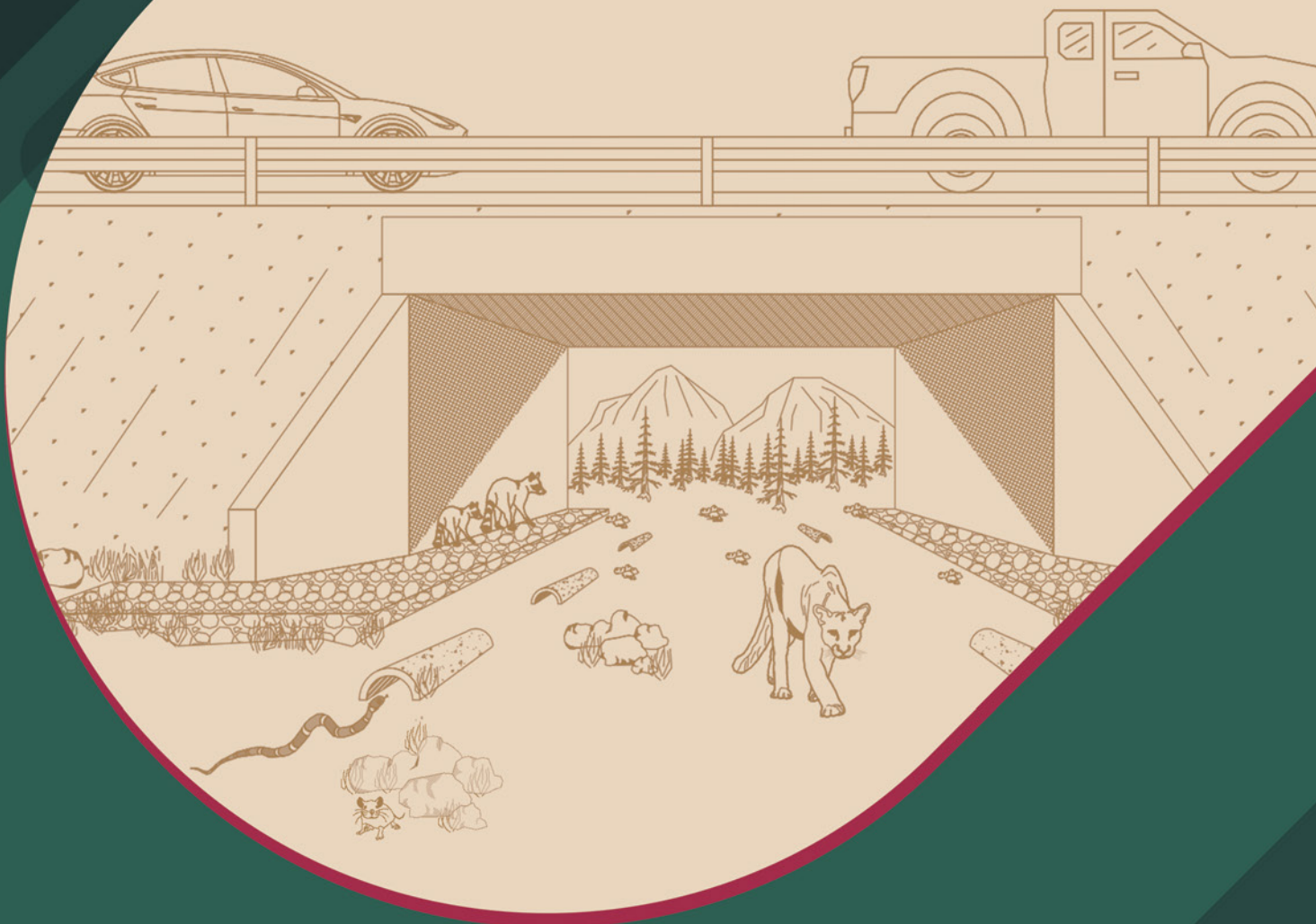




COMUNICACIONES

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

Subsecretaría de Infraestructura



MANUAL DE DISEÑO DE PASOS PARA FAUNA SILVESTRE EN CARRETERAS

Dirección General de Servicios Técnicos
Ciudad de México, noviembre 2020
Primera edición

MANUAL DE DISEÑO DE PASOS PARA FAUNA SILVESTRE EN CARRETERAS



COMUNICACIONES

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

MANUAL DE DISEÑO DE PASOS PARA FAUNA SILVESTRE EN CARRETERAS

ISBN: en trámite

Impreso en México
Printed in Mexico

NOVIEMBRE, 2020

Queda prohibido, salvo excepción prevista por la ley, la reproducción (electrónica, química, mecánica, óptica, de grabación o fotocopia), distribución, comunicación pública y transformación de cualquier parte de esta publicación –incluido el diseño de cubierta–, sin la previa autorización escrita de los titulares de la propiedad intelectual.

© SCT
Derechos reservados.



COMUNICACIONES

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

SUBSECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA

DIRECCIÓN GENERAL DE SERVICIOS TÉCNICOS

OBJETIVOS  **DE DESARROLLO
SOSTENIBLE**

MANUAL DE DISEÑO DE PASOS PARA FAUNA SILVESTRE EN CARRETERAS

Ing. Jorge Arganis Díaz Leal

Secretario de Comunicaciones y Transportes

Ing. Cedric Iván Escalante Sauri

Subsecretario de Infraestructura

Ing. Vinicio Andrés Serment Guerrero

Director General de Servicios Técnicos

Ing. Juan Manuel Mares Reyes

Director General Adjunto de Desarrollo Técnico

CONTENIDO

PRÓLOGO	11
ANTECEDENTES	13
INTRODUCCIÓN	21
OBJETIVOS DEL MANUAL	23
Objetivo General	23
Objetivos Particulares	23
ALCANCES	25
CAPÍTULO 1	
METODOLOGÍA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE PASOS PARA FAUNA SILVESTRE	27
Generalidades	28
1.1 Planificación	30
Identificación de las necesidades de permeabilidad de la infraestructura lineal hacia la fauna silvestre para la definición de estrategias	
1.2 Ubicación estratégica	31
Procedimientos, métodos, modelos y criterios recomendados para determinar la ubicación de cada tipo de paso para fauna silvestre	
1.3 Tipos de pasos para fauna silvestre	32
Diferentes tipos de pasos para fauna que se deberán considerar en la infraestructura lineal, en función de las especies que se requiere preservar y proteger	

1.4	Diseño	32
	Criterios generales para el diseño y construcción de pasos para fauna silvestre en infraestructura lineal	
1.5	Señalización vial	33
	Prevención al usuario de la infraestructura lineal sobre la presencia de fauna silvestre	
1.6	Monitoreo de pasos para fauna silvestre	34
	Metodología para que el operador de la infraestructura lineal pueda dar seguimiento a la eficacia y eficiencia de los pasos	
1.7	Conservación de pasos para fauna silvestre	34
	Recomendaciones para el mantenimiento de los pasos para fauna	

CAPÍTULO 2

PLANIFICACIÓN

IDENTIFICACIÓN DE LAS NECESIDADES DE PERMEABILIDAD DE LA INFRAESTRUCTURA LINEAL HACIA LA FAUNA SILVESTRE PARA LA DEFINICIÓN DE ESTRATEGIAS	35
Generalidades	35
2.1 Estrategia a seguir según las necesidades de permeabilidad	39
2.1.1 Ruta crítica	39
2.1.2 Descripción de los elementos que integran la ruta crítica	41

CAPÍTULO 3

UBICACIÓN ESTRATÉGICA

PROCEDIMIENTOS, MÉTODOS, MODELOS Y CRITERIOS RECOMENDADOS PARA DETERMINAR LA UBICACIÓN DE CADA TIPO DE PASO PARA FAUNA SILVESTRE	59
Generalidades	59
3.1 Ruta crítica	61

CAPÍTULO 4

TIPOS DE PASOS PARA FAUNA SILVESTRE

DIFERENTES TIPOS DE PASOS PARA FAUNA SILVESTRE QUE SE DEBERÁN CONSIDERAR EN LA INFRAESTRUCTURA LINEAL, EN FUNCIÓN DE LAS ESPECIES QUE SE REQUIERE PROTEGER

	99
Generalidades	99
4.1 Tipos de pasos	100
1) Paso Inferior para Fauna (PIFA)	103
2) Paso Superior para Fauna (PSFA)	104
3) Obra de drenaje adaptada para función mixta (paso de agua y paso para fauna)	106
4) Paso para fauna embebido en la infraestructura lineal	108
5) Paso aéreo para fauna arborícola	109
6) Obra para el paso y protección de fauna voladora	111
7) Paso temporal para invertebrados migratorios	117
8) Paso para fauna acuática	118
4.2 Obras complementarias en los pasos para fauna	122
4.2.1 Banquetas laterales o plataformas	122
4.2.2 Vallados perimetrales	123
4.2.3 Revegetación y colocación de refugios para fauna pequeña en los accesos a los pasos para fauna	124
4.2.4 Canaletas y pozas retenedoras de agua para diversificar las especies que usen el paso	125
4.3 Especificaciones particulares para diferentes grupos taxonómicos	125
4.4 Diagrama para toma de decisión sobre tipos de pasos a utilizar	131

CAPÍTULO 5**DISEÑO****CRITERIOS GENERALES PARA EL DISEÑO
Y CONSTRUCCIÓN DE PASOS PARA FAUNA
EN LA INFRAESTRUCTURA LINEAL**

135

Generalidades

135

5.1 Densidad de pasos para fauna

136

5.2 Selección del tipo de paso

138

**5.3 Dimensiones recomendadas, componentes y criterios
a considerar en los pasos para fauna**

140

1) *Paso Inferior para Fauna (PIFA)*

140

2) *Paso Superior para Fauna (PSFA)*

156

3) *Obra de drenaje adaptada para función mixta
(paso de agua y paso para fauna)*

174

4) *Paso para fauna embebido en la
infraestructura lineal*

196

5) *Paso aéreo para fauna arborícola*

210

6) *Obra para paso y protección de fauna voladora*

227

7) *Paso temporal para invertebrados migratorios*

233

8) *Paso para fauna acuática*

239

5.4 Obras complementarias en los pasos para fauna

248

CAPÍTULO 6**SEÑALIZACIÓN VIAL****PREVENCIÓN AL USUARIO DE LA INFRAESTRUCTURA LINEAL
SOBRE LA PRESENCIA DE FAUNA SILVESTRE**

257

Generalidades

257

6.1 Señales reglamentarias

259

6.2 Pictogramas adicionales

266

CAPÍTULO 7

MONITOREO DE PASOS PARA FAUNA

**METODOLOGÍA PARA QUE EL OPERADOR DE LA INFRAESTRUCTURA LINEAL
PUEDA DAR SEGUIMIENTO A LA EFICACIA Y EFICIENCIA DE LOS PASOS** 275

Generalidades 275

7.1 Datos a considerar para la selección de los pasos para fauna
silvestre que deben ser monitoreados 276

7.2 Análisis del ecosistema aledaño al paso para fauna silvestre 277

7.3 Identificación de la fauna silvestre presente en las inmediaciones
de la infraestructura lineal 286

7.4 Evaluación de la eficacia de los pasos para fauna silvestre 288

7.5 Evaluación de la eficiencia de los pasos para fauna silvestre 294

CAPÍTULO 8

CONSERVACIÓN DE PASOS PARA FAUNA SILVESTRE 299

CAPÍTULO 9

**DESARROLLO DE UN PROYECTO EJECUTIVO
DE PASOS PARA FAUNA SILVESTRE** 307

NOTAS FINALES 311

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 313

GLOSARIO 329

ÍNDICE DE FIGURAS 335

ÍNDICE DE TABLAS 347

ÍNDICE DE PLANOS 348



COMUNICACIONES

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

SUBSECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA

DIRECCIÓN GENERAL DE SERVICIOS TÉCNICOS

PRÓLOGO

México es reconocido a nivel mundial como uno de los países que ofrece grandes servicios ambientales a la humanidad. La relación de éstos es un tema ampliamente estudiado hoy en día debido a las diversas demostraciones de dependencia que existen entre el bienestar humano y el sistema natural, lo que ha contribuido a buscar el equilibrio entre el desarrollo humano y la preservación del ecosistema para ambas partes. El impacto de los servicios ambientales en la calidad de vida de los humanos a lo largo del tiempo es lo que nos lleva a la definición de desarrollo sustentable.

El concepto de desarrollo sustentable en la práctica toma su verdadero sentido en el trabajo multidisciplinario y transdisciplinario, ya que busca poder generar estrategias que beneficien y den soluciones responsables a todas las partes. A pesar del reto que esto implica es responsabilidad de todos intentar afrontar la realidad que asecha simplemente con el cambio climático, cuya amenaza es latente para la vida en la tierra y se origina de la separación entre el sistema natural y las prácticas antrópicas.

La construcción de carreteras y vías férreas en México y en el mundo es promotora del desarrollo económico y bienestar social porque permite potenciar el desarrollo y la integración regional; favorece la entrega oportuna de bienes y servicios, y reduce tiempos y costos en términos de comunicación. No obstante, también ha sido fuente de fragmentación de ecosistemas y la afectación de los servicios ambientales que en ellos se brindan. El desarrollo de la infraestructura incide en la interacción cercana de la fauna silvestre con la vida humana, con resultados negativos para el bienestar humano y el de los animales.

La sostenibilidad en carreteras y vías férreas se puede lograr si se priorizan los criterios de índole ambiental y social, por encima de los económicos, dando mayor énfasis en las medidas de prevención que en la mitigación de los daños. De esta manera se pueden trazar rutas y modernizar infraestructuras lineales ambiental y socialmente mejor planificadas, asumiendo el costo ambiental como una responsabilidad ante generaciones futuras.

La incidencia de fauna silvestre en carreteras y vías férreas constituye un problema tanto de seguridad vial como de daño a la biodiversidad. Lo anterior es resultado del impacto que estas obras ocasionan sobre la conectividad de los ecosistemas, por lo que la construcción de pasos para fauna se ofrece como una alternativa de solución que permite, por un lado, reducir el riesgo para los usuarios que implica la presencia de fauna silvestre en carreteras y vías férreas y, por otro, reduce la mortandad por atropello en la fauna silvestre de nuestros tan diversos e importantes ecosistemas.

Una estrategia dentro del concepto de salvaguardar la vida y restaurar o conservar la conectividad en los ecosistemas es la creación de corredores biológicos, y particularmente en el ámbito de las carreteras y vías férreas, los corredores biológicos artificiales.

El concepto de corredor biológico artificial en el mundo está siendo utilizado en la legislación y en la práctica por diversos países, pero sobre todo en América del Norte y países europeos, donde se han obtenido resultados positivos en la disminución

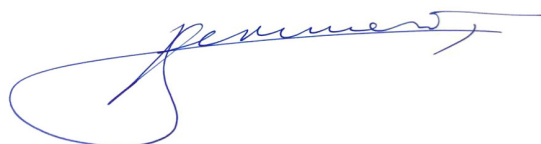
y prevención de las colisiones vehículo-animal, atropello de fauna silvestre y la fragmentación de los ecosistemas.

En México, cuando se habla de conectividad de los ecosistemas, generalmente se hace referencia a las grandes extensiones de tierra que requieren ser conservadas y su enfoque se plantea generalmente para las áreas naturales protegidas. Sin embargo, en términos de la conectividad artificial (mitigación de la fragmentación ocasionada por estructuras lineales) y la planificación de infraestructura en términos ambientales (prevención de impactos ambientales por la construcción de carreteras y vías férreas), las herramientas jurídicas y técnicas aún son incipientes, por lo que es importante fortalecer nuestro marco nacional con información técnica que permita el desarrollo de infraestructuras integradas al sistema natural donde se alojan, procurando principalmente la seguridad humana para las actuales y futuras generaciones, así como la conservación y aprovechamiento de los servicios ambientales y nuestra biodiversidad.

En este marco con visión a futuro, se inserta este Manual como herramienta de apoyo para contribuir al desarrollo sostenible del país. A través de la instalación de pasos para fauna en proyectos de infraestructura lineal, existentes y futuros, y del manejo integrado del paisaje y la conectividad de los ecosistemas que estos requieren; este Manual se alinea a los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030. El primero es el Objetivo 3 “Salud y Bienestar”, que tiene como meta reducir a la mitad el número de muertes y lesiones causadas por accidentes de tráfico en el mundo. El segundo es el Objetivo 11 “Ciudades y Comunidades Sostenibles”, que tiene como meta proporcionar acceso a sistemas de transporte seguros, asequibles, accesibles y sostenibles para todos y mejorar la seguridad vial. Finalmente, el tercero es el Objetivo 15 “Vida de ecosistemas terrestres” que tiene como meta principal proteger, restablecer y promover el uso sostenible de los ecosistemas terrestres, gestionar sosteniblemente los bosques, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras y detener la pérdida de la biodiversidad.

El presente Manual forma parte de las iniciativas en México para implementar la planificación de carreteras y vías férreas considerando maximizar la conservación de corredores biológicos, mediante la creación de corredores artificiales a manera de pasos para fauna silvestre, tomando como punto de partida la experiencia que han tenido otros países, y considerando la gran variabilidad ecosistémica de un país megadiverso como lo es México.

En los siguientes capítulos se especifica la metodología y las recomendaciones para la implementación de pasos para fauna silvestre en el diseño de carreteras y ferrocarriles, procurando conservar y restaurar, en lo posible, la conectividad de los ecosistemas que los rodean.



M.I. Vinicio Andrés Serment Guerrero

Director General de Servicios Técnicos

ANTECEDENTES

La seguridad vial y la pérdida de la biodiversidad en relación con los accidentes viales ocasionados por la fauna silvestre es un tema que preocupa a las naciones de todo el mundo. No en vano las discusiones sobre el tema se encuentran en diversos tratados internacionales donde muchos países suman esfuerzos para contrarrestar la pérdida en biodiversidad como el Convenio de la Diversidad Biológica de 1993.

Uno de los factores que en el mundo atenta contra la biodiversidad es la fragmentación de ecosistemas, ocasionada, por un lado, por acciones enfocadas a satisfacer las necesidades básicas de la población humana y, por otro, por el derroche y mala planificación en el aprovechamiento y uso de los recursos naturales.

La construcción de carreteras y vías férreas que contribuye con la fragmentación de los hábitats, también constituye en términos económicos y sociales un importante símbolo de unidad y muestra de progreso que facilita la movilidad y la capacidad logística para planificar y mejorar los servicios educativos, recreativos, alimentarios, de protección y de salud. No obstante, la movilidad y la salud, por mencionar algunos, no sólo deben ser vistos en términos antrópicos ya que, si bien la salud humana se favorece con la movilidad que ofrecen las vías de comunicación, en términos estrictos ésta depende de los servicios que proporcionan los ecosistemas, como resulta ser agua, aire y alimentos de calidad, los que a su vez dependen de la capacidad con la que los elementos del sistema natural se mantengan en conexión y por lo tanto en equilibrio.

El problema real en la conservación de los ecosistemas no sólo radica en el cambio de uso de suelo sino en el cambio derivado de una planificación estratégica que permita ahondar en los requerimientos necesarios para equilibrar las acciones antrópicas con su entorno natural y las acciones que se definen sin involucrar a los actores necesarios que ayuden a esclarecer estos requerimientos bajo todas las perspectivas (económicas, políticas, sociales y ambientales), para planificar de manera sostenible un proyecto.

Si bien el medio ambiente y el combate contra la fragmentación causada por la infraestructura lineal (entendiéndose en este documento como carreteras y vías férreas) es un tema mundial, es de esperarse que el combate contra la pérdida de la biodiversidad se enfrente de distintas maneras en los diferentes países y esto depende de las iniciativas o acuerdos nacionales e internacionales, las necesidades, los recursos, la política y la cultura con que cuente cada país.

El fin común y el paradigma planteado hoy en día para combatir a la fragmentación por la infraestructura lineal, y con ello contribuir con el combate al cambio climático, es la conservación y/o recuperación de la conectividad del ecosistema referida como i) la facilidad con la que los organismos se mueven entre elementos

particulares del paisaje, y ii) el número de conexiones entre parches de hábitat con relación al número máximo de posibles conexiones o interrelaciones de procesos clave dentro y entre ecosistemas.^{1,2}

En la construcción de la infraestructura lineal, en países desarrollados, la conectividad de los ecosistemas se trabaja desde la planificación de la red de infraestructura de transporte, buscando que ésta sea ecológicamente sostenible considerando un enfoque holístico,³ que integre factores sociales, económicos, políticos y ambientales. La prevención de los impactos ecológicos es fundamental y, en este sentido, forma parte crucial de las acciones que se deben considerar y tratar de evitar o minimizar, en la medida de lo posible, desde la etapa de planificación. Con lo anterior, la planificación de los corredores artificiales conformados por los pasos para fauna, forman parte de las medidas aplicadas hoy en día para proteger a los usuarios de la infraestructura lineal, aumentando la seguridad en éstas, además de mantener la conectividad de los ecosistemas y la movilidad de la fauna, y así evitar, por un lado, las colisiones vehículo-animal así como que los animales sean atropellados y, por otro, que el flujo de interacción continuo entre especies se vea interrumpido.

Para lograr una conectividad de los ecosistemas funcional con la construcción de los pasos para fauna, la experiencia a nivel mundial indica que es necesario contemplar las estrategias que se llevarán a cabo desde el momento de la planificación del proyecto, partiendo de considerar no sólo las zonas aledañas al trazado sino que debe tenerse en cuenta un contexto del manejo integral del paisaje y la conectividad ambiental. También es necesario considerar el proyecto dentro del marco de la red de infraestructura presente en el paisaje, así como los aspectos relacionados con el análisis de los usos de suelo actuales y los contemplados en los planes de desarrollo a nivel municipal, estatal o nacional, así como el Plan Nacional de Infraestructura, ya que estos factores determinan considerablemente la eficacia de cualquier medida de mitigación y compensación.

La conservación de la fauna silvestre no sólo se vincula con la protección *per se* de las especies, ya que su supervivencia depende en gran medida de las condiciones de su hábitat. El entorno donde se desenvuelven los animales conforma una cadena de interacciones abióticas y bióticas, constituyendo un todo con el sistema al cual pertenecen. Es así que cuando en las leyes de cualquier país se habla de su protección, se deben atender también las leyes y estrategias que protegen a su hábitat. De lo anterior se desprende la razón por la que en este Manual se hayan incluido temas relativos a la planeación y la conectividad de ecosistemas como punto medular para la ubicación de los pasos, a fin de brindar las mejores oportunidades para la movilización de la fauna silvestre y la conservación de los corredores biológicos por los que se

¹ Lindenmayer, D., y J. Fischer (2006). *Landscape change and habitat fragmentation: an ecological and conservation synthesis*.

² Pulsford, I., D. Lindenmayer, C. Wyborn, B. Lausche, G. L. Worboys, M. Vasiljević y T. Lefroy (2015). "Connectivity conservation management". *Protected area governance and management*: 851-888.

³ La tendencia de la naturaleza de usar una evolución creativa para formar un todo que es mayor que la suma de sus partes.

desplaza, optimizando los recursos de los proyectos. Es decir, lejos de dictar y señalar métricas sistemáticas para la ubicación de los pasos, con alta incertidumbre de su uso, se ha optado por señalar criterios de conectividad como punto de partida para definir los sitios donde deban ubicarse estos, maximizando su probabilidad de uso por los animales.

En este sentido, lo que se busca preferentemente es impulsar la prevención de los impactos ambientales producidos por la infraestructura lineal sobre la fauna silvestre como medida óptima y de menor costo que la implementación de mitigaciones o remediaciones costosas, ya que “prevenir es mejor que reparar”.⁴

El tema de la conectividad de los ecosistemas y los pasos para fauna es complejo, muchas prácticas y conceptos siguen siendo analizados y evolucionan mientras se van rompiendo paradigmas. Cada país, a partir de la experiencia de otros, implementa sus propias reglas para sus ecosistemas y especies, considerando las necesidades de su espacio y su contexto político y social; no hay nada asentado sobre la mesa, el tema es un concepto vivo pues evoluciona en la medida que se lleva a cabo la práctica y se adquiere mayor conocimiento. Por ello, el monitoreo, análisis y publicación de los datos del funcionamiento de los pasos para fauna es crucial para mejorar las técnicas, métodos y diseños que hoy en día son mayormente utilizados.

En México se ha hecho una gran labor dentro del marco normativo, firmando 77 tratados internacionales o acuerdos interinstitucionales en materia de medio ambiente, de los cuales en materia de biodiversidad se han firmado 23 instrumentos. Asimismo, cuenta con una amplia legislación en materia ambiental que protege tanto a la fauna como a su hábitat. Sin embargo, pese a los avances conceptuales, institucionales, jurídicos y de diseño de políticas sobre la gestión de la biodiversidad, en México aún se sigue sin comprender con claridad la dependencia que tienen las actividades económicas y el bienestar humano de la biodiversidad. Esto se debe a que la legislación ambiental en el país no necesariamente se maneja de manera holística y a la falta de vinculación de los diferentes instrumentos de planeación y manejo de recursos existentes. Sigue siendo un reto para el país la implementación efectiva de nuestros instrumentos en términos de gobernanza y economía de la conservación del ecosistema. Hoy en día el enfoque sistémico, la tendencia a la comprensión de los ecosistemas y el concepto de paisaje, cada día retoman mayor fuerza. En este plano, el concepto de conectividad del ecosistema asociado con la construcción de infraestructura lineal resulta ser aquí un pilar clave en la conservación de las especies, pues su estudio requiere del entendimiento del espacio como una unidad y en el caso de la construcción de infraestructura lineal, su entendimiento ayuda a plantear mejores estrategias para la protección de la vida, tanto de los humanos como de los animales.

En nuestro país se ha trabajado el tema de conectividad del ecosistema y corredores biológicos desde hace más de dos décadas, no obstante, aún está pendiente integrar la definición y regulaciones asociadas en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), ley marco en materia ambiental en el país. Se tienen avances

⁴ Iuell, B. (2003). “Wildlife and Traffic: a European handbook for identifying conflicts and designing solutions”, en The XXIIInd PIARC World Road Congress World Road Association-PIARC.

en algunas otras leyes,⁵ sin embargo, aún no contamos con un marco legal preciso y actual en lo referente a la protección y conservación de la conectividad de los ecosistemas y la fauna silvestre mediante la implementación de corredores biológicos.

En México, cuando se habla de conectividad de los ecosistemas se hace referencia a corredores biológicos naturales o corredores de grandes extensiones, cuyo objetivo recae en la conservación de dichos ecosistemas, pero en ninguna parte del sistema jurídico o de la planificación se establece de manera imperativa un marco regulatorio que establezca la construcción de corredores artificiales como pasos para fauna, como una medida para mitigar los impactos causados por la infraestructura lineal.

Hoy día se tienen iniciativas de ley que promueven regular estos temas en la construcción de infraestructura lineal, por lo que estas iniciativas, así como cualquier acción que de manera formal incentive llevar a cabo estas buenas prácticas en su contexto integral, estará dentro de las primeras acciones que suman a establecer un diálogo de común entendimiento entre humano-naturaleza y su conectividad.

En varios países de Europa y Norteamérica se tiene más estudiado el tema de los corredores biológicos artificiales, por ejemplo, dentro de los estados miembros de la Unión Europea (UE), su patrimonio natural incluye una gran diversidad de formas de vida y ofrece una gran variedad de ecosistemas, por lo que su política de cautela y prevención, marcan la pauta normativa del medio ambiente. Durante las últimas décadas han realizado notorios progresos en el campo del estudio y prevención de los impactos que las vías de transporte generan sobre la naturaleza y también sobre el cómo la falta de planificación pone en riesgo la seguridad vial a causa de las colisiones con la fauna. Debido a ello han creado redes de colaboración para estudiar este fenómeno reuniendo a un grupo de expertos activos sin fines de lucro, no gubernamental y no político; cuyo objetivo es proporcionar un espacio independiente, internacional e interdisciplinario para el intercambio y el desarrollo de conocimientos que buscan promover una infraestructura de transporte paneuropea segura y ecológicamente sostenible. Ello finalmente ha resultado en la elaboración de guías y manuales, así como mejores prácticas para la implementación de pasos para fauna, lo que en función de la versatilidad del tema, no permite que estas estructuras puedan ser normadas.

En general se puede decir que para la UE la política ambiental en términos de conectividad se encuentra fuertemente ligada en promover inversiones en infraestructura sostenible, con la intención de restaurar la salud de los ecosistemas, garantizar que las áreas naturales permanezcan conectadas y permitir que las especies prosperen en su hábitat natural, para que la naturaleza continúe proporcionando los beneficios y servicios ambientales que provee.

Los Países Bajos, por ejemplo, cuentan con más de 600 corredores artificiales, incluidos pasos superiores e inferiores para fauna a lo largo de carreteras transitadas. Uno de los proyectos más innovadores y no tan citados es el Puente Natural Zanderij Crailoo Hil-

⁵ La Ley General de Vida Silvestre (LGVS), promulgada en el año 2000, fue la primera en su tipo en abordar el tema de establecimiento de corredores biológicos en el marco de las Unidades de Manejo Ambiental (UMA's). La única ley de carácter federal que define los corredores biológicos y hace referencia al concepto de conectividad ecológica es la Ley General de Cambio Climático, promulgada el 6 de junio del 2012 (Art. 3º, Fracc. IX, Art. 29, Fracc. X y Art. 30, Fracc. XVIII).

versum, en Holanda, característico por conectar áreas naturales correspondientes con ambientes húmedos, donde se crearon las condiciones favorables para la preservación de anfibios. Este ejemplo es interesante ya que se establece a partir de un entendimiento claro de la función del ecosistema y por lo tanto de las necesidades de permeabilidad de la zona, en particular donde está inmersa la infraestructura lineal. Este corredor es parte del área natural protegida más grande dentro del país, el Veluwe, que consta de 1,000 kilómetros cuadrados de bosques y otros hábitats naturales. Es el primer paso para fauna en los Países Bajos que conecta áreas naturales húmedas. Las especies que se sabe usan estos corredores incluyen corzos, ciervos, jabalíes y el tejón europeo en peligro de extinción. Además de un nivel aparente de agua subterránea en la cubierta del puente, se ha construido una serie de piscinas a lo largo de todo el puente natural y las rampas. La idea era que estas medidas promovieran el uso del puente natural por parte de los anfibios, sobre todo aquellos en peligro de extinción.

La estructura de Hilversum constituye el paso para fauna más largo del mundo y ofrece a las criaturas de la localidad una alternativa segura para cruzar la carretera y cuerpos de agua, fusionando paisajes ecológicos (Figura 1). Este paso para fauna silvestre es un buen ejemplo de la unión entre los esfuerzos de conservación y la innovación arquitectónica, no obstante, es importante controlar el acceso al turismo, ya que se debe tener en cuenta que su presencia puede disuadir a los animales que pretenden hacer uso de dicho paso.⁶

Figura 1



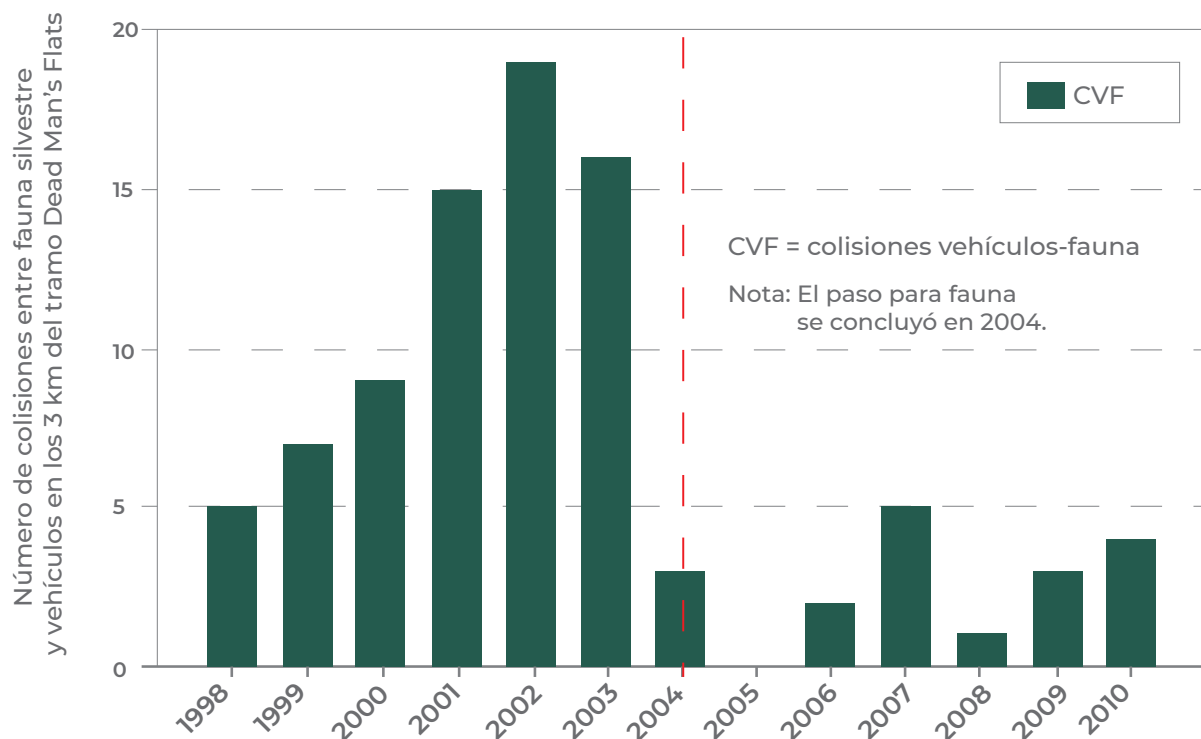
Paso para fauna en Natuurbrug Zanderij Crailoo (Holanda).⁶

⁶ Atlas Obscura (2020). *Natuurbrug Zanderij Crailoo, Hilversum, Netherlands*. Disponible en: <https://www.atlasobscura.com/places/natuurbrug-zanderij-crailoo>.

En el caso de Norteamérica, uno de los proyectos carreteros que desde los años setenta iniciaron la instalación de pasos para fauna innovadores y de mayor renombre en el mundo es la Trans-Canada Highway. Esta autopista hoy en día es reconocida como un ejemplo de clase mundial de desarrollo sostenible. Cuenta con 38 pasos deprimidos para fauna silvestre y seis pasos elevados, desde el Parque Nacional Banff hasta la frontera del Parque Nacional Yoho, en Canadá. Este proyecto cuenta con años de investigación que reúnen datos de al menos tres décadas recopilados tanto por las autoridades ambientales como por las encargadas del desarrollo carretero y Organizaciones No Gubernamentales (ONG's) que muestran los beneficios de los pasos para fauna, incluyendo un análisis del costo-beneficio que implicaba el pago de primas de seguros y reparación de daños por colisiones con fauna silvestre en esta carretera, sin considerar las pérdidas de vidas humanas que no tienen precio (Figura 2).

Particularmente para estas áreas donde el gran tamaño de las especies presentes en sus ecosistemas ocasionan fuertes impactos por las colisiones vehículo-animal, se ha observado que la implementación de los pasos para fauna y el cercado total de la carretera contribuye a salvar vidas humanas, preservar la integridad de los ecosistemas y al mismo tiempo genera un ahorro considerable en costos por colisiones (Tabla 1).

Figura 2



Número de colisiones entre la fauna silvestre y los vehículos por año a lo largo de un tramo de tres kilómetros en la Trans-Canada Highway, en la zona conocida como Dead Man's Flats. Investigación centrada en un Paso Superior para Fauna (PSFA) cuya construcción concluyó en 2004 (Lee, T. et al., 2012).⁷

⁷ Lee, T., A. P. Clevenger y R. J. Ament (2012). *Highway wildlife mitigation opportunities for the Trans Canada Highway in the Bow River Valley*. Report to Alberta Ecotrust Foundation, Calgary, Alberta.

Tabla 1

Especies de ungulados	Pre-construcción del paso para fauna	Costo Total por Atropello (dólares)	Post-construcción del paso para fauna	Costo Total por Atropello (dólares)
Venado	30	198,510.00	8	52,936.00
Ciervo	22	384,626.00	3	52,449.00
Alce	5	153,800.00	0	–
Borrego Cimarrón	5	33,085.00	0	–
Otros ungulados	9	–	4	–
TOTAL DE COLISIONES CON FAUNA Y COSTO TOTAL	72	770,021.00	15	105,385.00
TASA DE COLISIÓN ANUAL Y COSTO PROMEDIO ANUAL	11.8	127,975.32	2.5	17,564.00
REDUCCIÓN EN COSTO PROMEDIO ANUAL				86%

Número de colisiones entre la fauna silvestre y los vehículos antes y después de la construcción del Paso Superior para Fauna, así como los costos derivados por las colisiones, en un tramo de tres kilómetros en la Trans Canada Highway.⁸

Hoy en día existen muchos ejemplos de pasos para fauna en el mundo, sin embargo, partiendo de las lecciones aprendidas a nivel mundial se debe hacer énfasis en que los pasos para fauna son parte de la estrategia para prevenir y evitar la fragmentación de los ecosistemas, las colisiones vehículo-animal y la pérdida de la biodiversidad, además son una herramienta dentro del análisis de la conectividad de los ecosistemas que ayudan a reducir dichas problemáticas. En este sentido, si bien existen casos exitosos de pasos para fauna en el mundo, es porque los países han implementado dentro de sus estrategias de conservación una evaluación ambiental estratégica que acompaña a la planificación de los proyectos, así como otra serie de medidas integrales de protección, conservación, recuperación de corredores biológicos, áreas naturales protegidas y generación de conciencia social.

La implementación de los pasos para fauna implica la necesidad de evaluar desde la etapa de planificación las condiciones necesarias para mantener el hábitat y con ello reducir al mínimo acciones que conlleven a la compensación o a la mitigación. Es decir, el mejor paso para fauna es el que **no requiere ser construido**, pues implica que el proyecto de infraestructura ha sido diseñado de forma tal que evita la fragmentación de los ecosistemas y las consecuencias que derivan de ello.

