



Guía para mantener la conectividad ecológica en las estructuras de cruce en ríos y quebradas de Puerto Rico



Departamento de Recursos Naturales y Ambientales
División Monitoreo del Plan de Aguas
Primera Versión, 2016.

Aprobado por la Comisión Estatal de Elecciones
CEE-SA-16-11450

Para citar a este documento:

Departamento de Recursos Naturales y Ambientales. 2016. Guía para mantener la conectividad ecológica en las estructuras de cruce en ríos y quebradas de Puerto Rico. División de Monitoreo del Plan de Aguas, Secretaría Auxiliar de Planificación Integral. San Juan, Puerto Rico.

Esta publicación fue financiada con el Fondo Estatal Especial de Agua del DRNA, Ley Núm. 136 de 3 de junio de 1976, s. e.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
APLICABILIDAD	1
LA IMPORTANCIA DE LA CONECTIVIDAD EN LOS RÍOS Y QUEBRADAS PARA LAS ESPECIES NATIVAS	2
PROBLEMAS CAUSADOS POR LAS ESTRUCTURAS DE CRUCES	7
EFFECTOS NEGATIVOS DE LAS ESTRUCTURAS DE CRUCES	14
EN LOS CUERPOS DE AGUA Y SOBRE LAS ESPECIES	15
ASPECTOS BÁSICOS SOBRE LAS ESTRUCTURAS DE CRUCE	17
ALTERNATIVAS PARA LA FASE DE DISEÑO	18
ASPECTOS A CONSIDERAR	20
ALGUNAS MEDICIONES REQUERIDAS	21
EJEMPLOS	22
CONCLUSIÓN.....	24
GUIAS DE DISEÑO RECOMENDADAS	25
REFERENCIAS.....	26
GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	28

INTRODUCCIÓN

La red de carreteras y la red de ríos son sistemas lineales en el paisaje. En ambos, el transporte eficiente de materiales y organismos es esencial para su funcionamiento, lo que se logra mediante la conectividad. La fauna migratoria que vive en los ríos y quebradas de Puerto Rico requiere de una conexión directa entre los ríos y el mar para poder migrar y así completar sus ciclos de vida. Sin embargo, estructuras de cruces de diseño convencional orientadas exclusivamente al drenaje y transporte del agua, que no toman en cuenta las características de la conectividad ecológica, pueden: alterar el hábitat físico, obstaculizar la migración, y reducir o eliminar la población de las especies nativas acuáticas de Puerto Rico (Blanco y Scatena, 2006; Cooney y Kwak, 2013). Al comprender los efectos que causan estas estructuras en el hábitat acuático e implementar ciertos elementos en sus diseños, se puede reducir el impacto que causan las estructuras de cruce en los patrones migratorios de las especies nativas, manteniendo su función ecológica a lo largo de su ruta migratoria.

Este documento tiene varios objetivos, entre ellos: 1) presentar aspectos básicos de la fauna acuática nativa migratoria de Puerto Rico, 2) exponer sus patrones migratorios, 3) explicar las maneras en que las atarjeas obstaculizan sus migraciones, y 4) presentar estrategias de diseño para mantener las migraciones. Al construir estructuras de cruce de forma armoniosa con los requerimientos que tienen las especies acuáticas nativas, se mantendrá la integridad ecológica en los ríos y quebradas de Puerto Rico.

APLICABILIDAD

Las alternativas aquí presentadas van dirigidas principalmente al efecto que tienen las atarjeas sobre los *ríos* y las *quebradas* perennes por igual, las cuales se reconocen en un cuadrante topográfico por una línea azul continua. Esta guía está dirigida a las atarjeas en cuerpos de agua perennes, por lo que no es de aplicación a atarjeas instaladas en tramos normalmente secos, debido a que éstas carecen de poblaciones significativas de especies acuáticas. Las estructuras de cruce de cauces comúnmente utilizadas en Puerto Rico son las atarjeas y los puentes. En general, las atarjeas no mantienen el lecho natural, incrementan la velocidad del flujo y turbulencia del agua, y crean un perfil discontinuo en el cuerpo de agua. Por el contrario, los puentes son estructuras con menor impacto ambiental ya que mantienen la forma natural del lecho, crean una restricción hidráulica menor, y mantienen la continuidad del río. Sin embargo, si se aplican los conceptos presentados en este documento, el efecto de las atarjeas sobre los patrones migratorios de las especies puede minimizarse.

La información aquí presentada es complementaria a los requisitos de diseño ingenieril que se encuentran en los códigos, manuales y guías de diseño aplicables.

LA IMPORTANCIA DE LA CONECTIVIDAD EN LOS RÍOS Y QUEBRADAS PARA LAS ESPECIES NATIVAS

Puerto Rico cuenta con 224 ríos y 553 quebradas con nombres (DRNA, 2008). La fauna acuática nativa requiere de la conexión entre diferentes hábitats acuáticos, incluyendo quebradas, ríos, estuarios y océanos, para completar sus ciclos de vida. Sin embargo, el movimiento de las especies a lo largo de la cuenca puede ser afectado por las estructuras de cruce, junto con el efecto de otras estructuras, que fragmenten los ecosistemas acuáticos.

La migración entre los dos ambientes, el agua dulce y el agua salada, se conoce como *diadromía*. En Puerto Rico se observan dos tipos de migración diádroma: el catádro y el anfídromo. Organismos **catádro** (Ilustración 1), como la anguila, entran al río como pequeños juveniles. Después de varios meses en el estuario, se mueven aguas arriba donde pasan la mayor parte de su vida. Al alcanzar la madurez sexual, migran hasta el mar para reproducirse y liberar los huevos al mar (Greathouse et al., 2006, Blanco, 2006).

Animales como los camarones, los peces nativos y algunos caracoles son **anfídromos**. En este patrón migratorio, los adultos se reproducen en agua dulce en la parte de las cabeceras de los ríos. Luego de desovar, la larva va a la deriva transportada por la corriente del río hacia el mar. Las especies de camarón de río presentes en Puerto Rico realizan este tipo de migración. Se conoce que la deriva de las larvas de camarón ocurre mayormente durante la noche, entre las 7 y 10 pm (Ilustración 2, March et al., 1998), lo que permite que las larvas lleguen hasta el océano donde pasan las primeras etapas de su vida. Luego de pasar el periodo oceánico de su ciclo de vida, los juveniles llegan a los estuarios y empiezan su migración aguas arriba hasta las cabeceras donde alcanzan la madurez sexual. El ciclo comienza nuevamente con la reproducción de los adultos en la parte alta de las cabeceras (Ilustración 2, Blanco, 2006).

Aunque no se conoce con certeza el ciclo de vida oceánico de nuestras especies acuáticas, si se conoce que las corrientes oceánicas dispersan las larvas entre islas cercanas, tal como ha sido confirmado por estudios genéticos con especímenes de diferentes islas del Pacífico y del Atlántico (Gehrke et al, 2011, Page et al., 2013). Durante el periodo en que los juveniles están en los océanos, las corrientes oceánicas arrastran los juveniles hacia otro río de la isla donde nacieron o hacia los ríos de otras islas cercanas (Ilustración 3, Gehrke et al, 2011).

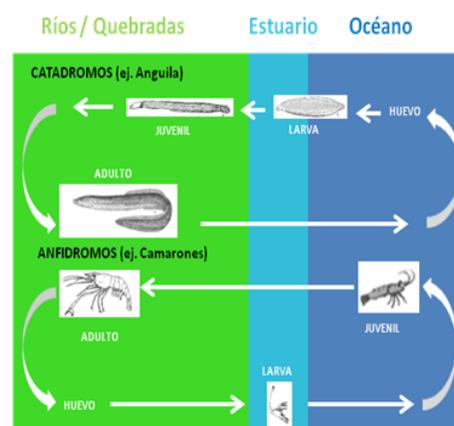


Ilustración 1. Patrones migratorios de los organismos acuáticos presentes en Puerto Rico.

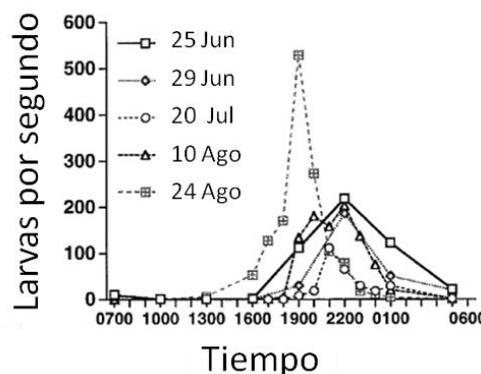


Ilustración 2. Horas pico de la deriva de las larvas de camarón en la cuenca del Espíritu Santo. El periodo comienza a las 7:00 am hasta las 6:00 am del siguiente día. Imagen extraída de March et al., 1998.

