puede dar lugar, en función de la técnica empleada, a cambios importantes en los componentes físicos y biológicos de los cauces y, ocasionalmente, en sus componentes químicos. A continuación se hace un resumen de los potenciales impactos derivados de la instalación de este tipo de infraestructuras y se analizan los efectos que tienen cada una de las técnicas sobre el medio.

3.2.1 Impactos potenciales del cruce de cauces

Dependiendo del tipo de técnica empleada, los cruces de ríos por infraestructuras lineales soterradas tienen una serie de impactos potenciales susceptibles de afectar de forma directa o indirecta a los siguientes elementos del cauce:

- Morfología del cauce
- Vegetación de ribera
- Materiales del lecho
- Calidad de las aguas
- Caudales fluyentes
- Régimen hidráulico
- Fauna y flora acuática

A continuación se resumen dichos impactos y su efecto sobre el medio hídrico.

Alteración de la morfología del cauce

La instalación de conducciones enterradas que cruzan ríos y arroyos puede provocar importantes modificaciones temporales o permanentes de la sección del lecho y los márgenes.

Así, durante las obras tiene lugar en el tramo de cruce una alteración del hábitat físico, con la consiguiente afección a las comunidades biológicas, tanto acuáticas como

ripícolas, allí presentes. Por otra parte, se dan además cambios en la velocidad de la corriente, lo que puede conllevar un arrastre de sedimentos -que produce erosión y modifica la granulometría del lecho- y de macroinvertebrados y otros elementos de la comunidad biológica, o bien sedimentación de los sólidos en suspensión generados durante la obra.

Si la morfología del tramo no se devuelve a la situación previa a las obras, o bien la restauración del tramo no se realiza de forma adecuada, la alteración podría ser permanente, continuando los efectos negativos en el tiempo y extendiéndose hacia aguas abajo, lo que podría conllevar una alteración del régimen hidráulico y desestabilización del cauce que excediese el ámbito de actuación.

Eliminación de la vegetación de ribera

Las actividades de desbroce y desmonte en las márgenes dan lugar a una pérdida de la vegetación de ribera asociada, lo que conllevaría como efectos más importantes la desprotección de las riberas y márgenes frente a la erosión y la interrupción de la continuidad del corredor que esta supone para la fauna asociada. La magnitud del impacto y su reversibilidad tras la restauración del tramo dependerá del estado de la vegetación de ribera en la zona de cruce antes del comienzo de las obras y de su valor singular, así como de su potencial de regeneración.

Además, si las márgenes no se recuperan convenientemente pueden convertirse en fuentes permanentes de sedimentos al cauce, con la consiguiente afección a la calidad del agua y la integridad del hábitat aguas abajo de la zona de cruce.

Por otra parte, la actividad de la maquinaria durante las obras puede dar lugar a compactación del terreno, dificultando la posterior regeneración de la vegetación de ribera.

Alteración de los materiales del lecho

La apertura de zanjas en el cauce conlleva la eliminación de los materiales del lecho presentes en el punto de cruce, modificando tanto su granulometría como su textura, lo que puede dar lugar a una alteración de microhábitats tales como frezaderos, que podrían ser de gran valor para las comunidades biológicas presentes en el río.

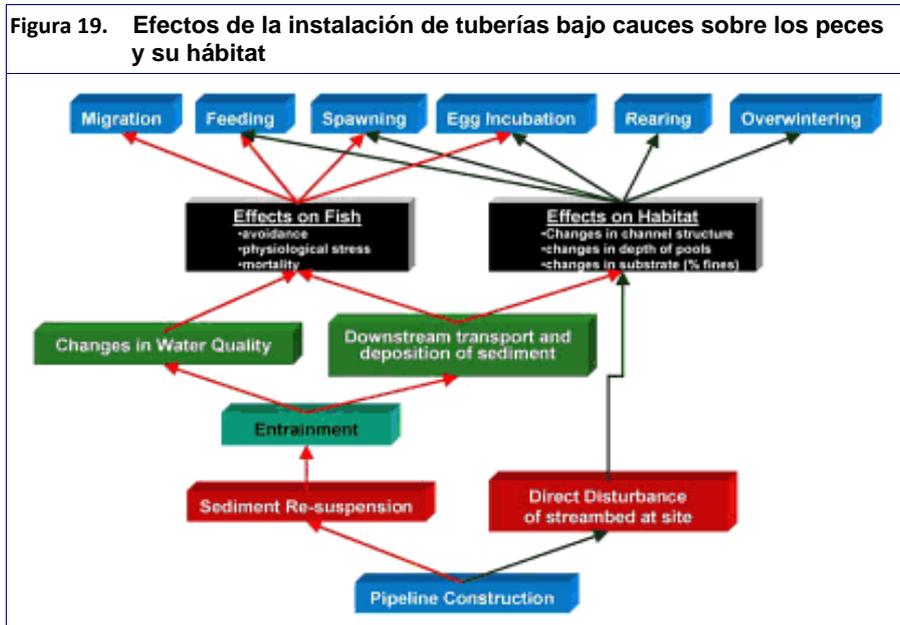
La restauración de los mismos no debería limitarse sólo al relleno de la zanja con los mismos materiales, manteniendo la granulometría, sino que se debería prestar también atención a restablecer la textura y rugosidad, ya que modificaciones en las mismas podrían dar lugar a una alteración del régimen hidráulico y posible desestabilización del tramo.

Incremento y depósito de sólidos en suspensión

Además de los efectos directos en el hábitat por la alteración del lecho y las riberas, la principal fuente de efectos negativos de las obras de cruce en el medio hídrico son los sedimentos que quedan suspendidos en la columna de agua durante los trabajos en el cauce.

Los trabajos en el propio lecho del río y en las márgenes, así como las actividades constructivas a lo largo de la pista de trabajo, dan lugar aguas abajo de la zona de cruce a un incremento temporal de los sólidos en suspensión en la columna de agua durante las obras. Este incremento de sólidos en suspensión, que se produce desde el comienzo de la obra y es variable a lo largo de la misma, tiene numerosos efectos directos e indirectos sobre la flora acuática, los invertebrados bentónicos y las comunidades piscícolas. Los sólidos en suspensión crean condiciones de poca luz que reducen la actividad fotosintética, y pueden dar lugar a una reducción de la producción primaria aguas abajo del punto de cruce si permanece durante varios días o semanas. Además, tienen efectos sobre el comportamiento y la fisiología de los peces, pudiendo llevar a situaciones de mortandad.

Dependiendo de la cantidad y tamaño de las partículas, así como de la velocidad del agua y la morfología del cauce, los sólidos en suspensión pueden tener otras consecuencias negativas importantes en la disponibilidad de hábitat por el depósito de los mismos. Al depositarse, los sedimentos rellenan los intersticios del sustrato del lecho, reduciendo el flujo de agua que lo atraviesa, lo que provoca altas tasas de mortalidad en las fases de desarrollo de ciertas especies sensibles a la sedimentación, como los huevos y larvas de muchos invertebrados y peces. Además, pueden reducir la disponibilidad de hábitat por relleno de pozas y reducción de la superficie de rápidos. No obstante, los efectos son temporales y la recuperación tras las obras suele ser de corta duración.