Dado lo anterior, uno de los primeros criterios que debe ser establecido para mantener la conservación y la integridad de los ecosistemas es la identificación de la o las especies

⁸ Lee, T., A. P. Clevenger y R. J. Ament (2012). *Highway wildlife mitigation opportunities for the Trans Canada Highway in the Bow River Valley*. Report to Alberta Ecotrust Foundation, Calgary, Alberta.

focales, que son las especies prioritarias seleccionadas a partir de su importancia estratégica para la conservación de otras especies y su hábitat; su relevancia para el mantenimiento del hábitat, la estructura y el funcionamiento de un ecosistema o parte de él; su carácter endémico; cuando se trate de especies o poblaciones en riesgo y el alto grado de interés social, cultural, científico o económico existente respecto a ellas.⁹

Las necesidades de hábitat de las especies focales contribuirán a orientar los criterios de evaluación y las estrategias que deben ser implementadas en la construcción de la infraestructura lineal, esto también ayudará a disminuir los impactos ambientales causados y a identificar desde etapas tempranas las acciones que deberán ser implementadas para contribuir en la conservación de los ecosistemas.

Finalmente, para asegurar que los pasos para fauna cumplan como corredores biológicos artificiales, todas las medidas (preventivas, correctoras y compensatorias) deben ser objeto de control y seguimiento para evaluar su efectividad y eficiencia, y garantizar que se cumplan los estándares de calidad y se alcancen los objetivos para los que han sido diseñados y contruidos. La preservación de la fauna en este sentido no debe ser vista como un objeto a regular sino como un mecanismo vinculante con el medio en el que habita, de esta manera es más fácil entender que al intentar preservar a la fauna en realidad se protege al medio donde ésta cohabita y los servicios de los que nos beneficiamos todos los seres vivos.

Para el año 2030, en términos de conectividad, México se ha comprometido con el documento “Visión Nacional de Manejo Integrado del Paisaje¹⁰ y Conectividad” a trabajar de manera conjunta entre los sectores de la administración pública para construir de manera coordinada una política nacional de manejo integrado del paisaje y la conectividad de los ecosistemas que pueda verse plasmada en una Estrategia Nacional y con ello implementar más acciones de conservación de los ecosistemas en términos de conectividad.

Este Manual está dirigido a la planeación, diseño, construcción, operación y monitoreo de pasos para fauna, y considera no solamente un enfoque ecológico que tenga la intención de preservar o restaurar la conectividad ambiental sino permitir el desarrollo armónico de la infraestructura con el ambiente.

⁹ Para el caso particular de México así se establece en el Reglamento de la Ley General de Vida Silvestre, Artículo 5º, Fracciones XV y XVIII.

¹⁰En ecología el concepto de paisaje ha retomado gran fuerza, por ser un concepto que involucra a las actividades antrópicas y la funcionalidad ecosistémica dentro de su análisis. No obstante, el concepto es manejado a partir de una visión socioecológica y no como un término arquitectónico o estético. Se hace la aclaración ya que el concepto está siendo integrado hoy en día en distintos documentos nacionales dentro de la planificación de la sustentabilidad y como parte de las estrategias para combatir la fragmentación y favorecer la conectividad de los ecosistemas, el cambio climático, etc., pero desde la visión holística (el todo es más que la suma de las partes).

INTRODUCCIÓN

Este Manual forma parte de las iniciativas que la Secretaría de Comunicaciones y Transportes tiene contempladas para un mejor desarrollo y desempeño de infraestructura lineal (entiéndase en este documento como carreteras y vías férreas). Se busca que esta infraestructura se integre al entorno ambiental y social en donde quedan inmersas las vialidades, ya que eventualmente pasan a formar parte del paisaje ecológico de estos sistemas naturales.

México desde hace algunos años ha iniciado la construcción de obras que permiten el paso de animales silvestres a través de carreteras, también conocidos como pasos para fauna.¹¹ La construcción de dichos pasos ha obedecido a los altos costos en indemnizaciones, a los daños ocasionados a los usuarios de la infraestructura, a una obligación establecida a través de los estudios de impacto ambiental y las resoluciones de autorización por parte de las autoridades ambientales. Sin embargo, es necesario realizar un esfuerzo organizado y coordinado entre todas las autoridades responsables para que la implementación de un paso para fauna sea considerada desde la planeación del proyecto de una carretera o vía férrea.

La construcción de infraestructura lineal debe proporcionar un cruce seguro a la fauna silvestre y dar continuidad a la conectividad del ecosistema, con el objetivo de disminuir de manera significativa los accidentes viales relacionados con la fauna, mismos que se originan, en parte, debido a la limitación a la que se enfrenta la fauna silvestre para ejercer su movilidad una vez que es construida la infraestructura lineal; pero más importante aún es el resultado de la falta de una planificación estratégica o sustentable que integre las visiones sociales, económicas y ambientales en común entendimiento, siendo necesaria una mayor planificación de estas infraestructuras, potenciando sus bondades, pero minimizando su efecto ambiental adverso.

La planificación estratégica de la infraestructura lineal no confiere un tema que se pueda señalar de manera única en un manual de pasos a seguir para alcanzar cierta meta, ya que la elaboración del análisis surge en la medida del diálogo entre diferentes disciplinas que aportan su conocimiento, y depende del proyecto (los objetivos) y de las necesidades y particularidades de cada zona donde se pretende construir la infraestructura. Lo fundamental es que el análisis debe considerar el costo-beneficio de las acciones elegidas por los diferentes actores, y a partir de éstas tomar una decisión.

¹¹ Estructura transversal al camino destinada a mantener la conectividad entre ecosistemas fragmentados por la construcción de carreteras o ferrocarriles, que permiten el cruce de la fauna silvestre, aumentando la permeabilidad de la infraestructura.

La protección de la vida humana y la vida silvestre es el principal objetivo promotor de este Manual, cuyas acciones giran en torno a la conservación de la conectividad ecosistémica, separando el movimiento de los vehículos del movimiento de los animales, y así permitir que ambos se realicen en un marco de seguridad y bienestar para lograr proyectos viales cada vez más sustentables.

OBJETIVOS DEL MANUAL

Objetivo general

El presente Manual tiene por objeto establecer los criterios específicos para llevar a cabo la planificación, ubicación, diseño y construcción de pasos para la fauna silvestre en carreteras y vías férreas. Asimismo, tiene la finalidad de que la Normativa de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes cuente con los criterios específicos y uniformes que permitan el diseño y construcción de dichos pasos en la infraestructura lineal.

Objetivos particulares

- 1) Brindar las bases teóricas, criterios y recomendaciones para el uso de herramientas tecnológicas que permitan la planeación de infraestructura lineal y pasos para fauna, maximizando la permeabilidad para la fauna silvestre al minimizar la fragmentación y pérdida de conectividad de los ecosistemas a un nivel regional.
- 2) Proporcionar las bases teóricas, criterios y recomendaciones para el uso de algunas de las herramientas tecnológicas que permitan identificar zonas críticas para la colocación de pasos para fauna silvestre de forma estratégica, con el fin de maximizar su probabilidad de uso y optimizar recursos.
- 3) Mostrar las alternativas de pasos para distintos tipos de vertebrados e invertebrados terrestres, acuáticos, arborícolas y voladores, que corresponden a los pasos para fauna mayormente diseñados y contruidos para este fin a nivel mundial, indicando las particularidades requeridas por los distintos grupos de fauna.
- 4) Presentar diseños generales de tipos de pasos para fauna adaptados a las condiciones climáticas y tamaños de la fauna en México, para orientar la elaboración de proyectos y su construcción.
- 5) Denotar la señalización que coadyuva al usuario a extremar precauciones debido a la presencia de fauna silvestre.
- 6) Plantear algunos de los métodos para la evaluación de la eficiencia y eficacia de los pasos para fauna en infraestructura lineal, con la metodología y resultados de un estudio de caso realizado en tres diferentes carreteras mexicanas.
- 7) Brindar recomendaciones para la conservación de los pasos para fauna en la infraestructura lineal.



COMUNICACIONES
SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

SUBSECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA

DIRECCIÓN GENERAL DE SERVICIOS TÉCNICOS

ALCANCES

Integrar los criterios, las mejores prácticas nacionales e internacionales, normatividad nacional en materia de preservación de la fauna silvestre, así como todos aquellos aspectos que se puedan convertir en especificaciones para determinar la ubicación, densidad y diseño de pasos para fauna silvestre en carreteras y vías férreas, tomando en cuenta lo siguiente:

- 1) **CRITERIOS Y RECOMENDACIONES PARA LA PLANIFICACIÓN.** Considerar las necesidades de permeabilidad de la infraestructura lineal hacia la fauna y la definición de estrategias para conseguirlo mediante el uso de ciertas herramientas tecnológicas.
- 2) **PROCEDIMIENTOS Y METODOLOGÍAS PARA ORIENTAR LA UBICACIÓN ESTRATÉGICA DE LOS PASOS.** Señalar los procedimientos, metodologías, modelos y/o criterios más comúnmente utilizados y recomendados para simular el comportamiento de la fauna y determinar la ubicación de cada tipo de paso.
- 3) **PRINCIPALES TIPOS DE ESTRUCTURAS PARA EL PASO Y PROTECCIÓN DE FAUNA SILVESTRE.** Indicar los distintos tipos de pasos para fauna terrestre, acuática, arborícola y voladora que se deberán considerar en las infraestructuras lineales, así como particularidades a tomar en consideración para cada grupo de animales (taxa) en función de las especies que se requiere preservar o proteger.
- 4) **DISEÑO DE LOS DIFERENTES TIPOS DE PASOS Y PROTECCIÓN DE FAUNA.** Presentar los diseños generales con los criterios y dimensiones recomendadas, sus componentes y obras complementarias para cada tipo de paso, considerando sus características en función de las particularidades de los diferentes grupos de animales en México.
- 5) **SEÑALIZACIÓN.** Incluir pictogramas y especificaciones para la señalización vial que se requiere instalar para prevenir al usuario sobre la presencia de fauna silvestre.
- 6) **MONITOREO DE PASOS PARA FAUNA.** Presentar la metodología más utilizada para el monitoreo del uso de los pasos para fauna y la estimación de la eficiencia y eficacia de estas estructuras en permitir el flujo de fauna silvestre, tomando como punto de partida un estudio de caso de monitoreo de estructuras en tres carreteras mexicanas.
- 7) **CONSERVACIÓN DE PASOS PARA FAUNA.** Se brindan recomendaciones para el mantenimiento periódico y rutinario de los pasos para fauna en infraestructuras lineales.



COMUNICACIONES
SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

SUBSECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA

DIRECCIÓN GENERAL DE SERVICIOS TÉCNICOS

CAPÍTULO 1

METODOLOGÍA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE PASOS PARA FAUNA SILVESTRE

El diseño y construcción de infraestructura lineal como carreteras y vías férreas contribuye con el gran desarrollo social y económico en nuestro país, logrando así la comunicación entre las grandes metrópolis y los poblados grandes y pequeños. Esto trae consigo el desplazamiento de personas a diversas partes del país y el extranjero, así como el traslado de materias primas, víveres, combustibles, etc. Desafortunadamente estos beneficios pertenecientes al desarrollo de una sociedad trae consigo grandes impactos en el ambiente, afectando de una manera directa a los ecosistemas que conforman nuestro país.

Para el diseño y construcción de carreteras y vías férreas se cuenta con medidas desarrolladas para el cuidado y conservación del medio ambiente, planteadas para estos proyectos en sus estudios de impacto ambiental, las cuales ayudan a la mitigación de los daños. Sin embargo, algunas de estas medidas son solamente enunciativas y carecen de los lineamientos técnicos para su adecuada implementación, entre las que podemos identificar a los pasos para fauna. Motivo de ello, en este Manual se busca proporcionar los criterios, recomendaciones y parámetros de diseño que permitan la elaboración de proyectos ejecutivos y la construcción de estos pasos bajo consideraciones ambientales, que requieren ser adecuados de forma específica para cada proyecto de infraestructura lineal.

El presente Manual parte del análisis de las experiencias en el diseño y construcción de pasos para fauna implementados en México y en el mundo, analizando las necesidades, requisitos y particularidades de los principales grupos taxonómicos de fauna silvestre de nuestro país, con relación a la funcionalidad de los pasos para fauna y de las obras de drenaje presentes en las carreteras que, sin así haberlo considerado en un inicio, cumplen esa doble función.

También a partir del análisis de la situación legal y normativa en materia de pasos para fauna en México y la existente en otros países, este Manual proporciona los elementos técnicos, de ingeniería y biológicos, para una adecuada implementación de estos pasos, con lo que se busca maximizar su eficiencia y efectividad, minimizando sus costos de diseño y construcción.

En este contexto, el Manual va dirigido a establecer los criterios, especificaciones y recomendaciones de pasos para fauna debidamente planificados y diseñados, de acuerdo con las características que se presenten en la zona donde se pretendan construir los proyectos carreteros y ferroviarios, así como las propias características de construcción de dichos proyectos y la fauna de cada sitio y sus requerimientos, lo

que permitirá mitigar la problemática de colisiones vehículo-animal y atropello de fauna silvestre, así como dar continuidad al flujo de interacción constante entre las especies animales, reduciendo el efecto de barrera al desplazamiento que implican estas infraestructuras lineales.

Generalidades

Los pasos para fauna son estructuras hechas por el hombre que permiten el paso a los animales silvestres en la zona donde cruza la infraestructura vial (carretera o ferrocarril). Estas estructuras pueden ser tan grandes como túneles, viaductos y puentes o de menor tamaño como las alcantarillas. Los pasos más conocidos son los denominados “ecoductos”, utilizados en países como Argentina, Canadá, Australia y EUA, que principalmente están diseñados para animales grandes que forman rebaños. Asimismo, pueden ser estructuras tan pequeñas como túneles embebidos en la estructura del pavimento para el paso de anfibios y reptiles; escaleras de agua para peces migratorios; túneles y drenajes para mamíferos pequeños, como nutrias, erizos y tejones; corredores de vegetación para mariposas, abejas y aves; pasos aéreos para los mamíferos arbóreos como monos y ardillas, entre otras.

Para integrar el presente Manual se ha considerado una metodología integrada por siete fases mediante las cuales es posible tomar en cuenta de forma oportuna, los mejores criterios y especificaciones para analizar la necesidad de un paso para fauna, así como definir su ubicación, densidad y diseño. Estas fases se enuncian a continuación:

- 1) Planificación.
- 2) Ubicación estratégica.
- 3) Tipos de pasos para fauna silvestre.
- 4) Diseño.
- 5) Señalización vial.
- 6) Monitoreo de pasos para fauna.
- 7) Conservación de pasos para fauna.

La planeación, ubicación, tipificación y diseño de un paso para fauna bajo estas etapas, permitirá maximizar las probabilidades de su uso, minimizando los riesgos de accidentes viales y optimizando los recursos para su construcción, dirigiendo adecuadamente las acciones a implementar y sus costos asociados.

Como se mencionó anteriormente, para la realización del presente Manual y la definición de las etapas consideradas, fue necesario analizar el estado que guarda la normatividad nacional respecto de normas, reglamentos y leyes en donde se incluyan lineamientos referentes a la protección hacia la fauna silvestre, la conservación de la conectividad de los ecosistemas o la prevención de la fragmentación de éstos, así como la normatividad asociada al diseño y construcción de infraestructura lineal.

Asimismo, se identificaron algunos instrumentos y acciones de protección a especies focales y casos de estudio a nivel nacional en donde han sido diseñados o construidos pasos para fauna silvestre en carreteras.

La información permitió identificar que, si bien en la normatividad nacional no existen en particular especificaciones técnicas en materia de diseño y construcción de pasos para fauna, ni la obligatoriedad para ello, estos pasos se proponen y quedan obligados a nivel de cada proyecto individual mediante el resolutivo de autorización en materia de impacto ambiental, pues generalmente es en la Manifestación de Impacto Ambiental (MIA) donde se indica el análisis de la implementación de los pasos para fauna.

Es importante mencionar que para una mayor conservación de la biodiversidad en infraestructuras lineales en México se requieren al menos tres acciones fundamentales: i) reducir la fragmentación ocasionada por la infraestructura lineal, al realizar una planeación integral que evite romper la conectividad de los ecosistemas; ii) promover la conectividad de ecosistemas a través de acciones de reforestación y restauración ecológica; iii) brindar alternativas de cruce seguro para la fauna silvestre mediante una mayor implementación de pasos para fauna y vallados en la infraestructura lineal del país, tanto en proyecto como existentes.

La revisión bibliográfica de carreteras mexicanas donde se han construido pasos para fauna ha permitido analizar las acciones realizadas en distintos estados de la república, tanto de construcción como de monitoreo de estos pasos, y concluir que su implementación ya forma parte de una realidad innegable y creciente en nuestro país.

Se identifica que la conservación de la conectividad biológica mediante acciones combinadas de reforestación, restauración y construcción de pasos para fauna son una realidad cotidiana en la mayoría de los países europeos y norteamericanos; siendo además una tendencia creciente en todo Latinoamérica.

El cambio climático y los efectos que éste ha reflejado en diversas partes del mundo ha hecho que la humanidad retome con mayor fuerza la conservación de los ecosistemas y de la vida silvestre. Si bien los pasos para fauna se construyen en carreteras desde la década de los sesenta en países desarrollados, no había sido tan generalizada a nivel mundial hasta hace apenas una veintena de años; desarrollo que ha venido acompañado de un marco legislativo tanto a nivel individual de varios países, como a nivel colectivo, para el caso de la comunidad económica europea. En países como México, la construcción de pasos para fauna se ha solicitado en los estudios de impacto ambiental desde el inicio de los años noventa; no obstante, se identifica que, a nivel del país, aún son pocos los casos en los que se han implementado, por lo que este Manual resultará de gran utilidad para regularizar, orientar y reglamentar el diseño y construcción de estos pasos en la infraestructura lineal de nuestro país.

En los siguientes apartados se describe la metodología bajo los criterios, especificaciones y recomendaciones que se deben considerar en cada una de las fases para la implementación de pasos para fauna en la infraestructura lineal.

1.1 Planificación

Identificación de las necesidades de permeabilidad de la infraestructura lineal hacia la fauna silvestre para la definición de estrategias

La planificación de un proyecto de infraestructura lineal debe incluir alternativas de ruta que minimicen los efectos ambientales adversos y maximicen las bondades y beneficios del proyecto. En esta fase del Manual se identifica la necesidad de incrementar la permeabilidad de la infraestructura lineal hacia la fauna, en función del entorno en donde se ubique. Por permeabilidad a la fauna nos referimos a que la infraestructura permita la mayor movilización posible de animales silvestres en sentido perpendicular al trazo del proyecto, bajo condiciones seguras, tanto para los usuarios de la infraestructura lineal, como para la fauna silvestre.

En este apartado se integran los procedimientos y criterios que hoy en día se utilizan con mayor frecuencia para definir si la infraestructura lineal requiere o no la implementación de pasos para fauna, así como la identificación de tramos críticos,¹² en donde se deberá asegurar la continuidad de la movilidad de la fauna silvestre. Se inicia con la delimitación del área de estudio, identificando los criterios morfológicos y de ecología del paisaje con los que se definirán los límites del área por estudiar. A partir de imágenes satelitales y cartas temáticas en materia de usos del suelo y vegetación, así como la carta topográfica regional, se identifica si el trazo de la infraestructura lineal requiere la implementación de pasos para fauna.

En caso de resultar afirmativo lo anterior se requiere identificar los tramos críticos, para lo que se considerarán elementos de ecología del paisaje,¹³ macizos con vegetación natural, distintos tipos de usos del suelo, los diferentes grupos taxonómicos de fauna potencialmente presentes en la región, posible presencia de especies protegidas por la NOM-059-SEMARNAT-2010¹⁴ y su anexo (modificaciones en 2019); así como sus áreas de distribución potencial (información cartográfica de fuentes oficiales, estudios y publicaciones académicas o estudios previos), corredores biológicos, hábitats conservados; además de la presencia y formas de desplazamiento de especies focales.¹⁵

Se indican además las técnicas o métodos a utilizar para analizar la distribución potencial de especies focales a partir de criterios de hábitat preferencial, la fragmentación y conectividad existente de los ecosistemas, utilizando bases de datos disponibles como por ejemplo las de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), con la finalidad de definir las zonas relevantes como hábitat de fauna y ecosistemas fragmentados que requieran recuperar su conectividad, así como zonas o tramos críticos donde deberán considerarse pasos para la fauna silvestre.

¹²Tramos críticos o zonas negras se refiere a tramos del proyecto que cruzan por zonas importantes para la conservación de la conectividad biológica y que el proyecto está fragmentando.

¹³Corredores, parches, matriz, entre otros elementos propios de esta disciplina.

¹⁴Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo.

¹⁵Una especie focal es una especie que produce un efecto desproporcionado sobre su medio ambiente en relación con su abundancia. Tales especies afectan a muchos otros organismos en un ecosistema y ayudan a determinar los tipos y números de otras varias especies en una comunidad.

1.2 Ubicación estratégica

Procedimientos, métodos, modelos y criterios recomendados para determinar la ubicación de cada tipo de paso para fauna silvestre

Las oportunidades de protección a la fauna silvestre mediante la implementación de pasos para fauna en la infraestructura lineal requieren ser maximizadas; es decir, optimizar costos y recursos para obtener la máxima eficacia y eficiencia. Por ello resulta de gran importancia incluir recomendaciones referentes a los métodos más utilizados para realizar las modelaciones y análisis necesarios para definir los sitios de ubicación de cada tipo de paso, así como su cantidad y criterios para distanciar entre pasos para fauna similares.

A partir de la anterior información, los usuarios de este Manual cuentan con los elementos para poder definir con cierta precisión, las zonas donde debe considerarse la ubicación de estos pasos, a partir de los criterios de conectividad ecológica y la continuidad de corredores biológicos.

Por lo anterior, se señalan los procedimientos, metodologías, modelos y criterios recomendados para determinar la ubicación de cada tipo de paso para fauna, de tal manera que se puedan maximizar sus posibilidades de uso por la fauna silvestre y a la vez, brinden una permeabilidad adecuada a la infraestructura para contrastar el impacto del efecto de barrera a la dispersión de la fauna.

En este capítulo del Manual se indica la manera como se deben analizar los sectores de concentración de atropellos en algún tramo de la infraestructura lineal, la obtención de índices de atropello y la realización de cartas de riesgo de atropello o, en su caso, accidentes ocasionados por interacción humana con fauna silvestre, como parte de la información relevante para definir la ubicación de cada paso para fauna en un proyecto de infraestructura lineal. Se sugiere el análisis a través de modelos espaciales bajo ciertos criterios o procedimientos, para determinar las áreas o tramos de la carretera en donde se deba recuperar la conectividad de los ecosistemas mediante la instalación de pasos para fauna y la reforestación, o la densificación de la vegetación, así como la restauración ecológica que deba acompañar estos pasos para lograr una conectividad ecológica adecuada.

Lo anterior debido a que la construcción del paso para fauna como una medida aislada sin considerar la prolongación de macizos de vegetación, corredores biológicos y otras acciones, no resultaría en su totalidad ser funcionalmente adecuada.

También se incluyen algunas recomendaciones para la modelación de la conectividad de los ecosistemas, donde se identifican los sitios en los cuales deban construirse pasos para fauna y acciones a realizar, por ejemplo, reforestación, densificación vegetal, restauración ecológica, preservación, etc., para la recuperación de corredores biológicos.

Para esta modelación se señalan algunos criterios y recomendaciones para poder aplicar modelos espaciales e identificar la conectividad entre hábitats y por ende de los corredores biológicos, a fin de que se puedan modelar escenarios antes y después de implementar los pasos para fauna. Con ello verificar que la conectividad existente se mantenga y mejore en la infraestructura lineal y con los pasos establecidos.

1.3 Tipos de pasos para fauna silvestre

Diferentes tipos de pasos para fauna que se deberán considerar en la infraestructura lineal, en función de las especies que se requiere preservar y proteger

Una vez identificados los tramos críticos es importante visualizar los tipos de pasos que serán requeridos, así como la cantidad de éstos, en función de las especies de fauna silvestre presentes en el área de estudio. Para ello se deben identificar y cuantificar las especies que potencialmente requerirían el paso a través de la carretera considerando sus áreas de distribución, preferencias de hábitat, condiciones de movilidad y, en lo posible, abundancias relativas o tamaños poblacionales de las especies clave, así como la presencia de especies protegidas por la NOM-059-SEMARNAT-2010.

A fin de ofrecer alternativas sobre distintos tipos de pasos para fauna que puede llegar a requerir la infraestructura lineal en cada tramo crítico, en este capítulo se presentan ocho tipos de pasos para fauna, definidos a partir de la literatura especializada, mostrando diversos ejemplos de pasos que han sido construidos o propuestos para carreteras o ferrocarriles en distintas partes del mundo, incluyendo a México.

En este capítulo se describen los siguientes tipos de pasos para fauna.

1. Paso Inferior para Fauna (PIFA).
2. Paso Superior para Fauna (PSFA).
3. Obra de drenaje adaptada para función mixta (paso de agua y paso para fauna).
4. Paso para fauna embebido en la infraestructura lineal.
5. Paso aéreo para fauna arborícola.
6. Obra para el paso y protección de fauna voladora.
7. Paso temporal para invertebrados migratorios.
8. Paso para fauna acuática.

La cantidad de pasos a colocar en el tramo crítico obedecerá al tamaño del tramo, especies focales y protegidas por la normatividad, y características topográficas, hidráulicas y geométricas de la propia infraestructura lineal, por lo que, para el diseño de los pasos para fauna, se requiere el proyecto ejecutivo de la infraestructura lineal.

1.4 Diseño

Criterios generales para el diseño y construcción de pasos para fauna silvestre en infraestructura lineal

El diseño de cada paso para fauna requiere adaptarse a las particularidades del proyecto en cuestión, del sitio, dimensiones, materiales, tipos de vegetación, necesidades de vallado o cercado inductor, entre otras. Por tales motivos, en este capítulo del Manual se proporcionan los criterios, especificaciones y recomendaciones que se deben considerar para tomar las mejores decisiones al momento de diseñar cada uno de los pasos para fauna en la infraestructura lineal existente o en proyecto.

En este capítulo se presentan los diseños “tipo” con las dimensiones recomendadas para cada variante de paso que aumentan la probabilidad de uso por parte de la fauna silvestre; las recomendaciones de adaptación vegetal para cada tipo de paso que facilita el aprendizaje y uso de éstos por parte de la fauna silvestre; así como las obras complementarias como cercas, barreras, de canalización, refugios, ambientación y paisaje para la correcta operación de los pasos para fauna. Lo anterior se presenta en planos orientativos, y será el proyecto ejecutivo donde se defina a detalle cada paso para fauna.

Se presentan los criterios, consideraciones y recomendaciones para los siguientes tipos de pasos para fauna.

1. Paso Inferior para Fauna (PIFA).
2. Paso Superior para Fauna (PSFA).
3. Obra de drenaje adaptada para función mixta (paso de agua y paso para fauna).
4. Paso para fauna embebido en la infraestructura lineal.
5. Paso aéreo para fauna arborícola.
6. Obra para el paso y protección de fauna voladora.
7. Paso temporal para invertebrados migratorios.
8. Paso para fauna acuática.

1.5 Señalización vial

Prevención al usuario de la infraestructura lineal sobre la presencia de fauna silvestre

La incidencia de las colisiones vehículo-animal y el atropello de fauna silvestre se estima que tiene al menos tres componentes: i) la presencia de la infraestructura lineal en el paisaje natural; ii) la velocidad del tránsito, y iii) la densidad de circulación de vehículos (Tránsito Diario Promedio Anual [TDPA]); principalmente los que circulan en el ocaso, durante la noche y el crepúsculo, que es cuando los mamíferos terrestres presentan mayor movilidad.

Motivo de lo anterior, surge la necesidad de prevenir a los usuarios de la infraestructura lineal sobre tramos con incidencia de fauna silvestre para que reduzcan su velocidad y estén alertas, a fin de que puedan, sin ponerse en riesgo, evitar la colisión vehículo-animal y el atropello de fauna. Por lo anterior es de gran importancia implementar la señalización vial necesaria en los tramos donde se requiera extremar precauciones por la presencia de fauna silvestre y evitar accidentes viales que pudieran resultar en fatalidades.

Hoy en día, la literatura indica que la señalización convencional referente a la fauna silvestre no ha mostrado ser eficaz para lograr la reducción de la velocidad de los automóviles y, por ende, los atropellos de fauna y las colisiones vehículo-animal. Motivo por el cual en este capítulo se proponen algunas acciones complementarias a la señalización vertical con el objetivo de brindar mayor protección al usuario y a la fauna nativa.

Este capítulo se basa en el *Manual de señalización vial y dispositivos de seguridad 2014* de la SCT, así como en los pictogramas autorizados por la Dirección General de Servicios Técnicos para representar a las especies en la señal preventiva SP-48.

1.6 Monitoreo de pasos para fauna silvestre

Metodología para que el operador de la infraestructura lineal pueda dar seguimiento a la eficacia y eficiencia de los pasos

Se presentan los métodos y procedimientos para el seguimiento y evaluación del funcionamiento de los pasos, con algunas alternativas para el monitoreo y estimación de la eficiencia (capacidad para realizar o cumplir adecuadamente una función) de cada paso, así como el monitoreo del número de atropellos y estimación de índices que permitan verificar la eficacia (capacidad para producir el efecto deseado, sea éste la reducción en el atropello y mortandad de organismos silvestres) de las medidas implementadas; también se presentan criterios para la toma de decisiones y acciones que permitan adecuar o mejorar las medidas para lograrlo.

Resulta de gran utilidad para desarrollar este capítulo incluir ejemplos de un estudio de caso, con la experiencia obtenida a partir de dos meses de monitoreo de pasos para fauna en tres carreteras mexicanas, así como las experiencias en otras carreteras a nivel nacional e internacional, ya que conocer dichas acciones facilitará el aplicar adecuadamente los procedimientos para seguimiento de la actividad de la fauna, así como interpretar resultados a la luz de otros proyectos, particularmente en México.

Se incluyen algunas recomendaciones para implementar el registro de cruce de fauna por los pasos y los atropellos detectados, para que, en la práctica, los operadores de la infraestructura lineal al monitorear éstas, puedan recopilar los datos y se integren en una base de datos general del país, para su aprovechamiento. Dicha información permitirá mejorar el diseño e implementación de los pasos para fauna, y eventualmente mantener la actualización continua del presente Manual a partir de la experiencia generada, para una mayor optimización de tiempos y recursos.

1.7 Conservación de pasos para fauna silvestre

Recomendaciones para el mantenimiento de los pasos para fauna

Se proponen un conjunto de acciones esenciales para mantener las cualidades operativas de los pasos para fauna o estructuras adaptadas para funcionar como tales en infraestructuras lineales. Se señalan acciones de rehabilitación o sustitución de elementos que componen el paso para fauna con base en trabajos de conservación anual. Además del mantenimiento de la vegetación y las plantaciones realizadas, particularmente durante los primeros años, y la reposición de ejemplares de plantas que puedan resultar dañados o que no sobrevivan al trasplante.

Se hace hincapié en la importancia de que estos pasos no deben ser utilizados para cruce de vehículos, maquinaria agrícola, ganado o personas, pues ello puede traducirse en el desuso del paso por la fauna silvestre.

CAPÍTULO 2

PLANIFICACIÓN

IDENTIFICACIÓN DE LAS NECESIDADES DE PERMEABILIDAD DE LA INFRAESTRUCTURA LINEAL HACIA LA FAUNA SILVESTRE PARA LA DEFINICIÓN DE ESTRATEGIAS

Generalidades

Entre los impactos que producen las redes de infraestructuras lineales (entiéndase en este documento como carreteras y vías férreas) sobre la fauna silvestre y su relación con la población humana se encuentran, por un lado, las muertes y lesiones causadas a la población humana por colisiones vehículo-animal y, por el otro, la mortalidad por atropellos de fauna silvestre y el efecto de barrera ocasionado para la movilidad de la fauna.

Estas problemáticas tienen su origen, en parte, debido a la limitación a la que se enfrenta la fauna silvestre para ejercer su movilidad una vez que es construida la infraestructura lineal, pero más importante aún, debido a la falta de una planificación estratégica o sostenible¹⁶ de la infraestructura, elaborada a partir de la integración de las visiones sociales, económicas y ambientales en común entendimiento, que ayuden a planificar su construcción de una forma integral, minimizando su efecto ambiental y social adverso.

La planificación estratégica de la infraestructura lineal no confiere un tema que se pueda señalar de manera única en un manual de pasos a seguir para alcanzar cierta meta, es decir, no se tienen reglas definidas o imperativas establecidas, ya que la elaboración del análisis surge en la medida del diálogo entre las diferentes disciplinas que aportan su conocimiento dependiendo del problema que se tiene que enfrentar (los objetivos) y de las necesidades y particularidades de cada región donde se pretende construir. Lo fundamental es que el análisis integral debe considerarse incluso para realizar el estudio de costo-beneficio dentro de los lineamientos para inclusión en cartera de proyectos y programas de inversión de la Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP), y a partir de estos estudios poder tomar mejores decisiones para un desarrollo de proyectos, incluyente de los principales temas.

¹⁶ Entendiéndose como el desarrollo que busca incorporar en el análisis un enfoque social, político, económico y ambiental de común entendimiento entre las partes.

En este punto es necesario aclarar que dado el carácter socioambiental del tema que compete al presente Manual, la responsabilidad hoy en día es de todos, y las acciones que se toman a la fecha recaen en la buena voluntad de quien las propone o del grupo multidisciplinario, comprometido con la sociedad y el medio ambiente, que lleve a cabo dichas acciones. No obstante, es un hecho, revelado en distintos estudios y en distintas experiencias, que existe la necesidad de tomar acciones pertinentes para resolver las dos problemáticas antes mencionadas.

Es necesario introducir el principio de prevención y el de precaución desde el momento de la concepción de la infraestructura lineal. De aquí deriva el éxito de la permeabilidad que puede o no tener dicha infraestructura hacia la fauna silvestre, ello permitirá evitar, reducir o compensar los impactos negativos en los humanos y en la fauna en todas las etapas del proyecto.

Se pretende que con la planificación se reduzcan los costos ambientales, sociales y económicos que podría ocasionar la infraestructura lineal, en términos de tiempo, dinero y esfuerzo. Estos costos suelen duplicarse cuando se aplican únicamente medidas correctoras y compensatorias de las afectaciones ambientales, en lugar de anticiparse con un conjunto de medidas preventivas.

Para efectos de este capítulo, las medidas correctoras y compensatorias, entre las que se encuentran los pasos para fauna silvestre, pasarán a un segundo término, con respecto a las preventivas, es decir, en el caso de las medidas correctoras deberían ser aplicadas básicamente a las carreteras existentes, mientras que las medidas compensatorias constituyen el último recurso en zonas donde a pesar de las medidas aplicadas se sigan produciendo impactos residuales significativos.

Figura 3



La prevención resulta más benéfica en términos ambientales, económicos y sociales, que la aplicación de gran cantidad de medidas de corrección o compensación para

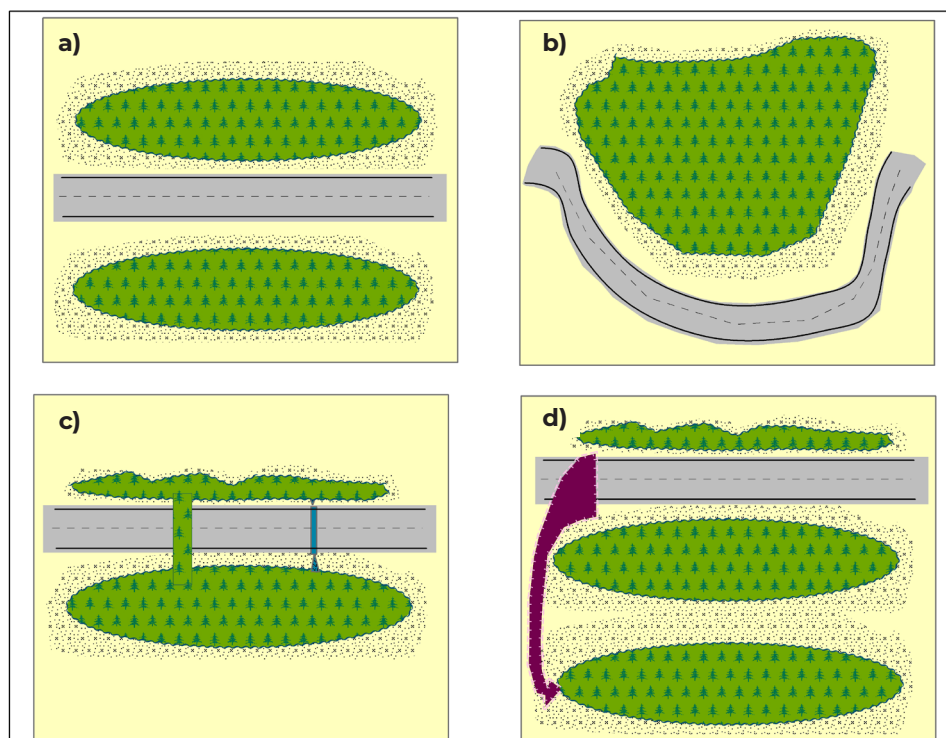
¹⁷ Iuell, B. (2003). "Wildlife and Traffic: a European handbook for identifying conflicts and designing solutions", en The XXIInd PIARC World Road Congress World Road Association-PIARC.

subsanan las afectaciones que puede ocasionar una infraestructura lineal; ejemplo de ello podemos mencionar la fragmentación de los ecosistemas.