Corrientes como la del Caribe, las Antillas y la del Golfo, entre otras distribuyen los organismos desde Centro América y el Caribe hasta la región norte de América del Sur.

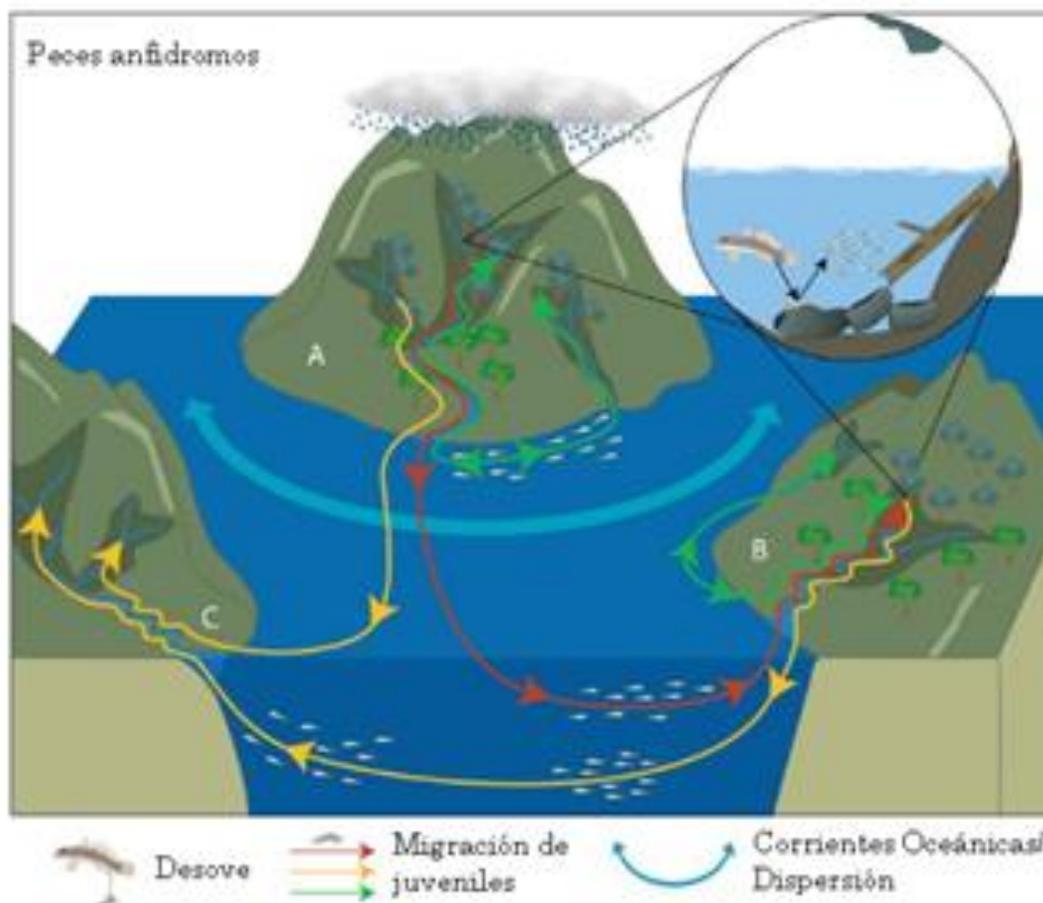


Ilustración 1. A) La isla A cuenta con una gran diversidad de hábitats favorables para el desove. Una vez los adultos desovan en el río, la larva es transportada por la deriva hasta el mar. Los juveniles migran a otros ríos de la misma isla (flecha verde) o son arrastrados por las corrientes oceánicas hacia otras islas cercanas (flecha amarilla y roja). B) Al igual que la isla A, los juveniles que llegan a la isla B provienen de otros ríos presentes en esta isla (flecha verde) y de otras islas (flecha roja). Una vez emerge la larva, llega a los océanos, éstas son arrastradas por las corrientes hacia otras islas (flecha amarilla). C) En el caso de la isla C, no existen hábitats favorables para el desove, por lo que los juveniles presentes provienen de otras islas cercanas (flechas amarillas). Varios estudios han revelado la mezcla genética que existe entre las islas, indicando lo complejo que pueden ser los patrones de dispersión entre islas. Se sospecha que esto no solo ocurre con los peces sino también con los camarones. (Imagen modificada de Gehrke et al., 2011.)

Para las especies migratorias, moverse río arriba representa el riesgo de ser depredado y un alto consumo de energía por nadar contracorriente (Bernatchez y Dodson, 1987). Se cree que las especies migratorias evitan parte de estos riesgos al migrar cuando las condiciones ambientales son más apropiadas. También se ha propuesto que una o varias *claves ambientales* (ver Glosario de términos), tales como alto flujo, mayor turbidez del agua, turbulencia o señales químicas, estimulan la migración (Kikkert et al 2009). Una vez están en el río, la migración aguas arriba se

detiene al llegar a un lugar donde hay gran cantidad de recursos disponibles, a la vez que la competencia y la depredación es mínima. El límite extremo de la migración aguas arriba está establecido por las barreras naturales, químicas o físicas en el hábitat acuático, lo que les impiden continuar moviéndose aguas arriba. Este límite de migración varía de una especie a otra. Algunas especies están adaptadas para migrar hasta la zona de las cabeceras de la cuenca mientras que otras especies están restringidas a las aguas de mayor caudal y profundidad.

El rango de distribución de los camarones en el hábitat acuático es más amplio que el de otras especies. Se mueven aguas arriba hasta las cabeceras de los ríos. Algunos camarones como *Atya* pueden detectar la presencia de camarones depredadores (ej. *Macrobrachium*) o de peces, por lo que se mueven saltando, nadando y caminando a pozas libre de depredadores (Kikkert, Crowl y Covich, 2009; Hein y Crowl, 2010; Ilustración 4).

La capacidad de movimiento varía por especie. Por ejemplo, la larva de *Macrobrachium* tiene una quela grande que causa que sus movimientos sean torpes. Por otro lado, *Xiphocaris* tiene patas largas y delgadas que le dificultan moverse por áreas de alto flujo. En cambio, *Atya* tiene un cuerpo más pequeño lo que le facilita moverse por áreas de alto flujo y por ende puede subir a mayores elevaciones en las cuencas (Kikkert, Crowl y Covich, 2009). Los camarones también pueden salir del agua y migrar a lo largo de zonas del banco o piedras que se mantienen húmedas debido a la salpicadura del agua, lo que le sirve de *clave ambiental* para determinar por donde moverse (Ilustración 4). Moverse por áreas secas durante periodos prolongados puede causar la muerte por deshidratación.



Camarones



Ilustración 2. Larvas de camarones migrando río arriba sobre la superficie de las rocas.

Los peces también se distribuyen a lo largo del río de acuerdo a las adaptaciones que tienen. En general, los peces se mueven nadando o brincando aguas arriba durante los periodos de mayor flujo. Peces más especializados como los gobies (Ilustración 5) tienen la aleta pélvica modificada en forma de chupón para adherirse sobre la superficie de las rocas, lo cual les permite sobrepasar barreras naturales de mayor altura (ej. una cascada) y llegar a zonas libres de depredadores (Benstead et al., 1999). Sin embargo, las adaptaciones que presentan todos estos organismos pueden estar comprometidas si enfrentan muchas barreras a lo largo de su trayecto migratorio (Jackson, 2003). Se ha reportado que barreras de 0.4 a 1.6 m de alto pueden bloquear hasta un 50% de la población de peces como la guavina, el dajao, el morón y la anguila. Sin embargo, si la altura de la barrera es mayor de 2.5 m éstos no podrán atravesar la barrera y pueden desaparecer de un lugar (Cooney y Kwak, 2013).

Peces



Ilustración 3. Aleta pélvica modificada en forma de chupón del cetí (izquierda) y la saga (derecha).
Imagen modificada de <http://voices.nationalgeographic.com/2008/11/24/waterfall-climbing-fish/>

El burgao es un caracol de la familia nerita y es la única especie de caracol migratorio presente en Puerto Rico. Blanco y Scatena (2005) reportaron hasta 44 eventos masivos de migración en Puerto Rico durante un periodo de 2 años, lo que se correlacionó con una reducción en el flujo luego de eventos de aumento en el flujo. En comparación con las otras especies migratorias, el burgao se mantiene en las partes cercanas a la costa ya que su distribución está limitada por el calcio disuelto en el agua (barrera química), elemento indispensable para la formación de su concha (Ilustración 4). Cuando el calcio comienza a escasear, lo obtienen comiendo la concha de otros burgaos que estén presentes en el área. La flecha roja de la Ilustración 6 señala la laceración de la concha, causado por otro caracol. El daño a la concha es leve y no causa la muerte del caracol afectado. Su distribución también puede estar limitada por cambios mínimos en las características de los ríos, incluyendo tamaño del sustrato, la profundidad, la velocidad del agua, las cascadas, la cantidad y la calidad del agua, los que funcionan como barreras físicas y químicas (Blanco y Scatena, 2006). Por las razones previamente explicadas, el burgao ha sido sugerido como un bioindicador de la conectividad de los ríos (Blanco y Scatena, 2006).