Fuente: Reid *et al.* (2008)

Alteración del régimen hidrológico e hidráulico del río

Durante la ejecución de las obras de cruce a cielo abierto los caudales circulantes por el río se pueden ver reducidos o incluso interrumpidos, dando lugar a zonas con calados mucho menores a los previamente existentes o bien sin flujo. Esto conlleva, entre otros efectos, una importante pérdida de hábitat físico para las comunidades

biológicas del tramo, y puede resultar en mortandad de peces e invertebrados bentónicos, al quedar varados en las orillas o aislados de la corriente. La época en la que se efectúen las obras, así como el grado y duración de la disminución de los caudales, serán los principales factores que determinen las consecuencias en el medio.

Por otra parte, y aunque con un impacto muy inferior, en las pruebas hidráulicas que se realizan para comprobar la estanqueidad y resistencia de la tubería a instalar, en muchas ocasiones la incorporación de agua a presión se hace mediante bombes del propio río, lo que también puede alterar temporalmente su caudal.

En cuanto a los caudales sólidos circulantes por el río, además de los ya mencionados procesos erosivos o de sedimentación que se producen por las alteraciones en la morfología del cauce, la eliminación de la vegetación de ribera y el incremento de sedimentos en la columna de agua, si las obras no se llevan a cabo de forma adecuada se podría crear un obstáculo transversal permanente que dé lugar a la retención de sólidos o favorezca los procesos erosivos. Este sería el caso, por ejemplo, de la colocación de una escollera desproporcionada sobre la tubería para protegerla frente a la erosión, o de tuberías que no han sido enterradas a la profundidad suficiente, por lo que la erosión puede dejarlas expuestas.

Creación de barreras a la fauna piscícola

Otro impacto a tener en cuenta es la barrera que se crea para el paso de fauna piscícola como consecuencia de las obras de cruce. Dicha barrera suele ser temporal, causada por el establecimiento de una pista de trabajo perpendicular a la dirección de la corriente, así como por las derivaciones del caudal del río que se realizan durante las obras, por lo que a la hora de planificar el trabajo y de diseñar las estructuras de drenaje (vainas) se debería tener en cuenta para que no se obstaculice el acceso de la ictiofauna al tramo superior del río.

La barrera creada también podría incluso convertirse en un obstáculo permanente si las obras no se hacen de forma adecuada, tal y como se ha mencionado en el punto anterior.

Otros

Otros impactos potenciales menos frecuentes derivados de las obras de cruce pueden ser los siguientes:

- El vertido accidental de aceites, fluidos de perforación, lodos u otros materiales puede afectar a la calidad de las aguas por su carácter tóxico o por alterar las condiciones del lecho, pudiendo llevar a estrés o mortandad de las especies allí presentes.
- El uso de explosivos para la apertura de las zanjas puede dar lugar a la destrucción de hábitats y a mortandad o daños importantes en la ictiofauna e invertebrados bentónicos del tramo. La magnitud de impacto dependerá de factores como la profundidad del agua (en aguas poco profundas gran parte de la energía se libera por encima del nivel del agua) y el tipo y cantidad de explosivo detonado, pero los daños suelen limitarse a las inmediaciones del cruce.



CEDEX

- La desconexión con el medio hiporreico por la sedimentación o la alteración temporal del nivel freático puede afectar negativamente a la fauna bentónica y pequeños estadios de peces que allí se desarrollan, así como a los ciclos de nutrientes.
- La transferencia de organismos acuáticos entre cuencas por equipos contaminados puede llevar a introducción de especies invasoras como el mejillón cebrá.

3.2.2 Efectos de las técnicas de cruce sobre el cauce

Los impactos sobre el medio hídrico indicados en el apartado anterior son generales para las obras de cruce, pero que se den o no depende principalmente de la técnica empleada.

Así, las técnicas de construcción mediante zanja, tanto sin como con desvío de caudal, dan lugar a alteraciones importantes del lecho y las riberas así como a un incremento de los sólidos en suspensión. Por el contrario, estos impactos no tienen lugar cuando se emplean métodos de construcción sin zanja, si bien con estos últimos existe un importante riesgo asociado al vertido accidental de lodos de perforación.

En la siguiente tabla se resumen de forma general los impactos que cada una de los grupos de técnicas de cruce tiene sobre el cauce. No existe, por tanto, ninguna que esté exenta de impactos, si bien la magnitud y tipología de éstos varían en función de la técnica empleada.

Tabla 4. Resumen de los impactos de las técnicas de cruce sobre los cauces

	Alteración de la morfología del cauce	Eliminación de la vegetación de ribera	Alteración de los materiales del lecho	Incremento y depósito de sólidos en suspensión	Alteración del régimen hidrológico e hidráulico	Creación de barreras a la fauna piscícola	Otros	
Cruce con zanja sin desvío de caudal	X	X	X	X	X	X	X	→ Requiere restauración del cauce
Cruce con zanja con desvío de caudal	X	X	X		X	X	X	→ Requiere restauración del cauce
Cruce sin zanja							X	→ No requiere restauración del cauce

Fuente: Elaboración propia

A continuación se hace una revisión detallada de los impactos y efectos negativos que tienen sobre el cauce cada una de las técnicas de cruce referidas en el apartado anterior.

Construcción mediante zanja sin desvío de caudal

Las técnicas de construcción mediante zanja sin desvío de caudal tienen efectos potencialmente adversos sobre la biota y los hábitats situados aguas abajo por el arrastre y depósito de sedimentos, arrastre que se ve incrementado por el almacenaje del material excavado y la actividad de la maquinaria dentro del cauce. Por otra parte, con estos métodos se mantiene por lo general el caudal y el paso de los peces, pero se alteran el lecho y las márgenes y se elimina o degrada fuertemente la vegetación de ribera, por lo que se necesitan posteriores medidas de restauración. En consecuencia, las técnicas de cruce mediante zanja sin desvío de caudal se suelen emplear en tramos con poca sensibilidad medioambiental, siendo algunas de ellas especialmente recomendables para cauces que permanecen normalmente secos, ya que en estos casos desaparece su principal desventaja: la generación de sedimentos.

A continuación se enumeran las ventajas y desventajas para los cauces que presenta cada una de las técnicas:

Excavadora con arado

Ventajas:

- Instalación rápida, minimizando el tiempo de actividad dentro del cauce, por lo que el periodo de generación de sedimentos es corto
- Espacio de trabajo de reducidas dimensiones

Desventajas:

- Generación de sedimentos durante los trabajos dentro del cauce (excepto en cauces secos)
- Desmonte de las orillas, con el consiguiente arrastre potencial de sedimentos
- Eliminación de la vegetación de ribera
- Compactación de orillas y márgenes

Zanjadora

Ventajas:

- Instalación rápida, minimizando el tiempo de actividad dentro del cauce, por lo que el periodo de generación de sedimentos es corto
- Espacio de trabajo de reducidas dimensiones

Desventajas:

- Generación de sedimentos potencialmente elevada durante los trabajos dentro del cauce (excepto en cauces secos)
- El material excavado puede bloquear el caudal circulante y el paso de la fauna piscícola



CEDEX

- Desmonte extensivo de las orillas, con el consiguiente arrastre potencial de sedimentos
- Eliminación de la vegetación de ribera
- Compactación de orillas y márgenes

Retroexcavadora

Ventajas:

- Instalación rápida, minimizando el tiempo de actividad dentro del cauce, por lo que el periodo de generación de sedimentos es corto
- Espacio de trabajo de reducidas dimensiones (excepto en cauces en que sea necesario el trabajo simultáneo de más de una máquina)