Fragmentar un ecosistema no es simplemente dividir su superficie, ya que un manchón de vegetación, de cualquier superficie, estará conformado por una zona de vegetación propia del ecosistema al centro, y una periferia de vegetación conformada por una combinación de especies con características y preferencias del sitio distintas a las del interior, por lo que comúnmente son denominadas especies de borde. En este sentido, al fragmentar se termina perdiendo una superficie de vegetación de interior, mayor que la que resulta de dividir entre dos la masa vegetal original. Es por ello que la planeación juega un papel muy importante en la prevención de impactos ambientales ya que es en esta etapa donde se debe balancear los costos y beneficios económicos y sociales, generalmente al corto plazo, con respecto de los costos y daños ambientales que se generarán usualmente a largo plazo.

Para explicar cómo se ve afectado el ecosistema por la fragmentación derivada de la construcción de infraestructura lineal, y la ventaja que implica el diseño de estas infraestructuras para ser ambientalmente amigables desde su planeación, se presenta el siguiente esquema. Se ilustran cuatro distintos escenarios donde se representa que evitar invadir el ecosistema permite obtener un mejor resultado a largo plazo que implementar una gran cantidad de medidas de corrección o compensación.

Figura 4



Representación esquemática de a) fragmentación de un ecosistema, b) medida preventiva, c) medida correctora y d) medida compensatoria. Se representa en color verde la vegetación propia del ecosistema y en punteado gris la vegetación de borde.¹⁷

Al construir nuevas infraestructuras lineales, la selección del mejor trazo puede reducir al mínimo los conflictos y costos derivados de la necesidad de aplicar posteriores medidas correctoras o compensatorias. La construcción de pasos para fauna es una de estas medidas de mitigación que ha probado ser altamente efectiva y eficiente en muchos países para reducir las colisiones vehículo-animal y el atropello de especies. Sin embargo, nunca será tan efectiva como evitar fragmentar corredores biológicos o zonas con vegetación natural; de ahí es importante señalar que **el mejor paso para fauna es el que no requiere ser construido**, en términos económicos, de seguridad vial, técnicos, sociales y ambientales.

La evaluación de la zona de estudio constituye uno de los primeros pasos en la planificación, ya que debe contemplar la identificación de áreas limitantes, derivadas de la legislación ambiental,¹⁸ para el diseño y construcción de carreteras o ferrocarriles, y de los elementos de interés ambiental para la fauna, que representan sitios donde se tendrá mayor incidencia de la misma; y, por ende, sitios donde es probable que una vez que se construya la infraestructura lineal se tengan altos índices de atropello y colisiones vehículo-animal. En estas áreas, además, un paso para fauna no será capaz de proveer la permeabilidad necesaria para minimizar los impactos socio-ambientales, ya que, debido a la incidencia de la misma en estas áreas, se tendrá que construir una gran variedad de pasos para poder garantizar la permeabilidad que requiere el sitio y así reducir los accidentes. Esto nuevamente se traduce en costos que derivan en tiempo, dinero y esfuerzo, sin mencionar que las medidas ambientales compensatorias que por ley se establecen al fragmentar los ecosistemas, son altamente costosas en términos económicos.

Se pretende que durante la planificación de la infraestructura se analice la mejor ruta entre varias alternativas, a fin de que se evite incidir en áreas que representen un hábitat de fauna silvestre en la medida de lo posible.

Este apartado está dirigido a los profesionales comprometidos con la planificación y desarrollo de proyectos de infraestructuras lineales, y también a aquellos que toman parte en la evaluación ecológica y de los impactos ambientales, ya que, al requerirse analizar consideraciones de ingeniería, económicas, sociales y de medio ambiente en la planificación de infraestructuras, es necesario que en estas tareas participe un equipo multidisciplinario.

Se tiene como objetivo establecer los procedimientos conceptuales y recomendaciones metodológicas útiles para identificar áreas que, por su relevancia ambiental en términos de fauna, puedan ser propensas a la incidencia de colisiones vehículo-animal y atropellos de animales silvestres, con la intención de buscar maneras de evitarlos o reducir la incidencia sobre los mismos y, con ello, reducir también la necesidad de implementar medidas de compensación como son los pasos para fauna.

¹⁸ Estas áreas además de representar sitios de gran oferta en términos de servicios ecosistémicos designados para preservar la vida en la tierra incluyendo la humanidad, también representan sitios limitativos para la construcción, lo cual se deriva en costos relacionados con tiempo, dinero y esfuerzo simplemente para conseguir autorizaciones.

2.1 Estrategia a seguir según las necesidades de permeabilidad

Encontrar soluciones integrales satisfactorias para todos los actores participantes en proyectos de infraestructura lineal es uno de los mayores retos de la planificación. Se requieren criterios, datos y métodos que permitan evaluar el costo-beneficio de la construcción de un proyecto, considerando una mayor cantidad de factores como los que hoy en día se consideran dentro de los lineamientos para desarrollar proyectos y programas de inversión, es decir, considerar costos ambientales,¹⁹ sociales, entre otros, que deben ser incluidos en dicho análisis para realmente poder definir las mejores alternativas para los proyectos. Los resultados de no hacerlo resultan cada vez más en daños ambientales irreversibles, problemas de inconformidad social y altos costos y tiempos en la realización de los proyectos.²⁰

Incluir una estrategia de carácter ambiental desde el momento de la planificación de obras de infraestructura lineal permite visualizar, desde etapas tempranas, los retos a los que se deberá enfrentar el proyecto en términos ecológicos.

El estudio transdisciplinario durante la planeación permite reducir al mínimo los costos de construcción, mitigación y compensación, sumados a los costos de monitoreo y rectificación de estrategias en caso de ser necesario, con beneficios para todos a mediano y largo plazos, dentro de una política de sustentabilidad ambiental de la infraestructura lineal. Los casos en los que durante la planificación se observe la necesidad de introducir medidas de mitigación, como los pasos para fauna, deben formar parte integral del diseño de la infraestructura, con el objeto de que la medida de mitigación cuente con los recursos y tiempos para ejecutarla adecuadamente, se construyan en sitios estratégicos y de acuerdo con las características topográficas y geométricas del proyecto, de tal manera que se favorezca y garantice su funcionalidad.

Como enfoque general debe quedar en el entendido que entre mayor complejidad ambiental tenga la ruta elegida, independiente de la construcción o no de los pasos para fauna, mayores serán los costos requeridos para la construcción y operación del proyecto, dado que como ya se ha mencionado la complejidad ambiental se traduce en trámites de autorización, inversiones en mitigación, esfuerzos de negociación, tiempos de resolución, entre otros.

2.1.1 Ruta crítica

La estrategia de planeación se organiza a lo largo de una ruta crítica que se describe a continuación, y se esquematiza en la Figura 5. Para facilitar la ejecución de cada una de las actividades de esta ruta crítica se han integrado ocho fichas técnicas que se estructuran con la siguiente información:

¹⁹ Desarrollados dentro de la economía ambiental (costos por uso o daño a recursos naturales, costos de reposición, etc.).

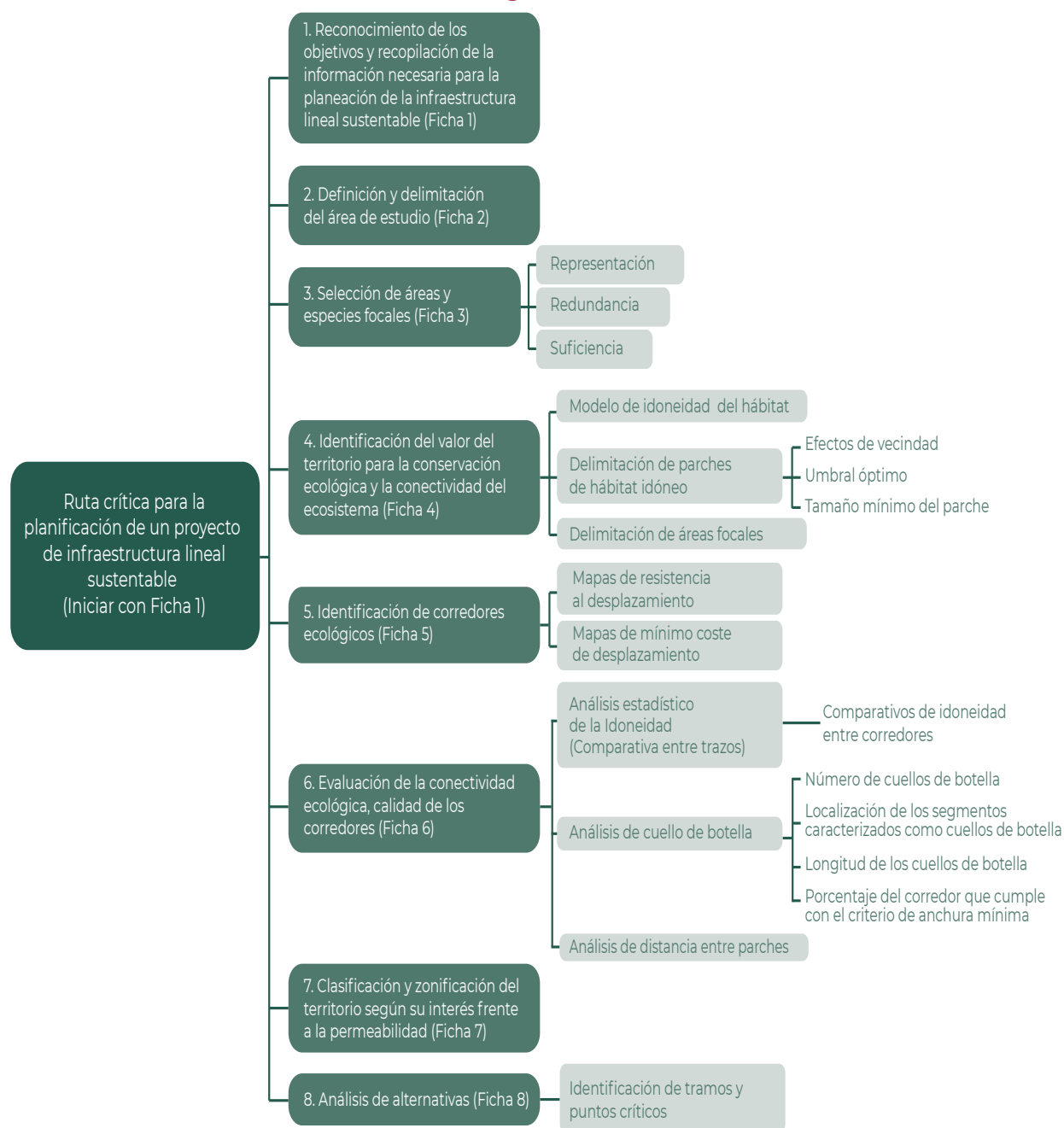
²⁰ Resultados de la Asesoría realizada para la Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP) en 2016 por las empresas Pricewaterhousecoopers, Steer, Davies, Gleave, Noriega y Escobedo y Grupo Selome, S.A. de C.V.

Fase de aplicación. Determina la etapa en la cual la información contenida en la ficha será de utilidad para el análisis y toma de decisiones.

Precepto o requerimientos: Se incluyen los insumos o recomendaciones necesarias para poder operar la metodología.

Criterios metodológicos: Se describen brevemente las consideraciones metodológicas usadas para desarrollar el análisis que confiere a cada una de las actividades dentro de la ruta crítica.

Figura 5



Ruta crítica y alternativas metodológicas para la planificación de un proyecto de infraestructura lineal con criterios de protección ambiental.

2.1.2 Descripción de los elementos que integran la ruta crítica

A continuación se describe cada uno de los elementos que conforman la ruta crítica de recomendaciones para la planificación de infraestructura lineal, con criterios para la identificación de sitios con mayor o menor permeabilidad ecosistémica para la fauna. En este punto es necesario recordar que la diversidad y abundancia de la fauna silvestre dependen de la estabilidad en la que se encuentren los ecosistemas, por lo que la presencia de ésta será mayor mientras más conservados estén los sitios y por lo tanto se requerirá una mayor permeabilidad de la infraestructura.

- 1) Reconocimiento de los objetivos y recopilación de la información necesaria para la planeación de la infraestructura lineal (Ficha 1).

Como primer paso se deben exponer y analizar los objetivos de la infraestructura lineal, ya que dependiendo de ellos se lleva a cabo la definición del área de estudio y la propuesta de las alternativas de trazo para el diseño y construcción de la infraestructura lineal.

En caso de que por los objetivos de la obra se requiera cruzar por áreas por donde se extienden ecosistemas conservados y relevantes en términos socio-ecológicos, se deberá identificar si existen alternativas de ruta con menores implicaciones ambientales, es decir, alguna alternativa que implique una menor afectación y que, además, siga siendo funcional y acorde con el objetivo inicial de la obra.

En esta parte de la estrategia se resalta la importancia que conlleva el hecho de que todos los actores involucrados en la planificación de la infraestructura, con distinta formación e interés sobre los componentes del proyecto, analicen la información y dialoguen en busca de soluciones conjuntas que permitan alcanzar la mejor decisión.

A continuación se presentan las recomendaciones y criterios dentro de la ruta crítica para la planificación de un proyecto de infraestructura lineal con criterios de protección ambiental. Es importante resaltar que, dado que se trata de criterios y herramientas de diferente naturaleza, en la planeación se requiere la participación de especialistas de diferentes disciplinas.

Ficha 1
RECONOCIMIENTO DE LOS OBJETIVOS Y RECOPIACIÓN
DE LA INFORMACIÓN NECESARIA PARA LA PLANEACIÓN
DE LA INFRAESTRUCTURA LINEAL SUSTENTABLE

Fase de aplicación:

Todas las fases de un proyecto. Esta información no es exclusiva de usar en alguna fase del proyecto ya que puede ser requerida en cualquiera de ellas.

Precepto o requerimientos:

Se deberá utilizar en todos los casos una herramienta tecnológica/*software* de análisis espacial de datos, ya que la metodología de trabajo está basada en sistemas de información geográfica.

Estos *software* permitirán:

- Manejar información vectorial o ráster.
- Procesar funciones que permitan generar modelos espaciales.
- Elaborar cartas temáticas de los resultados obtenidos.

Criterios Metodológicos:

Resulta imprescindible manejar desde el inicio información cartográfica. En este sentido es preciso que la información disponible en el proyecto se encuentre en formato digital para un Sistema de Información Geográfica (SIG).

Particularmente se debe contar con información referente al medio circundante, como mínimo se enlista lo siguiente:

1. Modelo digital de elevación.
2. Imágenes y/o fotografías satelitales.
3. Red hidrográfica.
4. Cartas de usos de suelo y vegetación.
5. Base de datos de especies y hábitats de fauna y flora.
6. Cartas de las áreas naturales protegidas, federales, estatales y municipales.
7. Cartas de la red de infraestructura y transporte.
8. Planes y programas urbanísticos y ordenamiento territorial.
9. Otras zonas voluntariamente destinadas a la conservación o áreas de interés.

Con la información recabada se deberá llevar a cabo un primer análisis sobre las condiciones de la región donde se desarrollará el proyecto, misma que será útil para posteriormente delimitar el área de estudio y planificar el trabajo en campo.

Se recomienda realizar la visita de campo posterior al análisis de gabinete. Esta visita deberá centrarse en las zonas donde el análisis del SIG identificó corredores o áreas de interés ecológico. El objetivo de esta visita es: i) validar el análisis elaborado en gabinete, y ii) complementar la información con elementos de relevancia que no hayan sido posibles de identificar desde el gabinete, dada la resolución de la información, pero que son de relevancia para incorporar en el estudio.

Actualmente existen disponibles diversos paquetes de SIG, de descarga libre o bajo licencia, que permiten analizar información espacial. Por mencionar ejemplos de herramienta cibernética/*software* más conocidos se tienen los siguientes:

- QGIS, descarga libre.
- SVSIG, descarga libre.
- SNAP, descarga libre.
- ArcGis, requiere licencia.
- ENVI, requiere licencia.
- ERDAS, requiere licencia.

Adicional a la información ambiental, el análisis de los aspectos de tránsito, topográficos, así como de los sitios arqueológicos y demás que deben preservarse, contribuyen al análisis de las alternativas de ruta en busca de soluciones conjuntas que permitan alcanzar la mejor decisión entre todos los actores involucrados en la planificación de la infraestructura.

2) Definición y delimitación del área de estudio (Ficha 2).

La definición del área de estudio en el entorno del proyecto es crucial y debe abarcar el espacio suficiente para poder entender el hábitat y comportamiento de la fauna en el espacio, con relación al proyecto de infraestructura lineal. Por lo que el área de estudio debe ser suficientemente amplia e incluir el análisis de los componentes ecosistémicos, la evaluación de la fragmentación existente y una visión general de los elementos que podrían estarla causando.

Ficha 2

DEFINICIÓN Y DELIMITACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Fase de aplicación:

Planificación.

Precepto o requerimientos:

Es necesario conocer la ruta del proyecto para la definición y delimitación del área de estudio, la cual debe abarcar el espacio necesario para entender los movimientos y el comportamiento de la fauna en la región.

Criterios Metodológicos:

Los criterios necesarios para delimitar el área de estudio son los siguientes:

- Se deberá elegir una superficie de territorio mayor al área de proyecto, según la incidencia que se identifique para incluir aquellos elementos del paisaje adyacentes que pueden influir en la conectividad del ecosistema (preferentemente usar el concepto de cuenca, subcuenca o microcuenca hidrológica,²¹ según escala).
- Identificar si existe la presencia de áreas de importancia ecológica (por ejemplo, las determinadas por la CONABIO).
- Identificar espacios protegidos como áreas naturales protegidas, federales, estatales y municipales.
- Identificar la presencia de especies de relevancia ecológica y con ello identificar hábitats requeridos para que estas especies puedan cumplir su función ecológica.

El análisis de los componentes ecosistémicos deberá ser considerado y evaluado a distintas escalas:

- **Escala Nacional:** Identificación de las Rutas de Migración de largo recorrido. Esta evaluación puede ser llevada a cabo en una escala 1:250,000 o mayor.

²¹ Hoy en día se reconoce a las cuencas como unidades ecosistémicas sumamente útiles para el manejo de los recursos naturales (Maass, 2003). Este reconocimiento, ha evolucionado junto con el concepto de ecosistema (Maass y Cotler, 2007), ya que al igual que ellos, las cuencas están estructuradas jerárquicamente, esto es: una cuenca está conformada por subcuencas y es, a su vez, parte de una cuenca mayor. La estructura jerárquica de la cuenca permite establecer un esquema de manejo igualmente jerárquico. Por ejemplo: se pueden establecer planes de manejo generales a nivel de toda la cuenca, y planes particulares a nivel de subcuenca (Cotler *et al.*, 2010; Cotler y Priego, 2004).

- **Escala Regional:** Centrada en el impacto de la infraestructura sobre ecosistemas en el que se inserta el objetivo de trazado, el análisis de obras que afectan a la zona y de los espacios clave para la conectividad ecológica. Una escala 1:100,000 a 1:50,000 es adecuada para este análisis.
- **Escala Local:** Estudios detallados del área que incluyan la distribución de poblaciones de las especies de fauna más sensibles a la fragmentación de sus hábitats y sus rutas de desplazamiento habituales.

Además de la información obtenida por los especialistas se pueden obtener datos complementarios, como rutas de paso para fauna, a partir de fuentes locales. Una escala 1:5,000 puede ser adecuada.

Las escalas menores también permiten, en etapas tempranas, identificar a grandes rasgos los tramos críticos para el movimiento de la fauna; identificando medidas que favorezcan la permeabilidad de la infraestructura para ella (por ejemplo, mapas y fotos aéreas de 1:25,000 o de 1:10,000).

Este análisis es un primer acercamiento para entender el área y definir el área de estudio, no obstante, esta área podrá ser ajustada nuevamente si durante el análisis y los trabajos en campo se determina que se requiere.

3) Selección de áreas y especies focales (Ficha 3).

Se determinan como especies focales a todas aquellas especies o espacios sometidos a protección legal o sitios con ecosistemas críticos²² que deben tomarse en consideración en la definición de un proyecto de infraestructura lineal. Una vez identificados, se deben localizar cartográficamente estas áreas focales en un mapa de referencia elaborado mediante un SIG, con la finalidad de facilitar el análisis. La protección de especies y áreas focales constituye el foco central de la planificación, ya que, a partir de sus conexiones ecológicas, se identifican tramos críticos o zonas negras de mayor riesgo de impacto socioambiental.

²² Poco abundantes a nivel nacional, protegidos por la legislación ambiental, altamente vulnerables ante la actividad humana.

Ficha 3

SELECCIÓN DE ÁREAS Y ESPECIES FOCALES

Fase de aplicación:

Planificación.

Precepto o requerimientos:

Definición del área, especies y hábitats de fauna y flora focales. Para ello se parte de la elaboración de inventarios de estos elementos.

Estos inventarios pueden ser obtenidos a partir de información existente y disponible en formato digital en todo el territorio nacional, como son las siguientes:

- Inventarios de la Comisión Nacional de Áreas NATurales Protegidas (CONANP) para la localización ANP de competencia federal.
- Inventarios de ANP de competencia estatal y municipal.
- Cartas de uso de suelo y vegetación para identificar ecosistemas críticos.
- Bases de datos de la CONABIO, donde se puede consultar la distribución potencial de las especies y hábitats de flora y fauna, así como su estatus legal.
- Regiones Terrestres Prioritarias (RTP), Regiones Hidrológicas Prioritarias (RHP), Áreas de Importancia para la Conservación de las Aves (AICAS), entre otras definidas por la CONABIO.
- Otras zonas voluntariamente destinadas a la conservación o áreas de interés.

Criterios Metodológicos:

La primera estructura de análisis que se debe elaborar es la siguiente:

1. Selección de especies focales:

A partir del listado de especies y hábitats del área de estudio, se procederá a realizar un filtrado de éstas con la finalidad de identificar redundancias por hábitos de las especies. Este filtro se llevará a cabo a partir de cuatro criterios:

- Áreas de Distribución.
- Capacidad de dispersión.
- Áreas mínimas funcionales.
- Hábitats que seleccionan las especies.

Se recomienda que el resultado final de la selección incluya al menos de 10 a 20 especies que representan diferentes taxones: plantas, invertebrados, peces,

anfibios, reptiles y mamíferos e idealmente con menos de 6 especies por grupo taxonómico.

Una limitante para realizar esta selección final será la disponibilidad de información suficientemente detallada acerca de las especies. Generalmente resulta complicado contar con toda la información, por lo que el especialista deberá considerar la información que le resulte suficiente como para poder realizar los análisis.

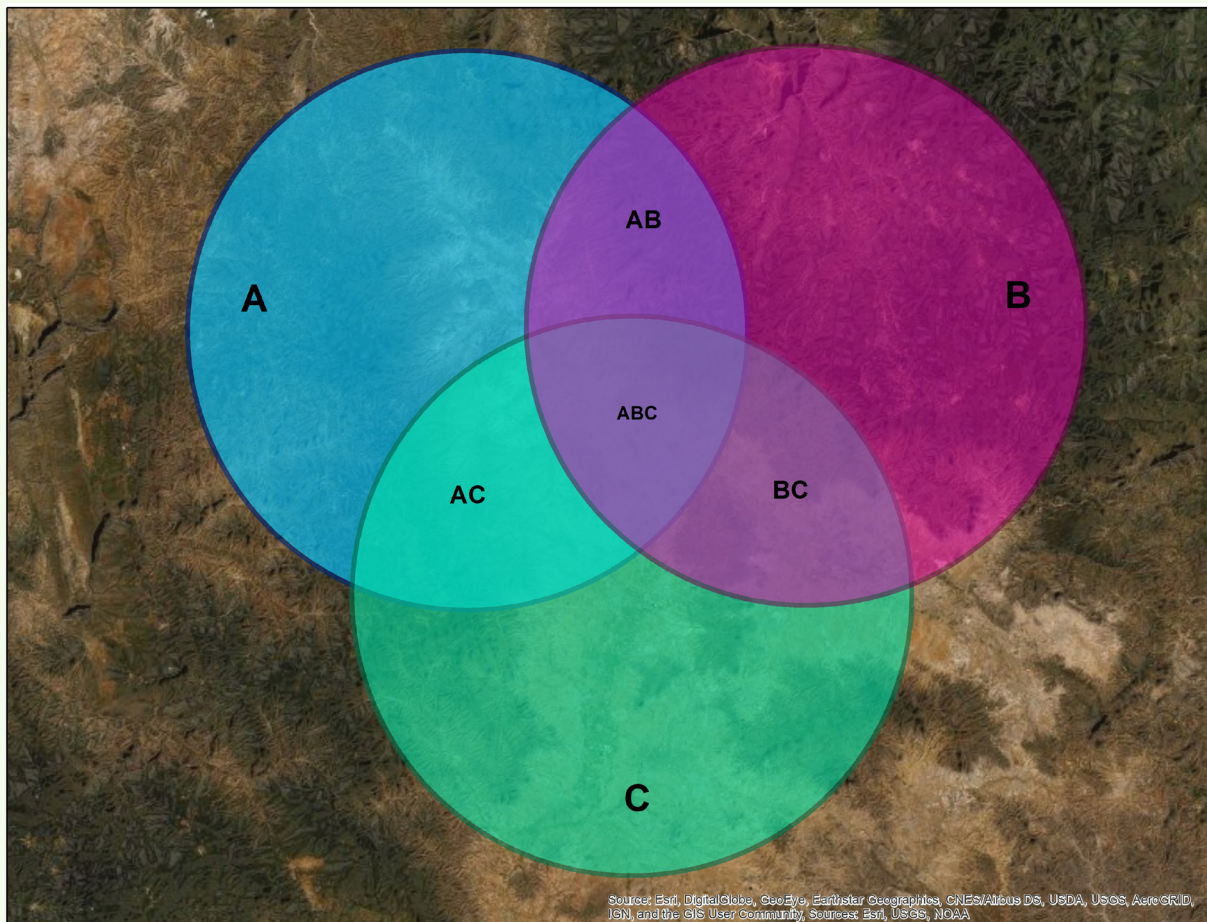
2. Selección de hábitats focales:

- Identificación de los hábitats correspondientes a los objetivos de conservación (con la información disponible).
- Identificación de los hábitats de especies focales relevantes y que no se encuentren en los inventarios nacionales, por ejemplo:
 - Espacios con gran riqueza y diversidad de especies.
 - Hábitats con presencia de especies en alguna categoría de protección listadas en la NOM-059-SEMARNAT-2010.
 - Espacios de hábitat de poblaciones emblemáticas.
 - Identificación de sitios relevantes en la dinámica de los ámbitos hogareños de especies focales.
 - Áreas de protección comunitaria, que, aunque no están normadas, en algunas ocasiones figuran con mayor nivel de conservación que las áreas protegidas por ley y en las que el trazo de algún proyecto puede verse fuertemente limitado.

3. Procedimiento para delimitar áreas focales.

Se lleva a cabo mediante un cruce de información en un ambiente SIG (procedimiento de álgebra de mapas). La identificación se basará en la consideración de tres criterios de aplicación:

- **Representación:** Todos los objetivos de conservación deben ser representados y considerados en la selección.
- **Redundancia:** Al cruzar las capas de interés existirá una reiteración entre objetivos. En general suele existir un alto grado de “redundancia” entre los objetos, lo cual facilita realizar el análisis con un número menor de variables. Entre mayor sea la “redundancia” de variables, mayor será el interés del área focal (teoría de conjuntos), ver Figura 6.
- **Suficiencia:** A pesar de que la “redundancia” es un criterio fuertemente a considerar, puede existir el caso de encontrar segmentos no “redundantes” de alto interés, por lo que en este caso habrá que considerarlos para tener suficiencia en el análisis (esto deberá ser considerado a criterio del especialista en fauna).

Figura 6**Teoría de conjuntos.**

La “redundancia” ayudará a identificar áreas más relevantes que otras, en términos de presencia y movilidad de la fauna, por lo que resulta uno de los principales criterios para identificar y delimitar las áreas focales.

- 4) Identificación del valor del territorio para la conservación ecológica y la conectividad del ecosistema (Ficha 4).

Se recomienda evaluar el patrimonio natural del área de estudio para identificar los aspectos de importancia ecológica y las áreas de mayor interés para la fauna bajo el contexto de la modelación de la conectividad del ecosistema y la identificación de parches o conglomerados ecosistémicos de mayor calidad ambiental usados por las especies focales, es decir, identificar el hábitat idóneo para las especies focales que se busca evitar afectar con el desarrollo de la infraestructura lineal. Un ejemplo de ello pueden ser los puntos de inicio y fin de los corredores biológicos dentro de las áreas bajo estudio y otros elementos del territorio que pueden conformar refugios de hábitat o paso (ocupación temporal) para estas especies.

Ficha 4

IDENTIFICACIÓN DEL VALOR DEL TERRITORIO PARA LA CONSERVACIÓN ECOLÓGICA Y LA CONECTIVIDAD DEL ECOSISTEMA

Fase de aplicación:

Planificación.

Precepto o requerimientos:

Se deberán identificar sitios de relevancia ecológica en toda el área de estudio. Esta identificación servirá de base para evaluar la conectividad y la fragmentación de ecosistemas existentes en el entorno del proyecto, previo a éste.

Criterios Metodológicos:

1. Modelo de idoneidad del hábitat

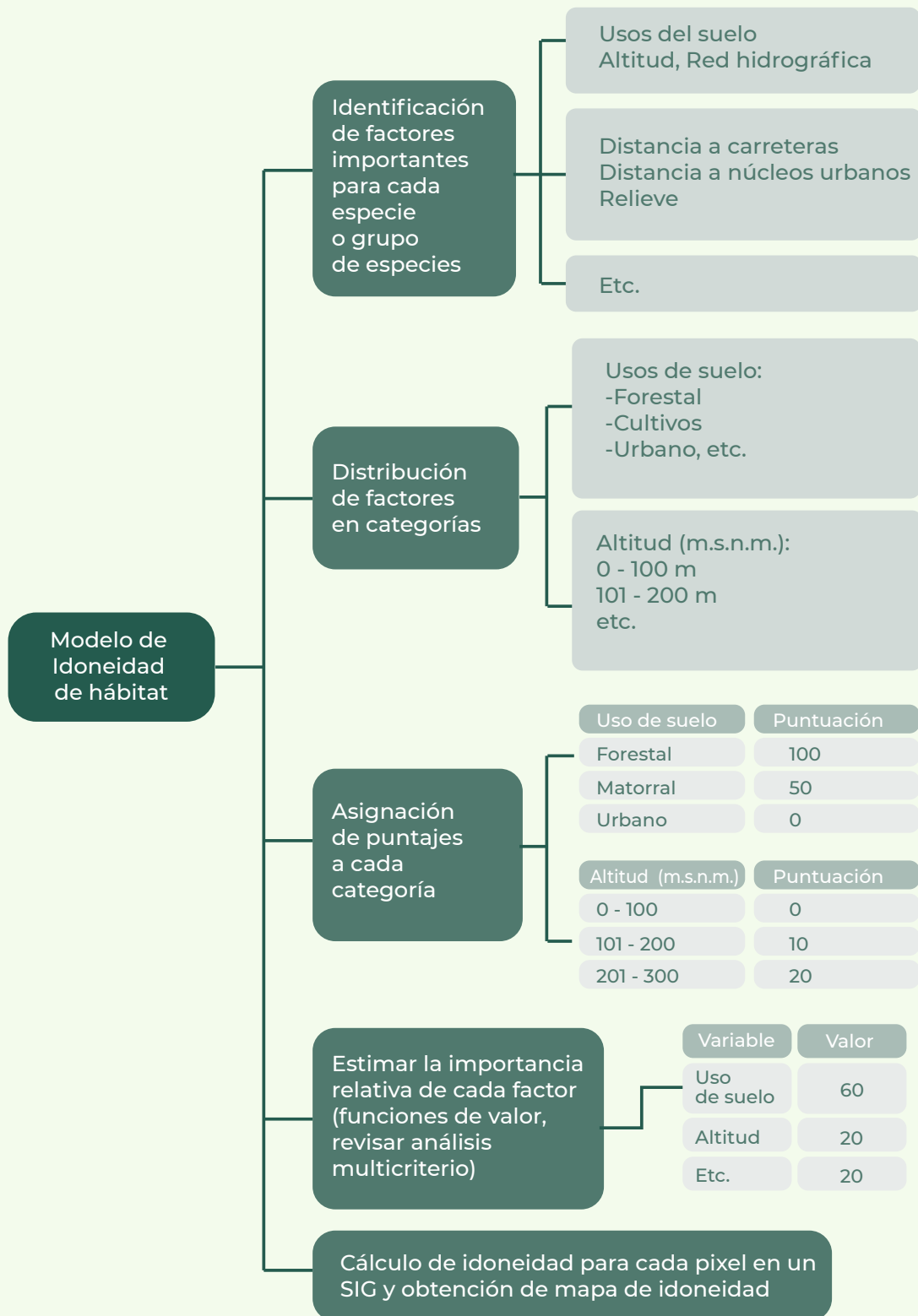
Estos modelos se sustentan en el criterio de expertos sobre las características biológicas de las especies focales y en la revisión de datos bibliográficos.

Dado que estos modelos se encuentran sujetos a cierta incertidumbre y subjetividad, es importante la justificación adecuada de todas las decisiones que conllevan, a fin de garantizar la transparencia global del proceso, misma que deberá ser avalada por el especialista.

Las etapas de este modelo se mencionan a continuación:

- a) Utilizar capas de información geográfica disponibles, correspondientes con los factores que potencialmente influyen más en la presencia, calidad y permeabilidad del hábitat idóneo para las especies focales.
- b) Distribuir en categorías o grupos de categorías los valores de cada factor y asignar puntuaciones a las mismas en función de las preferencias de hábitat de la especie. Por ejemplo, la escala se asigna entre 0 a 10 o 10 a 100, etc., donde el máximo valor representa la máxima probabilidad de aparición y el más bajo para el caso opuesto. Se obtienen así matrices que asignan a cada categoría un valor de probabilidad de presencia de la especie (por ejemplo, clasificación por tipos de vegetación), ver Figura 7.
- c) Estimar para cada factor un peso que refleje la importancia relativa en términos de los requerimientos de las especies.
- d) Estos valores determinarán la idoneidad que cada espacio representa para la fauna focal dentro del área de estudio, resultando en un mapa de idoneidad.

Existen varios programas o *software* que pueden llevar a cabo este proceso, la técnica más usada para modelos de idoneidad es el análisis multicriterio.

Figura 7**Esquema general de un modelo de idoneidad.**

2. Delimitación de parches de hábitat idóneo

Con la elaboración del modelo de idoneidad se pueden delimitar o seleccionar las áreas de mejor calidad de un determinado hábitat focal identificando:

- Hábitat idóneo para las especies focales.
- Puntos de inicio y fin de los corredores biológicos.
- Refugios de paso para las especies.

Posteriormente se pueden generar “índices de vecindad” y con ello minimizar el efecto de borde en la calidad del hábitat. Este procedimiento se requiere realizar en un SIG, para lo que se dan los siguientes criterios:

El proceso consiste en calcular para cada uno de los píxeles del modelo, el valor medio de idoneidad de hábitat de todos los píxeles vecinos. Así se obtiene un valor de hábitat ponderado por vecindad que se utilizará sólo para la delimitación de los parches de vegetación.

Cabe mencionar que es difícil establecer el “umbral óptimo” de los efectos de vecindad debido a la falta de datos adecuados sobre los requerimientos de las especies. Es por ello que, dependiendo de la especie habrá que realizar la consulta pertinente con los especialistas en dichas especies para seleccionar el tamaño del Kernel o filtro que usa el SIG para calcular este parámetro.

Algunas sugerencias indican que para especies de mayor movilidad, como grandes felinos, la idoneidad de hábitat es de un radio de 200 m (12.6 ha) alrededor de cada píxel; mientras que para especies de movilidad reducida, como roedores, una ventana móvil de 3x3 píxeles vecinos (0.6 ha, considerado un tamaño de píxel de 25 m), y ninguno si la especie no es sensible a los efectos de borde o se desconocen sus requerimientos.

Por otro lado, el tamaño mínimo de parche para el hábitat que se debe considerar será especificado en función de la información bibliográfica de las especies y de la opinión de expertos sobre las características biológicas de las especies utilizadas en el análisis.

A partir del mapa de idoneidad, ponderado por vecindad, y una vez establecido el umbral, se agrupan los píxeles adyacentes de hábitat idóneo (mapa clasificado por valores de idoneidad) para crear superficies de sitios “idóneos” para la especie.

Es decir, este mapa reflejará los sitios por los cuales las especies focales preferentemente presentan afinidad y, por ende, movilidad hacia y desde ellas.

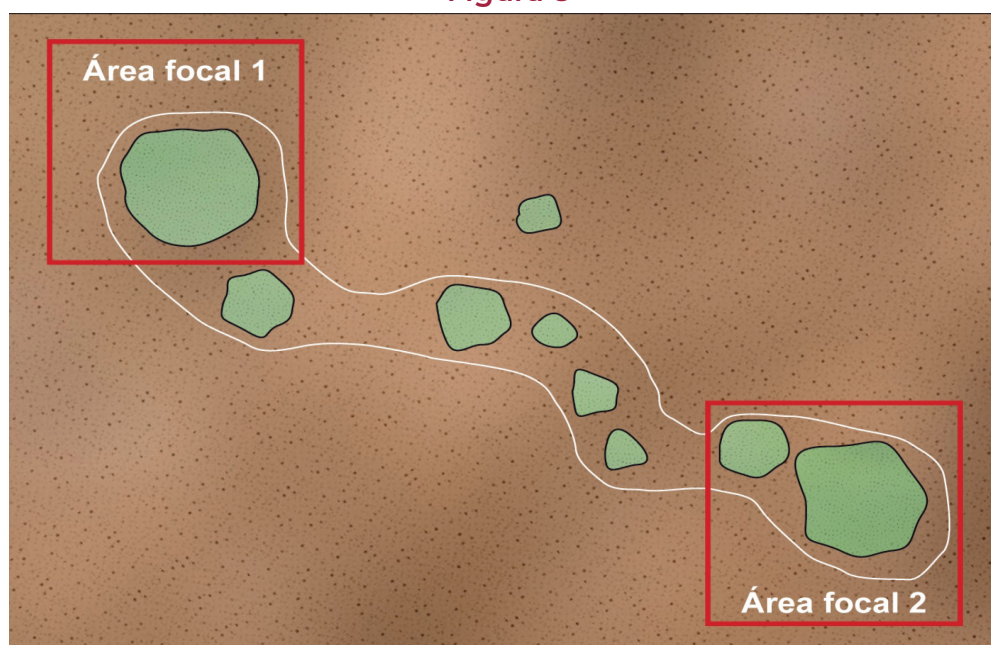
5) Identificación de corredores biológicos (Ficha 5).