Burgao



Ilustración 4. La flecha roja señala el área de la concha que fue comida por otro burgao. Observe que a todos los caracoles que están en la foto les falta una parte de la concha.

En la Tabla 1 se presenta una lista de las especies nativas presentes en los ríos y quebradas de Puerto Rico. El único cangrejo de agua dulce presente en Puerto Rico es la buruquena y no requiere migrar para completar su ciclo de vida. Todas estas especies son importantes por su valor recreativo, comercial y cultural.

Tabla 1. Lista de caracoles, camarones y peces nativos presentes en los ríos y quebradas de Puerto Rico

Especie	Patrón Migratorio	Especie	Patrón Migratorio
Caracol burgao (<i>Neritina virginea</i>)	Anfídromo	Camarón Chágara (<i>Potimirim americana</i>)	Anfídromo
Silgao, Camarón Tigre (<i>Macrobrachium heterochirus</i>)	Anfídromo	Camarón Chágara (<i>Potimirim glabra</i>)	Anfídromo
Camarón Silgao (<i>Macrobrachium acanthurus</i>)	Anfídromo	Camaroncito (<i>Potimirim mexicana</i>)	Anfídromo
Camarón Coyuntero (<i>Macrobrachium faustinum</i>)	Anfídromo	Camarón Chirpi, Salpiche (<i>Xiphocaris elongata</i>)	Anfídromo
Camarón de río, Boquiguayo (<i>Macrobrachium carcinus</i>)	Anfídromo	Cangrejo Buruquena (<i>Epilobocera sinuatifrons</i>)	Ninguno
Camarón Coyuntero, Rayao (<i>Macrobrachium crenulatum</i>)	Anfídromo	Pez Morón (<i>Eleotris perniger</i>)	Anfídromo
Camarón lagunero de hierbas (<i>Palaemon pandaliformis</i>)	Anfídromo	Pez Guavina (<i>Gobiomorus dormitory</i>)	Anfídromo
Camarón Guábara, Chágara (<i>Atya innocuous</i>)	Anfídromo	Pez Mapiro (<i>Dormitator maculates</i>)	Anfídromo
Camarón Guábara, Chágara (<i>Atya lanipes</i>)	Anfídromo	Pez Ceti (<i>Sicydium plumieri</i>)	Anfídromo
Camarón Gata (<i>Atya scabra</i>)	Anfídromo	Pez Saga (<i>Awaous banana</i>)	Anfídromo
Camarón Salpiche (<i>Jonga serrei</i>)	Anfídromo	Pez Dajao (<i>Agonostomus monticola</i>)	Catádromo
Camaroncito de río (<i>Micratya poeyi</i>)	Anfídromo	Pez Anguila (<i>Anguilla rostrata</i>)	Catádromo

PROBLEMAS CAUSADOS POR LAS ESTRUCTURAS DE CRUCES

Existen diferentes tipos de atarjeas. La más utilizada en Puerto Rico es la atarjea circular (Ilustración 7 A), ya que es de fácil instalación y usualmente es la más económica. Una estructura tradicional, empleada con menos frecuencia hoy en día, es un puente vado con celdas múltiples (normalmente circulares, Ilustración 7 B). Durante crecidas mayores el vado queda completamente sumergido por el río. Las atarjeas cuadradas o rectangulares (“*box culverts*”) son empleadas normalmente cuando se requiere mayor capacidad hidráulica (Ilustración 7 C). Éstas pueden ser una estructura de hormigón con 3 lados si mantiene el fondo natural del cuerpo de agua o 4 lados, si tienen un fondo de hormigón. Las atarjeas en arco normalmente tienen fondo natural, pero en Puerto Rico se utilizan con poca frecuencia. Todos los tipos de atarjeas se pueden emplear en celdas múltiples (Ilustración 7B). Cada una de estas estructuras tiene su aplicabilidad, en términos de ingeniería, para manejo de la descarga. Sin embargo, el tipo de diseño e instalación determinará si las atarjeas se convierten en barreras para la migración, ya que pueden crear un ambiente poco atractivo o de mucho riesgo para los organismos migratorios.



Ilustración 5. A) Atarjea circular, Quebrada los Muertos, Mayagüez, B) Puente vado con atarjeas múltiples, Río Toro Negro en Ciales, C) Atarjea rectangular, Caguas (Foto provista por Greg Morris).

Alta velocidad

- **Problema:** A los organismos se les dificulta nadar en contra de la corriente debido a que aumenta la velocidad del agua dentro de la estructura.
- **Causas:** La atarjea es muy pequeña o la pendiente es muy empinada.
- **Solución:** En Puerto Rico, típicamente las atarjeas se diseñan para manejar las crecidas extraordinarias, asociadas a los eventos de 100 años. Sin embargo, la migración de las especies acuáticas tiende a

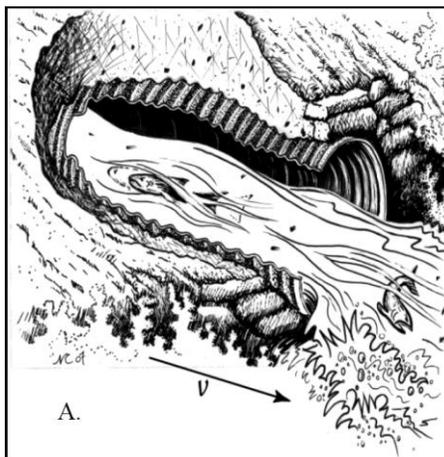


Ilustración 6. Pez nadando contra corriente para cruzar la atarjea. La flecha indica la dirección en que aumenta la velocidad del agua. Imagen obtenida de: Culverts and Low- Water Crossings: Tools, Techniques, and Considerations for Aquatic Organism Passage Kale Gullett NRCS, NC.

ocurrir durante periodos de flujo normal, o luego de una crecida. Por lo tanto, para favorecer la migración es necesario mantener una velocidad de flujo adecuada para la migración durante los periodos de flujo normal. Existen varias estrategias que permiten profundizar el nivel del agua dentro de la estructura durante periodos de flujo normal, al igual que reducen la velocidad del flujo dentro de la estructura de cruce (Ilustración 14). Algunas de estas estructuras son: los deflectores (“*baffles*”), los vertederos (“*weirs*”), o colocar sustrato (piedras) dentro, a la salida o entrada de la estructura para permitir que se formen pequeñas pozas ya que mantienen el nivel y reducen la velocidad del agua bajo condiciones de flujo normal. Otra estrategia es enterrar parcialmente el fondo de la atarjea o utilizar una atarjea de diámetro mayor que permita mantener el material y la rugosidad natural del lecho (Ilustración 16).

- **Nota importante:** Si la atarjea se encuentra parcialmente enterrada en el lecho y es de tamaño muy pequeño, las velocidades dentro de la estructura serán demasiado altas ocasionando la remoción del material del lecho. Si se van a instalar los deflectores dentro de la estructura, estos deben ser de poca altura y de poca rugosidad para evitar la acumulación de material orgánico e inorgánico. Durante la fase de diseño se debe tener en cuenta el efecto que causan estas estructuras en reducir la capacidad de flujo dentro de la atarjea. Los deflectores deben ser instalados en atarjeas con un tamaño apropiado para que facilite la instalación y el mantenimiento.

Perfil discontinuo y cambio en morfología

- **Problema:** En la zona aguas abajo de la atarjea se crea un punto de socavación, con una poza profunda lo que causa que la elevación de salida de estructura sea mayor que la capacidad de brinco de las especies. Este salto artificial que se forma representa una barrera migratoria y crea una discontinuidad en el cuerpo de agua. Además, la poza profunda formada aguas abajo de la atarjea propicia un hábitat ideal para los depredadores de los camarones y las larvas de los peces. Desde el punto de ingeniería, la erosión de la poza puede iniciar la degradación del río aguas abajo y eventualmente resultar en una falla estructural de la atarjea.

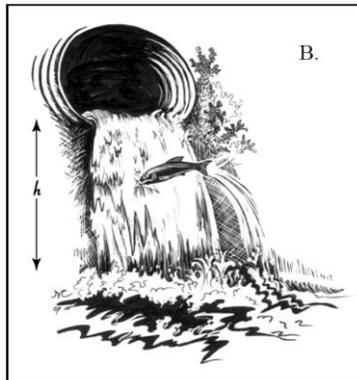


Ilustración 7. La erosión resulta en una atarjea colgante, por lo que la salida de la estructura está a una altura mayor que la capacidad de brinco de los peces. Ilustración obtenida de: Culverts and Low-Water Crossings: Tools, Techniques, and Considerations for Aquatic Organism Passage Kale Gullett NRCS, NC.