Desventajas:

- Generación de sedimentos potencialmente elevada durante la excavación y el relleno (excepto en cauces secos)
- En cursos de agua anchos se acumulan los materiales de excavación dentro del cauce
- El material excavado puede bloquear el caudal circulante y el paso de la fauna piscícola
- Eliminación de la vegetación de ribera
- Compactación de orillas y márgenes

Dragalina

Ventajas:

- La maquinaria se sitúa fuera del cauce
- El material excavado se acumula fuera del cauce
- Se mantiene el caudal circulante por el río
- Se mantiene el paso de la fauna piscícola

Desventajas:

- Generación de sedimentos potencialmente alta
- Instalación lenta, por lo que el periodo de generación de sedimentos es largo
- Puede necesitar desmonte de las orillas, con el consiguiente arrastre potencial de sedimentos
- Necesita una gran superficie para la maquinaria
- Eliminación de la vegetación de ribera

Draga

Ventajas:

- La generación de sedimentos es mínima durante la apertura de la zanja
- No se acumula material excavado dentro del cauce, sino en las márgenes o en barcazas
- Se mantiene el caudal circulante por el río
- Se mantiene el paso de la fauna piscícola

Desventajas:

- Requiere balsas de decantación para el material extraído y el posterior tratamiento del agua decantada
- Posible mortandad o daños a la fauna piscícola
- Eliminación de la vegetación de ribera

Construcción mediante zanja con desvío de caudal

Las técnicas de construcción mediante zanja con desvío de caudal conllevan un arrastre bajo de sedimentos, restringido a la instalación y retirada de presas y estructuras de drenaje. Por el contrario, el tiempo de trabajo dentro del cauce es mayor que en la construcción sin desvío, y en ciertas circunstancias la velocidad del agua se puede ver incrementada, aumentando localmente la capacidad erosiva. Además, la desecación del tramo podría hacer necesario el rescate de peces, y su paso se vería impedido durante el periodo de trabajo dentro del cauce. La alteración del lecho, riberas y márgenes hace que también sean necesarias medidas de restauración.

En general, la principal ventaja para el cauce de este tipo de técnicas es que conllevan una generación de sedimentos y transporte aguas abajo limitados, que no suelen dar lugar a efectos negativos en ictiofauna y en el hábitat. Por todo ello, resultan convenientes en aquellos cauces en los que hay que prestar especial atención al arrastre de sedimentos.

Por el contrario, también cuentan con una serie de desventajas medioambientales en función de la técnica concreta que se emplee y que se enumeran a continuación:

Desvío mediante presas y obras de drenaje

- Instalación lenta
- Puede ser necesario el rescate de la fauna piscícola de las zonas desecadas
- Barrera temporal para la fauna piscícola si la velocidad del agua en las vainas de drenaje es muy alta
- Alta ocupación de terreno en orillas y márgenes para la realización de los trabajos, especialmente para el almacenaje temporal de los materiales



CEDEX

- Eliminación de la vegetación de ribera
- Compactación de orillas y márgenes

Desvío mediante presas y bombas

- Instalación lenta
- Puede ser necesario el rescate de la fauna piscícola de las zonas desecadas
- Barrera temporal para la fauna piscícola por desecación del tramo por presencia de presas y desecación del tramo
- Alta ocupación de terreno en orillas y márgenes para la realización de los trabajos, especialmente para el almacenaje temporal de los materiales
- Eliminación de la vegetación de ribera
- Compactación de orillas y márgenes

Desvío mediante bypass de gran volumen

- Puede ser necesario el rescate de la fauna piscícola de las zonas desecadas
- Barrera temporal para la fauna piscícola por desecación del tramo
- Necesita zonas de sumidero
- Alta ocupación de terreno en orillas y márgenes para la realización de los trabajos, especialmente para el almacenaje temporal de los materiales
- Eliminación de la vegetación de ribera
- Compactación de orillas y márgenes

Desvío mediante recintos estancos

- Instalación lenta
- En cauces grandes puede necesitar actividad extensiva dentro del lecho con maquinaria pesada para instalar las presas
- Se hace necesario el rescate de la fauna piscícola de las zonas desecadas
- Se incrementa la velocidad del agua y el potencial erosivo de los materiales del lecho, así como la erosión en la orilla opuesta de trabajo
- Alta ocupación de terreno en orillas y márgenes para la realización de los trabajos, especialmente para el almacenaje temporal de los materiales
- Eliminación de la vegetación de ribera
- Compactación de orillas y márgenes

Desvío de cauce

- Instalación lenta
- El tramo de cauce desecado es largo
- Se hace necesario el rescate de la fauna piscícola de las zonas desecadas

- Alta ocupación de terreno en orillas y márgenes para la realización de los trabajos, especialmente para el almacenaje temporal de los materiales
- Eliminación de la vegetación de ribera
- Compactación de orillas y márgenes
- Los daños a las márgenes y terrenos adyacentes son importantes
- La restauración del tramo a sus condiciones iniciales es compleja

Construcción sin zanja

Los métodos de construcción sin zanja pueden resultar muy efectivos para lograr la instalación de conductos bajo ríos minimizando los impactos en el cauce y en la calidad del agua. Los impactos potenciales están relacionados, por una parte, con las instalaciones auxiliares, que incluyen limpieza del terreno y consecuentes alteraciones en la flora y la fauna del lugar, así como afecciones visuales; y por otra parte, con el posible vertido accidental de lodos de perforación durante la obra y la eliminación de los mismos.

En general, las ventajas para el cauce del empleo de este tipo de técnicas son:

- No hay generación de sedimentos
- No se alteran ni el lecho ni las orillas
- Se mantiene el caudal circulante por el río
- Se mantiene el paso de los peces
- Se mantiene la vegetación de ribera a ambos lados del río

Por todo ello, resultan convenientes en aquellos tramos con hábitats o especies sensibles en los que no son aconsejables los trabajos dentro del cauce, o que tienen un alto interés paisajístico.

Por el contrario, y además de su elevado coste, también cuentan con una serie de afecciones en función de la técnica concreta que se emplee y que se enumeran a continuación:

Perforación horizontal dirigida

- Se necesitan amplias zonas de trabajo fuera del área del cauce
- La existencia de fracturas en el sustrato puede dar lugar a filtraciones de los fluidos de perforación presurizados al cauce
- El fluido de perforación circulante puede lavar cavidades que den lugar a socavones en el cauce
- Existe posibilidad de vertido de lodos de perforación



Perforación horizontal

- Se necesita espacio de trabajo adicional para los pozos de ataque y retirada, zonas de acopio de material de obra y excavado y sumideros en la llanura de inundación
- Existe posibilidad de vertido de lodos de perforación
- Existe posibilidad de desplome del túnel de perforación
- En el caso de perforación a percusión, las vibraciones del terreno y las ondas de presión asociadas podrían afectar a las fases sensibles de la fauna piscícola

Cruces de vehículos durante la construcción

Para la ejecución de una conducción bajo un cauce es necesario además el cruce de vehículos, operación que puede realizarse a través de puentes existentes o requerir la construcción de pasos de carácter temporal, con las consiguientes afecciones adicionales.