Uno de los modelos de conectividad de ecosistemas más usados para identificar áreas de movilidad de las especies faunísticas es el de corredores biológicos, definido precisamente como “el espacio manejado para favorecer la conectividad” entre ecosistemas.

La identificación de los corredores biológicos es uno de los criterios más importantes para analizar la permeabilidad de la infraestructura para la movilización de la fauna durante el proceso de planeación. A partir de la identificación de los corredores se podrán identificar rutas de movilidad de la fauna y planear el trazo de la infraestructura lineal considerando zonas que requieran implementar la mayor o menor cantidad y complejidad de medidas de mitigación con el objetivo de proponer el trazo que implique mayor sustentabilidad (menor necesidad de mitigación).

Es importante señalar que un corredor biológico no siempre constituye una formación continua de relieve o vegetación a lo largo de la cual se desplaza la fauna, sino que puede estar conformado por parches de hábitat de forma discontinua que utilizan los animales para su paso (Figura 8). En el siguiente esquema se ejemplifica un corredor biológico “funcional” conformado por unidades de hábitat discontinuas entre dos áreas focales, partiendo de la movilidad que puede realizar la fauna utilizando sitios de forma temporal (de paso) donde encuentran hábitats adecuados para las especies bajo consideración.

Figura 8



Parches de hábitat (manchas verdes) en el contexto de un proceso de corredor biológico discontinuo, que es funcional a partir de áreas focales y parches de vegetación (tomado del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino de España, 2010).

En general la idea también orienta a identificar sitios donde podrían enfocarse acciones de compensación con la finalidad de complementar con vegetación propia del ecosistema, los espacios vacíos a lo largo del corredor.

Ficha 5

IDENTIFICACIÓN DE CORREDORES BIOLÓGICOS

Fase de aplicación:

Planificación.

Precepto o requerimientos:

Se deberá obtener información disponible sobre la presencia de corredores biológicos. En caso de no contar con ellos se procederá a realizar la identificación de éstos a partir de un análisis y modelación matemática como se explica más adelante.

Criterios Metodológicos:

De existir una serie de corredores definidos en la zona, ésta debe contar con:

- Una referencia espacial igual o superior al establecido para el proyecto considerando los requerimientos ecológicos.
- Una escala cartográfica que sea adecuada a los objetivos del proyecto.
- Información actualizada.
- Los métodos utilizados para identificar que los corredores sean formales, técnicamente correctos y puedan ser puestos a disposición del público.

Con esta información se podrá evaluar y exponer en conjunto con los análisis descritos en las fichas anteriores, el estado que guarda el área de estudio en términos de conectividad y fragmentación ecológica.

En el caso de que una o varias de las condiciones para considerar como válida la información de un corredor biológico no se cumpla, se procederá a completar el estudio existente.

Para ello se puede aplicar el siguiente modelo, entre otros disponibles en la literatura:

Mapas de resistencia al desplazamiento (inverso de idoneidad)

A partir del mapa de idoneidad se pueden calcular mapas de resistencia de desplazamiento del grupo biológico que se esté considerando como focal.

Se definen matrices con valores de resistencia para cada categoría de los factores considerados (actualmente existen opciones de *software* bajo licencia o libres para este fin).

Mapa de mínimo coste de desplazamiento

Con el mapa de resistencia se puede calcular cuál será la ruta entre dos puntos (áreas focales) que acumularán una menor resistencia a la movilidad. Se puede obtener así la ruta del mínimo coste de desplazamiento entre dos puntos para cada especie (existen herramientas dentro de los SIG que realizan este procedimiento).

A partir de las rutas de mínimo coste* se pueden identificar los corredores biológicos para las especies focales dentro del área de estudio. Finalmente se deberán integrar en la cartografía base, los diversos corredores biológicos presentes en la región bajo estudio.

* Se asume que las rutas de mínimo coste serán las usadas por las especies para sus desplazamientos.

6) Evaluación de la conectividad ecológica, calidad de los corredores (Ficha 6).

Una vez identificados los corredores biológicos, continuos o discontinuos, se recomienda evaluar la calidad de éstos en relación con los requerimientos de las especies focales (las que se busca proteger). El objetivo de esta evaluación es determinar con mayor precisión si los corredores identificados son verdaderamente óptimos para el desarrollo de las especies o estamos incurriendo en un error metodológico o de apreciación en el que se podría estimar una movilidad de fauna inexistente, que pudiera llevarnos a desviar una obra de infraestructura lineal innecesariamente. Para evitar incurrir en esta situación, se recomienda realizar el análisis de la conectividad ecológica, lo que implica el uso de metodologías específicas para ello que se describen en la siguiente ficha.

Ficha 6 EVALUACIÓN DE LA CONECTIVIDAD ECOLÓGICA, CALIDAD DE LOS CORREDORES

Fase de aplicación:

Planificación.

Precepto o requerimientos:

Se realizará la evaluación de la red de corredores biológicos identificados, con el fin de determinar si son óptimos o no como áreas que facilitan la movilidad de la fauna focal.

Criterios Metodológicos:

Para asegurar que los corredores seleccionados sean funcionales, se deberá valorar la idoneidad de éstos bajo los siguientes criterios:

- Verificar que no existan estrechamientos o cuellos de botella en los corredores biológicos. Es decir, sectores dentro del corredor donde se rompa la regla de anchura mínima del corredor para ser funcional a la especie, población o hábitat focal.
- Existencia de tramos de gran longitud sin hábitat adecuado para las especies focales, con lo que se rompe la conectividad.

Esta verificación se llevará a cabo en los corredores modelados o en aquellos disponibles. En cualquiera de los casos la información debe ser respaldada con visitas de reconocimiento en campo.

Las principales conclusiones de la evaluación deberán ser representadas en tablas y gráficos para su interpretación.

Algunos de los métodos más usados son los siguientes:

Análisis estadístico de la idoneidad de hábitat

Este análisis es útil para conocer el interés intrínseco del corredor para una especie o hábitat y para comparaciones alternativas.

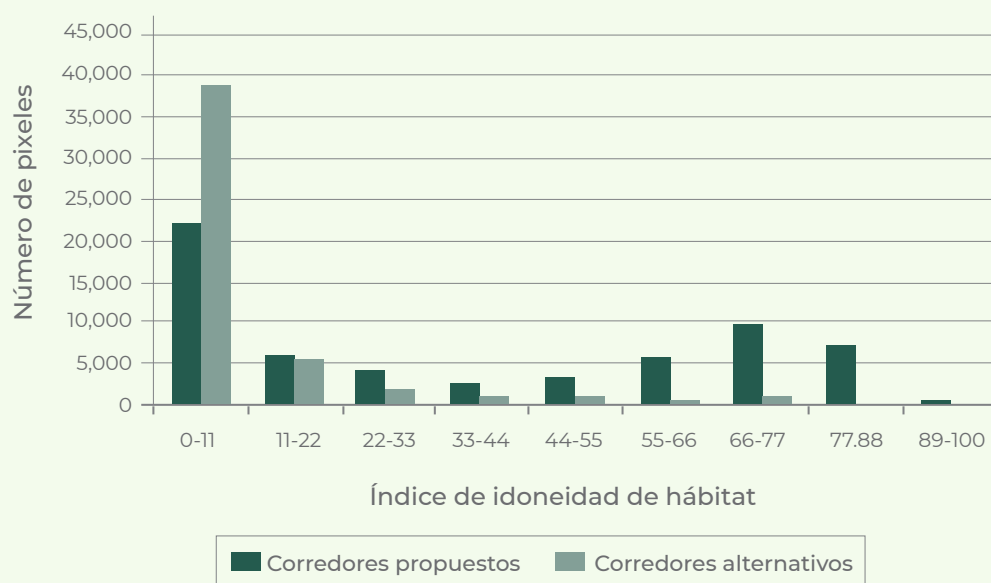
Los métodos más usados consideran comparaciones mediante estadísticos sencillos (histogramas de frecuencia, medidas de tendencia central o dispersión media, desviación estándar, etc.).

Por ejemplo, se puede elaborar un histograma de frecuencias donde se comparen los valores de idoneidad de los píxeles entre dos corredores. Este estudio puede informar sobre el número de píxeles dentro del corredor con baja calidad, por lo tanto, se puede identificar cuál resulta ser el corredor con mayor calidad para la especie (Figura 9).

Análisis del cuello de botella

El cálculo de la anchura de un corredor biológico a lo largo de todo su recorrido sirve para identificar “cuellos de botella”. Es decir, aquellos puntos en los que la anchura del corredor se encuentra por debajo de un umbral definido por motivos del objetivo de supervivencia de la especie focal.

Figura 9



Histograma comparativo de la calidad del hábitat entre dos corredores (tomado del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino de España, 2010 y elaborado con Corridor Designer).

Entre los indicadores para evaluar los cuellos de botella se tienen los siguientes:

- Número de cuellos de botella.
- Localización de los segmentos caracterizados como cuellos de botella.
- Longitud de los cuellos de botella.
- Porcentaje del corredor que cumple con el criterio de ancho mínimo.

A partir de estos indicadores se puede clasificar la importancia de los corredores en el área de estudio y además se pueden identificar sitios prioritarios para llevar a cabo acciones de mitigación o compensación como la restauración.

Análisis de la distancia entre parches

Los cálculos de distancia simplemente consisten en calcular la longitud de distancia entre matriz y parche e identificar aquellos segmentos en los que dicha medida supera la capacidad dispersiva de la especie, haciendo invisible el corredor para la misma.

Nuevamente se pueden comparar entre alternativas y escenarios para determinar el valor del corredor biológico en términos de conectividad ecológica.

Estos estudios por lo general se realizan en un ambiente SIG (en programas para diseño de corredores) pero es importante realizar verificaciones en campo para completar o validar la información.

- 7) Clasificación y zonificación del territorio según su relevancia para la permeabilidad (Ficha 7).

Se recomienda clasificar el área estudiada en torno al proyecto de infraestructura lineal de transporte en función del valor ecológico de los elementos que la integran.

Ficha 7

CLASIFICACIÓN Y ZONIFICACIÓN DEL TERRITORIO SEGÚN SU RELEVANCIA PARA LA PERMEABILIDAD

Fase de aplicación:

Planificación.

Precepto o requerimientos:

Se deberá clasificar el área bajo estudio en función del valor de los diferentes sitios y la capacidad del proyecto para reducir o evitar la fragmentación de hábitats, permitiendo a la infraestructura lineal pasar por zonas que representen menores necesidades de aplicar medidas de mitigación para evitar el conflicto fauna/usuario.

Criterios Metodológicos:

Este procedimiento se realiza con herramientas de clasificación y álgebra de mapas en un ambiente de SIG, utilizando los siguientes criterios y definiendo la zonificación en el mapa base:

- **Zonas de máximo interés.** Son áreas definidas como área focal, corredores biológicos de importancia para especies amenazadas o de particular interés, donde se deberá evitar la fragmentación por la instalación de la infraestructura lineal. Zonas a evitar afectar con la infraestructura.
- **Zonas de alto valor.** Son zonas de alto valor por su biodiversidad y/o grado de naturalidad, pero que no se hayan identificado como áreas focales o corredores. De no evitar pasar por estas áreas, es altamente probable que el proyecto requiera considerar un gran número y variedad de pasos para fauna, entre otras medidas de mitigación; resultando en un alto costo de mitigación ambiental.
- **Zonas de menor valor.** Las zonas de menor valor ocuparán el resto del territorio, tratándose de zonas en las que el nivel de transformación de los hábitats por motivo antrópico es alto, por lo que ya no se identifican elementos prioritarios de conservación desde el punto de vista ecológico.

8) Análisis de Alternativas (Ficha 8).

Una vez que se haya elaborado el mapa de sitios de relevancia ecológica (puntos 1 a 7), se procederá a realizar el trazado de la infraestructura lineal sobre este mapa con todos los elementos técnicos que desde la ingeniería se requieran. Lo ideal es proponer más de un trazo, considerando rutas de menor costo ecológico y de construcción, con lo que se busca reducir los costos y tiempos de todo el proyecto y su operación; posteriormente se requiere analizar y definir la mejor alternativa para la ruta definitiva.

Para la selección de ruta se deberán identificar tramos de posible conflicto con la fauna, así como los tramos y puntos críticos en los que las alternativas propuestas pueden implicar efectos relevantes con respecto a los costos del proyecto, ya sea económicos, sociales o ecológicos. La decisión final debe considerar un balance entre todo tipo de estos costos, en un afán de obtener un proyecto sustentable que minimice las necesidades de inversión en Pasos para Fauna Silvestre, así como en otras medidas de mitigación.

Ficha 8

ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS

Fase de aplicación: Planificación.

Precepto o requerimientos: Se deberán identificar tramos y puntos críticos donde las alternativas puedan generar efectos de impacto socioambiental relevantes. Se podrán identificar tramos donde no es posible evitar la fragmentación de hábitats, corredores o zonas de relevancia para la fauna, por lo que se podrán caracterizar como zonas negras, para posteriormente modelar los sitios donde deberán instalarse pasos para la fauna, los tipos y cantidades requeridos de éstos.

Criterios Metodológicos: Tomando en consideración el mapa elaborado a partir de la integración de la información analizada a lo largo de las fichas 1 a 7, se calcularán las superficies y longitud de los tramos afectados de máximo y alto interés.

El diseño de la alternativa debe:

- Establecer el proyecto preferentemente en áreas identificadas como zonas de menor valor, siempre que ello sea factible. Estas zonas serán tratadas como de capacidad de acogida alta para el trazado de la infraestructura lineal.
- Considerar la opción de ajustar la ruta a una carretera ya existente o, si se están planificando o proyectando diversas vías en paralelo, concentrarlas en un único “corredor de infraestructura lineal”.
- Finalmente se deberá considerar elegir la ruta que reduzca al mínimo los costos de construcción, de medidas de mitigación y compensación para evitar conflictos fauna/usuarios, sumados a los costos de monitoreo, acciones adicionales en vías paralelas y rectificación de estrategias, en caso de ser necesario.

Con estos criterios se espera que la selección de la ruta para la construcción de la infraestructura lineal reduzca al máximo los impactos que pudieran presentarse entre los usuarios y la fauna silvestre.

CAPÍTULO 3

UBICACIÓN ESTRATÉGICA

PROCEDIMIENTOS, MÉTODOS, MODELOS

Y CRITERIOS RECOMENDADOS PARA

DETERMINAR LA UBICACIÓN DE CADA

TIPO DE PASO PARA FAUNA SILVESTRE

Generalidades

A partir de la planificación de la infraestructura lineal llevada a cabo con un enfoque socio-ecológico, el siguiente paso es identificar aquellos sitios que serán afectados por dicha infraestructura. La identificación de éstos estará determinada por las zonas donde el análisis señala mayor permeabilidad (Ficha 7), y que serán fragmentados con la implementación de la infraestructura lineal. La intención de identificar estas zonas es destinar los esfuerzos en ellas para planificar e implementar las medidas de mitigación y compensación.

Las medidas de mitigación deben aplicarse siempre que la infraestructura lineal divida partes importantes de un hábitat o cree una barrera para las rutas de migración de fauna, y no sea posible prevenir dicha situación. Las medidas de mitigación y/o compensación incluyen, para efectos del presente Manual, la construcción de pasos para fauna (como corredores biológicos artificiales) y la rehabilitación de sus corredores biológicos naturales. Este punto es particularmente importante porque para que la colocación de un paso para fauna sea funcional, el análisis de permeabilidad implica un estudio integral no sólo teniendo en cuenta la infraestructura lineal sino también la distribución de los hábitats y otras posibles barreras.

En términos generales un paso para fauna debe ser construido cuando:²³

- Una infraestructura lineal suponga una amenaza para los hábitats, comunidades o especies de interés para la conservación.
- Una infraestructura lineal afecte a especies particularmente sensibles al efecto barrera y a la mortalidad causada por colisiones vehículo-animal y atropellos de especies.
- La conectividad entre los hábitats en el entorno de la infraestructura lineal se vea perjudicada por la construcción de ésta.

²³ Iuell, B. (2003). "Wildlife and Traffic: a European handbook for identifying conflicts and designing solutions", en The XXIInd PIARC World Road Congress World Road Association-PIARC.

- Se considere la solución más idónea para mitigar el efecto barrera.
- La infraestructura lineal cuente con vallado perimetral continuo.

La identificación de los sitios de la infraestructura lineal que requieren la construcción de los pasos para fauna se realizará en función del análisis elaborado en el capítulo anterior y de éste se deberán tener presentes los siguientes criterios para la toma de decisiones:

- 1) Identificación de los hábitats de interés para los grupos de fauna de atención especial (distribución espacial), considerado a partir de su funcionalidad.
- 2) Identificación de sectores del territorio de interés para la conectividad ecológica, tales como:
 - a) Presencia de usos de suelo compatibles con los desplazamientos de la fauna.
 - b) Presencia de formas de relieve que canalizan el desplazamiento de la fauna.
 - c) Presencia de cursos fluviales que canalizan movimientos longitudinales de especies acuáticas, semiacuáticas o terrestres.
 - d) Información de rutas de desplazamiento habitual de fauna a partir de prospecciones sobre el terreno y de aportaciones de expertos locales.
- 3) Identificación de tramos críticos en los que se produzca alto índice de mortalidad de fauna por la colisión vehículo-animal y atropello de especies en las carreteras ya construidas.
- 4) Identificación de áreas a desfragmentar con la intención de hacer funcionales los corredores biológicos planteados.

Se construirán pasos para fauna en todos los lugares en los que, a partir del análisis de los factores indicados en el punto anterior, se determine que sean necesarios. En este sentido cabe hacer mención que el resultado de las fichas 6 y 7 nos indican todas las zonas donde deben ser construidos, pero no refiere a la densidad, el tipo, o la estrategia de colocación, por lo que ésta será determinada a partir de los criterios mencionados y cuya información se tiene a lo largo de todos los estudios elaborados en el capítulo anterior y se complementa con las medidas y consideraciones propuestas en este capítulo (Ficha 9).

Por otro lado, en los proyectos de mejora o ampliación en proyectos ya construidos, se deberá analizar la posibilidad de construir pasos para fauna en los tramos de alta concentración de accidentes por la colisión vehículo-animal causados por la presencia de fauna silvestre o de mortalidad de ésta por atropello, así como acciones coincidentes con áreas a desfragmentar, con la finalidad de conducir a la fauna hacia las medidas de mitigación construidas. En este caso, además de realizar un estudio como el referente en el Capítulo 2, es decir, con la intención de identificar la funcionalidad del espacio, se deberá complementar la información con un monitoreo en campo para identificar zonas negras (Ficha 10).

Finalmente, este capítulo presenta un ejemplo de *software* que se utiliza para elaborar las metodologías descritas tanto en el Capítulo 2 como en el presente. Este no es el único que existe, por lo que su recomendación en este capítulo sólo pretende ser

ilustrativa de lo que existe y de la manera en la que facilita el desarrollo del análisis. No obstante, será el especialista quien determinará el uso de aquél que más le convenga (Ficha 11).

A continuación se realiza un marco de referencia sobre los criterios metodológicos a considerar en la selección de su ubicación.

3.1. Ruta crítica

La estrategia de ubicación de pasos para fauna se organiza a lo largo de una ruta crítica que se describe a continuación, y se esquematiza en la Figura 10. Para facilitar la ejecución de cada una de las actividades de esta ruta crítica se han integrado tres fichas técnicas que se estructuran con la siguiente información:

Fase de aplicación

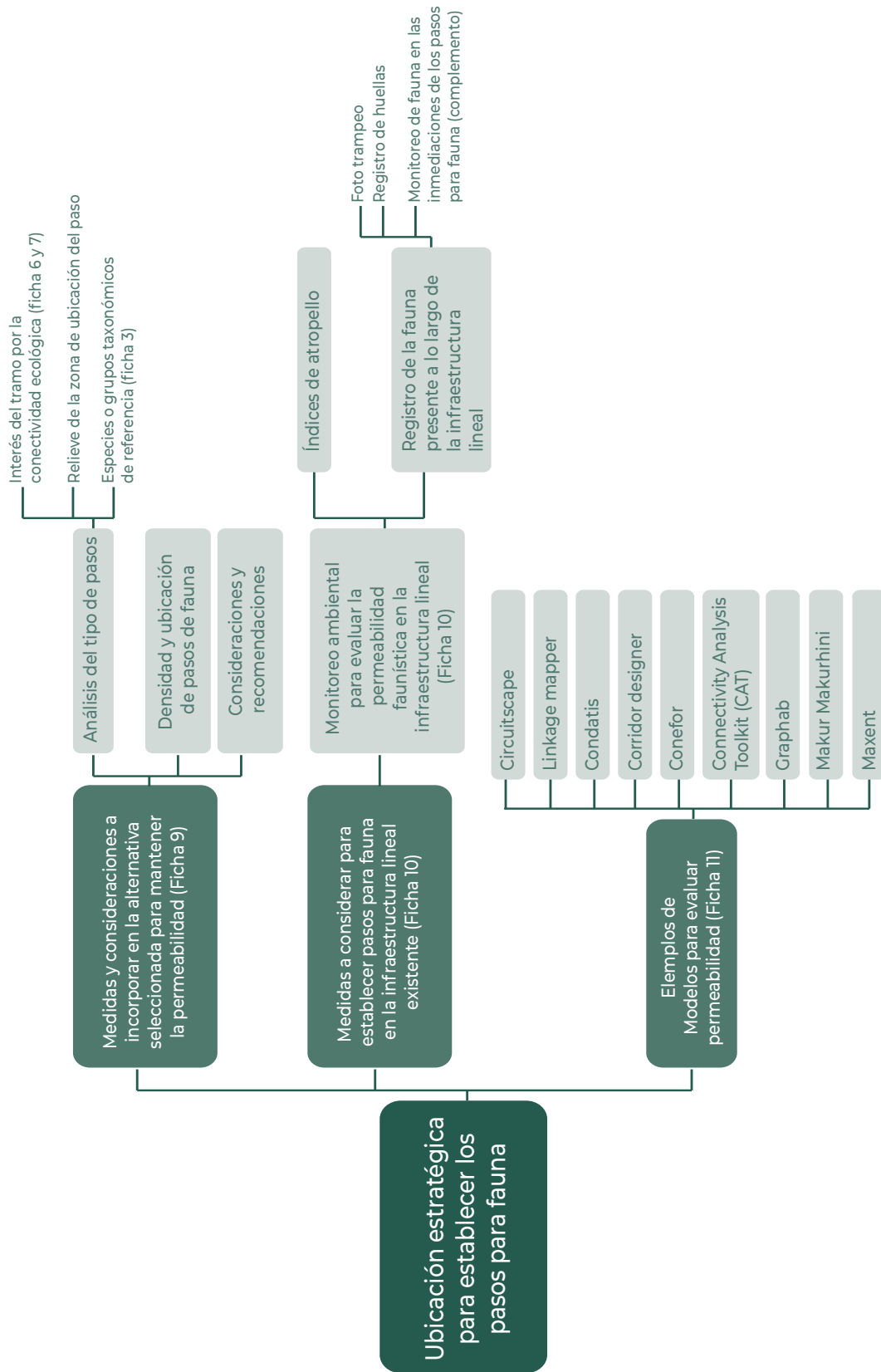
Determina la etapa en la cual la información contenida en la ficha será de utilidad para el análisis y toma de decisiones.

Precepto o requerimientos

Se incluyen los insumos o recomendaciones necesarias para poder operar la metodología.

Criterios metodológicos

Se describen brevemente las consideraciones metodológicas usadas para desarrollar el análisis que confiere a cada una de las actividades dentro de la ruta crítica.

Figura 10

Ruta de planificación para la construcción de pasos para fauna.

Ficha 9
MEDIDAS Y CONSIDERACIONES A INCORPORAR
EN LA ALTERNATIVA SELECCIONADA
PARA MANTENER LA PERMEABILIDAD

Fase de aplicación:

Ubicación estratégica.

Precepto o requerimientos:

Para el diseño e identificación de pasos para fauna se debe usar toda la información generada durante la planificación, con el objetivo de evaluar los sitios, los tipos y el número de pasos para fauna necesarios para mitigar los daños, así como las acciones complementarias a estos pasos para asegurar que sean funcionales.

Criterios Metodológicos: *Análisis del tipo de pasos*

Para elegir los tipos de pasos más adecuados se debe considerar el paisaje, los hábitats afectados y las especies a las que van destinadas las medidas. La importancia de los hábitats se debe evaluar a escala local, regional, nacional e internacional durante el proceso de la evaluación, tal como se ha mencionado en el Capítulo 2 (Ficha 2).

En la práctica no sólo se debe apostar por una medida para mitigar la fragmentación del hábitat, ya que con frecuencia se requiere la aplicación de un paquete de medidas integradas que aborden todos los problemas de cada zona. La mejor solución es, con frecuencia, la aplicación de un conjunto de medidas destinadas a distintos grupos de animales, según sus características ecológicas, Capítulo 2 (Ficha 3).

Nuevamente estas características y estas medidas deberán ser planteadas por un equipo multidisciplinario a partir del análisis elaborado previamente. Los tipos de pasos para fauna más comunes se describen en el Capítulo 4 de este Manual. Los principios básicos, como por ejemplo los que se refieren a su ubicación o número, se pueden aplicar para distintos pasos.

a) Interés del tramo para la conectividad ecológica

La evaluación para incorporar pasos para fauna en la infraestructura lineal y las modificaciones que posibiliten el desplazamiento seguro de los animales a través de ésta, son las medidas más importantes para mitigar la fragmentación del hábitat.

La evaluación de la red de corredores biológicos identificados se realiza con el fin de determinar si son óptimos o no como áreas que facilitan la movilidad de la fauna focal (fichas 6 y 7).

b) Relieve de la zona de ubicación del paso

No existen reglas para saber cuál es el tipo de paso más adecuado. La elección la determinará principalmente la topografía y las características propias del diseño geométrico de la infraestructura lineal.

En la experiencia se ha visto que en un terreno montañoso generalmente es más fácil construir pasos inferiores, permitiendo a la fauna desplazarse por encima de la infraestructura lineal, mientras que, en las zonas llanas se ha visto que es más fácil elevar la rasante de la infraestructura lineal y permitir el desplazamiento de la fauna por debajo de ésta mediante losas u otro tipo de estructura.

Se ha visto que los pasos inferiores para fauna tienen la ventaja de que pueden ser revegetados creando diferentes microhábitats, ya que la vegetación crece con más facilidad que en los pasos superiores.

Por otra parte, los pasos inferiores se mantienen casi siempre secos, por lo que los pasos superiores resultan ser más apropiados para los animales que requieran condiciones de humedad. Por tanto, la elección también depende de los hábitats adyacentes que se pretenda conectar y de las preferencias de las especies implicadas.

En este sentido, aun cuando los pasos en su mayoría se determinan por la topografía y las características particulares de la infraestructura lineal, a estos pasos se deben incluir adecuaciones dependiendo de los requerimientos de las especies para las que están destinados.

c) Especies o grupos taxonómicos de referencia

Cualquier especie puede requerir de la implementación de un paso para fauna y se debe priorizar a las especies de interés local o regional vulnerables a los efectos de la infraestructura. La identificación de estas especies es un paso fundamental en el proceso de planificación como ya se ha mencionado, ya que la ubicación y diseño de los pasos para fauna estarán determinados en gran medida por la distribución y patrones de movimiento de las especies objeto de las mediciones. Algunos ejemplos de estos pasos basados en la experiencia europea se muestran en la siguiente figura:

Figura 11

	Eoductos (7.2.1)	Pasos superiores de fauna (7.2.1)	Pasos superiores multifuncionales (7.2.2)	Pasos entre árboles (7.2.3)	Viaductos (7.3.1)	Pasos inferiores para mamíferos de mediano y gran tamaño (7.3.2)	Pasos inferiores multifuncionales (7.3.3)	Pasos inferiores para pequeños vertebrados (7.3.4)	Drenajes adaptados para animales terrestres (7.3.5)	Drenajes adaptados para peces (7.3.6)	Pasos de anfibios (7.3.7)
Ungulados											
Alce	●	●	—	—	●	○	—	—	—	—	—
Otros cévidos y bóvidos	●	●	○	—	●	●	○	—	—	—	—
Jabalí	●	●	○	—	●	●	○	—	—	—	—
Carnívoros											
Oso pardo	●	●	○	—	●	○	○	—	—	—	—
Lince	●	●	○	—	●	●	○	—	—	—	—
Lobo	●	●	●	—	●	●	●	●	○	—	—
Zorro	●	●	●	—	●	●	●	●	○	—	—
Tejón	●	●	●	—	●	●	●	●	○	—	—
Nutria	○	○	○	?	●	●	●	●	○	○	—
Marta y garduña	●	●	●	—	●	●	●	●	○	—	—
Turón y comadreja	●	●	●	—	●	●	●	●	○	—	—
Gineta	●	●	●	—	●	●	●	●	○	—	—
Lagomorfos											
Liebres	●	●	○	—	●	●	●	—	—	—	—
Conejo	●	●	○	—	●	●	●	—	—	—	—
Insectívoros											
Eizos	●	●	●	—	●	●	●	○	—	—	—
Musarañas	●	●	●	—	●	●	●	○	—	—	—
Roedores											
Ardilla	●	●	●	●	●	●	●	—	—	—	—
Lirones	●	○	○	?	○	—	—	—	—	—	—
Ratones y topillos	●	●	●	—	●	●	●	●	○	—	—
Castor	—	—	—	—	●	—	?	—	?	—	—
Reptiles											
Serpientes	●	●	●	—	●	○	○	—	?	—	—
Lagartos	●	●	●	—	●	○	○	—	—	—	—
Tortugas	●	●	●	—	●	?	?	?	—	—	—
Anfibios	●	○	○	—	●	●	●	○	○	●	—
Peces	—	—	—	—	—	—	—	—	—	●	—
Invertebrados terrestres											
Especies de hábitats secos	●	●	●	—	●	○	○	○	—	—	—
Especies de hábitats húmedos	○	○	○	—	●	○	○	○	○	—	○

● solución óptima

○ se puede utilizar adaptada a las condiciones locales

? desconocida, se necesita más información

— no aplicable

Idoneidad de diferentes tipos de pasos para fauna para distintas especies o taxones (tomado de Iuell, 2003).

Densidad y ubicación de los pasos para fauna

La densidad de estructuras transversales se calculará en función de la longitud de cada subtramo y del tipo de hábitats que atraviesa, así como los requerimientos de las especies.

Esta densidad de pasos para fauna necesarios para mantener la conexión entre los hábitats es una de las decisiones más importantes en la planificación de las medidas de mitigación.

La decisión estará basada en las especies de referencia seleccionadas, su distribución y su tipo de hábitat. En algunos casos pueden ser necesarios uno o dos pasos grandes, mientras que en otros casos, el problema puede ser resuelto con un mayor número de pasos de menor tamaño.

En el caso de México se debe recordar que la mayoría de las especies presentes son de tamaños pequeños y medianos, por lo que algunos criterios a considerar son los siguientes:

- Para determinar el número de pasos se debe conocer el comportamiento de las especies de referencia.
- La densidad de los pasos debe ser mayor en las zonas que crucen ambientes naturales.
- Se deben tomar en cuenta la presencia de corredores que conduzcan a los pasos.
- No se deben excluir los pasos en zonas agrícolas ya que pueden ser esenciales para mantener la permeabilidad de fauna silvestre también presente en estos espacios.

Algunos estudios como el de San Vicente y Valencia (2009) han usado el siguiente criterio (Tabla 2), no obstante, aún falta mucha investigación en este campo y es posible que, para especies de menor tamaño y ámbitos hogareños reducidos, los criterios sean distintos y tal vez se requiera incluir una mayor densidad de pasos.

La ubicación debe ser definida en función de los datos disponibles sobre los movimientos de los animales y la distribución de sus hábitats. En este punto pueden ser utilizados los modelos de desplazamiento y de corredores creados en la planificación del trazado (Capítulo 2, modelos de idoneidad [Ficha 4], mapas de resistencia, mapas de mínimo coste [Ficha 5], evaluación de conectividad [Fichas 6 y 7]).

Consideraciones y recomendaciones

Se recomienda tener en cuenta que:

- Los valles y cursos fluviales canalizan los desplazamientos de muchas especies.
- La continuidad de bosques y matorrales a ambos lados de la vía condicionan rutas de paso habitual.

- Deben evitarse ubicaciones que pueden resultar afectadas por otras barreras existentes en el entorno natural.
- Debe garantizarse que el paso se mantenga funcional a largo plazo integrándolo en la planificación del ordenamiento de su territorio o la planificación urbanística de su entorno.

Si se comprueba que la densidad de pasos en un punto determinado es baja para conseguir el nivel de permeabilidad necesario en la infraestructura en una región concreta, se deben identificar otros sitios donde se puedan construir estructuras adicionales.

Tabla 2

Tipos de hábitats interceptados por los tramos de las infraestructuras lineales de transporte	Tipos de estructuras en función de su permeabilidad	
	Adecuadas para grandes mamíferos	Adecuadas para medianos mamíferos
Hábitats forestales y otros tipos de hábitats de interés para la conexión de hábitats fragmentados	1/1 km	1/500 m
Hábitats transformados por actividades humanas	1/3 km	1/1 km

Densidades orientativas de estructuras transversales para la permeabilización de infraestructuras lineales.

FICHA 10
MEDIDAS A CONSIDERAR PARA ESTABLECER PASOS PARA FAUNA
EN INFRAESTRUCTURA LINEAL EXISTENTE

Fase de aplicación:

Ubicación estratégica.

Precepto o requerimientos:

La metodología para establecer los sitios de relevancia para la implementación de pasos para fauna en la infraestructura lineal existente, presenta cierta variación que cuando ésta aún no existe. Para el primer caso, además de los métodos indicados y aplicados en la fase de Planificación, presentados en el Capítulo 2 y las presentes en este capítulo, se deberá complementar con un monitoreo de la infraestructura lineal que permita conocer su necesidad de permeabilidad.

Por lo tanto, en primera instancia se deberán realizar los estudios descritos en el Capítulo 2 con el objetivo de identificar los corredores ecológicos presentes en el área de la infraestructura lineal. Estos estudios servirán para identificar sitios donde se deben orientar los esfuerzos de monitoreo de fauna.

Teniendo claros estos sitios, se deberán realizar las siguientes actividades, mismas que se describen con mayor detalle en el Capítulo 7 de este Manual.

Criterios Metodológicos:

Monitoreo ambiental para evaluar la permeabilidad faunística en la infraestructura lineal

a) Índice de atropello

Consiste en identificar los tramos de la infraestructura lineal en los que se produce una elevada mortalidad de fauna a causa de atropellos o colisiones vehículo-animal y en los que se requieren medidas de mitigación para reducir la mortalidad.

El Índice de Atropello (IP) consiste en registrar el número de individuos de diferentes especies que son víctima de atropello o colisión vehículo-animal, con relación a la longitud del tramo de infraestructura lineal inspeccionado. Para calcular el IP se aplica la siguiente fórmula:

$$IP = a / kt$$

Donde:

α = número de atropellos para una especie (o para el conjunto de ellas) en el tramo de análisis.

k = extensión (km) de la infraestructura lineal analizada.

t = días de monitoreo de atropellos en la infraestructura lineal analizada.

La información se debe ingresar en una base de datos, generando mapas en un Sistema de Información Geográfica, que proporciona imágenes precisas de las zonas con mayor densidad de atropellos, así como los posibles puntos críticos a lo largo del trazo de la infraestructura lineal.

b) Registro de la fauna presente a lo largo de la infraestructura lineal

1. Foto trampeo

En años recientes se ha incrementado la utilización en el campo de las llamadas cámaras-trampa, que consiste en colocar cámaras automatizadas ya sean sujetas en troncos de árboles o en varillas, a una altura determinada. Su uso ha permitido detectar especies sigilosas o de hábitos nocturnos que, mediante otros métodos de muestreo, no habrían sido posibles de registrar. Estas cámaras-trampa poseen un sensor de calor y movimiento, las cuales deben ser colocadas en los sitios identificados como posibles corredores ecológicos.

2. Registro de huellas

Como técnica complementaria al uso de las cámaras-trampa para identificar las especies de fauna silvestre que cruzan la infraestructura lineal, se coloca una capa de tierra cernida o algún otro material fino como yeso o arena fina en sitios estratégicos (nuevamente estos lugares corresponden con los sitios donde a partir de los modelos se han identificado corredores biológicos).

3. Monitoreo de fauna en las inmediaciones de los pasos para fauna (complemento)

Las especies captadas deberán ser registradas en una base de datos SIG, con el objetivo de realizar los análisis pertinentes para determinar especies focales y sitios de mayor incidencia de fauna que comprueben y determinen corredores ecológicos.

Estas bases de datos en conjunto con los sitios de mortandad por atropellos y colisiones vehículo-animal, ayudarán a determinar los sitios prioritarios para establecer pasos para fauna, su densidad y tipo, acordes con las características de las especies focales presentes y el tamaño del corredor.