- **Causas:** La erosión aguas abajo y la degradación del lecho puede ser causado por diferentes problemas, incluyendo: 1) la alta velocidad de la descarga de la atarjea crea una zona de socavación durante crecidas justo aguas abajo de la estructura; 2) reducción del aporte desde aguas arriba de sedimentos como consecuencia de la construcción de una represa o extracción de material del río; 3) atrincheramiento del cauce aguas abajo debido a extracción de material del río o aumento en caudales debido a la urbanización.



Ilustración 8. Perfil discontinuo por efecto de la atarjea.

- **Solución:** Para estructuras nuevas se debe enterrar parcialmente la atarjea. Además, se deben incorporar estructuras de control de erosión aguas abajo de la estructura para prevenir problemas de erosión del cauce. Se pueden colocar rocas grandes y estables a la salida de la atarjea que funcionen como disipadores de la energía de la descarga para evitar la socavación del lecho en la salida (Ilustración 15). Es necesario observar las condiciones que sugieren que el río no está estable y si hay indicios de degradación progresiva, como lo son los bancos erosionados, las pilastras de puentes expuestas, atarjeas en el aire, etc. También es importante entrevistar a los residentes del área para obtener información sobre las características del lugar. Para estructuras existentes, es necesario instalar estructuras de control de erosión aguas abajo para minimizar la degradación del lecho y minimizar el salto creado en la salida de la atarjea. Una buena alternativa es utilizar vertederos de roca (*rock weirs, boulder weirs*).
 - **Nota importante:** Este problema no está asociado con la entrada de la atarjea porque el sedimento del río elevará el lecho al nivel de la atarjea. Una atarjea que originalmente fue enterrada puede experimentar este problema en la medida que el lecho del río aguas abajo se socave con el pasar del tiempo.

Atarjea muy larga y oscura

- **Problema:** Atarjeas muy largas resultan en estructuras oscuras e intimidantes para las especies migratorias, ya que las especies asocian la falta de luz con la presencia de depredadores. Un tubo largo y homogéneo también es una estructura sin áreas de descanso, lo que puede resultar en fatiga para las especies.
- **Causas:** Cruce de carreteras anchas y autopistas.
- **Solución:** Utilice dos tubos en serie con un área de descanso entre ellos o utilice puentes en vez de atarjeas. Tubos más anchos permiten la entrada de mayor cantidad de luz dentro de la estructura. Si es un tubo ya instalado, puede ser factible colocar rejillas o tragaluces para permitir la entrada de luz dentro de la estructura.
 - **Nota importante:** La Ley Núm. 49 del año 2003 prohíbe la canalización de las quebradas, al igual que la instalación de atarjeas largas dentro de proyectos nuevos.

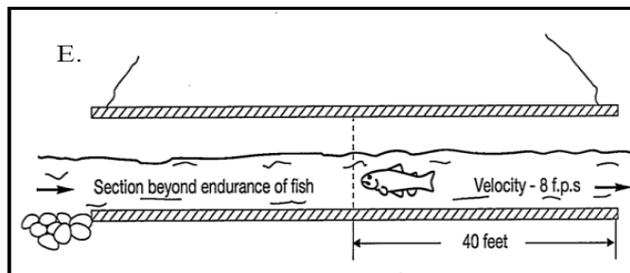


Ilustración 9. Atarjea larga y oscura en sección del río que es parte del trayecto migratorio de las especies nativas migratorias. Imagen obtenida de: Culverts and Low-Water Crossings: Tools, Techniques, and Considerations for Aquatic Organism Passage Kale Gullett NRCS, NC.

Obstaculización de la entrada de la atarjea

- **Problema:** El flujo transporta una gran cantidad de escombros que se acumulan a la entrada de la atarjea, minimizando su capacidad hidráulica y bloqueando el paso de las especies cuando migran aguas arriba. También se puede formar una poza profunda en la medida que los escombros limiten el paso de agua.
- **Causas:** Atarjea muy pequeña.
- **Solución:** Instalar una estructura de diámetro mayor, que permita el movimiento de los escombros a través de la estructura y prestar mantenimiento a la obra para evitar que se obstruya la entrada de la atarjea.



Ilustración 10. Escombros acumulados a la entrada de la atarjea, Río Guaynabo, PR#1.

- **Nota importante:** Los trabajos de limpieza deben limitarse a la remoción del material orgánico o basura. No se debe remover sedimentos del cauce ni profundizar el río.

Nivel de agua bajo dentro de la estructura

- **Problema:** Si el cruce es muy llano, los camarones no tendrán problema atravesando la estructura. En cambio, puede presentar un problema para los peces debido a su poca profundidad pueden lacerar su cuerpo al rozar su abdomen contra el fondo de la estructura.

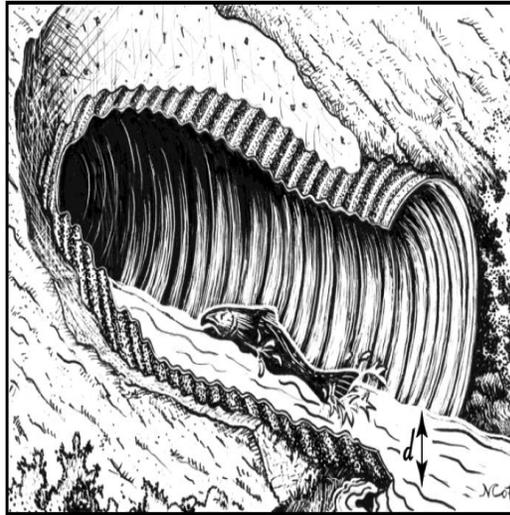


Ilustración 11. Poca profundidad del nivel de agua dentro de la atarjea. Imagen obtenida de: Culverts and Low- Water Crossings: Tools, Techniques, and Considerations for Aquatic Organism Passage Kale Gullett NRCS, NC.

- **Causas:** La atarjea forma un cruce llano cuando el flujo del agua es lento o la estructura no permite la acumulación de sedimento natural.
- **Solución:** Enterrar la estructura suficientemente, instalar *baffles* u otros elementos de rugosidad dentro de la estructura, o instalar estructuras de control aguas abajo para aumentar la profundidad en la salida de una atarjea llana (Ilustración 15).
 - **Nota importante:** Estructuras como los deflectores no deben ser instaladas en ríos donde predominen los pedruscos (“*cobbles*”), ya que estos pueden destruir los deflectores durante eventos de crecidas.