Los tipos de cruce de vehículos habituales son los siguientes:

- **Puentes existentes:** se suelen utilizar cuando el cruce de la conducción está cerca de un puente o en ríos grandes en los que otros métodos no son posibles. También cuando se usan técnicas de cruce sin zanja. Este método elimina la generación de material en suspensión y mantiene el flujo del cauce, así como el paso de los peces.
- **Puentes temporales:** se utilizan en cauces de tamaño pequeño a moderado (< 15 m) con riberas estables. Los grandes ríos pueden cruzarse con puentes de varios vanos y apoyos intermedios, pero el coste resulta muy elevado.
- **Esteras o rejillas formadas con troncos atados, tubos de acero o raíles²:** se utilizan en cauces de tamaño pequeño a moderado (<15 m) poco profundos, en los que no se puede alterar el material del lecho. Este método puede restringir el flujo y el paso de peces si el cauce es muy poco profundo, pero su montaje y desmontaje es rápido.
- **Relleno de todo el cauce con troncos o tubos atados²:** se usa en pequeños arroyos con cauces muy encajados. Este método puede restringir el flujo y el paso de peces en el caso de usar troncos, pero como en el caso anterior el montaje y desmontaje es rápido.
- **Terraplén y obra de drenaje:** se utiliza en cauces de tamaño pequeño a moderado (< 15 m) con cauce bien definido. Este método mantiene el flujo y el paso de peces. El terraplén se debe construir con material granular o sacos terreros para evitar la generación de materia en suspensión.
- **Badén:** consiste en el paso de los vehículos a través del lecho del cauce, lo que puede generar gran cantidad de material en suspensión en función del material del

² La utilización de troncos es poco frecuente en España

lecho, y requiere tender los taludes del cauce. Se usa en cauces de cualquier tamaño, con lechos de materiales gruesos y escaso calado. Este método permite el paso de peces.

- **Badén artificial:** consiste en la creación de un relleno de roca bajo la superficie del agua de tamaño tipo bolo sin finos. Produce material en suspensión durante su construcción y retirada. Mantiene el flujo del cauce y requiere al menos 20 cm de agua para mantener el paso de peces. Su retirada puede ser difícil. Se usa en cauces poco profundos de todos los tamaños.
- **Barcaza:** se utiliza en cauces muy anchos con grandes calados. Requiere suavizar las márgenes o crear una rampa de carga.

3.3 Recomendaciones en la elección de la técnica de cruce. Principales elementos del cauce a tener en cuenta.

Como ya se ha comentado al principio del presente capítulo, en la elección de la técnica de cruce, además de los elementos relativos a la conducción a instalar ya vistos anteriormente, habrá que tener en cuenta una serie de elementos relativos al cauce, que son por un lado los aspectos de tipo hidromorfológico, que condicionan la técnica a emplear desde un punto de vista constructivo, y por otro los relacionados con su sensibilidad, que la condicionan desde un punto de vista medioambiental.

3.3.1 Elementos o condicionantes constructivos

Los principales elementos del cauce a tener en cuenta para la elección de la técnica de cruce desde el punto de vista constructivo son su geometría, fundamentalmente la anchura y el calado pero también la pendiente de las riberas y las márgenes, el caudal circulante por el río, y la naturaleza de los materiales a atravesar por las obras.

En el capítulo anterior se hace una revisión detallada de los métodos de cruce y de sus condicionantes constructivos, no solo los relativos a la conducción a instalar sino también los relativos al cauce. A continuación se resumen en una tabla las principales particularidades y limitaciones que presentan las distintas técnicas en función de las características del cauce:



CEDEX

Tabla 5. Aplicabilidad de las técnicas de cruce en función de las características del cauce

Técnica de cruce		Ancho del cauce (m)	Calado (m) / Caudal (m ³ /s)	Pendiente de talud		Material del lecho
				Riberas	Márgenes	
Cruce con zanja sin desvío de caudal	Excavadora con arado	< 10 m	< 1 m	Muy baja o baja	Cualquier pendiente	Arenas y gravas. Dificultoso con bolos y roca
	Zanjadora	< 10 m*	< 1 m	Muy baja o baja	Cualquier pendiente	Limos y arcillas. Dificultoso con roca
	Retroexcavadora	< 20 m*	< 1,5 m	Baja	Cualquier pendiente	Arenas, gravas y bolos. Genera mucho material en suspensión en limos y arcillas
	Dragalina	> 20 m. Para anchos menores puede resultar muy caro	< 10 m	Baja	Cualquier pendiente	Arenas y gravas. Genera mucho material en suspensión en limos y arcillas
	Draga	> 20 m. Para anchos menores puede resultar muy caro	Grandes calados	Moderada	Cualquier pendiente	Arenas, gravas, limos y arcillas. Dificultoso con bolos
Cruce con zanja con desvío de caudal	Mediante presas y obras de drenaje	Cualquier ancho	Caudal < 3 m ³ /s**. Uso normal para < 1 m ³ /s	Cualquier pendiente	Cualquier pendiente	Todo tipo de materiales
	Mediante presas y bombas	Cualquier ancho	Caudal < 1 m ³ /s	Cualquier pendiente	Cualquier pendiente	Todo tipo de materiales
	Mediante bypass de gran volumen con bombas y sumidero y bomba	Cualquier ancho	Caudal < 1 m ³ /s	Cualquier pendiente	Cualquier pendiente	Todo tipo de materiales, excepto roca
	Mediante recintos estancos	> 10 m	Cualquier calado	Cualquier pendiente	Cualquier pendiente	Todo tipo de materiales
	Desvío de cauce	> 10 m	Cualquier calado	Baja	Cualquier pendiente	Todo tipo de materiales
Cruce sin zanja	Perforación horizontal dirigida	Cualquier ancho	Cualquier calado	Suave y media	Muy baja	Todo tipo de materiales. Dificultoso con bolos
	Hinca y perforación horizontal (túnel)	Cualquier ancho	Cualquier calado	Cualquier pendiente	Baja****	Todo tipo de materiales. Dificultoso con bolos
	Hinca por percusión	< 100 m. Caro para > 20 m	Cualquier calado	Cualquier pendiente	Baja****	Todo tipo de materiales. Dificultoso con bolos y roca
	Perforación horizontal mediante barrena o a rotación	< 180 m	Cualquier calado	Cualquier pendiente	Baja****	Todo tipo de materiales. Dificultoso con bolos y roca
	Microtúneles	> 10 m	Cualquier calado	Cualquier pendiente	Baja****	Todo tipo de materiales. Dificultoso con bolos

* Aplicable en ríos de mayor anchura si son cauces rambla

** Excepcionalmente caudales superiores

*** Excepto si la obra de desvío se hace por la margen

**** Con pendientes superiores habría que hacer unos pozos de ataque y retirada excesivamente profundos

Fuente: elaboración propia

Consideraciones referentes a la socavación del cauce

La socavación es la erosión del lecho de los cauces producida por la acción del agua.

La socavación puede ser general o local:

- La socavación general es el descenso del fondo de un cauce que se produce al presentarse una avenida, y es debida al aumento de la capacidad de arrastre de material sólido que en ese momento adquiere la corriente, en virtud de su mayor calado y velocidad. La erosión general es máxima en el cauce de aguas bajas y llega a ser nula en los extremos laterales de la zona inundable.
- La socavación local se produce por la interferencia de elementos dispuestos dentro de la zona inundada, como pueden ser pilas y estribos de puentes, o como en este caso una conducción que no ha sido enterrada a la profundidad adecuada.