FICHA 11

MODELOS PARA EVALUAR LA PERMEABILIDAD

Circuitscape

Fase de aplicación:

Ubicación estratégica.

Breve descripción del modelo:

Para conectividad con corredores ecológicos.

Este modelo simula algoritmos basados en la teoría de circuitos eléctricos para predecir patrones de movimiento, flujo de genes y diferenciación genética entre las poblaciones de plantas y animales en paisajes heterogéneos. La teoría de circuitos complementa los alcances de la ruta de menor costo ya que considera los efectos de todas las posibles rutas a lo largo del paisaje en simultáneo. Los paisajes están representados como superficies de conducción, con resistencias bajas asignadas a los tipos de paisaje que son más permeables al movimiento o que mejor promuevan el flujo de genes, y las resistencias altas son asignadas a las barreras de movimiento. Las resistencias efectivas, el flujo actual, y los voltajes calculados a lo largo del paisaje pueden estar relacionados a procesos ecológicos, tales como el movimiento individual y el flujo de genes. La siguiente Figura es una impresión de pantalla de la interfaz del programa para hacer la modelación a manera de ejemplo.

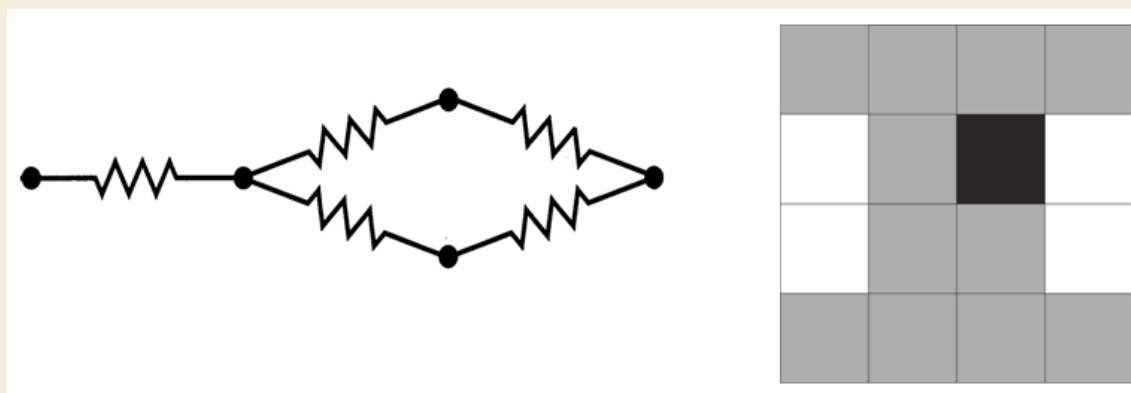
Figura 12



Interfaz de *Circuitscape*. Variables, requerimientos y/o especificaciones que utiliza.

La forma en que *Circuitscape* trabaja es proveyendo al programa con datos de resistencia y el programa calcula resistencias efectivas y/o crea mapas de flujo de corriente y voltaje a lo largo del paisaje y sus redes. El modelo lee tipos de datos tales como una red de nodos conectados por enlaces o un grid ráster de resistencia (Figura 13). Los enlaces y las celdas del ráster tienen valores de resistencia atribuidos que reflejan el grado al cual el paisaje facilita o impide el movimiento. Las redes y los mapas ráster pueden ser codificados en resistencias (con valores altos indicando mayor resistencia al movimiento) o conductancias (lo recíproco a resistencia) cuyos valores altos indican mayor facilidad de movimiento.

Figura 13



Ilustraciones simples de ejemplo de los tipos de datos.
A la izquierda está la red de nodos y a la derecha un grid ráster.

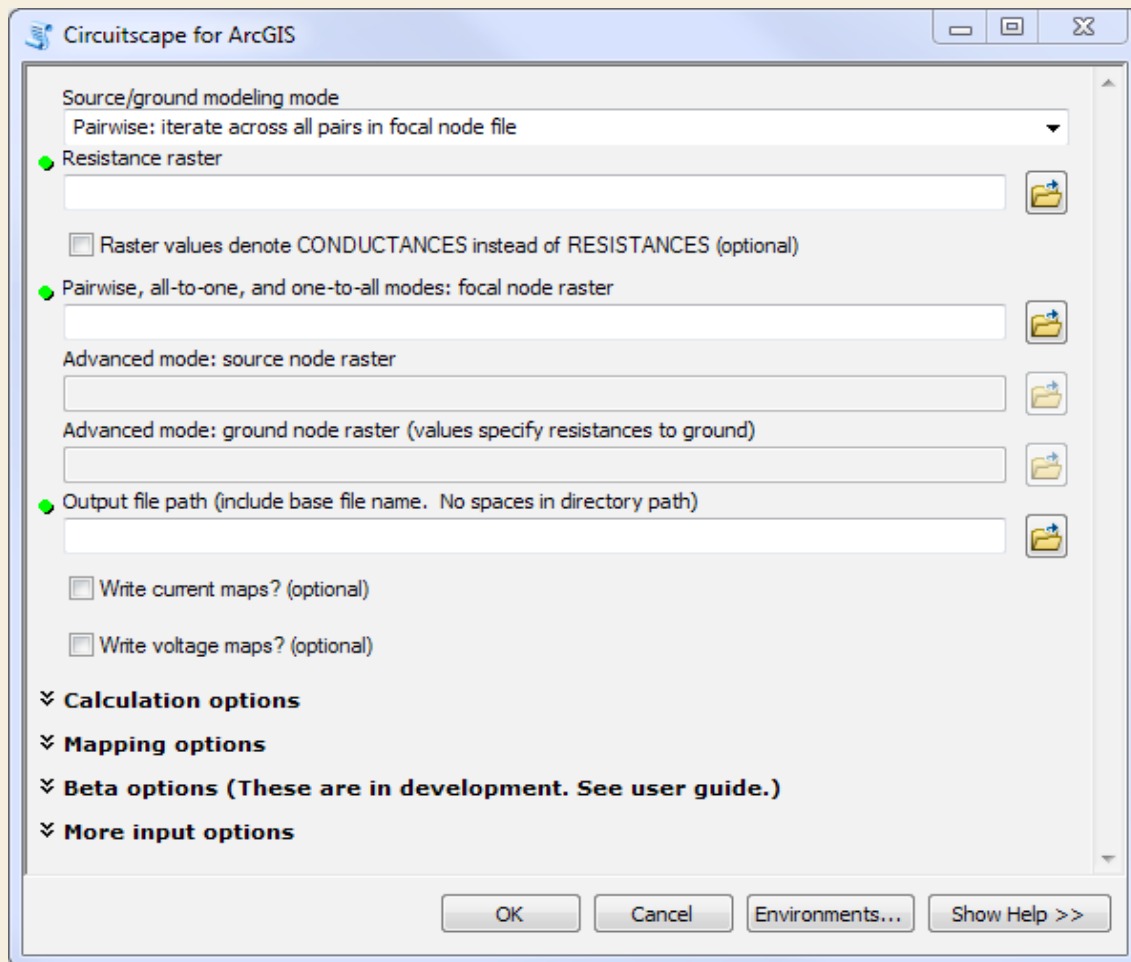
El mapa de hábitat debe ser en formato ráster, éste especifica la habilidad de cada celda en el paisaje para simular el flujo de movimiento a través de parches de hábitat (como un circuito donde se carga corriente). Estos mapas deben estar en el formato “grid” de *Arc/Info ASCII estándar*, tal como se exporten en cualquier programa de SIG.

Los valores con cero o infinitos para las resistencias o conductancias (Ficha 5) representan casos especiales. Las resistencias infinitas son codificadas como valores NO DATA en “grid” de resistencia en el archivo de entrada, o como cero o NO DATA en los “grid” de conductancia; éstos son manejados como barreras y son separados de todas las demás celdas.

Herramientas de análisis y aplicaciones:

Los modos de cálculo de *Circuitscape* son cuatro: en parejas, avanzado, uno a todos, todos a uno; (pairwise, advanced, one-to-all, all-to-one). Los dos primeros están disponibles para los dos tipos de datos, mientras que los dos últimos nada más están disponibles para los datos ráster. La siguiente Figura muestra lo descrito anteriormente, en la interfaz del modelo en la herramienta compatible con *ArcGIS*.

Figura 14



Ejemplo de interfaz de *Circuitscape* en la caja de herramientas de *ArcGIS*.

En el **modo en parejas**, la conectividad es calculada entre todos los pares de áreas o nodos focales (puntos o regiones entre los cuales la conectividad ecológica va a ser modelada) (Ficha 3), proporcionados al programa en un archivo de entrada. Para cada par de nodos focales, un nodo será conectado arbitrariamente a una fuente de 1 ampere de corriente, mientras que el otro se conectará a tierra. Las resistencias efectivas se calcularán iterativamente entre todos los pares de nodos focales y, si se seleccionan, se harán mapas de corriente y voltaje (ruta o corredor) (Ficha 5). Si hay “n” nodos focales, habrá $n(n-1) / 2$ cálculos, a menos que se usen puntos focales (solamente una celda por nodo focal) y no se hagan mapas de corriente o voltaje. En este caso se pueden hacer en “n” cálculos, para mayor rapidez.

El **modo avanzado** ofrece mayor flexibilidad en definir las fuentes y blancos para una corriente de flujo. El usuario define un número de fuentes de

corriente y un número de tierras, en un paisaje de redes o ráster, y éstos se activan todos simultáneamente.

Las fuentes representan puntos o áreas de los cuales la corriente fluye, donde el punto tierra representa nodos donde la corriente sale del sistema. Los nodos fuente pueden tener diferentes fuerzas (esto es inyectar más o menos corriente a la red o al ráster), y los nodos tierra pueden estar atados a tierra con cualquier resistencia. Las fuentes de corriente y los puntos tierra se proporcionan en archivos diferentes.

Los otros dos modos son únicamente para los datos ráster. El modo **uno a todos** es similar al modo en parejas, y tiene los mismos archivos de entrada. Pero, en lugar de hacer el mismo proceso en todos los pares de nodos focales, lo hace en todos los nodos focales. En cada iteración un nodo focal se conecta a la fuente de corriente de 1 ampere, mientras todos los demás se conectan a tierra. Si hay “n” nodos focales, habrá “n” cálculos.

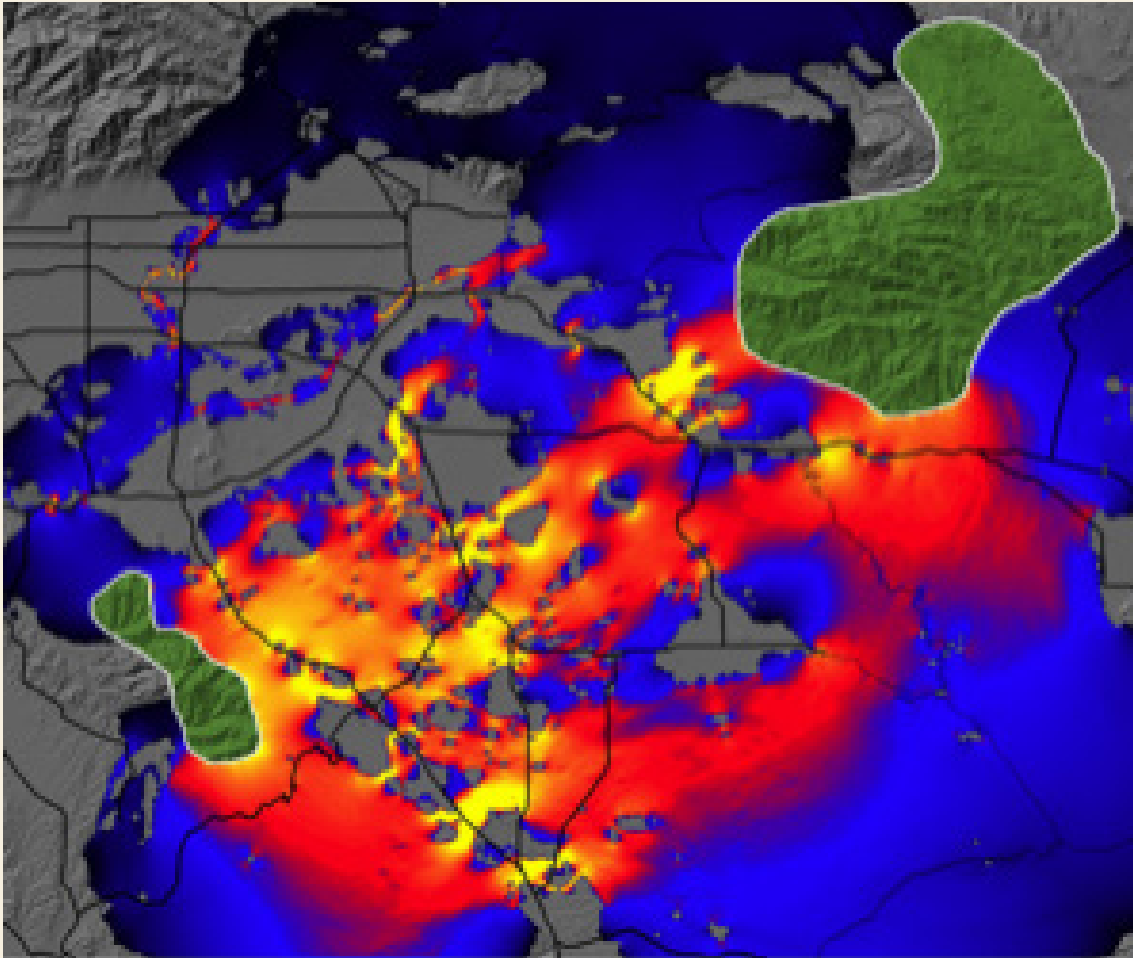
El **modo todos a uno** es similar al modo uno a todos, y tiene los mismos archivos de entrada. La diferencia es que en este caso se conecta un nodo focal a tierra y todos los demás a una fuente de corriente de 1 ampere. Después se repite el proceso para cada nodo focal, si hay “n” nodos focales, habrá “n” cálculos.

Los mapas que se generan pueden mostrar la densidad de corriente y voltaje en cada nodo o celda bajo cada configuración (y flujo corriente para cada enlace/resistor en las redes). Además, se crea un archivo reportando las resistencias efectivas entre todos los pares de nodos focales en el modo en parejas, y entre cada nodo y tierra entre el modo uno a todos. Las resistencias en el modo todos a uno no están definidas, así que un archivo se escribe con ceros que indican resultados exitosos.

En el caso de los mapas de flujo de movimiento (corriente), éstos tienen valores en cada nodo o celda, representando la cantidad de flujo de corriente a través del nodo. Estos mapas se pueden usar para identificar áreas que contribuyen a la mayor conectividad entre puntos focales.

En la siguiente figura se puede ver un mapa de flujo de movimiento (corriente) que sirve para predecir áreas importantes de conectividad entre parches de hábitat –polígonos verdes que se usaron como regiones focales– para el puma. Los colores más cálidos indican áreas con densidad de corriente más alta. Los puntos de atracción (pinch points), o áreas donde la conectividad es más tenue, se muestran en amarillo.

Figura 15

Ejemplo de mapa de flujo de movimiento usando *Current Map*.

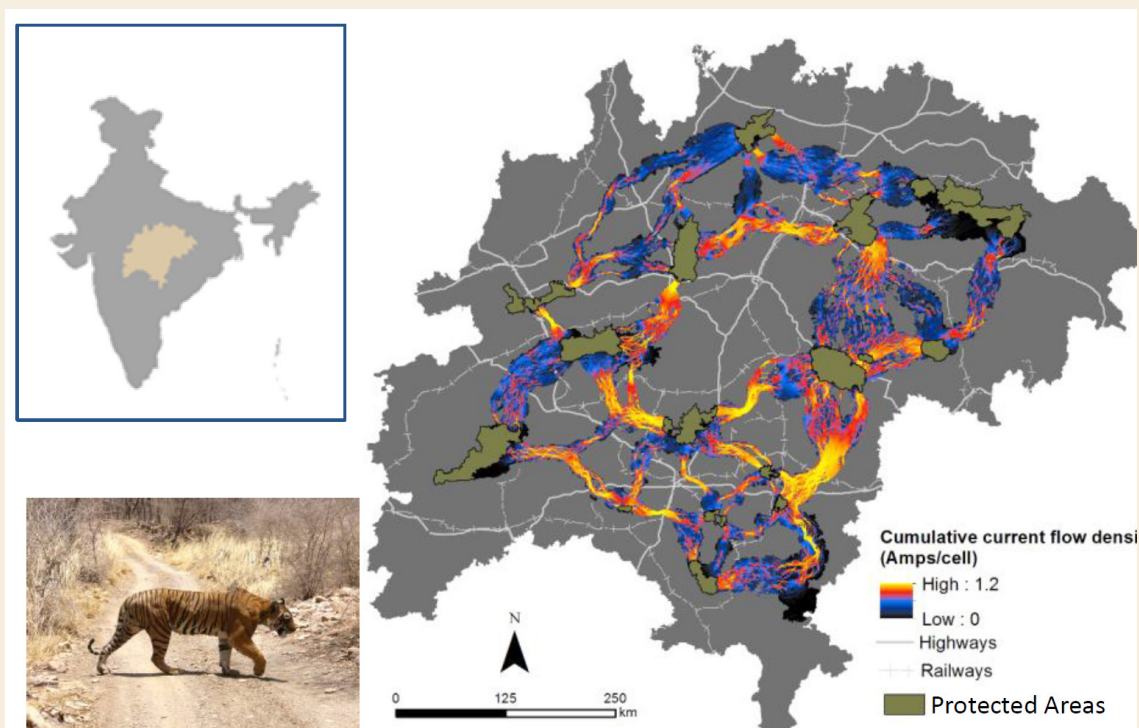
Algunas aplicaciones de *circuitscape* en la ecología del paisaje y análisis de conectividad son:

- a) Diseño de corredores de vida silvestre. Se usan en los ejercicios de planificación para la adquisición, restauración y gestión de tierras, esto en el marco de la Conservación de la Naturaleza. Algunas ONG's usan *Circuitscape* para establecer prioridades de conservación.

Ejemplos de uso de este método serían:

La planeación de conectividad de multiespecies en Borneo; la conectividad para el Puma en Arizona y Nuevo México; la planeación de grandes paisajes a lo largo de Ontario en Canadá; la priorización de conectividad de los gibones; los corredores para tigres en India; la conectividad para los leopardos Amur en China; la conservación pasando fronteras en Irán, Turquía, Armenia y Azerbaiyán; la conectividad multi-escala en Australia, entre otros.

Figura 16



Métodos combinados de *Circuitscape* con la ruta de menor costo para trazar puntos de atracción dentro de corredores conectando áreas protegidas para los tigres en India central. Las áreas con el flujo de corriente alto son las más importantes para los movimientos del tigre y mantienen la red conectada.

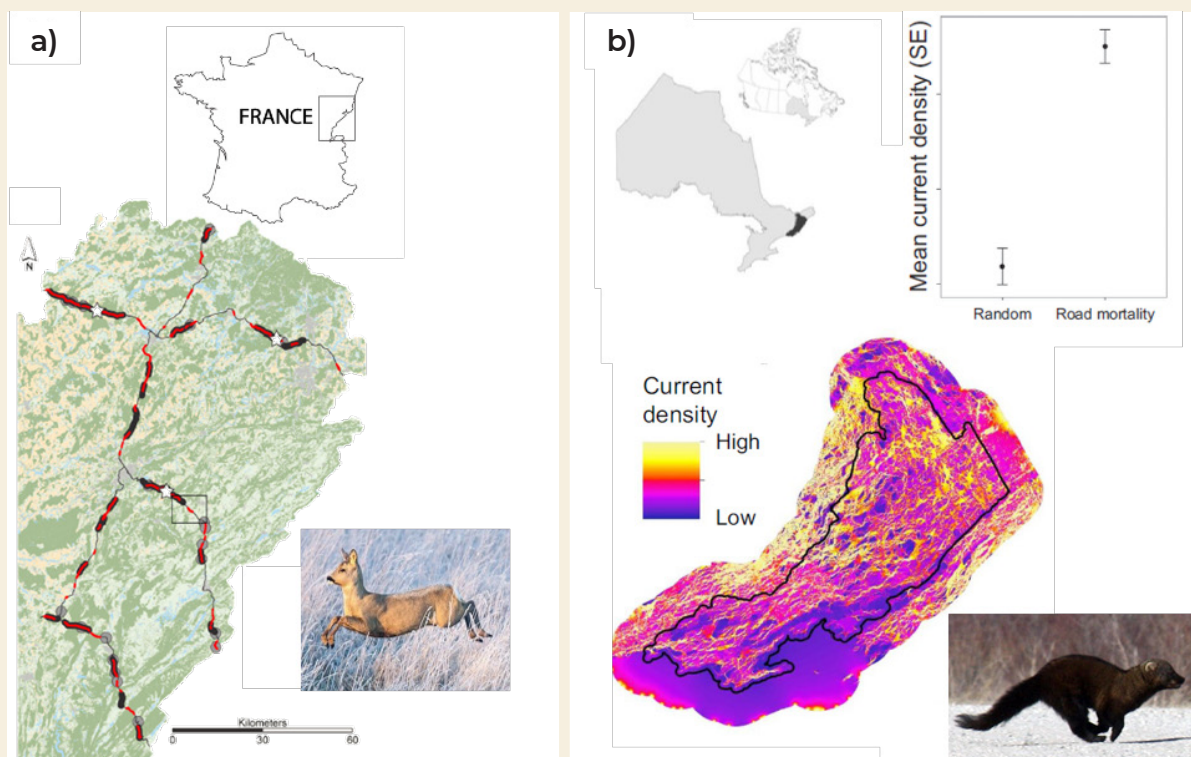
- b) Genética del paisaje. El estudio de cómo los patrones de paisaje (la distribución del hábitat adecuado, barreras como infraestructura lineal, etc.) afectan el flujo de genes y la diferenciación genética entre las poblaciones de plantas y animales. *Circuitscape* es usado ampliamente en este campo, y se ha combinado con datos genéticos para mostrar algunos resultados entre los que destacan:

La resiliencia de las lagartijas de selva tropical al cambio climático en los trópicos australianos; la manera cómo las plantaciones de aceite de palma aíslan a los monos ardilla en Costa Rica y donde los corredores de los árboles nativos pueden reconectar a las poblaciones; cómo la genética y los modelos de conectividad se pueden combinar para diseñar corredores del tigre de la India; cómo el cambio climático y la montaña han estructurado las poblaciones de la salamandra en el sur de California; los efectos del cambio en el paisaje en movimiento entre las colonias del perrito de las praderas, y cómo el paisaje presenta influencia en la conectividad genética para muchas especies.

- c) Ecología de movimiento. La teoría de circuitos también se puede usar para predecir movimientos de animales y cómo éstos afectan a la conectividad de la población. Esta aplicación está estrechamente ligada a la planeación de la conservación.

Por ejemplo: El movimiento de los perros salvajes y cheetas en Sudáfrica; la dispersión del glotón (wolverine) en gran ecosistema de Yellowstone; cómo las inundaciones periódicas afectan la conectividad para los anfibios en Australia; predicciones donde la mitigación de los impactos en las carreteras reduciría la mortalidad de los animales en Francia; el movimiento y comportamiento del cruce de brechas de algunas aves, entre otros.

Figura 17



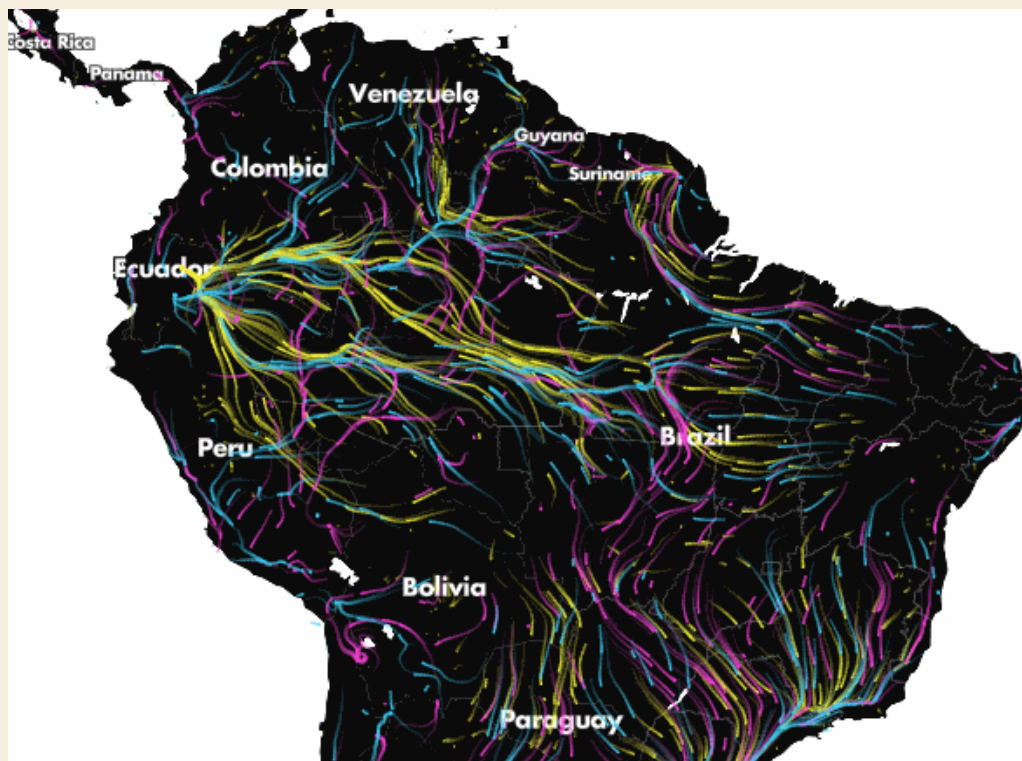
a) Teoría de circuitos usada para predecir colisiones de vehículos con el venado en Francia (imagen lado izquierdo), b) mapa de conectividad creado usando *Circuitscape* donde se ve una alta correlación con la mortalidad en carreteras de los anfibios y reptiles, y el uso del hábitat por pescadores en el este de Ontario, Canadá.

d) Conectividad para el cambio climático. Una de las formas más importantes en que las especies han respondido a los cambios climáticos pasados ha sido cambiar sus rangos para rastrear climas más adecuados. El calentamiento rápido proyectado para el siguiente siglo significa que varias especies y poblaciones necesitarán moverse mucho más rápido que en el pasado o extinguirse. Algunas especies ya se están moviendo en respuesta a esto, pero también se encuentran con barreras –como carreteras, áreas agrícolas y ciudades– que no estaban presentes en el pasado. Para que las especies mantengan su conectividad de población y la habilidad de adaptarse al cambio climático se necesita identificar y conservar rutas importantes de movimiento. Aquí se mencionan algunas formas de cómo se puede usar *Circuitscape* para ello.

Ejemplos:

Se demostró cómo la teoría de circuitos puede usarse para diseñar paisajes que promuevan rápidos cambios de rango; también se usó para proyectar movimientos de casi 3000 especies en respuesta al cambio climático a lo largo del hemisferio oeste; se combinó la distribución de especies, proyecciones climáticas, datos genéticos y teoría de circuitos para predecir rutas de cambio de rangos para los murciélagos, entre otros.

Figura 18



Ejemplo de mapa usando *Circuitscape* en donde se muestran cambios de rango proyectados por las condiciones climáticas en 2,903 especies, en respuesta al cambio climático. Las direcciones de las líneas (flechas) representan la dirección de los movimientos modelados de climas inadecuados a climas adecuados por medio de rutas que evitan los usos de suelo humanos.

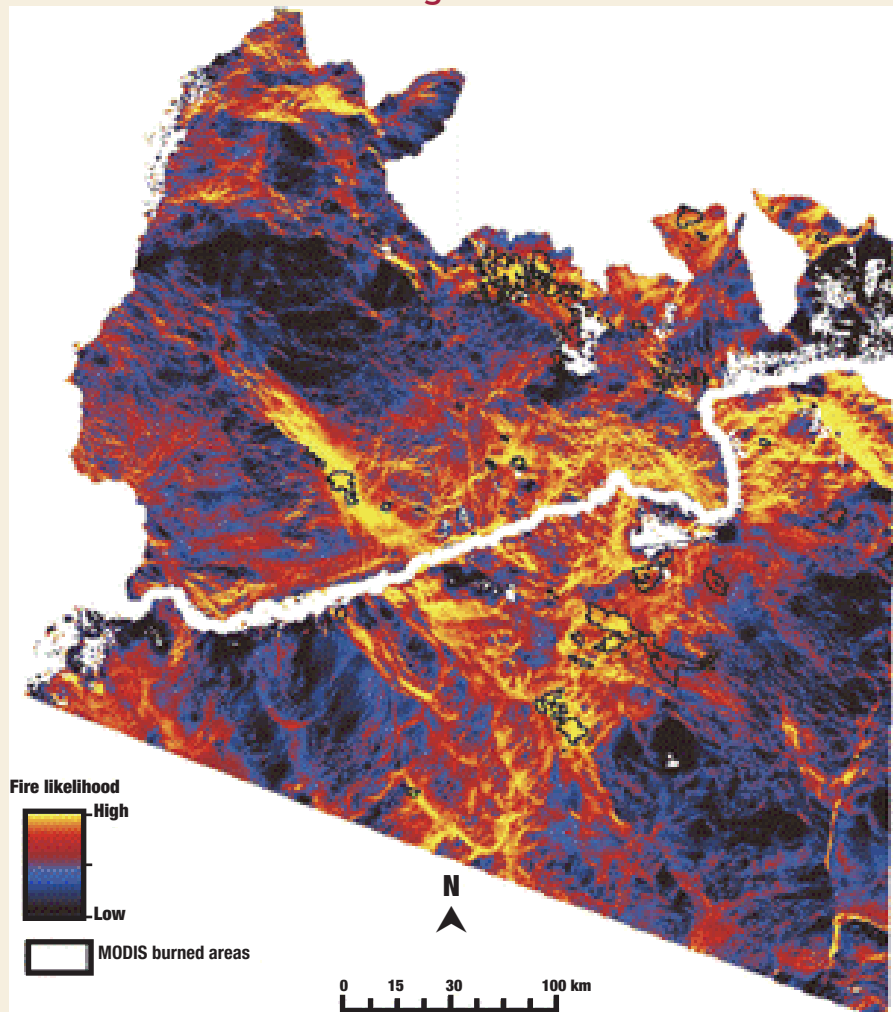
- e) Otras aplicaciones, enfermedades infecciosas, incendios y agricultura, tales como la epidemiología, la propagación de especies invasivas, la arqueología, y el manejo de los incendios.

Ejemplos:

Cómo las redes de caminos conducen la propagación del VIH en África; la propagación de insectos invasivos, entre ellos los mosquitos; el entendimiento del porqué las reintroducciones de especies tienen éxito o fracasan; la propagación de una enfermedad que está amenazando la producción de arroz en África; la propagación de la rabia; cómo el clima y la fragmentación del hábitat

conducen la enfermedad de Lyme y su rango límite; la conectividad del combustible y el riesgo de incendio forestal, y cortes de combustible estratégicos para proteger al hábitat del urogallo (*sage-grouse*) de un incendio forestal.

Figura 19



Probabilidad de incendio en el desierto sonorense de Arizona.
Se usó un modelo de conectividad utilizando *Circuitscape*.
Las áreas con alto riesgo de incendio correspondieron con datos de áreas quemadas mostrando dónde ocurrieron los incendios forestales desde el año 2000 al 2012.

Observaciones:

Es amplia la bibliografía acerca de los estudios en donde se ha usado este modelo. Para conocer más a fondo *Circuitscape* se recomienda revisar las siguientes páginas de donde se ha obtenido la presente información:

<https://circuitscape.org/about/>

<https://circuitscape.org/>

<https://circuitscape.org/applications/>

Linkage Mapper

Fase de aplicación:

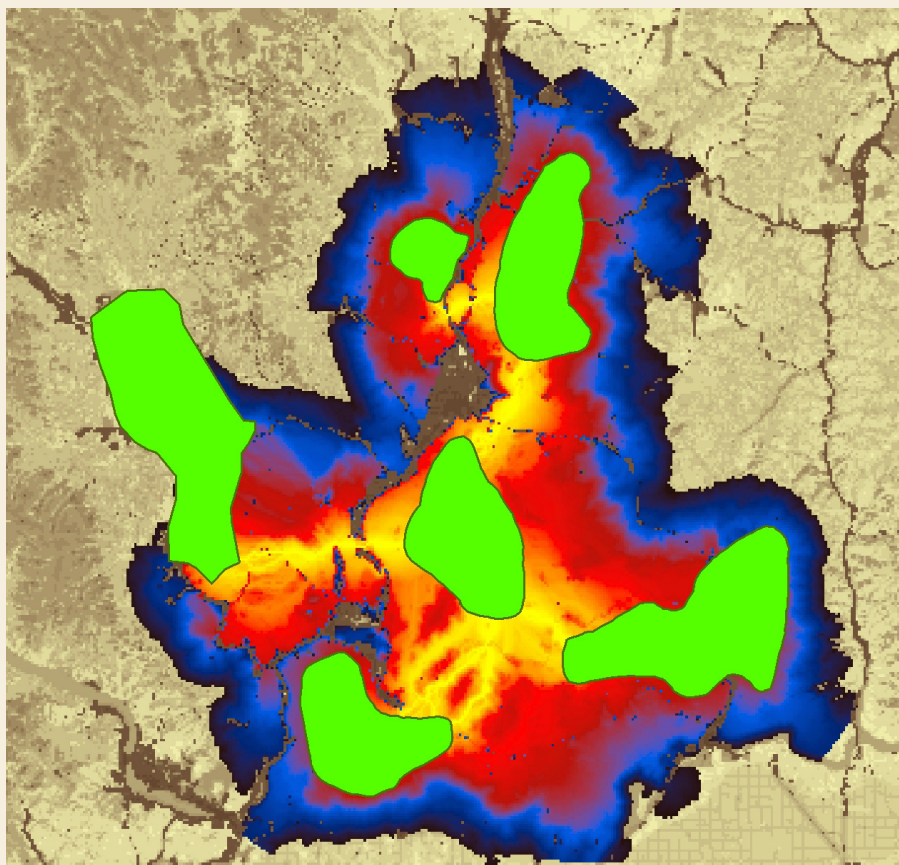
Ubicación estratégica.

Breve descripción del modelo:

Para corredores biológicos.

Este modelo utiliza el análisis de corredores de menor costo-desplazamiento, teoría de circuitos, y análisis de barrera para trazar el mapa de corredores, detectar los puntos de atracción y las oportunidades de restauración dentro de ellos, e identificar áreas núcleo y corredores importantes (Figura 20). A diferencia de otros programas de análisis de conectividad mediante corredores, el análisis realizado por *Linkage Mapper* no profundiza en análisis de superficies y anchuras de corredores de manera directa e individualizada. En este tipo de análisis se realizan conexiones masivas entre múltiples parches con el fin de desarrollar trazados lineales que describan las rutas potenciales a tomar por parte de las especies. Gracias a estos trazados lineales podemos localizar puntos críticos que generan fenómenos de fragmentación de espacios debido a efectos de barrera, ausencias de pasos para fauna, etcétera.

Figura 20



Mapa de corredores usando *Linkage Mapper*.

Variables, requerimientos y/o especificaciones que utiliza

Esta herramienta permite analizar la información en cascada con el fin de obtener diferentes capas temáticas que ilustren los resultados. Para ello, los análisis van realizándose mediante fases o pasos hasta completar un total de cinco fases. Cada uno de estos pasos consta de los siguientes análisis:

- Paso 1: Identificación de territorios adyacentes entre espacios vecinos y generación de zonas vecinas (Ficha 4).
- Paso 2: Construcción de una red de conectividad entre espacios basadas en distancias a cada espacio (Ficha 5).
- Paso 3: Cálculo individualizado de costos y distancias de desplazamiento entre espacios y trazado de rutas entre ellos (Ficha 5).
- Paso 4: Especificación de relaciones de conexión entre un número concreto de espacio (Ficha 6).
- Paso 5: Creación de la red final de corredores (fichas 6 y 7).