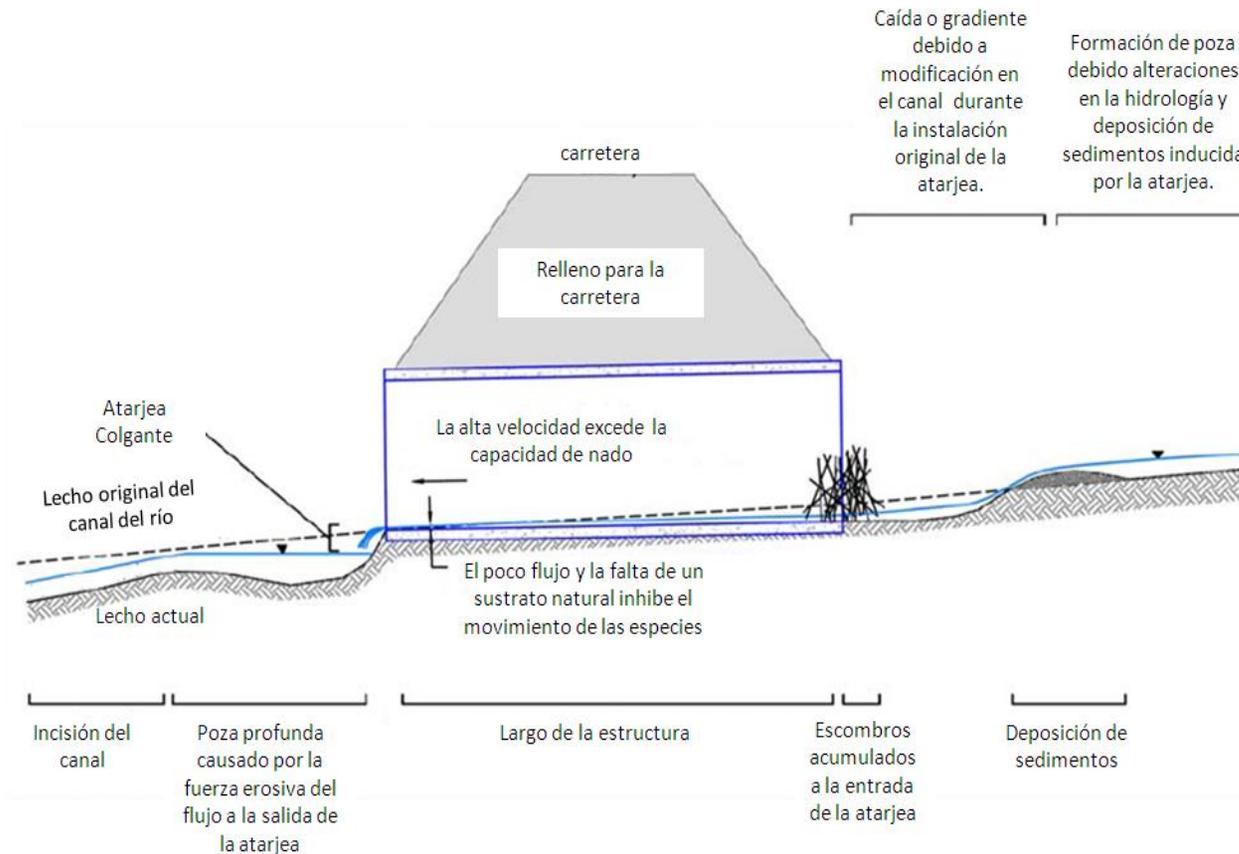


Ilustración 12. Resumen de los efectos que causan las atarjeas en los ríos y quebradas afectando la migración de los organismos acuáticos. Diagrama modificado de Massachusetts Department of Transportation and Highway Division. (2010) Design of Bridges and Culverts for Wildlife Passage at Freshwater Streams.

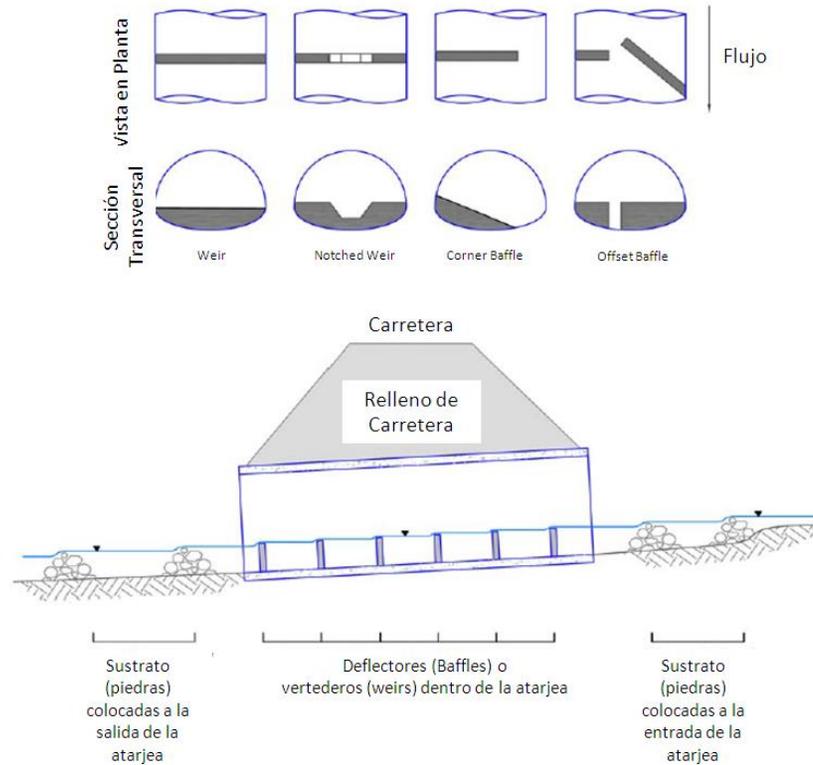


Ilustración 13. Elementos de rugosidad en el suelo de la atarjea o a la entrada o salida de la estructura para que ayuden a mantener el nivel del agua y reducir la velocidad. Algunas de estas estructuras son: los deflectores (“baffles”), los vertederos (“weirs”), o colocar sustrato (piedras) dentro, a la salida o entrada de la estructura para permitir que se formen pequeñas pozas manteniendo el nivel de agua y la velocidad reducida bajo condiciones de flujo normal. Diagrama modificado de Massachusetts Department of Transportation and Highway Division. (2010) Design of Bridges and Culverts for Wildlife Passage at Freshwater Streams.

EFFECTOS NEGATIVOS DE LAS ESTRUCTURAS DE CRUCES EN LOS CUERPOS DE AGUA Y SOBRE LAS ESPECIES

Los problemas mencionados anteriormente pueden resultar en una variedad de efectos negativos que pueden obstaculizar la migración de las especies acuáticas y en algunos casos también representan problemas de su funcionamiento hidráulico, como es el caso de bloqueo, socavación y erosión, etc. Varios ejemplos se presentan a continuación.



Gurabo

NIVEL BAJO DENTRO DE LA ATARJEA

Los organismos acuáticos requieren de un nivel mínimo para atravesar el cruce. De lo contrario, pueden lacerar su cuerpo al rozar con la invertida de la estructura. En la foto se aprecia una atarjea circular con poco flujo.



Carolina

LECHO NO NATURAL

El sustrato debe ser similar a las áreas cercanas para mantener las condiciones naturales del río, lo que ayudará a mantener la continuidad, proveerá áreas de refugio, y mantendrá una menor velocidad del flujo, sin causar daño físico a los organismos.



Bellingham, Washington

SOCAVACIÓN Y EROSIÓN

En los cruces muy pequeños, la velocidad alta del agua puede: socavar el sustrato natural, erosionar los bancos y degradar el hábitat. Aguas abajo de la atarjea el cauce se degrada causando desestabilización del terreno y comprometiendo la estabilidad de la estructura. En este caso, la atarjea está ubicada aguas arriba del área erosionada. Foto: <https://www.cob.org/services/environment/restoration/images/baker-creek-before-after2.jpg>



Comerío

ESTRUCTURA MUY PEQUEÑA

Atarjeas muy pequeñas obstaculizan la migración, y no tienen la capacidad de manejar la descarga, lo que resulta en un fallo de la estructura. La foto muestra los tubos de metal corrugado de una atarjea que quedaron luego de que una crecida arrancara el cemento.



Guaynabo

BLOQUEO

Estructuras de cruce muy pequeñas pueden obstaculizarse con escombros y basura, limitando el paso de las especies hacia los tramos aguas arriba. Se requiere de un mantenimiento programado para prevenir este problema. En la foto se puede apreciar la acumulación de escombros aguas arriba de la atarjea.



Carolina

AGUA EMPOZADA

Aguas empozadas pueden representar una zona de depredación, o una poza con agua de pobre calidad, resultando en una amenaza para las especies. La foto ilustra la poza profunda que se forma aguas abajo de la atarjea.

ASPECTOS BÁSICOS SOBRE LAS ESTRUCTURAS DE CRUCE

Idealmente, una estructura de cruce debe mantener un lecho natural, sin imponerse de forma abrupta al río. Bajo estas condiciones, pasará desapercibida por los organismos acuáticos. A la misma vez, la estructura instalada debe ser eficiente y costo efectiva. Cada sitio es único, por lo tanto, se requiere de una evaluación individual para determinar cuál es la mejor estrategia para lograr los objetivos hidráulicos a la vez que se mantiene la conectividad del ecosistema.

La aplicación de estos estándares requiere que se combinen los elementos de ingeniería y diseño para garantizar que las estructuras tengan un tamaño y diseño adecuado para manejo del caudal de diseño, asegurar la estabilidad de la estructura, y facilitar la migración de las especies. Al mantener la conectividad del cuerpo de agua a intervenir se garantiza la supervivencia de las especies nativas.

Una estructura de cruce apropiada...	Un cruce efectivo incluye...
Se extiende sobre el ancho completo del río o quebrada	Puente
Minimiza el incremento en las velocidades del flujo en comparación con las condiciones naturales	Atarjea con fondo natural
Tiene un lecho natural o semi natural	Atarjea enterradas en el lecho del río o quebrada
Minimiza los cambios en el río o quebrada	



Atarjea cuadrada de tres lados con fondo natural, Ciudad Jardín, Gurabo. En esta imagen las celdas de los lados no pueden apreciarse ya que han sido cubiertas por la vegetación.