Para que una conducción no sea afectada por el efecto de la socavación debe estar dispuesta por debajo del nivel esperable de socavación general. Normalmente este nivel se calcula para la avenida de 500 años de período de retorno.

En cauces efímeros con pequeño espesor de aluvial el nivel de socavación general coincide habitualmente con el contacto entre el aluvial y el sustrato competente. En estos casos, es suficiente con disponer la conducción dentro del sustrato competente.

En cauces importantes el espesor de aluvial puede ser considerable, y por tanto se debe realizar un estudio detallado para determinar tanto el caudal de la avenida de 500 años como la profundidad de socavación general. Esto es de especial importancia en cauces tipo rambla.

Una vez determinada la profundidad máxima de erosión general, la conducción se debe disponer por debajo de la misma en toda la zona inundable, incluidas las márgenes, dado que durante la vida útil de la conducción el cauce puede migrar lateralmente, por lo que la socavación máxima se puede producir en cualquier punto de la zona inundable para la avenida de diseño.

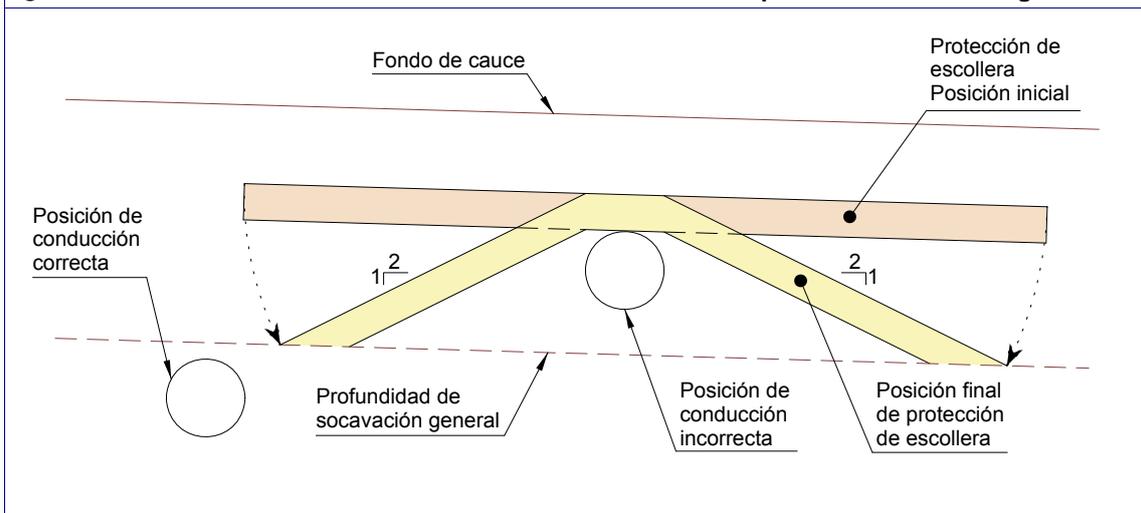
Figura 20. Migración lateral de cauce durante avenida que deja al descubierto la conducción por estar dispuesta a menor profundidad bajo las márgenes



Fuente: U.S. Department of the Interior (2007)

Si se dispone la conducción por encima de la profundidad de socavación general, situación totalmente desaconsejable, para protegerla es necesario disponer un manto de escollera de ancho tal que al producirse la erosión la protección bascule alrededor de la conducción hasta quedar apoyada en el lecho del cauce una vez socavado. Esto requiere una sobreexcavación lateral importante para disponer la protección en toda la zona inundable. En la siguiente figura se muestra esta situación.

Figura 21. Ubicación correcta e incorrecta de una conducción respecto a la socavación general



Fuente: Elaboración propia

A falta de un estudio hidrológico detallado, se puede estimar la avenida de 500 años de un cauce de las siguientes formas:

- Consultar el Mapa de Caudales Máximos desarrollado por el CEDEX. En el mapa se pueden consultar los caudales máximos instantáneos en régimen natural de cuencas de más de 50 km².

También se puede consultar las capas de caudales máximos instantáneos dentro del visor del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables.

- Consultar a las personas de mayor edad de la zona sobre inundaciones históricas, para obtener un nivel máximo alcanzado por las inundaciones. A través del nivel, un perfil transversal del cauce y la pendiente media del cauce, se puede estimar el caudal con un cálculo simplificado en régimen uniforme mediante la fórmula de Manning.

Para determinar la socavación general, se pueden usar los siguientes métodos:

- Lischtván-Lebediev, que permite el cálculo tanto para material granular como para material cohesivo.
- Laursen, que permite el cálculo para material granular.

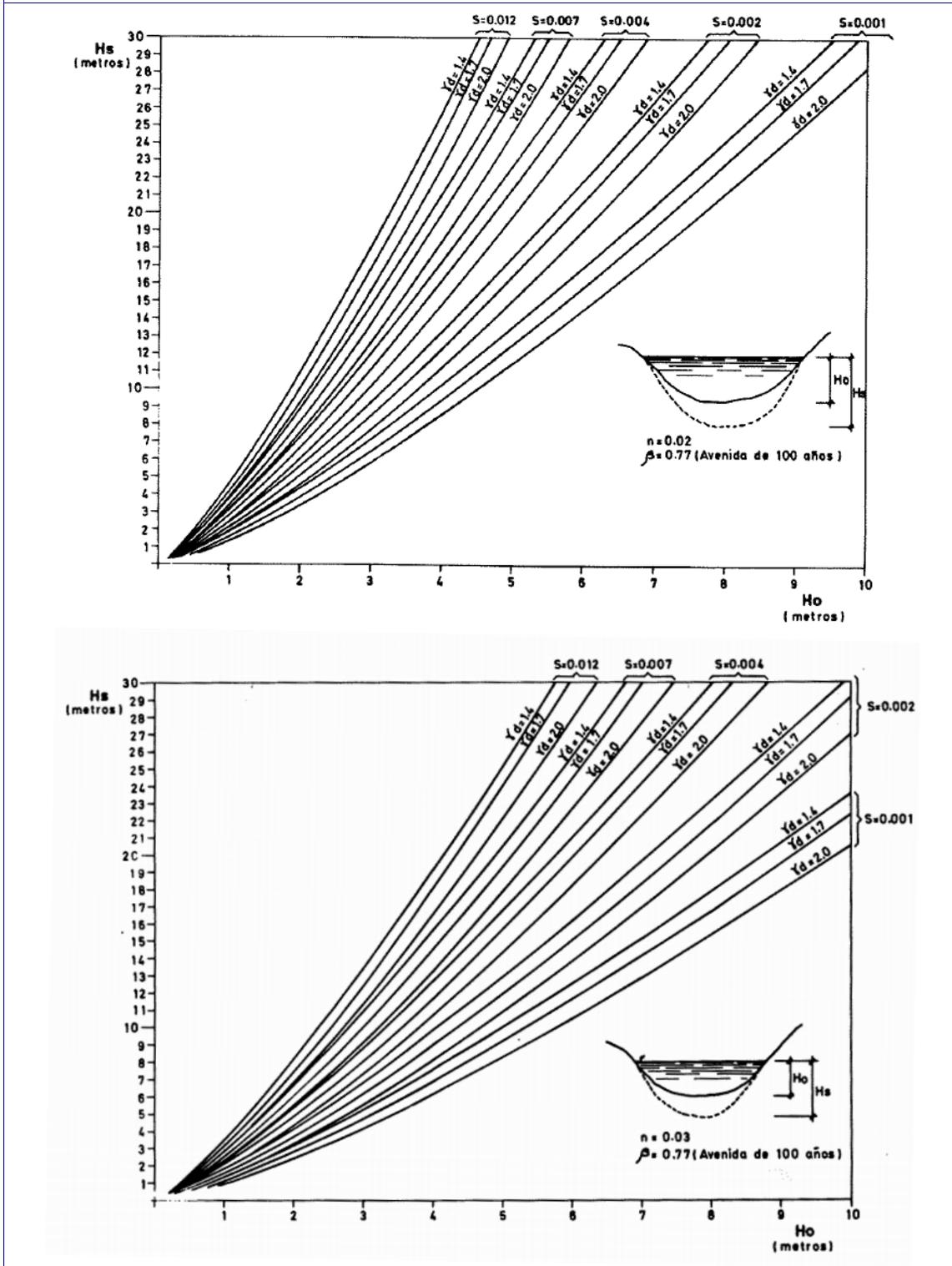
Ambos métodos dependen del caudal de diseño, calado, superficie mojada, ancho de lámina libre, granulometría del lecho (material no cohesivo) y densidad seca (material cohesivo). Todos los valores anteriores salvo las características del lecho se pueden obtener del cálculo hidráulico simplificado realizado en régimen uniforme mediante la fórmula de Manning. Normalmente, la profundidad de socavación máxima resultante suele estar comprendida entre el 25 % y el 250 % del calado máximo para la avenida de diseño.