Figura 21

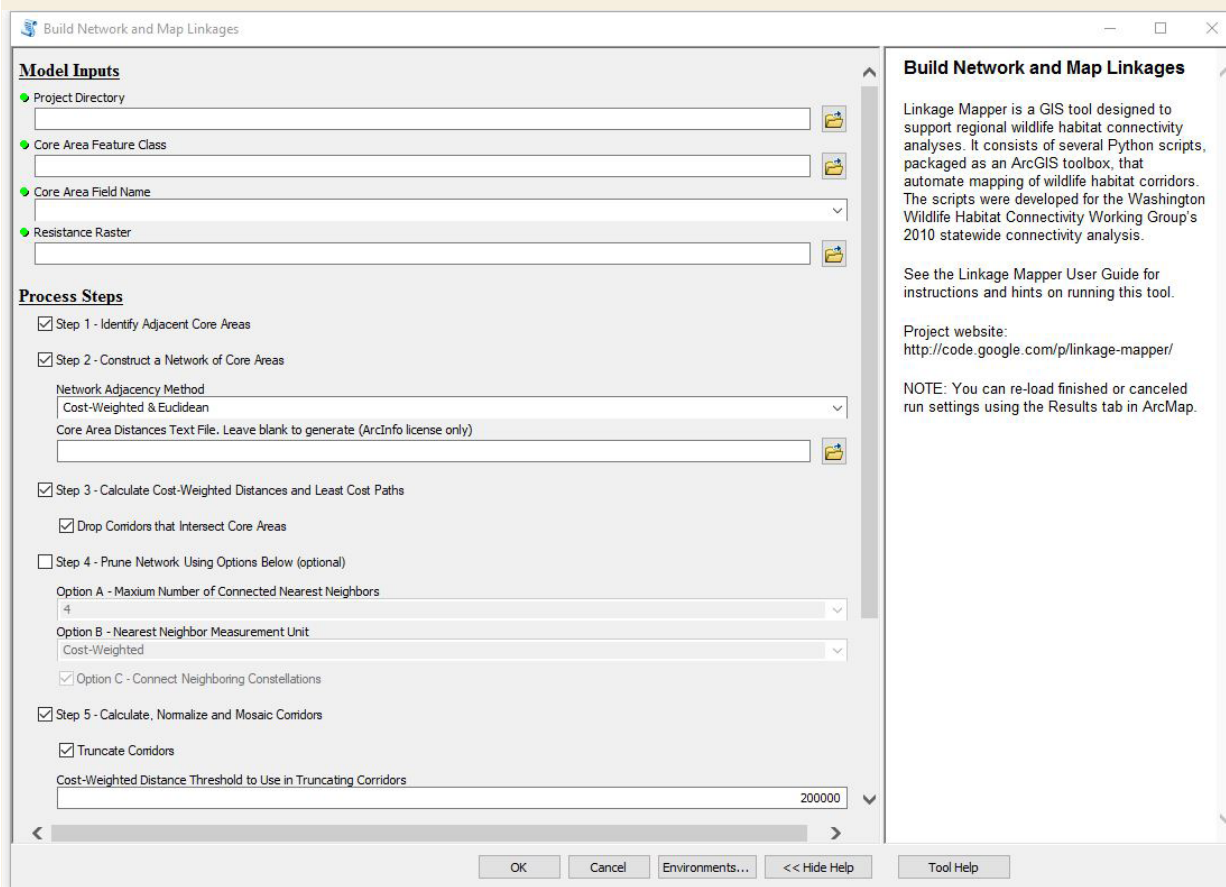


Imagen de la interfaz del modelo *Linkage Mapper* en la caja de herramientas de ArcGIS.

Los resultados finales quedan representados mediante archivos vectoriales de corredores y archivos ráster de esfuerzos que son gestionados desde geodatabases.

Archivos de entrada requeridos:

- Directorio del proyecto. Es la ruta en la computadora donde se creará toda la información cuando se hagan los pasos descritos anteriormente.
- Archivo de las áreas núcleo. Son los polígonos de las áreas de hábitat que se usarán como los núcleos que se unirán mediante los corredores (Ficha 2).
- Nombre del campo de las áreas núcleo. Es el campo en el archivo que contiene un identificador único para cada núcleo, debe ser entero (*integer*).
- Archivo ráster de resistencia. Es el ráster de costo, creado con las variables que se usaron a partir de los intereses buscados (vegetación, topografía, carreteras, hidrología, etc.) (Ficha 5).

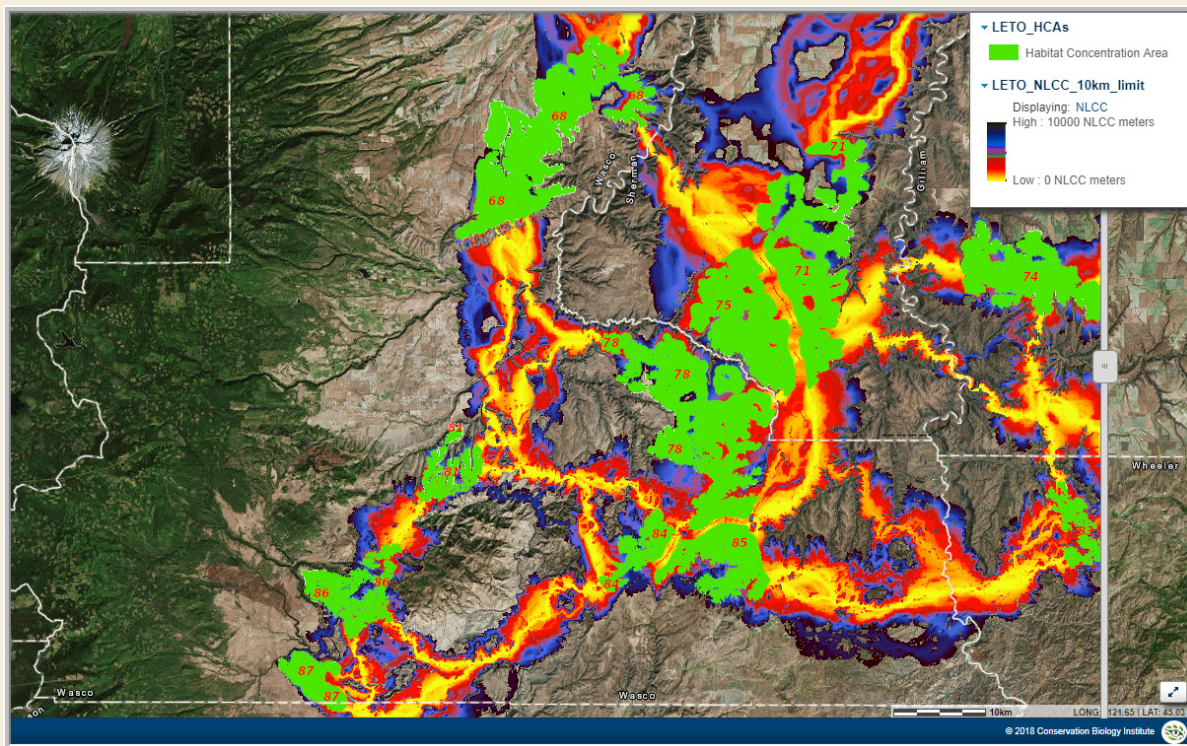
Herramientas de análisis y aplicaciones:

Consiste en seis herramientas que automatizan el mapeo y la priorización de los corredores de hábitat animal, éstas son:

- Rutas de enlace (*Linkage Pathways*).

Es la herramienta principal y original del paquete de herramientas, utiliza mapas de áreas hábitat núcleo y resistencias para identificar y trazar enlaces entre estas áreas. Cada celda en un mapa de resistencia tiene un valor atribuido que refleja el costo (dificultad y riesgo de mortalidad) de moverse a lo largo de la celda. Los valores de resistencia son determinados por las características de la celda, tales como la cobertura vegetal o la densidad de vivienda, combinados con los modelos de resistencia de paisaje de especies específicas. Mientras que los animales se muevan de áreas focales específicas, los análisis de distancia de costo ponderado producirán mapas de movimiento total de resistencia acumulado. Esta herramienta usa guiones *ArcGIS* y *Python* para identificar áreas núcleo adyacentes (que sean vecinas) y crea mapas de corredores de menor costo entre ellas. Luego combina los corredores individuales para crear un mapa de corredores compuesto. Los resultados muestran el valor relativo de cada celda proporcionando conectividad entre las áreas núcleo, dejando que los usuarios identifiquen qué rutas encuentran características que faciliten o impidan el movimiento entre estas áreas. Las rutas de enlace también producen capas en formato de vector que pueden ser consultadas para obtener estadísticas del corredor.

Figura 22



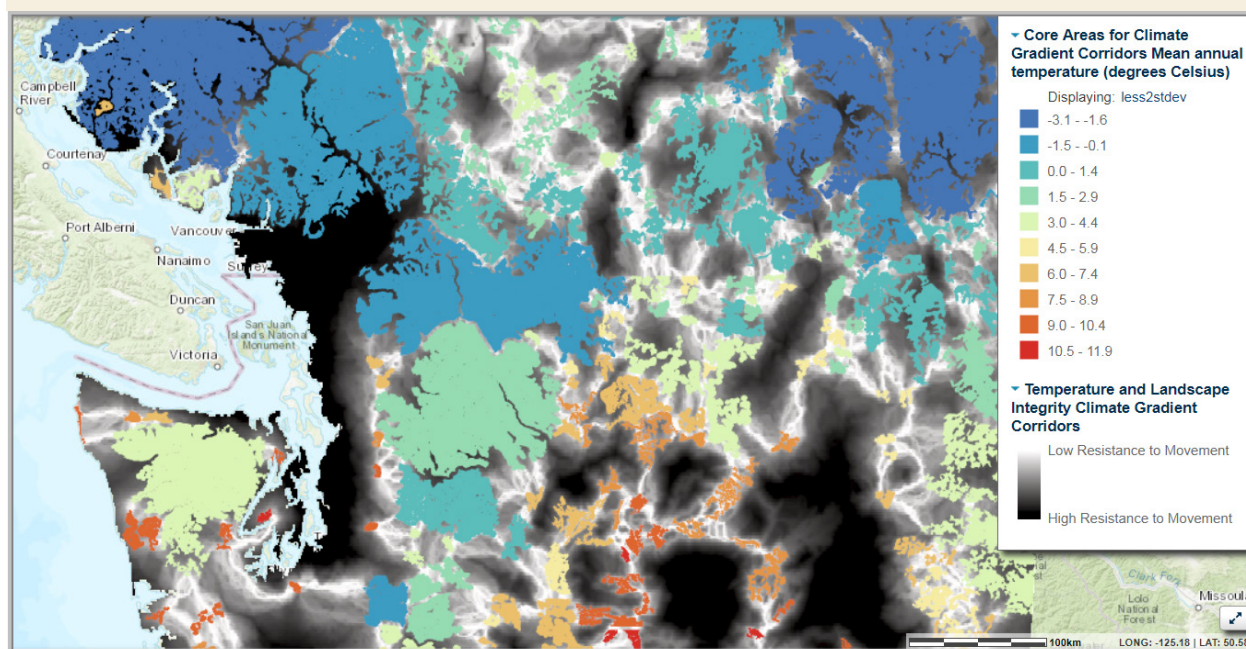
Rutas de enlace y áreas de concentración de hábitat de la liebre en Oregon, Estados Unidos.

- Trazado de enlace climático (Climate *Linkage Mapper*).

Esta herramienta afina las rutas de enlace entre las áreas núcleo tanto que minimiza el rango de los micro-climas (la temperatura, o la diferencia climática del agua) que se encuentren a lo largo del enlace. Tomando un ejemplo de dos crestas de montaña en el este y oeste de un valle cálido, y están unidos en el extremo norte, para hacer una forma de U. Esta herramienta sugerirá que el enlace de un área núcleo en una cresta hacia el área núcleo de la otra cresta es atravesando las crestas, conectándose al norte, en lugar de usar el corredor tradicional de la ruta de menor costo que no toma en cuenta los rangos climáticos y baja al valle cálido y después sigue hacia el otro lado. Eso hace que aumente la probabilidad de que el enlace trazado sea el que realmente es usado por los animales, especialmente por la fauna sensible al clima.

Los únicos enlaces trazados son aquellos que reúnen un umbral de diferencia climática dado por el usuario entre los dos núcleos.

Figura 23



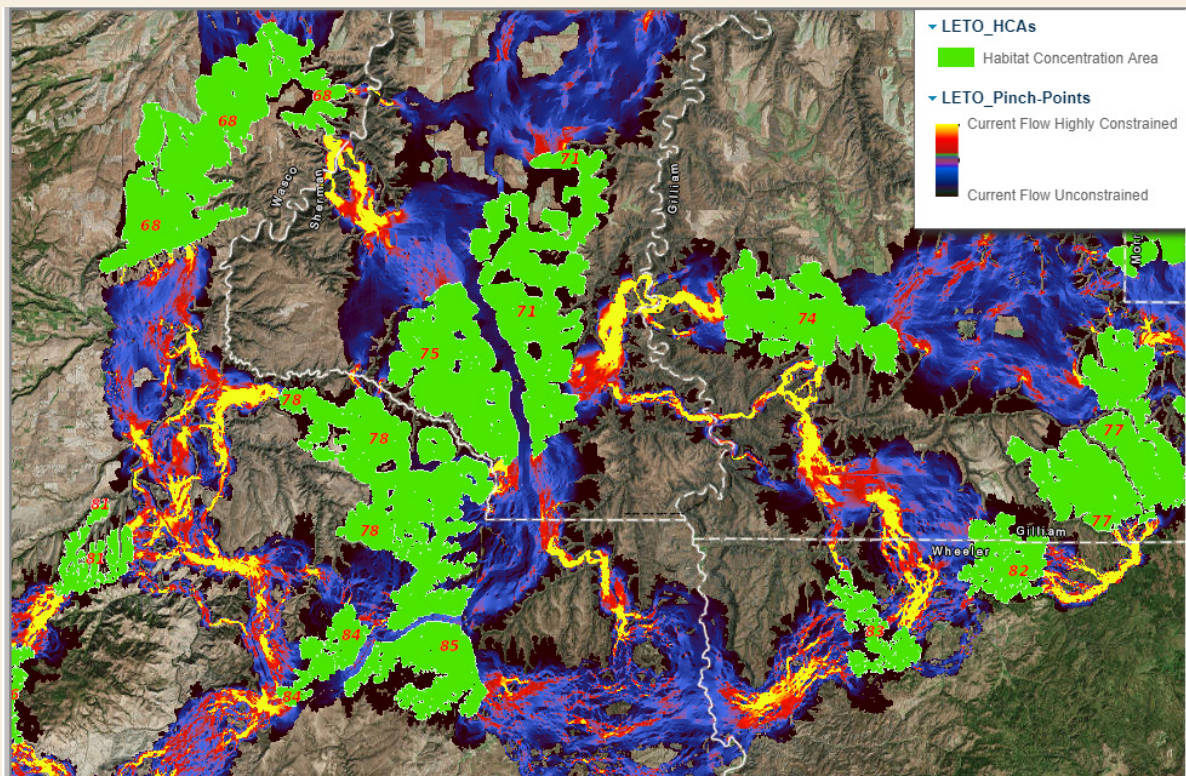
Mapa del pino madera blanca, en la frontera entre Estados Unidos y Canadá (Washington y British Columbia).

- Trazado de puntos de atracción (*Pinchpoint mapper*)

Ya que los corredores se hayan trazados usando las rutas de enlace, o el enlace climático, con esta herramienta se hace uso de la teoría de circuitos para utilizar *Circuitscape* dentro de los corredores resultantes. Esto produce mapas de corrientes que identifican y dibujan puntos de atracción –constricciones o cuellos de botella– (Ficha 6) dentro de los enlaces.

Los puntos de atracción representan áreas donde el movimiento es canalizado y así puede ser particularmente importante para mantenerse intacto. Incluso si se pierde una pequeña cantidad de área en estos puntos de atracción, comprometería desproporcionalmente la conectividad.

Figura 24

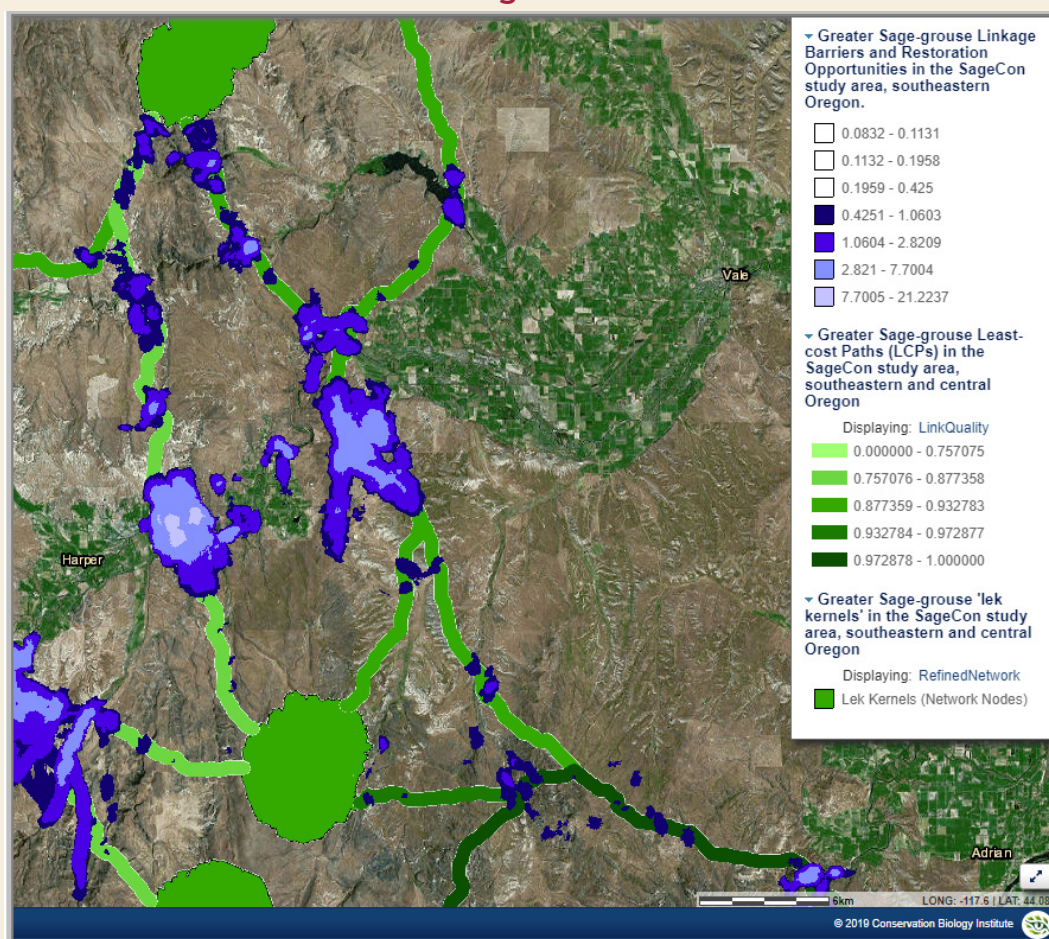


Puntos de atracción y áreas de concentración de hábitat de la liebre en Oregon, Estados Unidos.

- Trazado de barreras (*Barrier mapper*)

Con el trazo de barreras se cuantifica la importancia de las “barreras” que afectan la calidad y/o la localización de los corredores. El término barreras es usado en una forma general e incluye partes del paisaje que son difíciles de pasar por la fauna, pero no son barreras en el sentido estricto de la palabra. En esencia, identifican áreas que resultarían adecuadas para implementar acciones de restauración y mitigación.

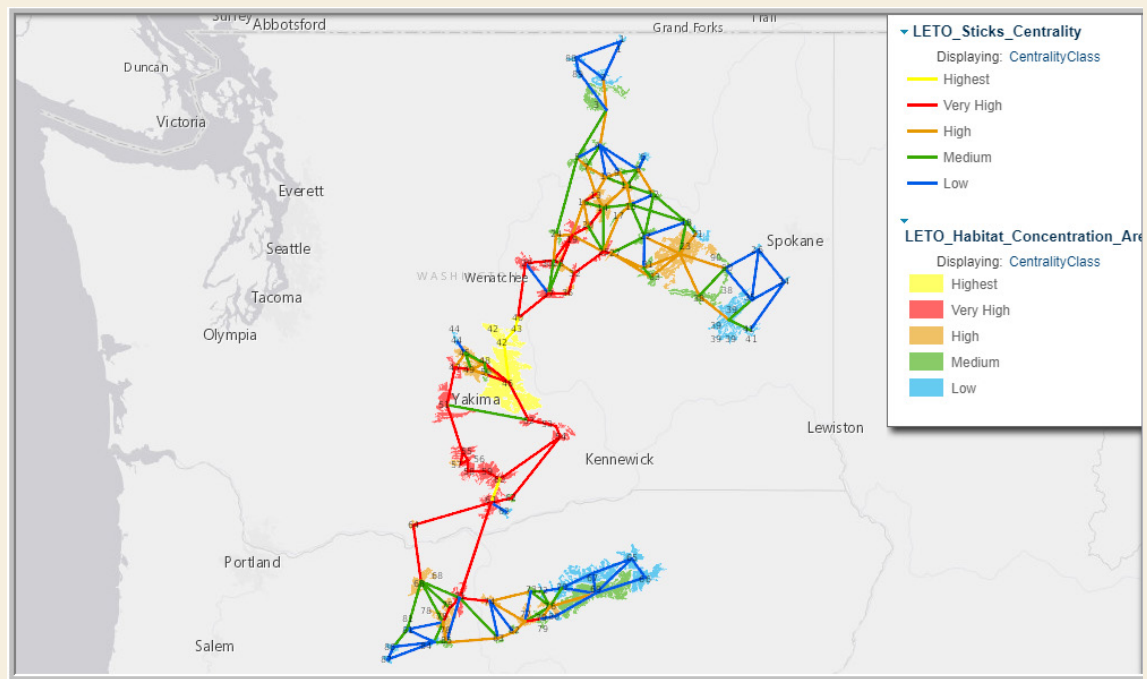
Figura 25



Áreas de concentración de hábitat para el urogallo, así como los enlaces, las barreras y las oportunidades de restauración.

- Trazado de centralidad (*Centrality mapper*).

Aquí se analizan las redes de enlace resultantes de las herramientas anteriores, se calcula la “centralidad del flujo de corriente” a lo largo de la red. Esta centralidad es una medida de qué tan importante es un enlace para mantener la red general conectada. Utiliza *Circuitscape* para implementar la teoría de circuitos, donde se trata a cada núcleo como un nodo, a cada enlace como un resistor simple, y asigna una resistencia igual a la distancia de costo ponderada de su corredor de menor costo correspondiente. Luego, repite a lo largo de todos los pares de núcleo, inyectando 1 ampere de corriente a un área núcleo y ajustando la otra a tierra. Posteriormente añade el flujo de corriente para cada núcleo y enlace para generar un mapa de flujo de corriente acumulativo, indicando la importancia de cada enlace en mantener la conectividad a lo largo de la red completa de núcleos, y se puede considerar como una medida de centralidad de enlace y núcleo.

Figura 26

Centralidad de enlaces y áreas de concentración de hábitat de la liebre en Oregón, Estados Unidos.

- Prioridad de enlace (*Linkage Priority*)

Esta herramienta se implementó para ayudar a cuantificar la prioridad relativa de conservación de cada enlace en un paisaje. Se basa en combinaciones ponderadas de muchos factores (Figura 22), como son, la diferencia de la firma climática de dos núcleos (entre más grande mejor), la resistencia media entre dos núcleos (entre más bajo mejor), el promedio del valor del área núcleo de dos núcleos (entre más alto mejor), la proximidad de dos núcleos (entre más cercanos mejor), la centralidad de cada enlace (entre más alto mejor), una opinión experta en el valor de importancia del corredor (Ficha 7).

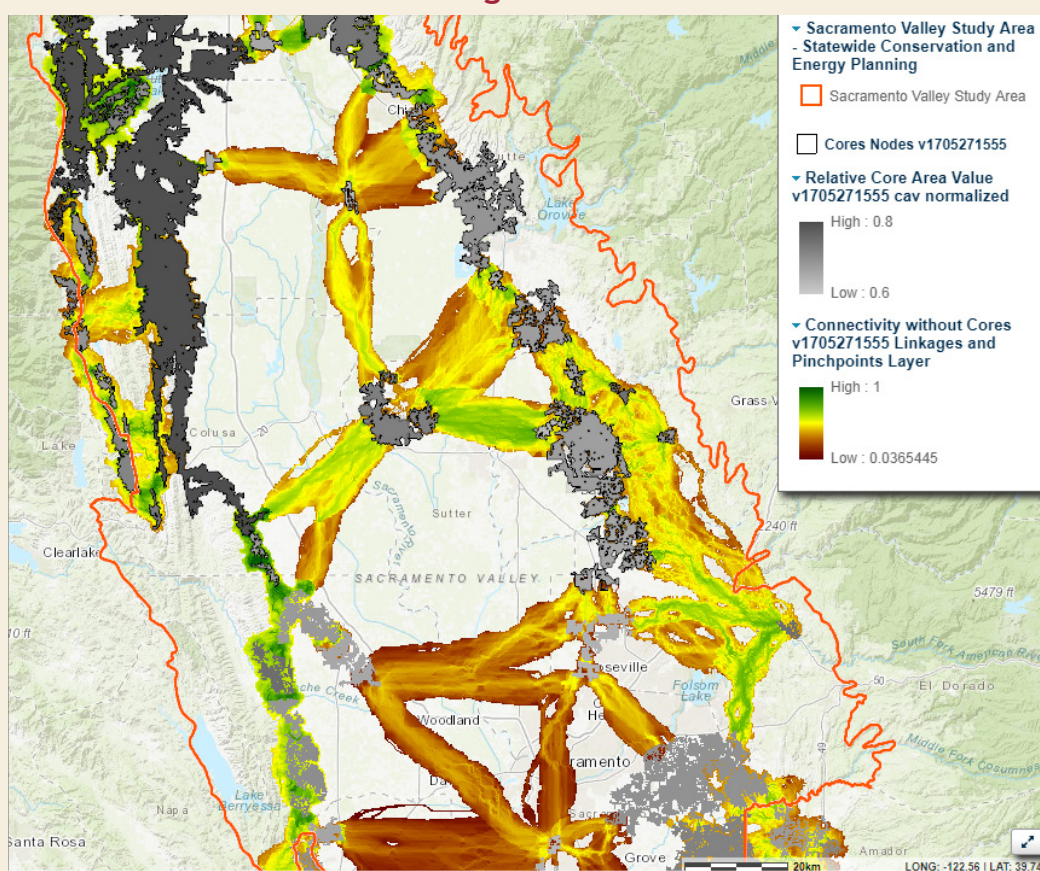
Se calculan los valores relativos para cada núcleo, y el valor promedio de los dos núcleos asociados con cada enlace. Esto se convierte en uno de los factores que determinan la prioridad del enlace. Por lo tanto, un enlace que conecte a dos áreas núcleo muy importantes es una prioridad más alta de conservación que uno que conecte dos áreas núcleo marginales. El valor promedio de cada área núcleo de dos núcleos de un enlace es combinado con los otros factores de niveles más altos que se relacione directamente con la prioridad del enlace, incluyendo la permeabilidad de cada enlace (esto es, los valores de resistencia media a lo largo de la ruta de menor costo), la proximidad de los dos núcleos, la centralidad, y la opinión de un experto si es posible.

Los usuarios también pueden incluir la diferencia de la firma climática entre dos núcleos, dándole mayor prioridad a los enlaces que abarquen un gradiente climático, facilitando los cambios de rango de las especies.

La herramienta también proporciona la opción de usar la diferencia entre la firma climática actual del núcleo más frío, y la firma climática futura del núcleo más caliente, para simular el gradiente climático que las especies de movimiento lento van a encontrar.

Algunas aplicaciones de estas herramientas han sido ubicar áreas de concentración de hábitat para la Liebre de Cola Blanca (*Lepus townsendii*), en Oregon, Estados Unidos. Conservation Biology Institute, 2018; el trazado de enlace climático para el pino de corteza blanca, en la región interfronteras entre Washington y British Columbia, Conservation Biology Institute, 2018; identificación de barreras y enlaces del Urogallo y oportunidades de restauración en Oregon, Estados Unidos. Conservation Biology Institute, 2018, entre otras.

Figura 27



Síntesis de los resultados del trazado de enlaces para obtener prioridades de conservación de conectividad para el tejón americano (*Taxidea taxus*), en el Valle de Sacramento, California.

Observaciones:

Para conocer más a detalle el modelo, se pueden revisar los siguientes enlaces de donde se ha obtenido la presente información:

<https://circuitscape.org/linkagemapper/>

<https://circuitscape.org/linkagemapper/linkage-mapper-tools/>

Condatís

Fase de aplicación:

Ubicación estratégica.

Breve descripción del modelo:

Es una herramienta de toma de decisiones para identificar los mejores sitios para la creación y restauración de hábitats para fortalecer las redes de hábitats existentes y aumentar la conectividad entre paisajes. Está diseñado para estudios de conectividad a escala de paisaje entre generaciones sucesivas de especies, y funciona particularmente bien para hábitats bien definidos y desiguales.

Variables, requerimientos y/o especificaciones que utiliza

El *software Condatís* puede ejecutarse en *Windows*, *Mac OS X* y *Linux* (y otros sistemas operativos similares a *Unix*). *Condatís* está escrito en *Python 2.7*. *Condatís* se publica bajo la licencia pública general GNU versión 3 con un periodo adicional permitido.

El *software Condatís* utiliza capas ráster creadas por *software GIS* para describir la disposición espacial del paisaje. *Condatís* utiliza la biblioteca *GDAL* para importar y exportar rásteres de hábitat. Todas las capas de hábitat utilizadas en un escenario deben tener el mismo cuadro delimitador y proyección del mapa. Si está navegando a un ráster en formato *ESRI*, aparecerá como una carpeta con varios archivos adentro. Resalte cualquiera de los archivos con una extensión *'.adf'* y *Condatís* podrá interpretarlo.

La cantidad de memoria que necesita *Condatís* depende del número de celdas que están marcadas como hábitat en la capa de escenario. El número de celdas también tendrá un gran efecto en la velocidad a la que *Condatís* calculará el flujo. Como guía, una computadora con 8 GB de RAM podrá procesar un paisaje con aproximadamente 20,000 celdas, pero llevará varios minutos realizar el cálculo.

Los paisajes con menos de 10,000 celdas se ejecutarán con bastante rapidez. Esto supone que está utilizando una computadora de 64 bits. La ejecución de *Condatís* en una computadora con sistema operativo de 32 bits limita significativamente el número de celdas, por lo que se recomienda una instalación de 64 bits archivos de entrada requeridos.

Herramientas de análisis y aplicaciones:

- Cálculo de la velocidad y el flujo del paisaje (Ficha 4).
- Cálculo de la capacidad de supervivencia o resistencia a la extinción (Ficha 5).
- Cálculo de los enlaces de cuello de botella (Ficha 6).

Esta herramienta se ha usado en estudios como:

- a) El mapeo de áreas prioritarias para la restauración del hábitat del águila halcón de Java en el Parque Nacional Monte Halimun Salak. Las variables utilizadas para los mapas de idoneidad del hábitat fueron la altitud, la temperatura, las precipitaciones, la distancia al río, la distancia a la carretera y los tipos de cobertura terrestre. Se utilizaron mapas de idoneidad del hábitat para determinar las áreas de origen y destino. Los datos necesarios para las áreas prioritarias de restauración utilizando aplicaciones de *Condatis* fueron: la capa de hábitat, la fuente y el objetivo, la tasa de reproducción y la distancia de dispersión.
- b) Evaluar la pérdida de hábitat, la fragmentación y la conectividad ecológica en Luxemburgo para apoyar la planificación espacial.
- c) Técnicas de ecología del paisaje que los planificadores pueden utilizar para evaluar los efectos en términos de cambios en la pérdida de hábitat, fragmentación y conectividad ecológica debido a los cambios esperados en el uso de la tierra. Los mapas de cobertura terrestre y las áreas propuestas de desarrollo urbano hasta 2030 se utilizaron como datos de entrada, junto con superficies de resistencia adaptadas de estudios anteriores y una matriz de presencia/ausencia para seis especies objetivo.

Las métricas de paisaje seleccionadas, los índices de conectividad, el modelo de conectividad y el *software* utilizado para ejecutarlos hacen que las técnicas antes mencionadas sean fáciles de usar por los no expertos, y su combinación ayuda a reducir algunas de las limitaciones de cada técnica individual. *Software* usados: *Connectivity Analysis Toolkit*, *Maxent*, *Circuitscape*, *Condatis*, *Graphab* y *LSCorridors* (Almenar et al., 2019).

Observaciones:

Para conocer más a detalle el modelo se pueden revisar los siguientes enlaces de donde se ha obtenido la presente información:

<https://conservationcorridor.org/corridor-toolbox/programs-and-tools/condatis/>

<http://wordpress.condatis.org.uk/about-the-software/downloads>

Corridor Designer ArcGIS

Fase de aplicación:

Ubicación estratégica

Breve descripción del modelo:

Los métodos, junto con las herramientas de *Corridor Designer ArcGIS*, son adecuados para diseñar corredores en un paisaje heterogéneo a una escala regional (por ejemplo, de 2 a 500 km de largo). El modelado de corredores basado en SIG es una herramienta útil que ayuda a diseñar las mejores rutas para un corredor.

Variables, requerimientos y/o especificaciones que utiliza

La caja de herramientas *Corridor Designer* actualmente sólo funciona dentro del software *ArcGis* y dentro de *ArcCatalog*, no en *ArcMap*, y requiere que todos los datos estén en la misma proyección de metros (UTM).

Herramientas de análisis y aplicaciones:

- 1) Crear modelos de idoneidad de hábitat e identificar parches de hábitat potenciales (Capítulo 3) (Ficha 4).
- 2) Crear modelos de corredor (Capítulo 3) (Ficha 5).
- 3) Transformar un modelo digital del terreno en un ráster de posición de pendiente topográfica.

La extensión *ArcMap* permite al usuario evaluar y comparar diseños de corredores alternativos mediante el cálculo de métricas tales como:

- 1) Ancho y cuellos de botella a lo largo de un corredor (Ficha 6).
- 2) Distancias entre parches de hábitat dentro de un corredor (Ficha 6).
- 3) Estadísticas generales como histogramas de idoneidad de hábitat dentro de un pasillo (Ficha 6).

La extensión de evaluación *Corridor Designer* está diseñada para trabajar con la salida de la extensión *ArcGIS* para evaluar posibles corredores de vida silvestre.

Esta herramienta se ha usado en estudios como bifurcaciones en carreteras: opciones en los procedimientos para diseñar vínculos con tierras silvestres.

Los modelos se utilizan comúnmente para identificar las tierras que mejor mantendrán la capacidad de la vida silvestre para moverse entre bloques de tierras silvestres a través de tierras de matriz después de que la matriz restante se haya vuelto incompatible con el movimiento de la vida silvestre. Ofrece una hoja de ruta con 16 opciones y suposiciones que surgen al diseñar vínculos para facilitar el movimiento o el flujo de especies focales entre dos o más bloques de tierras silvestres predefinidos. Se recomienda diseñar vínculos para servir a múltiples especies focales (en lugar de una) que probablemente sirvan como un paraguas colectivo para todas las especies nativas y los procesos ecológicos, reconociendo explícitamente los supuestos no probados y utilizando análisis

de incertidumbre para ilustrar los efectos potenciales de la incertidumbre del modelo. También se modelan los habitantes de los corredores (especies que requieren más de una generación para mover sus genes entre bloques de tierras silvestres) de manera diferente a las especies de paso (para las cuales un individuo puede moverse entre bloques de áreas silvestres en unas pocas semanas).

Observaciones:

Para conocer más a detalle el modelo se pueden revisar los siguientes enlaces de donde se ha obtenido la presente información:

<http://corridordesign.org/>

http://corridordesign.org/dl/tools/CD_toolbox_tutorial.pdf

<http://corridordesign.org/dl/docs/Beier.Majka.Spencer.2008.ConsBiol.LinkageDesigns.pdf>

<http://corridordesign.org/dl/docs/ConceptualStepsForDesigningCorridors.pdf>

http://www.jennessent.com/downloads/corridor_poster_portrait_online.pdf

Conefor

Fase de aplicación:

Ubicación estratégica.

Breve descripción del modelo:

Conefor es un *software* que permite cuantificar la importancia de las áreas de hábitat y enlaces para el mantenimiento o mejora de la conectividad, así como evaluar los impactos en la conectividad de los cambios de hábitat y paisaje. *Conefor* se concibe como una herramienta para el análisis de la ecología espacial y para el apoyo a la toma de decisiones en la planificación de la conservación, a través de la identificación y priorización de sitios críticos para la conectividad del hábitat y el paisaje. Las versiones anteriores de *Conefor* se conocían como *Conefor Sensinode*.

Conefor es de uso sencillo y se distribuye gratuitamente para uso no comercial, con la única condición de citar el *software* (Saura y Torné, 2009) y las referencias más relacionadas (Saura y Pascual-Hortal, 2007; Saura y Rubio, 2010).

Variables, requerimientos y/o especificaciones que utiliza

CS22 sólo requiere una computadora estándar que ejecute un sistema operativo *Windows*. CS22 se ha probado con éxito en *Windows XP*, *Windows Vista*, *Windows 7* y *Windows ME*, aunque también puede funcionar bien en otras versiones de *Windows*. La instalación de CS22 sólo requiere unos 8 MB de espacio libre en su disco duro.

Cualquier computadora estándar se puede utilizar para la mayoría de las aplicaciones de CS22. Sin embargo, cuando se trata de conjuntos de datos muy grandes, la cantidad de memoria RAM (GB) en computadora limita la cantidad máxima de nodos que se pueden procesar en una sola ejecución con CS22.

Además, para los índices más computacionalmente intensivos, la velocidad de procesamiento (GHz) de su CPU determinará qué tan rápido se pueden calcular los valores de importancia del nodo y, dependiendo de la cantidad total de nodos y enlaces/conexiones, se puede lograr el procesamiento completo en un tiempo razonable (por ejemplo, menos de 24 horas).

Conefor requiere capas de características de biodiversidad en formato ráster. Ejemplo: tipo de hábitat, distribución de la vegetación, disposición, servicios ecosistémicos.

Herramientas de análisis y aplicaciones:

Conefor y/o las nuevas métricas del Índice Integral de Conectividad (IIC) y el Índice de Probabilidad de Conectividad (PC) se han utilizado en un gran número y variedad de aplicaciones, como el apoyo a la toma de decisiones en planes de conservación y manejo, investigación científica sobre los efectos de la conectividad en diferentes procesos ecológicos e informes oficiales sobre indicadores de biodiversidad y evaluaciones de conectividad de áreas protegidas por la Comisión Europea, la Agencia Europea de Medio Ambiente y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, entre otros (Ficha 7).

El siguiente mapa muestra la ubicación aproximada de los diferentes casos de estudio que han aplicado.