ALTERNATIVAS PARA LA FASE DE DISEÑO

Para diseñar un cruce de forma armoniosa con la migración de las especies, es necesario evaluar los aspectos hidrológicos y geomorfológicos del río o quebrada donde se instalará la estructura. Para esto, se debe:

- 1- Visitar el lugar, observar potencial de escombros y la condición de lecho. Observar indicadores de incisión del río. Se debe conocer si existe actividad de extracción de grava del cauce aguas arriba y aguas abajo de la estructura y determinar el tamaño del material del fondo (ej. conteo “Wolman”).
- 2- Determinar si el río o quebrada es perenne o intermitente e identificar las especies migratorias que pueden estar presentes en el cuerpo de agua.
- 3- Diseñar la atarjea para manejar la crecida con una recurrencia de 100 años, según lo establecen las normas de diseño existentes.
- 4- Evaluar las alternativas que facilitan la migración de las especies y seleccionar la estrategia a implantar (Tabla 1).

Tabla 1. Elementos a considerar al momento de diseñar un cruce.

Alternativa	Condición Óptima
Tipo de cruce	Son preferibles las atarjeas sin fondo (ej. “ <i>box culvert</i> ” sin fondo) o los puentes.
Empotramiento de la estructura	<p>En la etapa de diseño debe considerarse enterrar la estructura para permitir la acumulación del material del lecho. Cuando el material de lecho contenga partículas $D_{50} > 18$ pulgadas de diámetro, la profundidad de empotramiento de la estructura debe ser de al menos el doble del D_{50} (ancho de particular mayor al 50% de las partículas presentes en el lugar y se determina mediante un conteo de piedras Wolman (DRNA, 2009)). Si el $D_{50} < 18$ pulgadas, la profundidad de empotramiento será igual al 50% de la altura de la atarjea o 36 pulgadas, lo que sea menor.</p> <p>Es necesario que se realice un análisis hidráulico de la estructura para confirmar que la estructura es capaz de manejar el flujo asociado a la descarga de los 100 años, considerando el porcentaje de la estructura que queda abierto.</p>
Ancho de la estructura	El ancho de las atarjeas debe extenderse al menos 1.2 veces el ancho del cauce lleno (Ilustración 15 III). La estructura debe dejar suficiente espacio para proporcionar el movimiento de todas las especies que utilicen el río o quebrada como corredor mediante la acumulación de sedimentos dentro de esta. Este requisito no aplica a las atarjeas pequeñas.
Apertura	El ancho y la altura del cruce deber ser proporcional con su longitud. La razón de apertura está basada en la relación entre la sección transversal y la longitud del cruce (Ilustración 15- I y II). La apertura debe ser de al menos 0.5 metros y una altura de 1.83 metros.
Profundidad y velocidad	La profundidad y la velocidad dentro de la estructura de cruce deben ser similares a lo observado en el canal natural (Ilustración 15- IV).
Sustrato	Colocar estructuras de control de flujo dentro de la atarjea, ayudan a la acumulación del material del lecho, modificando las condiciones de velocidad uniforme que se forman dentro de la atarjea para simular las condiciones que se observan en el ambiente natural para proveer áreas de refugio y descanso (Ilustración 16).

ASPECTOS A CONSIDERAR

Enterrar la estructura en el lecho, lo que también se conoce como empotramiento, es una alternativa altamente recomendable al momento de colocar estructuras dentro de los cauces de los ríos. Para conocer si la estructura tendrá la capacidad de manejar la descarga de los 100 años, es necesario conocer cuánto es la reducción en la sección transversal, ya que es un área con la que no se cuenta para manejar la descarga. Según se puede apreciar en la Ilustración 14, el empotramiento de la estructura no tiene que representar una reducción grande en la capacidad de la atarjea. Un aumento de 6 pulgadas en el diámetro es suficiente para compensar por la reducción en la sección transversal debido al espacio que ocupa el material del lecho.

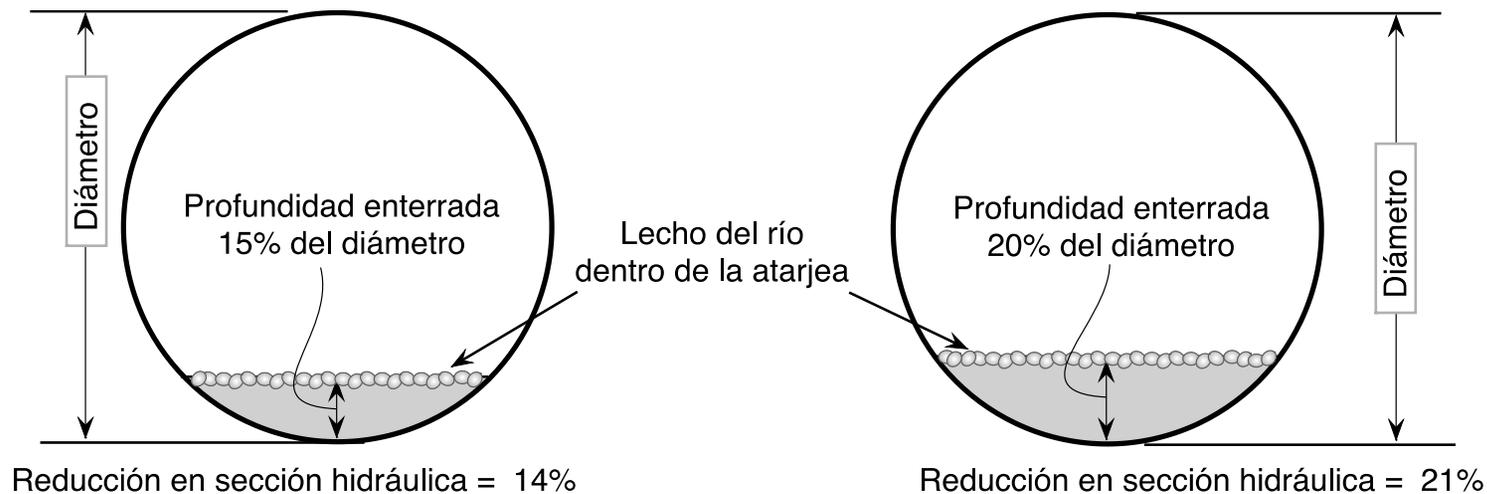


Ilustración 14. Reducción en la sección transversal de una sección circular al empotrar la atarjea 15% y 20% para permitir la continuidad del lecho a través de la atarjea.