A continuación se adjuntan unos ábacos para la estimación de la socavación general mediante el método de Lischtván-Lebediev.



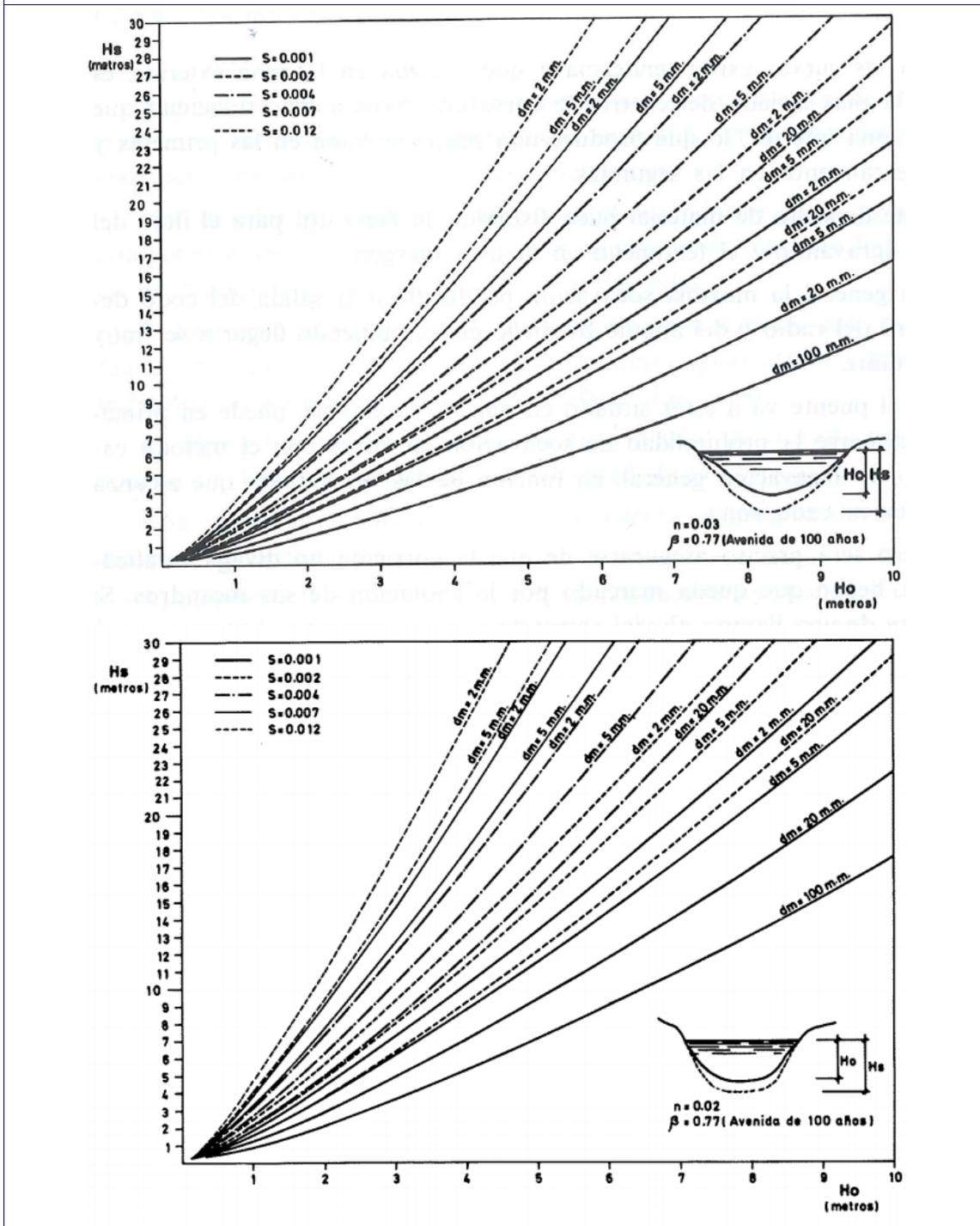
CEDEX

Figura 22. Socavación general en lecho arcilloso poco rugoso - $n=0,02$ (arriba) y rugoso - $n=0,03$ (abajo)



Fuente: Jiménez Salas (1980)

Figura 23. Socavación general en lecho granular poco rugoso - $n=0,02$ (arriba) y rugoso - $n=0,03$ (abajo)



Fuente: Jiménez Salas (1980)

En los ábacos se entra con el calado máximo (H_o), hasta llegar a la curva correspondiente a la pendiente media (s) y diámetro medio del cauce (d_m), en el caso de material granular y densidad seca (γ_d) en el caso de material cohesivo, obteniendo



CEDEX

el calado socavado (H_s), y por diferencia con el calado máximo la profundidad de la socavación ($H_s - H_o$).

Los ábacos se han calculado para $\beta = 0,77$, mientras que para la avenida de 500 años $\beta = 1,05$. La corrección de los valores obtenidos en el ábaco para cambiar de β se realiza con la siguiente fórmula:

$$H_s(\beta = 1,05) = \frac{H_s(\beta = 0,77)}{\left(\frac{1,05}{0,77}\right)^{\frac{1}{1+x}}}$$

Donde para suelos granulares,

$$x = 0,44 - 1,083D_{84}^{0,7} - 0,303D_{84} + 1,89D_{84}^{-1,7} - 1,49D_{84} \ln D_{84}$$

y para suelos cohesivos,

$$x = \frac{66,28}{\gamma_d^{0,225}}$$

siendo:

D_{84} : diámetro de las partículas del sedimento, en el que el 84 por ciento, en peso, es menor o igual que ese tamaño en metros.