Figura 28



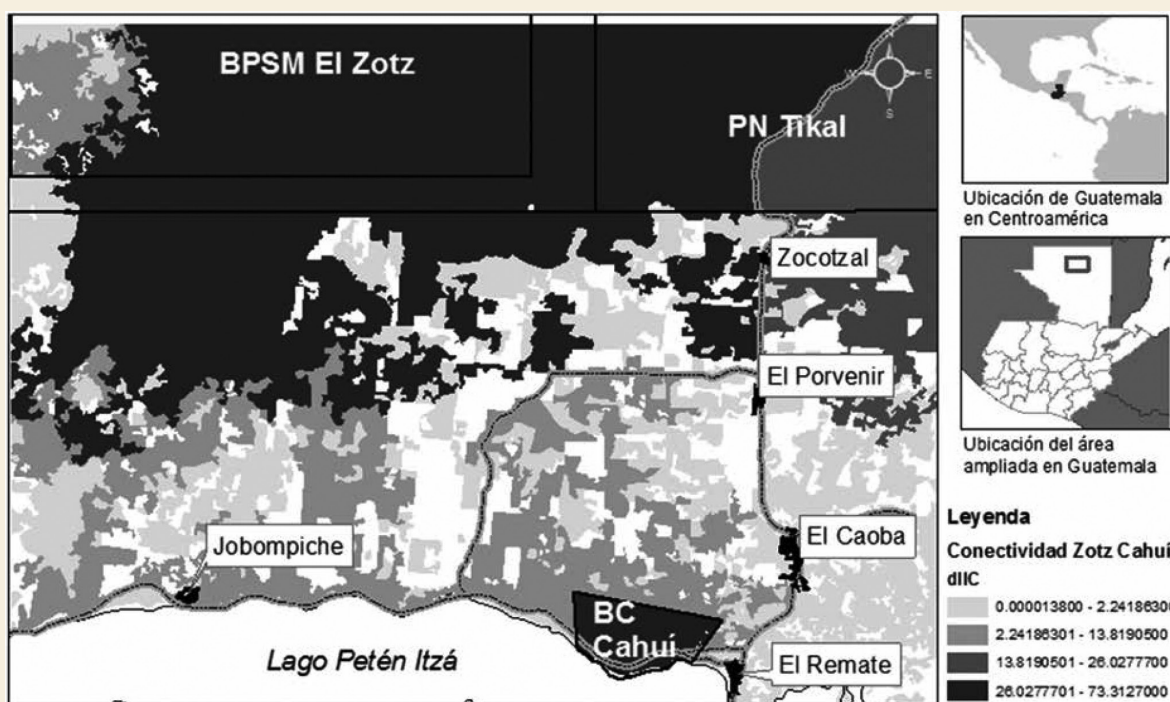
Casos de estudio y lugares donde se ha aplicado el modelo *Conefor*.
<http://www.conefor.org/applications.html>

Uno de los estudios aplicados con esta herramienta es la Regeneración natural de la vegetación como base para el desarrollo de estrategias de restauración ecológica en tres biotopos protegidos en la Reserva de Biósfera Maya, Guatemala. En este estudio se calculó el diferencial del IIC con el uso de este *software*.

Este índice estima la contribución de cada polígono en la conectividad total del sistema con base en su conectividad interna, su contribución como elemento conector y su potencial de conexión con otras áreas. En este caso, las distancias evaluadas representan especies o grupos de especies hipotéticas con distintas capacidades de dispersión.

En el análisis de conectividad funcional potencial se calculó el diferencial del IIC para remanentes de bosque y matorrales y montes bajos, como áreas potenciales a restaurar.

Figura 29



Mapa mostrando los valores de diferencial del Índice Integral de Conectividad (IIC) para los fragmentos de bosque y áreas de matorral como sitios potenciales a ser restaurados entre los biotopos Cerro Cahuí y San Miguel la Palotada (El Zotz).

En general este *software* tiene aplicaciones en:

- Medición de la disponibilidad (accesibilidad) de hábitat a escala de paisaje.
- Conversión de distancias entre parches en índices de conectividad.
- Análisis detallado para especies objetivo-específicas.
- Evaluación de conectividad funcional.

Observaciones:

Para conocer más a detalle el modelo se pueden revisar los siguientes enlaces de donde se ha obtenido la presente información:

<http://www.conefor.org/coneforsensinode.html>

http://www.conefor.org/files/usuarios/Manual_Conefor_26.pdf

Connectivity Analysis Toolkit (CAT)

Fase de aplicación:

Ubicación estratégica.

Breve descripción del modelo

El Kit de Herramientas de Análisis de Conectividad (CAT, por sus siglas en inglés) combina varios métodos de análisis de conectividad y mapeo de vínculos en una interfaz de usuario accesible. El *software* CAT facilita especialmente el cálculo de métricas de “centralidad”. Las métricas de centralidad evalúan las rutas entre todas las posibles combinaciones de sitios por pares en un paisaje para clasificar la contribución de cada sitio que facilite los flujos ecológicos a través de la red de sitios. La aplicación de métricas de centralidad permite representar paisajes como gradientes continuos de la calidad del hábitat. También permite delinear caminos entre pares individuales de áreas.

Variables, requerimientos y/o especificaciones que utiliza

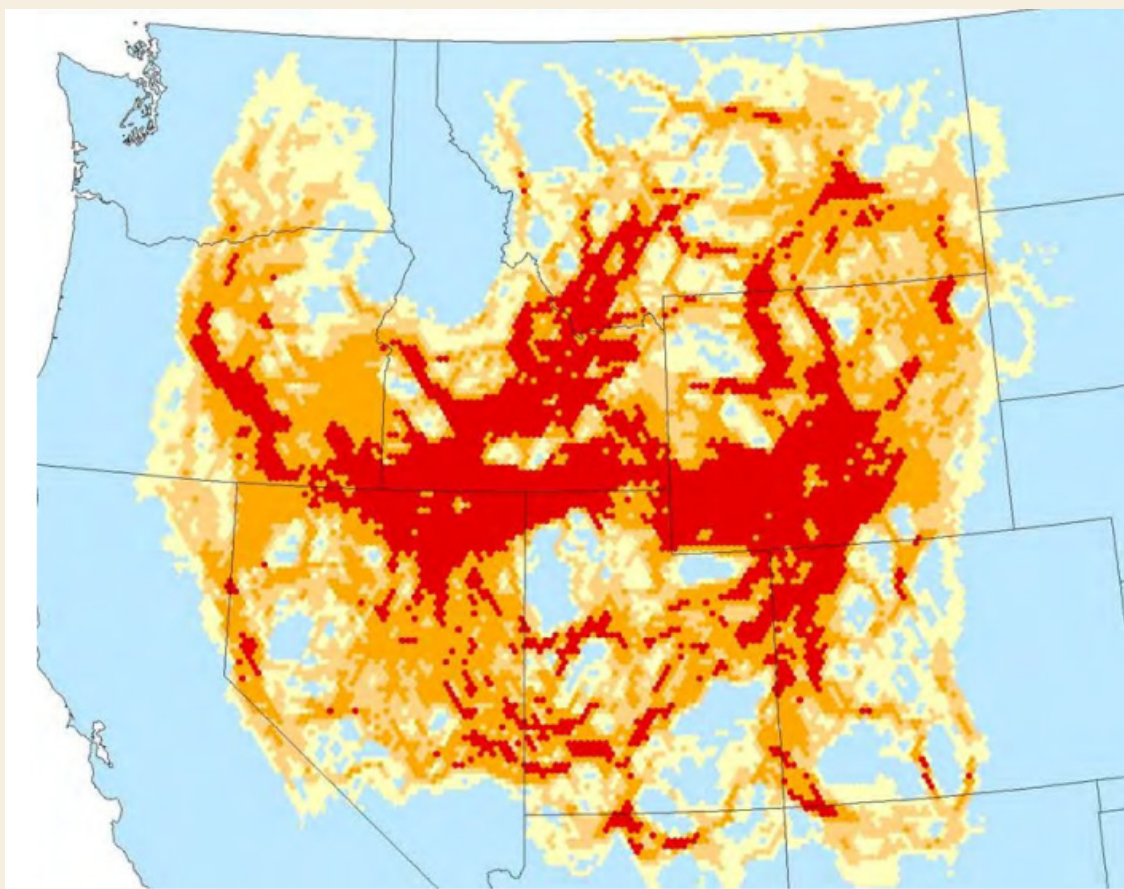
Los datos de hábitat se ingresan en el kit de herramientas en forma de un archivo .asc o ASCII producido en un *software* GIS como ArcGIS.

Este formato se puede producir mediante una variedad de *software*. Uno de los métodos utilizados dentro de ArcGIS ESRI. Desde la interfaz de ArcGIS Desktop (ArcMap o Arc Toolbox), puede utilizar la función “de ráster a ASCII” del conjunto de herramientas de ráster para convertir la información de un dataset ráster, como una cuadrícula, en un archivo .asc.

Herramientas de análisis y aplicaciones:

Crear modelos de resistencia, y mínimo coste (Ficha 5). Esta herramienta se ha usado en estudios como el Análisis de la permeabilidad del paisaje en California con centralidad de intermediación del camino más corto de todos los pares dentro del estudio de la conectividad de hábitat para urogallo.

Figura 30



Rutas generadas de menos coste a partir del modelo *Connectivity Analysis Toolkit*.

Observaciones:

Para conocer más a detalle el modelo se pueden revisar los siguientes enlaces de donde se ha obtenido la presente información:

http://www.klamathconservation.org/science_blog/software/

http://www.klamathconservation.org/CAT/v1_3_2/ToolkitManual.pdf

Graphab

Fase de aplicación:

Ubicación estratégica.

Breve descripción del modelo:

El *software Graphab* está dedicado al modelado de redes ecológicas desde el marco de la teoría de grafos. Es la única herramienta capaz de incluir construcción y visualización de gráficos, análisis de conectividad y enlaces con datos externos. Es fácilmente compatible con los sistemas de información geográfica.

Graphab se compone de 4 módulos: Construcción de grafos, Métricas de computación, Análisis y generalización e Interfaz visual y cartográfica.

Variables, requerimientos y/o especificaciones que utiliza

Graphab se ejecuta en cualquier computadora que admita *Java 8* o posterior (PC bajo *Linux*, *Windows*, *Mac*, etc.). Sin embargo, cuando se trata de conjuntos de datos muy grandes, la cantidad de memoria RAM en la computadora limitará el número máximo de nodos y enlaces que se pueden procesar en una sola ejecución con *Graphab*. Además, para algunas métricas complejas, la potencia de procesamiento (CPU) determinará la velocidad de procesamiento.

Herramientas de análisis y aplicaciones:

- Crear vínculos entre parches individuales (Ficha 6).
- Calcular métricas de conectividad (Ficha 6).

Esta herramienta se ha usado en estudios como:

Enfoque de múltiples especies para evaluar el impacto de los cambios en la cobertura terrestre en la conectividad del paisaje donde los resultados mostraron que el método propuesto podría informar y orientar las acciones de conservación y las estrategias de gestión del paisaje para mejorar o mantener la conectividad de las especies a escala del paisaje.

Observaciones:

Para conocer más a detalle el modelo se pueden revisar los siguientes enlaces de donde se ha obtenido la presente información:

<https://sourcesup.renater.fr/www/graphab/en/home.html>

<https://sourcesup.renater.fr/www/graphab/download/manual-2.4-en.pdf>

Makur Makurhini

Fase de aplicación:

Ubicación estratégica.

Breve descripción del modelo:

Makurhini (Connect en lenguaje purépecha) es un paquete R para calcular índices de fragmentación y conectividad del paisaje utilizados en la planificación de la conservación. *Makurhini* proporciona un conjunto de funciones para identificar la conectividad de las redes de áreas protegidas y la importancia de los elementos del paisaje para mantener la conectividad. Este paquete permite la evaluación de escenarios bajo cambios de conectividad del paisaje y presenta una mejora adicional, la inclusión de la heterogeneidad del paisaje como factor limitante para la conectividad.

Herramientas de análisis y aplicaciones:

- Fragmentación.

Calcula las estadísticas de parches y paisajes (por ejemplo, parches de tamaño medio, densidad de borde, porcentaje de área del núcleo, índice de forma, índice de dimensión fractal, tamaño de malla efectivo).

- Distancia

Genera una tabla o matriz con las distancias entre pares de nodos. Dos distancias euclidianas ('centroide' y 'borde') y dos distancias de costo que consideran la heterogeneidad del paisaje ('menor costo' y 'tiempo de viaje, este último es análogo a la distancia de resistencia de *Circuitscape*).

- Conectividad

Calcula el Índice Integral de Conectividad y los Índices de Probabilidad de Conectividad bajo una o varias distancias de dispersión. Calcula fracciones generales del efecto de la restauración en la conectividad del paisaje al agregar nuevos nodos (escenarios de restauración). Utiliza el "archivo de distancia ()", etcétera.

Esta herramienta se ha usado en estudios como el Análisis de redes para evaluar las tendencias de conectividad del paisaje: aplicación a los bosques europeos (1990-2000).

Observaciones:

Para conocer más a detalle el modelo se pueden revisar los siguientes enlaces de donde se ha obtenido la presente información:

<https://conservationcorridor.org/digests/2020/04/new-corridor-tool-makurhini/>

<https://connectscape.github.io/Makurhini/>

Maxent

Fase de aplicación:

Ubicación estratégica.

Breve descripción del modelo:

El *software Maxent* se basa en el enfoque de máxima entropía para modelar nichos y distribuciones de especies, a partir de un conjunto de cuadrículas ambientales (por ejemplo, climáticas) y localidades de ocurrencia georreferenciadas. El modelo expresa una distribución de probabilidad donde cada celda de la cuadrícula tiene una idoneidad prevista de las condiciones para la especie. Bajo supuestos particulares sobre los datos de entrada y los esfuerzos de muestreo biológico que llevaron a los registros de ocurrencia, la salida se puede interpretar como probabilidad de presencia predicha o como abundancia local predicha.

Variables, requerimientos y/o especificaciones

Maxent es una aplicación *Java* independiente y se puede utilizar en cualquier computadora que ejecute la versión 1.5 o posterior de *Java*.

Se debe proporcionar un archivo que contenga localidades de presencia “muestras”, un directorio que contiene variables ambientales y un directorio de salida.

Se pueden utilizar sistemas de coordenadas distintos de la latitud y la longitud siempre que el archivo de muestras y las capas ambientales utilicen el mismo sistema de coordenadas.

El directorio “capas” contiene una serie de cuadrículas ráster, cada una de las cuales describe una variable ambiental.

Herramientas de análisis y aplicaciones:

El modelo expresa la idoneidad (Ficha 4) de cada celda de la cuadrícula en función de las variables ambientales en esa celda de la cuadrícula. Un valor alto de la función en una celda de la cuadrícula en particular indica que se predice que la celda de la cuadrícula tendrá las condiciones adecuadas para esa especie. El modelo calculado es una distribución de probabilidad sobre todas las celdas de la cuadrícula.

Esta herramienta se ha usado en estudios para la predicción de la mortalidad por carretera del lince ibérico en el sur de España: un nuevo enfoque utilizando el *Maxent*. El estudio mediante el algoritmo *Maxent* identificó las carreteras donde existe un mayor riesgo de colisión vial para el lince ibérico. Se evaluaron más de 1.150 tramos de carretera en Andalucía (sur de España). Se incluyeron en el modelo tanto variables relacionadas con la carretera como con el hábitat del lince.

Observaciones:

Para conocer más a detalle el modelo se puede revisar el siguiente enlace de donde se ha obtenido la presente información:

https://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/

CAPÍTULO 4

TIPOS DE PASOS PARA FAUNA SILVESTRE

DIFERENTES TIPOS DE PASOS PARA FAUNA SILVESTRE QUE SE DEBERÁN CONSIDERAR EN LA INFRAESTRUCTURA LINEAL, EN FUNCIÓN DE LAS ESPECIES QUE SE REQUIERE PROTEGER

Generalidades

La implementación de pasos para fauna silvestre en los proyectos de infraestructura lineal es cada vez más frecuente en el mundo. En México ha crecido el interés por estas estructuras debido a la necesidad tangible de hacer más seguras y permeables las carreteras y vías férreas para la circulación de fauna silvestre, y reducir con ello las colisiones vehículo-animal y los atropellos de animales.

En el presente apartado se indican y agrupan los pasos para fauna en función de sus características estructurales y de ubicación. Se toma en consideración la nomenclatura existente en la normativa vigente, con el fin de seguir los mismos criterios de definición. En este sentido, tenemos que la definición del tipo de paso obedece a la posición por la que circulan los vehículos en la carretera. Por ejemplo, un Paso Inferior Vehicular (PIV) se define como una “estructura que se construye en un cruce de la carretera de referencia por debajo de otra vialidad y cuyas dimensiones quedan definidas por las características geométricas y rasantes de ambas vialidades”. Un Paso Superior Vehicular (PSV) se define como una “estructura que se construye en un cruce de la carretera de referencia por encima de otra vialidad y cuyas dimensiones quedan definidas por las características geométricas y rasantes de ambas vialidades”. Siguiendo esta nomenclatura, y de manera similar con un Paso Inferior Ganadero (PIG) y un Paso Superior Ganadero (PSG), un Paso Inferior para Fauna (PIFA) implica que los vehículos circularán por debajo del paso para fauna; mientras que un Paso Superior para Fauna (PSFA) implica que los vehículos circularán por encima del ducto por donde circulará la fauna silvestre.

Figura 31

Vistas de pasos para ganado en carreteras.
a) Paso Superior Ganadero (PSG) y b) Paso Inferior Ganadero (PIG).

Las variantes topográficas, la gran diversidad de fauna en nuestro país y las condiciones particulares de cada carretera o vía férrea, hacen imposible desarrollar un solo diseño de estructura para funcionar como paso para fauna, por lo que a nivel mundial se han implementado distintas estructuras para tales fines. Adicionalmente, cada caso requiere analizarse a detalle para definir las particularidades de los pasos para fauna. Este Manual brinda los criterios necesarios para tomar las mejores decisiones al momento de definir cuántos y dónde deben implementarse los pasos para fauna, así como el tipo y tamaño que requieren.

4.1 Tipos de pasos

Generalmente en la literatura internacional se utilizan tres tipos de pasos para fauna: i) Los que van sobre las vialidades (también llamados *overpasses*); ii) Los que van por debajo de las vialidades (*underpasses*), y iii) Los pasos aéreos. No existe como tal una clasificación específica para los diferentes tipos de pasos para fauna, por lo que en este Manual se exponen ocho tipos de pasos considerando las características y tamaños de la fauna existente en nuestro país. Se incluye además un conjunto de obras complementarias que se juzga son necesarias para el adecuado funcionamiento de dichos pasos y permitir encauzar la fauna hacia estas estructuras.

A continuación se enlistan los ocho tipos de pasos a considerar en el presente Manual:

- 1) Paso Inferior para Fauna (PIFA).
- 2) Paso Superior para Fauna (PSFA).
- 3) Obra de drenaje adaptada para función mixta (paso de agua y paso para fauna).
- 4) Paso para fauna embebido en la infraestructura lineal.
- 5) Paso aéreo para fauna arborícola.
- 6) Obra para el paso y protección de fauna voladora.

- 7) Paso temporal para invertebrados migratorios.
- 8) Paso para fauna acuática.

Es importante mencionar que las particularidades del diseño de los pasos para fauna están sustentadas en los tipos de vida de la fauna más frecuente en nuestro país. Si bien cada especie representa un reto particular, no es posible ni recomendable diseñar estructuras de cruce para una sola especie, por lo que las decisiones del tipo, tamaño y ubicación estratégica de los pasos deben considerar que éstos sean funcionales para la mayor cantidad de especies en cada zona.

Para definir las estructuras establecidas en este Manual, se agrupa a la fauna mexicana en siete formas de vida: mamíferos grandes con amplio recorrido, mamíferos medianos y pequeños, reptiles grandes, reptiles pequeños, anfibios, peces e invertebrados acuáticos, organismos voladores y arborícolas. A su vez, también se agrupa a los diversos tipos de vegetación en México en nueve categorías, a partir de una clasificación de usos de suelo y vegetación que define la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales,²⁴ en virtud de que México cuenta con una gran diversidad de hábitats donde vive esta fauna, que van desde las altas montañas hasta el mar profundo, pasando por desiertos, bosques nublados, pastizales, matorrales y lagunas costeras, lo que lo convierte en uno de los países megadiversos del mundo, albergando a más del 10% de la diversidad biológica mundial gracias a su ubicación geográfica y a su complejidad topográfica.

Los pasos para fauna para ciertos grupos deben ser estructuras diseñadas para satisfacer las necesidades diarias y del ciclo de vida del máximo de especies registradas en cada ecosistema y proyecto en particular, ya sean éstas de alta o baja movilidad; por ello es indispensable garantizar la accesibilidad y desplazamiento libre y seguro de especies pequeñas, medianas y grandes.²⁵

Es así como este Manual presenta ocho diseños “tipo” de pasos para fauna aplicables en México, que brindan las condiciones más apropiadas para el desplazamiento de distintas formas de vida y el conjunto de ellas, a través de una infraestructura lineal bajo distintos ambientes.

En la siguiente tabla se presentan los distintos tipos de fauna que pueden ser considerados en diferentes ecosistemas del país, partiendo de la predominancia de ciertos tipos de fauna habitando estos ecosistemas.

²⁴ SEMARNAT (2013). *Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de estadísticas ambientales. Indicadores clave y de desempeño ambiental.*

²⁵ Clevenger, A. P., y M. P. Huijser (2011). *Wildlife crossing structure handbook: design and evaluation in North America*, no. FHWA-CFL-TD-11-003. United States. Federal Highway Administration. Central Federal Lands Highway Division.

Tabla 3

Grupo Taxonómico / Formas de Vida de la Fauna							
Tipo de Vegetación	Mamíferos grandes con amplio recorrido	Mamíferos medianos y pequeños	Reptiles grandes	Reptiles medianos y pequeños	Anfibios	Peces e invertebrados acuáticos	Organismos Arboícolas
Desértica y semi desértica							
Bosque templado							
Bosque de niebla							
Bosque tropical perennifolio							
Bosque tropical caducifolio							
Matorral							
Pastizal natural o zacatonal montano							
Humedal/Manglar							
Halófila/gipsófila y de duna							

Matriz de tipos de estructuras que pueden ser utilizadas por cada grupo de fauna dependiendo de su forma de vida y tipo de vegetación en la que se realice el proyecto de infraestructura lineal.

A continuación se presenta la descripción de cada uno de los tipos de pasos tomados a partir de diversas fuentes bibliográficas.

1) *Paso Inferior para Fauna (PIFA)*

Estos pasos son grandes estructuras a manera de puentes que normalmente se construyen sobre vías de alta capacidad (Ejes de Transporte –ET– y Autopistas –A–²⁶) y trenes de alta velocidad. Aunque tienen un alto costo económico son muy efectivos para reducir localmente el efecto de barrera provocado por la infraestructura lineal. Las dimensiones, la tipología constructiva y la revegetación del paso y sus accesos deben diseñarse en función de las especies de referencia, que en general son mamíferos de grandes a medianos y de gran desplazamiento y movilidad.

Para la fauna pequeña este paso debe tener un adecuado diseño de superficie para que sirva de corredor, con suficientes estructuras y vegetación que sirva como refugio para los organismos de menor tamaño, mientras que para la fauna de gran tamaño es de mayor importancia el ancho de la estructura y las pendientes de los accesos. Derivado del alto costo de construcción, esta infraestructura debe considerar el paso de un gran número de especies y estar bien enlazado con la vegetación a ambos lados de la vialidad para conformar un corredor artificial, perpendicular a la infraestructura lineal.

Estos tipos de pasos pueden aprovecharse para diseñar opciones que permitan la movilización tanto de mamíferos como de reptiles, anfibios e incluso organismos voladores al conformar corredores arbolados.

En la siguiente figura se presenta un ejemplo de PIFA, también denominados eco-ductos, superclaros o túneles falsos.

²⁶ De acuerdo con la modificación a la clasificación carretera que se genera a partir de la vigencia de la Norma de Pesos y Dimensiones para el Autotransporte Federal (NOM012-SCT-2-2017) de la SCT.

Figura 32



a)



b)

a) Paso Inferior para Fauna (PIFA) en Groene Woud, Holanda, para diversos tipos de fauna incluyendo anfibios y b) Paso Inferior para Fauna (PIFA) en autopista transcanadiense en su cruce por el Parque Nacional Banff, Alberta, Canadá (fuente: Van der Grift, 2010).

2) Paso Superior para Fauna (PSFA)

Este tipo de pasos incluyen losas, viaductos y puentes. Son adecuados en zonas de orografía abrupta y, en el caso de los viaductos, son una solución óptima para facilitar el paso de la carretera y ferrocarriles a través de los valles, depresiones del terreno y cauces de ríos o arroyos, que conforman rutas de desplazamiento de muchos animales, sobre todo cuando por ellos discurren flujos fluviales. La gran ventaja de estos pasos es que la estructura libra la vegetación natural por lo que implica menor afectación al hábitat y corredores naturales de las especies. Los PSFA de mayores dimensiones son ampliamente utilizados en todo el mundo

por animales de diferentes tamaños y hábitos de desplazamiento ya que la fauna identifica los corredores por donde usualmente se desplaza. Las medidas que se adopten para la fauna deben garantizar la conservación o mejora de los corredores de desplazamiento ya existentes y en ocasiones se debe contemplar adicionalmente la inclusión de las barreras contra ruido sobre la infraestructura lineal.

Ejemplos de puentes, viaductos y losas que funcionan como pasos superiores para fauna.

Figura 33



Puentes carreteros, ferroviarios y losas de diferente tamaño funcionando como Paso Superior para Fauna (PSFA) ya que permiten el libre paso de la fauna silvestre y la conectividad de los ecosistemas.²⁷

²⁷ Tomado de imágenes de acceso abierto de internet de la carretera Tintal-Playa del Carmen, Quintana Roo, y la construcción de un paso para fauna en dicha carretera, y de Luell, B. (2003). "Wildlife and Traffic: a European handbook for identifying conflicts and designing solutions", en The XXIIInd PIARC World Road Congress World Road Association-PIARC.

3) *Obra de drenaje adaptada para función mixta (paso de agua y paso para fauna)*

Los drenajes son estructuras diseñadas para el paso de agua que fluye de forma continua por la totalidad de la estructura. No obstante, a veces discurren por ellos pequeñas corrientes permanentes que dejan un espacio libre de agua, por el que se pueden movilizar los animales. Es común en nuestro país que ciertas obras de drenaje se diseñan para dejar el paso de agua de corrientes temporales, por lo que la fauna las puede ocupar como pasos cuando los escurrimientos no llevan agua, lo que solamente se produce en periodos de estiaje. Esto limita la capacidad de las obras de drenaje por sí mismas de conformar pasos para fauna, aunado al tamaño de éstas que puede ser reducido para ser aprovechado por diversos tipos de fauna. En este sentido, para que las obras de drenaje puedan funcionar como pasos mixtos requieren ciertas adaptaciones y tamaños que permitan el paso de animales por alguna porción seca de la obra, de forma simultánea con el paso de agua para el que fueron diseñadas, sin afectar la sección hidráulica.

Cuando una obra de drenaje se construye con adaptaciones para el paso de la fauna, su diseño debe asegurar la continuidad tanto de la vía de agua como de la vegetación aledaña.

En estos pasos, la construcción de banquetas laterales, plataformas o repisas elevadas por encima del nivel del agua son necesarias para facilitar el paso de la fauna. Es importante señalar que estas obras sin las adaptaciones o dimensiones adecuadas no funcionan apropiadamente como pasos para fauna; no obstante, por su menor costo con respecto a las anteriormente descritas, y la mayor facilidad de su construcción, constituyen un área de oportunidad importante para las carreteras existentes en nuestro país, las que requieren ser más permeables para la fauna y brindar estructuras que permitan un cruce más seguro de los animales, reduciendo las incidencias vehículos-fauna silvestre.

Ejemplos de obras de drenaje que con ciertas adecuaciones pueden habilitarse como paso mixto para fauna y agua.

Figura 34



Bóvedas



Cajones de hormigón (*box culverts*).



Tubos de concreto (> 1.20 m Ø)

Obras de drenaje de diversos tipos y tamaños que con adecuaciones pertinentes pueden fungir como pasos mixtos para agua y fauna todo el año (fuente: acceso abierto de internet).

4) Paso para fauna embebido en la infraestructura lineal

Este tipo de paso es muy simple y fácil de instalar en carreteras existentes derivado de que implica una ranuración de la estructura del pavimento y su construcción mediante colado de concreto *in situ* o la inserción de módulos fabricados con resinas especiales, comercialmente disponibles en ciertos países para este tipo de pasos. Particularmente se utilizan en infraestructuras a nivel o cercanas a nivel, ya que de lo contrario los animales no podrían tener acceso a las mismas.

Son pasos que se utilizan frecuentemente para habilitar el cruce seguro de salamandras, ranas, sapos, serpientes y otros organismos en zonas pantanosas, humedales, manglares, bosques húmedos (templados o tropicales), etc., por lo que se colocan sobre sitios húmedos, pero no inundados. Cuentan con perforaciones en la parte superior para permitir ventilación, el paso de luz y cierta humedad, lo que da mayor confianza a los organismos para su uso.

Figura 35



Ejemplos de pasos para fauna embebidos en la estructura de la infraestructura para el cruce de anfibios y reptiles (fuente: acceso abierto de internet).

En los pasos destinados a animales de pequeñas dimensiones se pueden usar estructuras circulares con perforaciones superiores para permitir el paso de humedad y luz, a fin de que la fauna pueda utilizarlos.

En este tipo de estructuras los accesos a las mismas son importantes ya que de ello depende que los animales puedan subir a los pasos. A diferencia de los drenajes que se construyen para el paso de agua, estas estructuras deben estar en su totalidad destinadas exclusivamente al paso para fauna, pues el paso de agua pudiera restringir su uso.

Es recomendable su construcción en tramos que cruzan zonas con una alta diversidad de especies y que concentran una gran mortalidad de alguna especie de anfibio o reptil pequeño por atropellos.

5) Paso aéreo para fauna arborícola

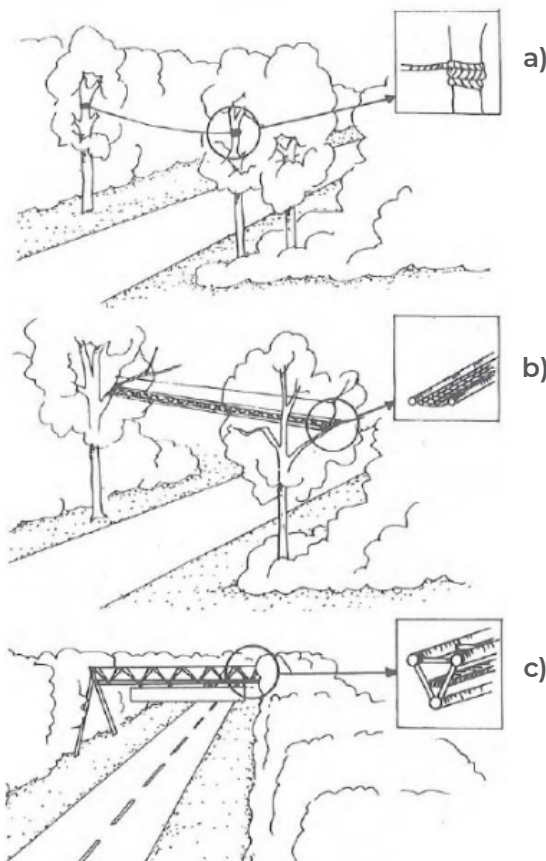
Para la fauna que se desplaza por los árboles se construyen tipos especiales de pasos, generalmente adaptados a las condiciones de vegetación y clima del sitio. Estas estructuras utilizan para su instalación cables, pasarelas o plataformas elevadas y tensas que permiten el paso de los animales entre los árboles a la altura del dosel y suficientemente altos para permitir el paso de vehículos de carga y autobuses de forma segura. Son pasos anclados a estructuras fijas y sólidas interconectadas de diferentes maneras con las copas de los árboles aledaños.

Se recomienda la instalación de estas estructuras donde una infraestructura lineal incide en zonas forestales con alta densidad de arbolado en las laterales del derecho de vía y en regiones donde se tenga la presencia de monos, ardillas, comadrejas, tlaquaches, cacomixtles o cualquier otro animal que se mueva preferentemente entre las copas de los árboles.

Su colocación requiere un proyecto ejecutivo autorizado por la SCT para garantizar que sea seguro tanto para los usuarios como para los animales. En infraestructuras muy anchas su diseño puede ser complejo y requerir estructuras intermedias para reducir las catenarias o bien la instalación de pasos rígidos en lugar de colgantes, lo que incrementa el costo. Es importante que estos pasos estén protegidos contra depredadores (por ejemplo, aves rapaces) y los materiales de construcción sean capaces de resistir las condiciones de la intemperie (alta insolación, viento y lluvia), por lo que la colocación de tramados de cuerdas, como se realiza en carreteras pequeñas de algunos países, tienen vidas útiles muy limitadas.

En las siguientes imágenes se muestran ejemplos de estructuras diseñadas para el cruce de fauna arborícola (Figura 36).

Figura 36



Ejemplos de pasos aéreos contruidos principalmente para el cruce de primates (fuente: acceso abierto de internet).

Figura a) una cuerda.

Figura b) una plataforma de red suspendida mediante dos cables de acero.

Figura c) adaptación de un panel de señalización para un paso rígido.²⁸

²⁸ Iuell, B. (2003). "Wildlife and Traffic: a European handbook for identifying conflicts and designing solutions", en The XXIInd PIARC World Road Congress World Road Association-PIARC.

6) Obra para el paso y protección de fauna voladora

Aves.

Debido a su capacidad de vuelo las aves son los animales menos afectados por el efecto barrera de las vías de comunicación, sin embargo, se han detectado diferentes formas de afectación por la construcción de carreteras que pueden ir desde problemas para la anidación hasta un alto índice de mortalidad por atropello (Figura 37).

Figura 37



Ejemplo de diferentes especies de aves, resultado del impacto con vehículos que transitan en una carretera.

La mortalidad es causada principalmente por colisiones con vehículos, y especialmente cuando la vía discurre por un humedal o cruza un curso fluvial. En este último caso el aumento de mortalidad es debido a que muchas especies vuelan siguiendo estos cursos y, si bien elevan su altura de vuelo al alcanzar un viaducto sobre el que discurre la carretera, generalmente no lo elevan lo suficiente para esquivar los vehículos en circulación.

La mitigación de estos impactos requiere del análisis de detalle de cada caso, pero puede abordarse de forma inicial mediante la colocación de plantaciones de árboles formando una barrera, pantallas o tapias que obliguen a elevar la altura de vuelo de las aves al cruce por la infraestructura.

Adicional a los atropellos, las perturbaciones por el ruido generado por el tráfico tienen efectos diversos en la presencia de aves en las zonas adyacentes. Se ha demostrado, mediante experimentos de sonidos de carreteras en sitios donde no existe una carretera (carreteras fantasma),²⁹ que el sonido del tránsito puede interferir en la reproducción de algunas especies, así como en su distribución, ya que aleja a los animales de estas zonas. No obstante, el mismo ruido del tráfico en otros casos sirve para alertar a las especies de la presencia de la carretera permitiendo que éstas eleven el vuelo y no sean atropelladas.

²⁹ McClure, C. J., H. E. Ware, J. Carlisle, G. Kaltenecker y J. R. Barber (2013). "An experimental investigation into the effects of traffic noise on distributions of birds: avoiding the phantom road". *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 280(1773), 20132290.

Además del atropello de aves por cruce de rutas de desplazamiento, otra causa, quizá la más frecuente en atropellos de aves rapaces,³⁰ se debe a sus hábitos de caza y alimenticios. En algunos tramos de carreteras se presenta una alta mortalidad de aves rapaces que acuden a las vías atraídas por la fuente de alimento que constituyen las poblaciones de pequeños mamíferos, en especial roedores, que colonizan las zonas cercanas a las infraestructuras y se desplazan por el derecho de vía e incluso la carpeta o los durmientes en ferrocarriles. Las aves bajan para atrapar a los roedores alizados por los faros de los autos y son atropelladas; o bien en otros casos ocurre el atropello de aves de rapiña cuando éstas bajan a la carpeta a consumir algún otro animal que se encuentre atropellado en la misma. Por lo anterior, si bien no existen estructuras para el paso por ser voladoras, sí son organismos altamente biodiversos que resultan fuertemente afectados por las carreteras, por lo que requieren medidas y acciones de mitigación del impacto de las vialidades sobre éstas.

Para la protección de aves y murciélagos en zonas donde pudieran volar en parvadas o grupos muy cercanos a la carretera o vía férrea, como puede ser en proximidades de zonas de cuevas, cuerpos de agua lénticos³¹ (estanques, lagos, estuarios, etc.) y que por ello presenten vuelo bajo y puedan ser vulnerables al atropello, en diversos países se instalan estructuras de protección de malla por encima de las vialidades en zonas críticas de cruce para que los organismos voladores puedan pasar libremente, como se muestra en la siguiente figura.