ALGUNAS MEDICIONES REQUERIDAS

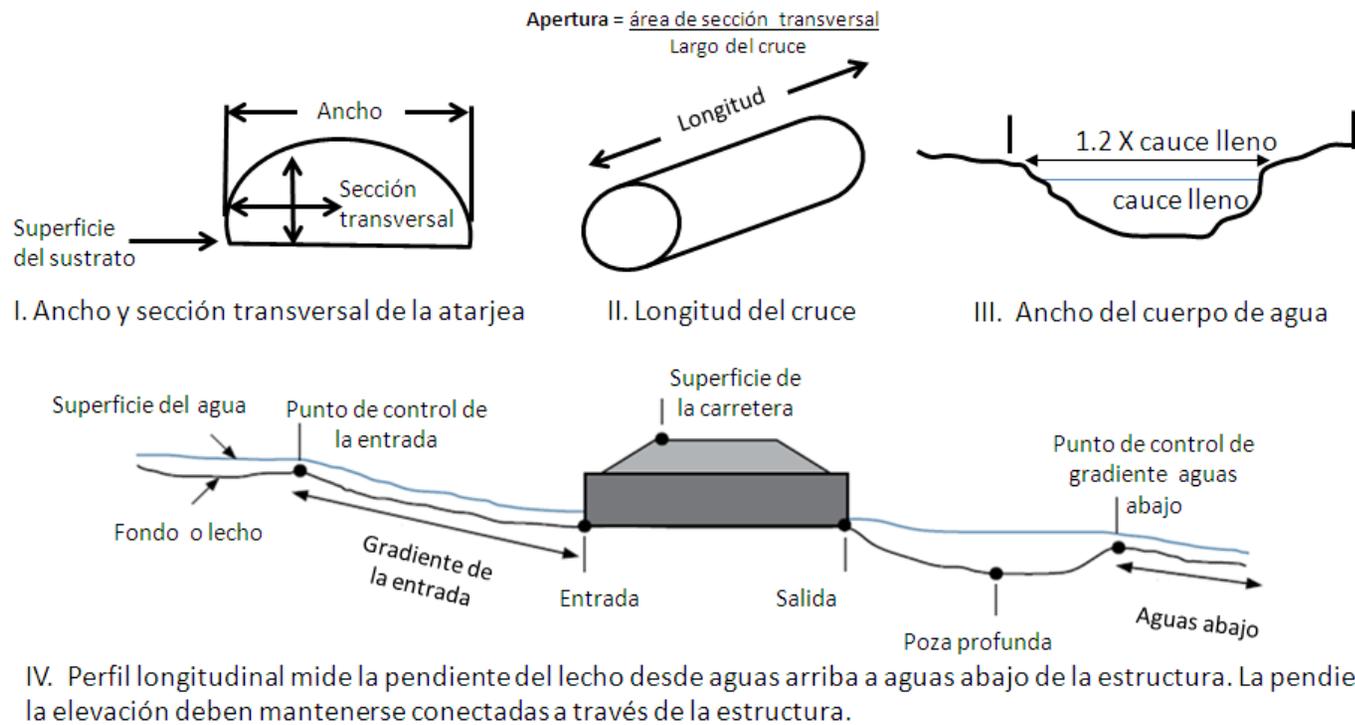
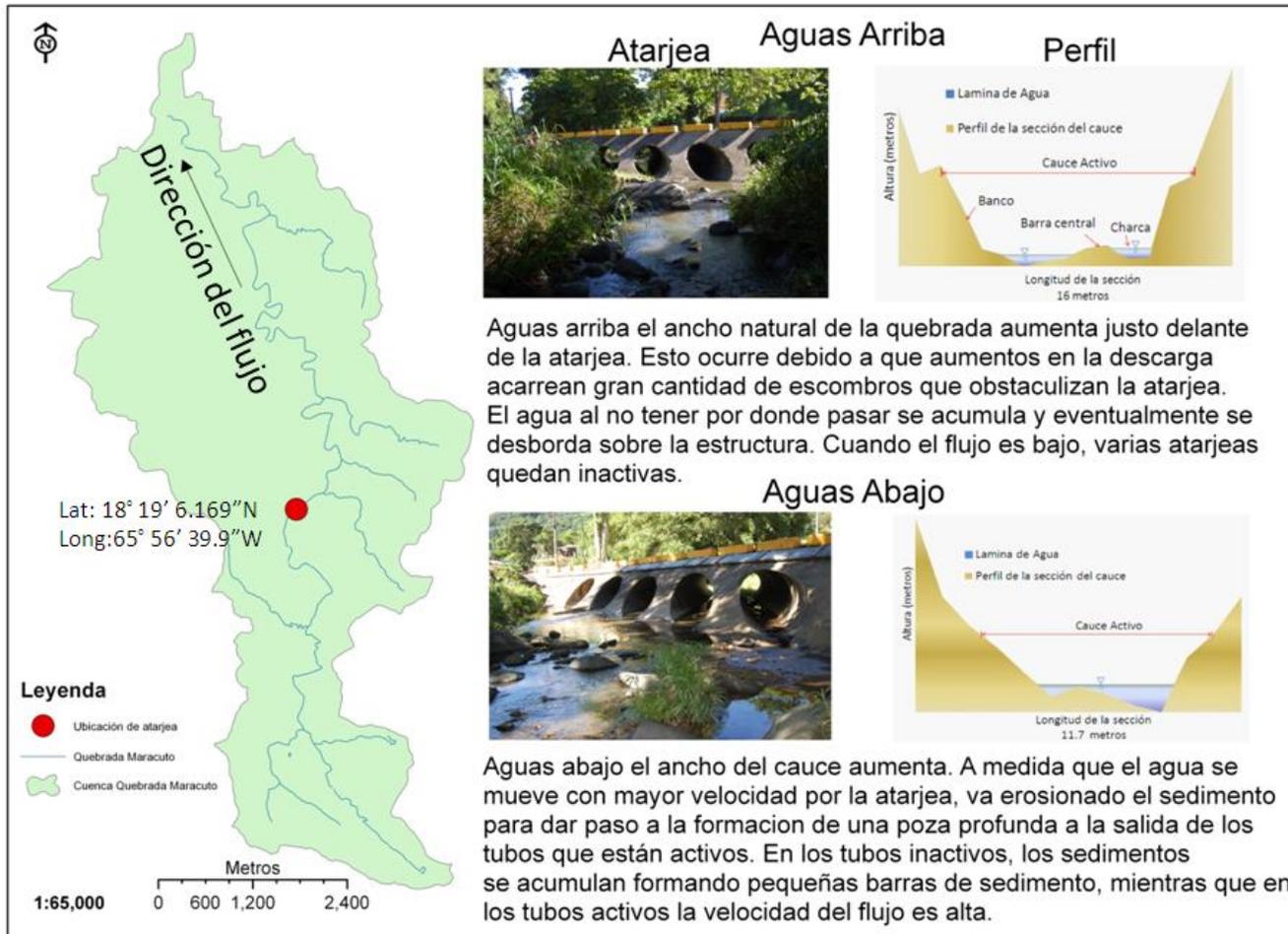


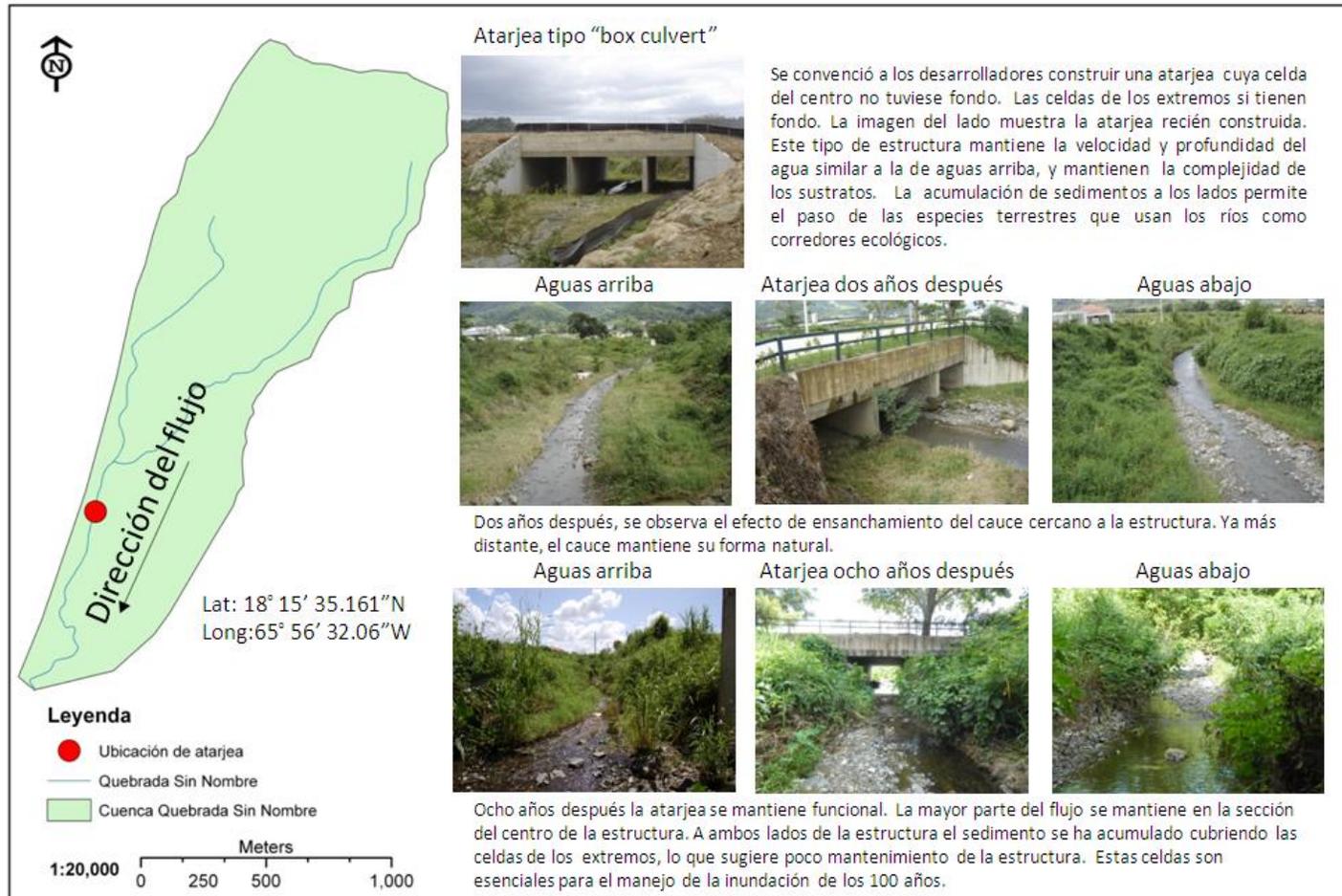
Ilustración 15. Mediciones básicas que deben realizarse al diseñar una estructura de cruce. Modificado de Massachusetts Stream Crossing Handbook, 2^{da} Edición y Culvert Fishway Planning and Design Guidelines, Part F – Baffle Fishways for Box Culverts.

EJEMPLOS

Quebrada Maracuto, Sector Calo, Barrio Barrazas, Carolina, Puerto Rico



Quebrada Sin Nombre, Ciudad Jardín, Gurabo, Puerto Rico



* Las primeras 4 imágenes fueron provistas por el Ing. Juan Portalatin, GL Morris Engineering Coop.