γ_d : densidad seca (kgf/m^3)

Se sugiere utilizar D_{84} en vez del diámetro medio debido al acorazamiento que tiene lugar en el fondo de la zona erosionada, sobre todo si el material tiene granulometría extendida por estar bien graduado. Esta recomendación está basada en datos de campo, en los que Maza-Álvarez y Rico-Rodríguez (1970) encontraron que la erosión general calculada era mayor entre 10 y 15 % que la real, cuando se utilizaba el diámetro medio, tal como lo propusieron Lischtvan y Lebediev. El D_{84} corresponde aproximadamente al diámetro medio de la coraza para distribuciones log-normal o logarítmica de los tamaños de las partículas.

Los valores obtenidos para 500 años son menores que los resultantes del ábaco porque el coeficiente β tiene en cuenta lo suelto que está el material del lecho. Así, si el período de retorno es pequeño la erosión que se produce solo afecta a la capa superior del material del fondo del cauce. El material de dicha capa con frecuencia es erosionado al ocurrir una avenida y depositado al disminuir nuevamente los caudales.

Por tanto, dicho material está muy suelto y poco contaminado con partículas más finas. En estas condiciones la velocidad necesaria para erosionarlo es menor. Lo contrario ocurre cuando el período de retorno es muy grande y la erosión alcanza estratos que casi nunca o con poca frecuencia son descubiertos y erosionados, y en los que el material ha estado sujeto al peso de los estratos superiores, y tal vez a un flujo vertical de agua que haya arrastrado partículas finas que tiendan a rellenar sus huecos.

Por otra parte, se debe evitar realizar el cruce de conducciones en curvas de cauces debido a que se produce una erosión local en el lado exterior de las mismas. La fuerza centrífuga tiende a sobre elevar ligeramente la superficie del agua en la zona exterior de las curvas, lo que tiende a producir una corriente sobre el lecho, de la zona exterior hacia la interior, y en consecuencia que el agua tienda a retornar por la parte superior, de la orilla interior a la exterior. Al conjuntar la corriente natural del cauce con esa corriente transversal se forma una corriente helicoidal en las curvas, cuyo efecto

ocasiona que los sedimentos del lecho sean arrastrados y transportados hacia la zona interior de las curvas, donde parte de ellos llega a depositarse, mientras que en la superficie los cuerpos flotantes tienden a ser desviados hacia la orilla exterior. La corriente transversal sobre el lecho arrastra a los sedimentos de la zona cercana a la orilla exterior y los lleva hacia la orilla interior. Como este proceso es continuo, existe una erosión del fondo cerca de la orilla exterior.

3.3.2 Elementos o condicionantes medioambientales

Para la selección de una técnica adecuada para el cruce de los ríos desde el punto de vista medioambiental conviene tener en cuenta, por un lado, la magnitud de los efectos negativos de cada una de las técnicas y, por otro, la sensibilidad medioambiental del tramo de cruce. La combinación de ambos factores permite determinar el grado del riesgo ambiental asociado al empleo de la técnica seleccionada.

Magnitud de los efectos negativos de las técnicas de cruce

Los efectos negativos sobre el cauce de cada una de las técnicas de cruce se describen de forma detallada en el apartado 0. Para estimar la magnitud de los efectos asociados a cada una hay que tener en cuenta que muchos de ellos pueden ser de corta duración, extensión espacial limitada o pequeña magnitud, por lo que conllevarían un bajo riesgo medioambiental. Por lo tanto, la magnitud de los impactos dependerá de los siguientes atributos:

- Intensidad del cambio esperado con respecto a las condiciones iniciales.
Las técnicas de perforación prácticamente no alteran el cauce, por lo que los cambios con respecto a las condiciones preoperacionales serán mínimos en comparación con los métodos con zanja, que pueden dar lugar a alteraciones importantes.
- Extensión espacial de los efectos negativos, incluyendo la zona de influencia aguas abajo del punto de cruce.
Ciertos impactos afectan tan sólo a la zona donde tienen lugar las obras de cruce, como los ligados a la vegetación de ribera o a los materiales del lecho, pero otros, como el incremento y depósito de sólidos en suspensión o la alteración del régimen hidrológico e hidráulico, extienden su ámbito en mayor o menor medida aguas abajo.
- Duración esperada de los efectos negativos, que puede ser desde varios minutos hasta permanentes.

Numerosos estudios realizados para estimar los efectos del incremento y depósito de sólidos en suspensión asociados a este tipo de obras concluyen que éstos son de corta duración, y que las poblaciones bentónicas y piscícolas normalmente se han recuperado en el transcurso de un año. Respecto a la granulometría y textura del lecho, un único evento de crecida bastará en la mayor parte de los casos para revertir el impacto. Sin embargo, otros impactos, como la eliminación de un bosque



CEDEX

de galería denso con árboles de diferentes edades, pueden requerir varias décadas para su total recuperación, mientras que una conducción enterrada a profundidad insuficiente podría llegar a convertirse en una barrera permanente para los peces.

- Época del año en la que tienen lugar las obras.

La realización de las obras en ciertas épocas del año, por ejemplo las de reproducción y freza de las poblaciones piscícolas presentes en el tramo, puede incrementar de forma importante la magnitud de los efectos negativos sobre la ictiofauna.

De manera simplificada, y vistos los efectos negativos de cada una de las técnicas de cruce sobre los cauces, se podría hacer una agrupación de las mismas en función de la magnitud de dichos efectos de la siguiente forma:

- **Magnitud baja:** correspondería a las técnicas de cruce sin apertura de zanja, en las que no hay alteración del lecho ni de las riberas, y tampoco arrastre de sedimentos. Los únicos efectos negativos estarían relacionados con las instalaciones auxiliares y con el posible vertido accidental de lodos de perforación durante la obra.
- **Magnitud media:** correspondería a las técnicas de cruce mediante apertura de zanja sin desvío de caudal, que no sólo alteran el lecho y las riberas, sino que también conllevan un elevado aporte de sedimentos a la corriente. No obstante, al ser el espacio y tiempo de trabajo necesarios para la obra sensiblemente más reducido que en las técnicas con desvío de caudal, el grado de alteración es también, en general, inferior.
- **Magnitud alta:** correspondería a las técnicas de cruce mediante apertura de zanja con desvío, en las que aunque la generación de sedimentos y transporte aguas abajo son limitados, la alteración que se produce en el lecho y las riberas es importante, creándose además durante el periodo de la obra barreras al paso de la fauna piscícola y modificaciones en el régimen hidrológico e hidráulico del tramo.

Sensibilidad medioambiental del tramo

El segundo condicionante a tener en cuenta es la sensibilidad medioambiental del tramo de cruce y su zona de influencia, ya que una técnica que tenga unos efectos negativos moderados puede ser tener una afección muy elevada sobre el medio si se trata de una zona con presencia de hábitats o especies de gran sensibilidad.

Para determinar la sensibilidad medioambiental de la zona de cruce hay que tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Estado de conservación del ecosistema fluvial en el punto de cruce, prestando especial atención a la vegetación de ribera y a la fauna acuática. Puede ser interesante estimar o recopilar información de la calidad de ambos elementos, medible mediante índices de calidad biológicos e hidromorfológicos, para caracterizar o evaluar dicho estado de conservación.
- Especies presentes en el punto de cruce y su zona de influencia, prestando especial atención a aquellas raras o amenazadas. Habría que considerar aquellas

especies recogidas en los catálogos nacionales y autonómicos de especies amenazadas dentro de las categorías de “En peligro de extinción”, “Vulnerables”, “Sensibles a la alteración de su hábitat” y “De interés especial”, así como las recogidas en los anexos II y IV de la Directiva Hábitats (Directiva 92/43/CEE).

- Hábitats presentes en el punto de cruce y su zona de influencia, prestando especial atención a los de interés comunitario, recogidos en el anexo I de la Directiva Hábitats (Directiva 92/43/CEE), y en especial a los prioritarios.
- Vulnerabilidad del tramo frente a las perturbaciones provocadas por las obras, siendo por ejemplo los cauces efímeros menos sensibles a la alteración que los permanentes, y los de aguas frías mucho más sensibles que los de aguas calientes.
- Uso del hábitat de las especies frecuentes, teniendo en cuenta aspectos como la presencia de frezaderos o zonas de cría de la ictiofauna, que resultan mucho más sensibles a la alteración.

Riesgo ambiental del cruce

El riesgo ambiental de una obra de cruce de un cauce depende de la magnitud de los efectos negativos y de la sensibilidad medioambiental del tramo. Se pueden definir distintos niveles para evaluar el riesgo ambiental de las actuaciones, desde obras de cruce sin riesgo hasta obras con riesgo extremo. Así, en aquellas obras que supongan un riesgo ambiental alto debería revisarse el punto de cruce o la técnica a emplear.

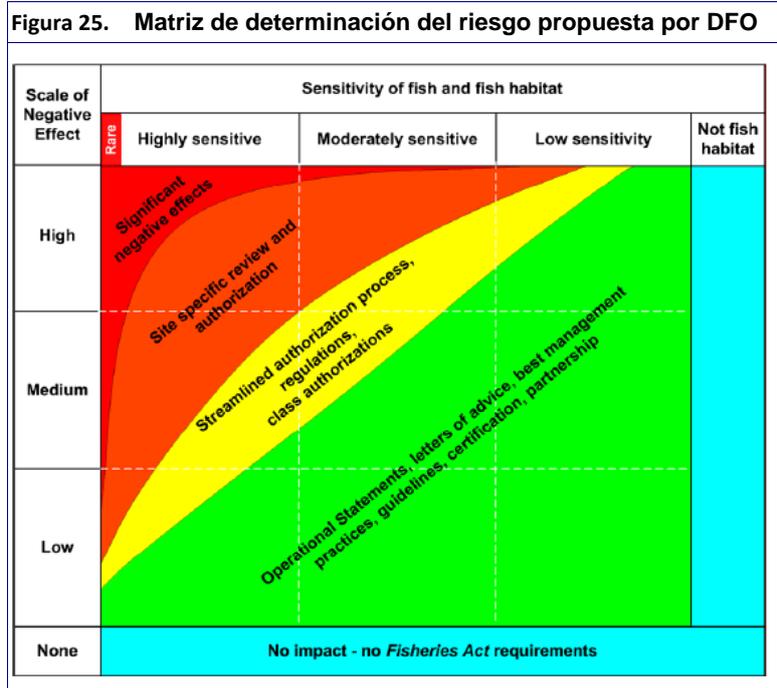
Para la toma de decisiones se puede emplear una matriz de este tipo:

Figura 24. Matriz de determinación del riesgo ambiental

		Sensibilidad medioambiental del tramo			
		Alta	Moderada	Baja	Ninguna
Magnitud de los efectos negativos	Alta	Riesgo extremo	Riesgo alto	Riesgo medio	Sin riesgo
	Media	Riesgo alto	Riesgo medio	Riesgo bajo	Sin riesgo
	Baja	Riesgo medio	Riesgo bajo	Riesgo bajo	Sin riesgo
	Ninguna	Sin riesgo	Sin riesgo	Sin riesgo	Sin riesgo

Fuente: Elaboración propia

O bien una similar a la propuesta por DFO (*Fisheries and Oceans Canada*) utilizada para determinar el riesgo ambiental sobre la fauna piscícola y su hábitat de, entre otros, las obras de cruce:



Fuente: CAPP, CEPA y CGA (2005)

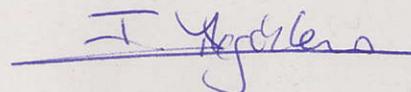
4. Bibliografía

- Alberta Environment Land Reclamation Division. 1988. *Environmental handbook for pipeline construction*. Edmonton, Alberta.
- Argonne. 2007. *Overview of the Design, Construction and Operation of Interstate Liquid Petroleum Pipelines*. Environmental Science Division, Argonne National Laboratory, Chicago.
- Argonne. 2007. *Natural Gas Pipeline Technology Overview*. Environmental Science Division, Argonne National Laboratory, Chicago.
- ARPEL. 1992. *Normas para la administración ambiental del diseño, construcción, operación y mantenimiento de oleoductos*. Asociación regional de empresas de petróleo y gas natural en Latinoamérica y el Caribe (ARPEL).
- CAPP, CEPA y CGA. 2005. *Pipeline Associated Watercourse Crossings, 3rd Edition*. Prepared by TERA Environmental Consultants and Salmo Consulting Inc. Calgary, Alberta.
- FERC. 2003. *Wetland and waterbody construction and mitigation procedures*. Federal Energy Regulatory Commission (FERC). Washington, DC.
- INGAA Foundation. 1998. *River and Stream Crossings Study (Phase I). Executive Summary*. Prepared by Golder Associates Ltd., Calgary, Alberta.
- Jiménez Salas, J.A. 1980. *Geotecnia y cimientos III*. Editorial Rueda, Madrid.
- Juárez Badillo, E. y A. Rico Rodríguez. 1972. *Mecánica de suelos, tomo III. Flujo de agua en suelos*. Limusa (Noriega Editores), México, DF.
- López Jimeno, C. 2004. *Ingeotúneles, libro 7: Ingeniería de túneles*. ETSI Minas, Madrid.
- López Jimeno, C. 2011. *Manual de túneles y obras subterráneas, Tomo II*. Ingeniería de túneles, Madrid.

- Maza Álvarez, J.A. 2003. *Erosión en ríos y obras de protección*. Manual de Ingeniería de Ríos. Series del Instituto de Ingeniería. UNAM, México, DF.
- Morcillo F., B. Arconada, Y. Fernández M. Lacal y L. Vadillo. 2004. *Estudio de los impactos ambientales de los cruces de gasoductos con ríos vadeables*. *Limnetica* 23 (3-4): 347-360.
- Najafi, M. 2010. *Trenchless technology piping: Installation and inspection*. McGraw-Hill.
- Reid, S.M. y P.G Anderson. 1999. *Effects of sediment Released During Open-cut Pipeline Water Crossings*. *Canadian Water Resources Journal* 24:23-39.
- Reid, S.M., S. Metikosh y J.M. Evans. 2008. *Overview of the river and stream crossings study*. En: *Environmental Concerns in Right-of-Way Management: Eighth International Symposium*. J.W. Goodrich-Mahoney, L.P. Abrahamson, J.L. Ballard y S.M. Tikalsky (editores), pp. 711-721. Oxford:Elsevier.
- US Department of the Interior. 2007. *Hydraulic considerations for pipelines crossing stream channels*. Technical Note 423. US Department of the Interior, Bureau of Land Management, National Science and Technology Center, Denver.
- US Department of Transportation. 2001. *Evaluating scour at bridges, fourth edition*. US Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, DC.

Madrid, noviembre de 2011

El Director del trabajo,



Fernando Magdaleno Mas
Doctor Ingeniero de Montes
Consejero Técnico