CONCLUSIÓN

La infraestructura de transportación vial es esencial para nuestra forma de vida, pero puede interferir innecesariamente con los patrones migratorios de las especies nativas acuáticas. Nuestras especies nativas tienen alto valor alimentario, cultural, pesquero y recreacional, por lo que seguir las recomendaciones presentadas en este documento ayudará a la preservación y conservación de la vida silvestre de Puerto Rico. Para permitir la supervivencia de nuestras especies acuáticas, es necesario identificar e implantar estrategias que ayuden a minimizar los efectos adversos que causan las atarjeas sobre el hábitat acuático.

Continuar con las prácticas de ingeniería tradicional, sin tener en cuenta las consideraciones ambientales presentadas en este documento, afectará de forma adversa la migración y supervivencia de los organismos acuáticos. Los conceptos presentados en este documento ayudarán a mantener los patrones de migraciones acuáticas, y deben ser incorporados en el diseño de los cruces de ríos y quebradas. De esta forma, las agencias de transportación e infraestructura, así como las que velan por el desarrollo socioeconómico del País, ejercerán un rol activo en el mantenimiento de la diversidad ecológica de nuestra Isla.

GUIAS DE DISEÑO RECOMENDADAS

Culvert Fishway Planning and Design Guidelines, Part F – Baffle Fishways for Box Culverts. James Cook University Australia. April 2010, Version 2.0.

Massachusetts stream crossings handbook, Division of Ecological Restoration, Department of Fish and Game, Commonwealth of Massachusetts, 2nd Edition, June 2012.

Massachusetts Department of Transportation and Highway Division. (2010) Design of Bridges and Culverts for Wildlife Passage at Freshwater Streams.

Ministry of Transportation and Infrastructure of British Columbia. Culverts and fish passage. Environmental and Management Section. Updated in May 2013.

http://water.epa.gov/polwaste/nps/urban/upload/2003_07_24_NPS_unpavedroads_ch3.pdf

REFERENCIAS

Benstead, J.P., March, J. M., Pringle, C. M. y Scatena, F.N. (1999). Effects of a low-head dam and water abstraction on migratory tropical stream biota. *Ecological Applications*. Vol 9, No. 2: 656-668.

Blanco, J. F. y Scatena, F. N. (2005). Floods, habitat hydraulics and upstream migration of *Neritina virginea* (Gastropoda: Neritidae) in Northeastern Puerto Rico. *Caribbean Journal of Science*, Vol 4, No. 41: 55-74.

Blanco, J. F. y Scatena, F. N. (2006). Hierarchical contribution of river-ocean connectivity, water chemistry, hydraulics, and substrate to the distribution of diadromous snails in Puerto Rican streams. *Journal of the North American Benthological Society*, Vol. 25, No. 1: 82-98.

Culvert Fishway Planning and Design Guidelines, Part F – Baffle Fishways for Box Culverts. James Cook University Australia. April 2010, Version 2.0.

Cooney, P. B. y Kwak, T. J. (2013). Spatial extent and dynamics of dam impacts on tropical island freshwater fish assemblages. *Bioscience*, Vol. 63, No. 3: 176- 190.

Departamento de Recursos Naturales y Ambientales (2007). Nomenclatura de los organismos acuáticos y de Puerto Rico e Islas Vírgenes. Vol. 9. Preparado por: Grana, F.

Departamento de Recursos Naturales y Ambientales (2008). Plan Integral de Recursos de Agua de Puerto Rico.

Departamento de Recursos Naturales y Ambientales (2009). Guía para el Manejo de Ríos, División Monitoreo del Plan de Aguas. Preparado por: Morris G. L., Portalatín J., De Jesús, R., Ramos, M., Toledo, T.

Gehrke PC, Sheaves MJ, Terry JP, Boseto DT, Ellison JC, Figa BS y Wani J. (2011). Vulnerability of freshwater and estuarine fish habitats in the tropical Pacific to climate change. In: JD Bell, JE Johnson and AJ Hobday (eds) *Vulnerability of Tropical Pacific Fisheries and Aquaculture to Climate Change*. Secretaria of the Pacific Community, Noumea, New Caledonia.

Greathouse, E. A., Pringle, C. M., McDowell, W. H., y Holmquist, J. C. (2006). Indirect upstream effects of dams: consequences of migratory consumer extirpation in Puerto Rico. *Ecological Applications*, Vol. 16, No. 1: 339-352.

Hein, C. L. y Crowl, T. A. (2010). Running the predator gauntlet: do freshwater shrimp (*Atya lanipes*) migrate above waterfalls to avoid fish predation? *Journal of the North American Benthological Society*. Vol. 29, No. 2: 233-246.

Hein, C. L., Pike, A. S., Blanco, J. F., Covich, A. P., Scatena, F. N., Hawkins C. P. y Crowl, T. A. (2011). Effects of coupled natural and anthropogenic factors on the community structure of diadromous fish and shrimp species in tropical island streams. *Freshwater Biology*, Vol. 56, No. 5: 1002-1015.

Jackson, S. (2003). Design and Construction of Aquatic Organism Passage at Road-Stream Crossings: Ecological Considerations in the Design of River and Stream Crossings. 20-29, CD-ROM Conference Proceedings, International Conference of Ecology and Transportation Lake Placid, New York

Kikkert, D. A., Crowl, T. A. y Covich, A. P. (2009) Upstream migration of amphidromous shrimps in the Luquillo Experimental Forest, Puerto Rico: temporal patterns and environmental cues. *Journal of the North American Benthological Society*. Vol. 28, No. 1: 233-246.

March, J. G., Benstead J. P., Pringle C. M. y Scatena F. N. (1998) Migratory drift of larval freshwater shrimps in two tropical streams, Puerto Rico. *Freshwater Biology*, Vol. 40, No. 2: 261-273.

Massachusetts stream crossings handbook, Division of Ecological Restoration, Department of Fish and Game, Commonwealth of Massachusetts, 2nd Edition, June 2012.

Massachusetts Department of Transportation and Highway Division. (2010) Design of Bridges and Culverts for Wildlife Passage at Freshwater Streams.

Ministry of Transportation and Infrastructure of British Columbia. Culverts and fish passage. Environmental and Management Section. Updated in May 2013.

Page, T. J., Torati, L. S., Cook, B. D., Binderup y A., Pringle, C. M., Reuschel S., Schubart C. D. y Hughes J. M. (2014) Invertebrés Sans Frontières: Large Scales of Connectivity of Selected Freshwater Species among Caribbean Islands. *Biotropica*, Vol. 45, No. 2: 236–244.

http://newswatch.nationalgeographic.com/2008/11/24/waterfall-climbing_fish/

<http://www.dot.ca.gov/hq/oppd/fishPassage/>

<https://www.cob.org/services/environment/restoration/images/baker-creek-before-after2.jpg>

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Clave ambiental: Son señales, ya sean físicas o químicas, que pueden percibir los organismos sobre el ambiente que lo rodea. Estas juegan un rol importante en la orientación de los organismos, sobre todo en aquellos que se mueven por una variedad de hábitats.

Cuerpos de agua: Término que incluye las aguas superficiales, las subterráneas, las costaneras y cualquier otra. Para efectos de esta Guía, se refiere a cuerpos de agua superficial ya sean ríos o quebradas

Cuenca hidrográfica: Comprende de todos los terrenos que drenan a un punto de interés y sus límites están determinados por la topografía del terreno.

Hábitat: Es el espacio que reúne todas las condiciones ecológicas necesarias para que una especie pueda residir y reproducirse.

Nerita: Son moluscos gasterópodos tropicales de agua dulce cuyos individuos migran río arriba en agregados masivos. Comúnmente se conocen como bulgao.

Nicho: Concepto ecológico que describe la relación de un organismo o población con su entorno. El nicho fundamental describe el lugar que ocupa un organismo en ausencia de interacciones con competidores. El nicho realizado es la porción del nicho fundamental efectivamente ocupada.

Quebrada: Una quebrada es un drenaje natural, cuyo caudal es menor que el de un río. Sus cauces y sus riberas se consideran de dominio privado y requieren de una faja de conservación con un ancho mínimo de 5 metros lineales a cada lado de la quebrada. A diferencia de los ríos, no todas las quebradas están reconocidas en los mapas topográficos.

Río: Se consideran como ríos los cuerpos de agua así nombrados en los mapas topográficos preparados por el Departamento de Transportación y Obras Públicas con la colaboración del Servicio Geológico Federal (USGS, por sus siglas en ingles). Los ríos de Puerto Rico son de dominio público y son custodiados por el DRNA, por lo que requieren de una faja de conservación con un ancho mínimo de 5 metros lineales a cada lado del río. La faja y el deslinde de los ríos se mueven lateralmente a medida que los meandros van migrando.



Puente sobre el Río Marín en Patillas Carr. # 7759



Impreso en el DRNA

Junio 2016