Figura 38



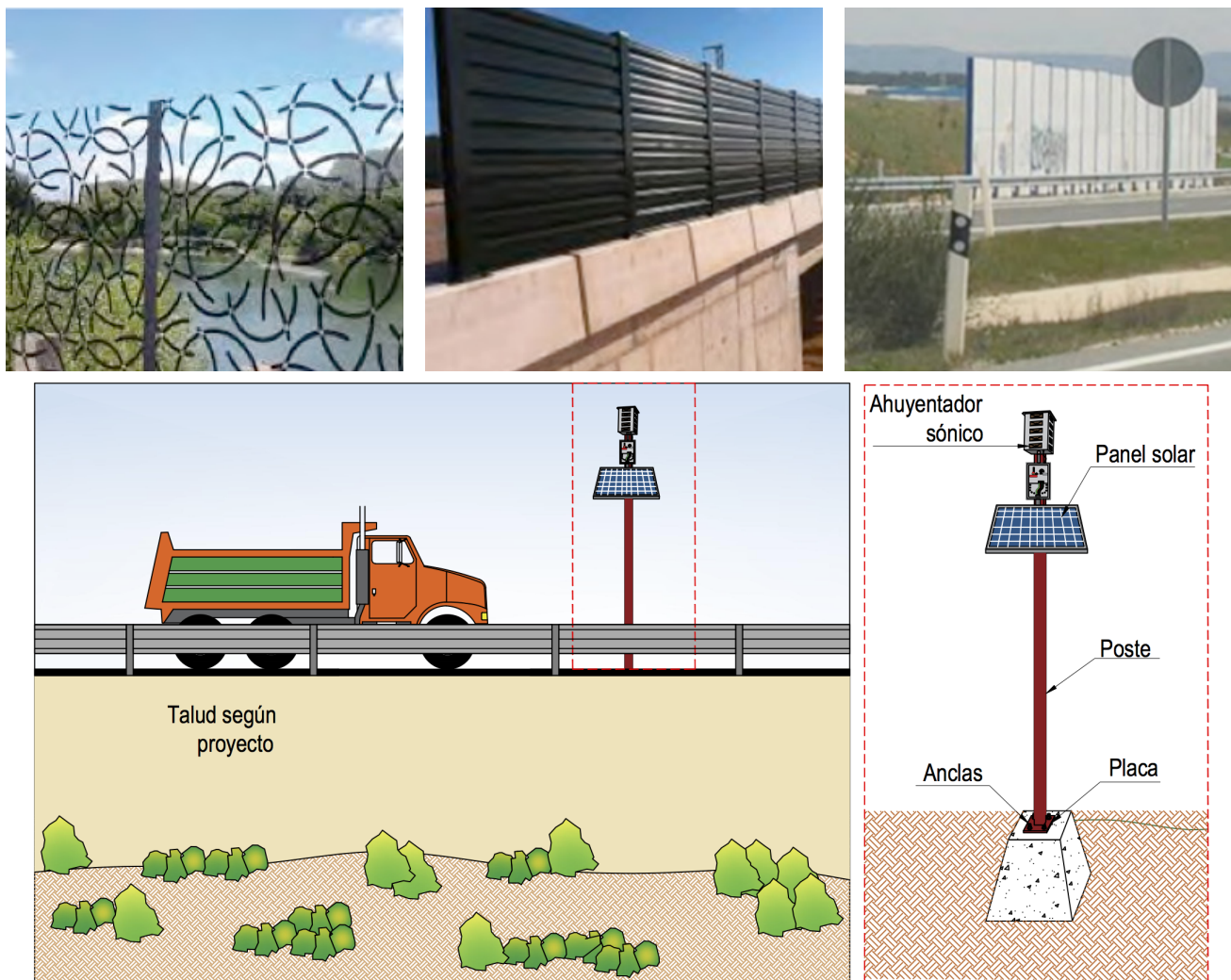
Colocación de malla que limita el vuelo de aves y murciélagos a ras de la corona de la infraestructura lineal (fuente: acceso abierto de internet).

³⁰ Aves rapaces. Aquellas que cuentan con garras y picos afilados como halcones, águilas, zopilotes, búhos, entre otros.

³¹ Los ambientes lénticos son cuerpos de agua cerrados que permanecen en un mismo lugar sin correr ni fluir, como los lagos, las lagunas, los esteros o pantanos.

Asimismo, existen otras medidas como la colocación de vallados en las zonas laterales al cuerpo de agua para obligar a las aves a elevar el ángulo de vuelo por encima de donde puedan ser arrolladas, o bien el uso de ahuyentadores sónicos (Figura 39).

Figura 39



Colocación de pantallas o de disuasores electrónicos para la dispersión de las aves y murciélagos.

Quirópteros (Murciélagos)

A través del tiempo, mediante diversos estudios y reportes, se ha podido demostrar que la infraestructura lineal tiene impactos perjudiciales en las poblaciones de murciélagos debido a colisiones con vehículos, luz y perturbación por ruido, pérdida y degradación del hábitat, e indirectamente la fragmentación de éste, por lo que en diversos países se ha tratado de promover el desarrollo de infraestructuras viales con un impacto mínimo sobre las poblaciones de murciélagos que cumplan con las obligaciones legales y la normatividad existente en cada región para proteger a los murciélagos.

En países de Europa se han publicado directrices para la construcción de carreteras tomando en cuenta las rutas y/o corredores de murciélagos, así como el comportamiento o hábitos de cada especie.

Figura 40**Ejemplar de murciélago atropellado por vehículos que transitan en una carretera.**

Si bien todas las especies de murciélagos pueden verse afectadas por la construcción y operación de infraestructuras lineales, el impacto puede variar entre especies en función de su fisionomía, tamaño, interferencia con su ecolocalización, maniobrabilidad o el comportamiento de vuelo. De esta forma, las poblaciones de murciélagos son sensibles de diversas maneras y ello se aprecia en el aumento de las tasas de mortalidad y modificaciones en su distribución debido a la expansión y cambio en el uso del suelo derivado de las actividades humanas.

Los murciélagos interactúan con los desarrollos viales de muchas maneras. Cuando se construye una carretera o vía férrea se debe considerar que la ubicación de los hábitats de alimentación y los sitios de descanso de los murciélagos varían estacionalmente, durante el verano pueden recorrer varios kilómetros cada noche entre sitios de descanso y sitios de alimentación; también aprovechan las carreteras secundarias y los caminos rurales como sitios de alimentación y rutas de viaje, ya que estos caminos típicamente están flanqueados por árboles bien desarrollados y la ausencia de iluminación en ellos permite que los murciélagos intolerantes a la luz, se alimenten allí. De igual forma la construcción de la infraestructura lineal a veces destruye la cubierta vegetal que anteriormente era utilizada por murciélagos, los que se desplazan entre áreas de percha y áreas de alimentación. Al remover los árboles, los animales deambulan erráticamente en busca de un nuevo refugio o sitio de percha, siendo entonces más vulnerables a ser atropellados.

Un nuevo camino puede ser un obstáculo que impide el movimiento de los murciélagos, ya que conforma una barrera que afecta el acceso a algún hábitat anteriormente utilizado, lo que podría dar lugar a una disminución de la población y/o un incremento en el atropello de estos animales en su desplazamiento hacia un área de descanso o alimentación.

Los murciélagos, al utilizar cuevas cercanas a la corona de la infraestructura lineal, puentes, viaductos u obras de drenaje como sitios para refugio o colonias de maternidad, pueden ser muy vulnerables a ser atropellados, por lo que en algunas carreteras de países europeos se han implementado líneas guía a manera de puentes que los quirópteros interpretan como obstáculos y con ello se les conduce fuera del área de la carretera. Líneas de árboles sobre los PIFA también pueden ayudar a los murciélagos a elevarse y dirigirse a lo largo de su recorrido sin incidir en la infraestructura lineal. El éxito de los murciélagos radica en su sistema de ecolocación;³² logran comunicarse a través de señales sonoras ultrasónicas a distancias que varían según la especie, el ambiente y los mecanorreceptores.³³ Los sonidos de este sistema de comunicación son en su mayoría de alta frecuencia de 20 a 200 khz, estos últimos no audibles por el oído humano. Los sonidos rebotan en un objeto y regresan en forma de eco hacia el animal, que los interpreta para localizar a sus presas u obstáculos a diferentes distancias y determinar sus tamaños (Figura 41).^{34, 35, 36} Al colocar árboles, cables u otro objeto suficientemente grande por encima de las infraestructuras en los puntos de cruce de grupos de murciélagos, estos organismos identifican los objetos como “obstáculos” y los esquivan, evitando con ello que incidan en la zona donde fluyen los vehículos o ferrocarriles.

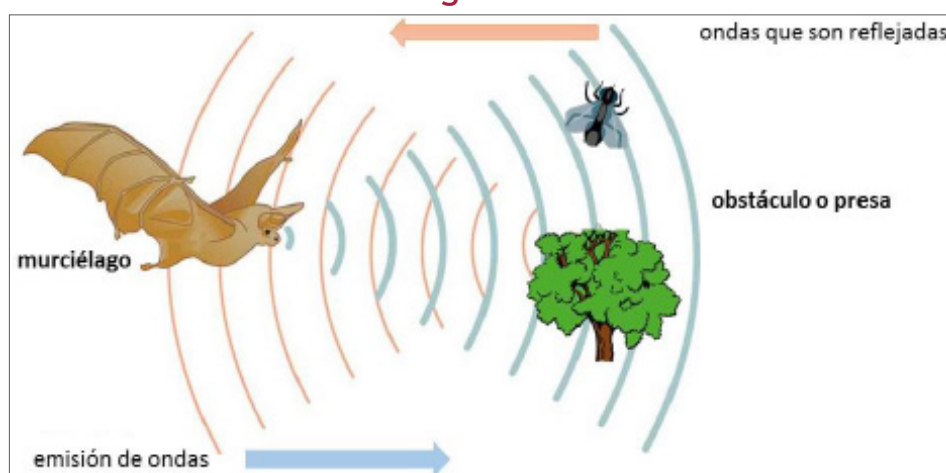
³² Moss, C. F., y S. R. Sinha (2003). “Neurobiology of echolocation in bats”. *Current opinion in Neurobiology*, 13(6): 751-758.

³³ Verduzco-Mendoza, A., A. Alfaro-Rodríguez y E. Arch-Tirado (2012). “Etología y bioacústica en ratas y cobayos”. *Revista Mexicana de Comunicación, Audiología, Otoneurología y Foniatría* 1(1): 7-12.

³⁴ Griffin, D. R. (1944). “Echolocation by blind men, bats and radar”. *Science*, 100(2609), 589-590.

³⁵ Schnitzler, H. U. y E. K. Kalko (2001). “Echolocation by Insect-Eating Bats: We define four distinct functional groups of bats and find differences in signal structure that correlate with the typical echolocation tasks faced by each group”. *Bioscience* 51(7): 557-569.

³⁶ Malo, J. A., y Molina, D. (2011). Ecolocación y detectores de quirópteros. *Revista Barbastella*, 1-9.

Figura 41

a)



b)

- a) Esquema de la ecolocalización de murciélagos para distinguir presas de obstáculos,³⁷
 b) colocación de malla de alambre y tramados de red que imitan las líneas de árboles (obstáculos) que los murciélagos siguen con ecolocalización para conducirlos por encima de la infraestructura fuera del área de riesgo (fuente: acceso abierto de internet).

Al igual que las aves, los efectos sobre murciélagos pueden ser muy diversos, en función de cada especie, sitio y tipo de carretera, por lo que para definir las mejores técnicas y acciones de protección a implementar que se describen en este Manual, se deben realizar estudios para cada caso específico y poder elegir así las mejores medidas de protección que permitan conservar las complejas redes de hábitat y la conectividad en el entorno del paisaje para las poblaciones de murciélagos.

³⁷ Ramos-Enríquez, M. D. (2014). *Uso de hábitat de los murciélagos (Chiroptera) en la ecorregión del desierto del Bajo Colorado, Baja California, México*. [Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias]. CICESSE, Ensenada, Baja California.

7) Paso temporal para invertebrados migratorios

Existen desplazamientos de fauna que ocurren solamente en determinadas temporadas y de forma masiva. En México estos movimientos se tienen identificados principalmente en crustáceos (cangrejos) de estero, movilizándose entre zonas de manglar y playa para realizar su reproducción. Estos fenómenos migratorios también se observan en tarántulas y otras arañas. Al ser animales pequeños son atropellados en grandes números por los vehículos circulantes. Además de ello, al haber gran cantidad de cadáveres de estos invertebrados en la corona se atraen otros animales como aves y mamíferos, que se aproximan para disponer de los cadáveres, haciéndolos susceptibles a ser atropellados o bien ocasionar un accidente al impactar con el parabrisas de algún vehículo.

La ciudad de Cancún, Quintana Roo, desde sus inicios ha sido testigo de la migración del cangrejo azul hacia el mar. Cada año, entre los meses de septiembre y octubre, especialmente durante las noches de luna llena, estos crustáceos azules emergen de sus guaridas en el manglar de la Laguna Nichupté y de los alrededores para emprender un peligroso recorrido hacia el mar para depositar sus huevos. Mismas migraciones se observan a lo largo de toda la costa del Golfo de México. El cangrejo azul (*Cardisoma guanhumi*), si bien no está enlistado por la NOM-059-SEMARNAT-2010 bajo alguna categoría de protección, constituye un recurso importante de la cadena alimenticia de los ambientes costeros mexicanos, y su número se ha ido reduciendo notablemente, tanto por la urbanización de sus sitios de hábitat y playas, como por el atropello en carreteras.

En algunas carreteras del mundo (por ejemplo en la Isla Navidad, Australia) se han tomado medidas que permiten instalar pasos para fauna solamente en la temporada de las migraciones, pudiendo desmontar y montar el paso y las barreras metálicas inductoras al movimiento de los animales según se requiera.

En las siguientes imágenes (Figura 42) se muestra un ejemplo de estructuras desmontables que funcionan como pasos de fauna para invertebrados que realizan migraciones estacionales.

Figura 42



- a) Paso de fauna desmontable para cangrejos migratorios, Isla Navidad, Australia.
 b) Paso embebido en la estructura de la carretera (previamente descrito) útil para el paso de fauna migratoria en zonas costeras (fuente: acceso abierto de internet).

8) Paso para fauna acuática

Fauna acuática (Peces e invertebrados acuáticos)

Los medios acuáticos son hábitats donde se encuentran gran cantidad de especies animales y vegetales. La composición, estructura y funcionamiento de estos ecosistemas se altera fácilmente con las actividades humanas dentro y cerca de tales medios. En la actualidad el hombre ha modificado el régimen hidrológico e hidráulico de prácticamente todos los ríos mediante obras de infraestructura como: presas, centrales hidroeléctricas, dragados, rectificaciones, canalizaciones, entubados, escolleras y el que nos incumbe en este caso, que es la infraestructura lineal. Estas intervenciones han cambiado las características de las aguas: velocidad de la corriente, profundidad, morfología del cauce y su ribera, granulometría del lecho, parámetros fisicoquímicos del agua, entre otros, provocando alteraciones sustanciales en la fauna y flora asociadas a los cauces fluviales, afectando muy especialmente a los peces e invertebrados acuáticos, pues éstos son muy vulnerables cuando varían las condiciones hidráulicas del medio.

Uno de los efectos más perjudiciales asociado a las actividades anteriores es provocado por la construcción de obras transversales en los ríos como son las carreteras, además de las presas, cimentaciones de puentes, pasos de agua prefabricados, caños de drenaje que frecuentemente impiden o limitan la libre circulación de la fauna piscícola. Cuando en el río se construye una infraestructura transversal infranqueable, las especies piscícolas que requieren acceder aguas arriba de la misma para reproducirse (remontantes como salmones o truchas) desaparecen inexorablemente del tramo superior inaccesible. Ésta ha sido la causa más frecuente de extinción de especies en buena parte de los ríos o tramos de ríos en el mundo.

Para otros tipos de peces la limitación del movimiento se traduce en la imposibilidad de colonizar nuevos territorios, pérdida de hábitat aguas arriba, disminución de la diversidad genética (aislamiento de poblaciones) e incluso desaparición de la especie en la zona superior a la estructura.

Por otro lado, cuando el obstáculo resulta muy selectivo, siendo remontable por pocos individuos, se producen cambios en la genética poblacional, pues únicamente se consiguen reproducir los ejemplares más vigorosos (que no tienen por qué ser los mejor adaptados al medio), o bien solamente algunas especies pueden franquear el obstáculo y desplazarse mientras que otras no, ocasionando importantes efectos en las comunidades.

Igualmente, en el caso de especies remontantes, al intentar superar el obstáculo, los peces pueden herirse y el sobreesfuerzo realizado consume las reservas energéticas destinadas a la reproducción, debilitándose y aumentando su predisposición a enfermedades. Por último, si los peces se retrasan en su viaje a la espera de condiciones adecuadas para sortear la estructura (caudales elevados), puede ocurrir que las condiciones óptimas para la reproducción (temperatura, profundidad y velocidad del agua, maduración de los órganos internos) hayan pasado en las zonas de freza y la reproducción no sea exitosa.

En virtud de ello, en países como Estados Unidos y Canadá se han empezado a implementar las llamadas “escaleras de peces” (*fishways* o *fish ladders*), que consisten en estructuras artificiales ligadas a las obras de drenaje para permitir el flujo de peces, incluso remontantes de corrientes como salmones y truchas, mediante la construcción de rampas y estructuras al final de obras de drenaje en zonas de arroyos o ríos donde habitan este tipo de peces, para permitirles remontar contra corriente y llegar a sus lugares de reproducción aguas arriba de la carretera. En incisos más adelante se presentan varios ejemplos de este tipo de pasos para fauna acuática.

Entre las estructuras que pueden requerir adaptaciones para facilitar el paso de peces se incluyen viaductos, losas y tubos. Particularmente estos últimos son estructuras por donde escurre un curso de agua y se pueden adaptar con un costo relativamente bajo. En estos casos el uso de tubería debe estar adaptada a los requerimientos de las especies acuáticas que se considera proteger.

Obras de drenaje de cauces permanentes, como losas o viaductos, funcionan como pasos para fauna acuática y no requieren adaptaciones particulares. No obstante, tubos o cajas pequeñas requieren adaptaciones para asegurar que todo el año exista suficiente tirante de agua para que los organismos circulen por ahí, además de un sustrato continuo similar al existente en el cuerpo de agua aledaño.

Figura 43



**Pasos de fauna para vertebrados acuáticos
(tomado de Notas Técnicas del CIREF, n° 7, 2013).**

Otro escenario lo representan las infraestructuras lineales que obstruyen el movimiento continuo de la fauna acuática al ubicar drenajes por encima del nivel del agua (dren de caída), impidiendo la movilización de organismos en ambos sentidos del cuerpo de agua. Es decir, se obstaculiza que las especies remonten el cuerpo de agua, separando sitios de alimentación, reproducción, desove, etcétera.

Figura 44



Ejemplos de la colocación de elementos que permiten el movimiento de peces en ambos sentidos cuando el río lleva poco caudal de agua o bien para poder remontar corriente arriba.^{38, 39}

³⁸ Catchment Solutions. Environmental Service Providers (2017). *Slacks Creek Rock Ramp and Horizontal Culvert Baffle Fishway*. Disponible en: <https://catchmentsolutions.com.au/slacks-creek-rock-ramp-and-horizontal-culvert-baffle-fishway/>.

³⁹ Stiebel, R. (2020). "Millstream fish ladder extension work starts Monday". *Victoria News*. Disponible en: <https://www.vicnews.com/community/millstream-fish-ladder-extension-work-starts-monday/>.

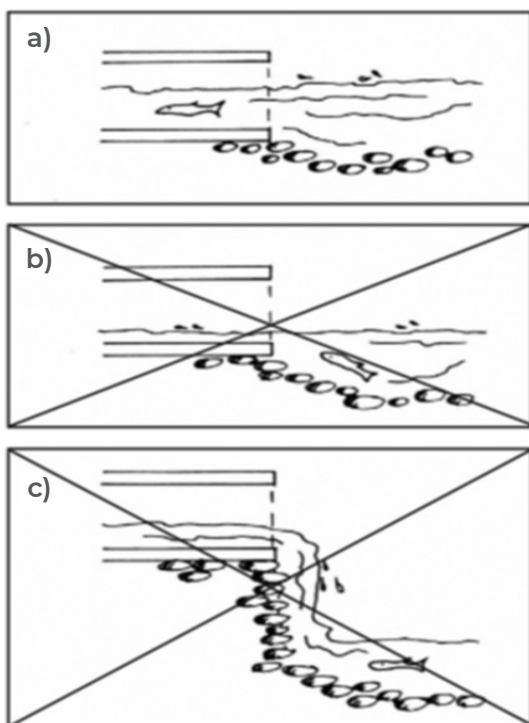
Existen obras de drenaje de diferentes tipos y dimensiones con flujo constante de agua que pueden ser adaptadas de diferentes maneras para permitir la circulación de fauna acuática (peces e invertebrados) en ambos sentidos (contra corriente y contra pendiente). Estos pasos para su correcto funcionamiento no deben ser demasiado largos, ni muy profundos o estrechos, ni con grandes desniveles en su interior y con una ligera pendiente.

Figura 45



Paso para fauna acuática en una obra de drenaje del camino a Atkins en el Parque Regional Mill Hill en Langford, Canadá, para permitir el movimiento a contracorriente de salmones. Se proyectó una rampa de la caída de la obra hasta el cuerpo de agua, asegurando que la rampa cuente con pozas pequeñas que retengan el agua y permitan a los organismos remontar la corriente como lo harían si el flujo del río no hubiera sido interrumpido.⁴⁰

Figura 46



El nivel del agua y el diseño de las salidas son elementos cruciales para permitir el paso de peces y otros organismos acuáticos como langostinos, moluscos, etcétera.

a) Situación ideal.

b) El nivel de agua en la tubería es demasiado bajo.

c) Hay un desnivel demasiado pronunciado entre la salida del drenaje y el curso fluvial por lo que requiere una rampa como la de la figura anterior.⁴⁰

⁴⁰ Iuell, B. (2003). "Wildlife and Traffic: a European handbook for identifying conflicts and designing solutions", en The XXIIInd PIARC World Road Congress World Road Association-PIARC.

4.2 Obras complementarias en los pasos para fauna

Existe evidencia que ha demostrado que ciertos animales, como es el caso de algunos ungulados,⁴¹ presentan aversión a cruzar a través de los pasos para fauna si no existen ciertas adecuaciones como es el caso de rampas con bajas pendientes, así como un vallado perimetral, por lo que con la finalidad de aumentar la efectividad del uso de dichos pasos por la fauna silvestre es necesario incorporar ciertas adecuaciones como estrategia para el libre flujo de especies a ambos lados de la infraestructura lineal, las cuales se describen a continuación:

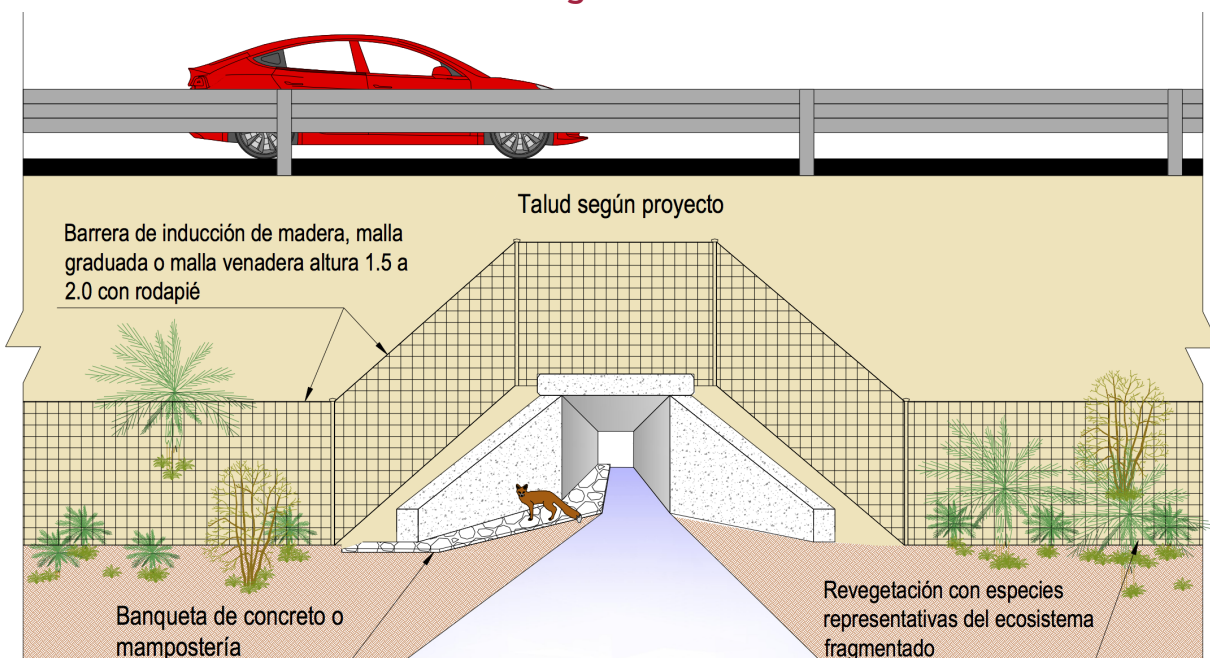
- Banquetas laterales o plataformas.
- Vallados perimetrales.
- Revegetación y colocación de refugios para fauna pequeña en sitios estratégicos del paso para fauna.
- Canaletas y pozas retenedoras de agua para diversificar las especies que usan el paso.

4.2.1 Banquetas laterales o plataformas

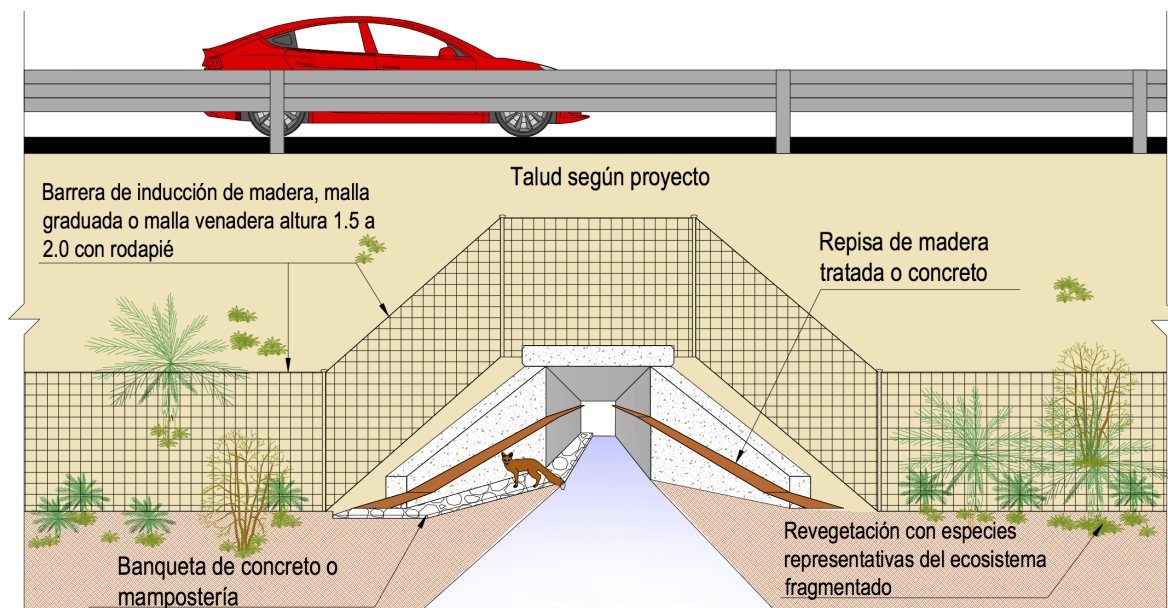
Cuando las obras de drenaje se adecuen como pasos para fauna es importante la construcción de banquetas laterales o plataformas elevadas por encima del nivel de agua que permita el paso de los animales y del agua de forma simultánea, ya que la mayoría de las especies de mamíferos prefieren no desplazarse sobre los cuerpos de agua para evitar mojarse las patas.

En estas obras de drenaje el nivel del agua aumenta durante la temporada de lluvias por lo que, de no construir banquetas, plataformas o repisas fuera de la influencia del agua, se limita el uso de las obras de drenaje como pasos mixtos.

Figura 47



⁴¹ Los ungulados (*Ungulata*) son un antiguo superorden de mamíferos placentarios que se apoyan y caminan con el extremo de los dedos, o descienden de algún animal que lo hacía. Típicamente están revestidos de una pezuña como en la cabra, venados, etcétera.



Ejemplo de la construcción de banquetas sobre el nivel de agua y repisas en una obra de drenaje adaptada como paso para fauna silvestre.

4.2.2 Vallados perimetrales

Con la finalidad de encauzar a la fauna silvestre hacia los accesos a los pasos y evitar que intenten cruzar la infraestructura lineal, donde potencializan la ocurrencia de colisiones vehículo-animal o atropello, es necesaria la instalación de vallados paralelos a la infraestructura en los costados del paso para fauna.

Idóneamente el vallado debería colocarse en ambos lados y a todo lo largo de la carretera o vía férrea y contar con al menos 2.5 m de alto, como se muestra en la siguiente fotografía.

Figura 48



Vista del vallado a lo largo de todo el derecho de vía de la autopista transcanadiense en la provincia de Alberta, Canadá. Este vallado de 2.5 m de alto protege de intentos de cruce a la fauna, a la vez que induce su desplazamiento hacia los pasos construidos en esta autopista (fuente: Grupo Selome, S.A. de C.V.).

4.2.3 *Revegetación y colocación de refugios para fauna pequeña en los accesos a los pasos para fauna*

Con la finalidad de potencializar la permeabilidad a través de cualquier infraestructura lineal es necesario aplicar acciones de densificación de la vegetación en las áreas susceptibles de serlo, como son los accesos a los pasos para fauna y, en el caso de los PIFA, sobre el propio paso, a fin de emular el ecosistema circundante.

Esto proporcionará una mayor seguridad a la fauna silvestre para que se encamine hacia los pasos para fauna, brindando una continuidad vegetal y de refugios tanto fuera como dentro del paso para los animales de diferentes formas y tamaños, como pueden ser la colocación de rocas, troncos e incluso fragmentos de tubos de concreto partidos a la mitad longitudinalmente para conformar pequeñas cuevas para animales pequeños. Motivo de ello, la vegetación a instalar requiere ser conformada por especies de vegetación nativas y propias de la vegetación regional, similares a los ecosistemas que rodean el paso.

Figura 49



Reforestación de un Paso Superior para Fauna (PSFA) para dar continuidad a la vegetación aledaña utilizando especies propias de la zona de diferentes tamaños y tipos con el fin de brindar refugios para animales diversos.⁴²

⁴² Clevenger, *op. cit.*, 2011.

4.2.4 Canaletas y pozas retenedoras de agua para diversificar las especies que usen el paso

Resulta conveniente incluir en los PSFA, canaletas como la que se muestra en la siguiente figura, en las que se conserve un pequeño volumen de agua que permita la movilización de mamíferos, reptiles y anfibios por el paso. Esta canaleta o pozas como las que se muestran en el PIFA de la misma figura permiten el desplazamiento de fauna silvestre que requiere un alto grado de humedad.

Figura 50



- a) Vista de una canaleta con agua y tierra húmeda para anfibios complementando a un Paso Superior para Fauna (PSFA) adecuado generalmente para mamíferos.
 b) Pozas retenedoras de agua y condiciones de humedal sobre un Paso Inferior para Fauna (PIFA) usualmente considerado para mamíferos (fuente: acceso abierto de internet).

4.3 Especificaciones particulares para diferentes grupos taxonómicos

La infraestructura lineal puede tener una gran variedad de efectos negativos en la vida silvestre y el medio ambiente. Estas son cada vez más reconocidas como un factor de pérdida de la biodiversidad, ya que pueden contribuir significativamente a la disminución y pérdida de poblaciones de animales silvestres. El impacto aumenta a medida que las redes de carreteras y vías férreas se incrementan, toda vez que se continúa fragmentando el hábitat.

La presencia de infraestructura lineal modifica el comportamiento de animales a través de cinco mecanismos:

- I. Alteración de los patrones de movimiento.
- II. Modificación del estado fisiológico de los individuos.
- III. Cambio en el ámbito del hogar de las especies.
- IV. Alteración de la respuesta de escape.
- V. Alteración de los eventos reproductivos.

Estos efectos se reflejan de forma distinta en los diferentes grupos taxonómicos de fauna (mamíferos, aves, reptiles y anfibios), así como en sus formas de vida (arborícolas, voladores, terrestres, trepadores, etc.) y tamaños. Motivo por el cual hay algunas particularidades que se deben considerar en los pasos para fauna más usuales, para permitir el paso protegido y adecuado para los diferentes tipos de animales y sus formas de desplazamiento.

Si bien los pasos para fauna generalmente permiten el acceso de diferentes grupos de animales en función de tamaño, comportamiento, apertura del paso, vegetación, aspectos olfativos, entre otros, en su mayoría son considerados y diseñados para el paso de mamíferos terrestres, por lo que es importante señalar que cada paso requiere contemplar ciertas adaptaciones y consideraciones para maximizar la oportunidad de que sean utilizados por la fauna silvestre de la localidad, incluyendo otras formas de vida y clases taxonómicas, adicionales a los mamíferos terrestres.

A continuación se presentan algunas consideraciones importantes para cada paso en función de la forma de vida o categoría taxonómica bajo estudio, siendo éstas las siguientes:

Mamíferos terrestres

El diseño y la evaluación de los pasos para fauna se han enfocado principalmente hacia los grandes mamíferos, especialmente hacia especies como el venado, puma, jaguar y oso, debido principalmente a que son especies que habitan en territorios extensos y se ven seriamente afectadas por las infraestructuras lineales, además de que son causa frecuente de accidentes viales con consecuencias serias en países como Canadá y Estados Unidos.

Aunque los pasos para fauna diseñados para mamíferos de talla grande también son aptos para mamíferos de talla pequeña o mediana, es importante que en el diseño de los pasos para fauna se dé prioridad a la amplitud de esta estructura, ya que se ha evidenciado que en México los mamíferos terrestres optan por cruzar a través de estructuras tipo losas o bóvedas que cuentan con una altura que va de 2.0 m a 4.0 m y un ancho de hasta 8.0 m. Las losas de 1.0 m de alto por 1.0 m de ancho y los tubos de 1.0 m de Ø son las estructuras menos utilizadas por los mamíferos.⁴³

Es importante considerar la cobertura vegetal en el entorno de los pasos para fauna ya que ésta tiene un papel canalizador de las especies hacia estos pasos y brinda el camuflaje perfecto para que las estructuras puedan insertarse de mejor manera al paisaje natural. Además de ello, los pasos con suficiente cobertura vegetal de plantas arbustivas y herbáceas propias de los ecosistemas aledaños, así como con troncos, rocas o estructuras artificiales con oquedades por las que puedan caber roedores, liebres, armadillos, etc., brindan oportunidades de refugio y, por consiguiente, facilitan el

⁴³ Grupo Selome, S.A. de C.V. Consultoría Ambiental. 2011. Does size matter? Animal crossings in roads of tropical ecosystems in Mexico. International Conference of Ecology and Transportation. Seattle, Washington, EU.

paso de mamíferos pequeños, permitiéndoles ocultarse de sus depredadores (carnívoros medianos y grandes).

Mamíferos arborícolas

En las zonas tropicales de México es donde mayormente se distribuyen especies que se desplazan a través del dosel de los árboles, tal es el caso de los primates, tlacuachos, oso hormiguero, martucha, coatí, cacomixtle, puerco espín, etc., por lo que es imprescindible que en la infraestructura lineal existente y nueva se construyan pasos aéreos para fauna arborícola.

Estas estructuras pueden ser construidas de distintos materiales, sin embargo es importante considerar que, aunque no son animales muy grandes los que atravesarían por dichas estructuras, algunas especies como es el caso del mono aullador (*Alouatta palliata*) mide entre 0.7 m y 1.4 m y pesa entre 3.6 y 7.6 kg, además de que se desplazan en grupos de entre 3 a 10 individuos, por lo que los pasos aéreos deben de ser lo suficientemente resistentes al peso de estas especies; teniendo en consideración la catenaria que se forma en este tipo de pasos, para evitar posibles colisiones con vehículos de grandes dimensiones. La altura de estos pasos debe considerar, por ende, una catenaria que al menos libre 2.0 m por encima del vehículo más alto que circule por esa infraestructura vial, ya que los monos pueden cruzar por arriba, por los lados o colgados por debajo de la estructura. Asimismo, el clima es un factor degradante para este tipo de pasos, al ubicarse en regiones tropicales con alta incidencia de vientos producto de huracanes y tormentas, por ello debe considerarse que los materiales sean robustos y resistentes.

Otro factor importante a considerar es que la ubicación de los pasos para fauna debe realizarse en aquellos sitios en donde exista una conexión con el dosel de los árboles aledaños a la carretera, ya que muchas especies, como es el caso de los primates, para desplazarse al poste del paso aéreo intentan cruzar sobre la carpeta asfáltica en dirección a otro árbol.

Por lo anterior, es importante que los pasos aéreos se encuentren abundantemente conectados con el arbolado aledaño mediante pasarelas y estructuras suficientemente resistentes, gruesas y amigables con sus formas de agarre de locomoción (incluyendo las colas), es decir, que los monos puedan colgarse bien y que otros tipos de animales puedan sujetarse adecuadamente con sus patas al tramado de cables, plataformas o líneas con que se enlace el paso a la vegetación.

Herpetofauna

Las particularidades del diseño de los pasos para los anfibios y reptiles estarán sustentadas en los tipos de vida de la herpetofauna y tipos de vegetación, en tanto que cada especie representa un reto particular; sin embargo, no es posible ni recomendable diseñar estructuras de cruce para cada especie. Por lo anterior se han agrupado los requerimientos y condiciones que deben cumplir los pasos para estos organismos, a fin de que se incluyan en los pasos para mamíferos terrestres.

Los pasos para fauna específicos para anfibios y reptiles deben ser estructuras diseñadas para satisfacer las necesidades diarias y del ciclo de vida del máximo de especies registradas en cada proyecto en particular, ya sean éstas de alta o baja movilidad, por ello es indispensable garantizar la accesibilidad y desplazamiento libre y seguro de especies pequeñas, medianas y grandes,⁴⁴ las que muchas veces tienen como depredadores a las otras especies que cruzan por el mismo paso.

Ejemplos de pasos para fauna en Holanda reflejan la manera cómo los pasos pueden hacerse aptos para el desplazamiento de anfibios y reptiles; un punto importante en el caso de los anfibios es que cuenten con hábitats húmedos a lo largo del paso. Asimismo, incluir vegetación herbácea y arbustiva en filas paralelas y alrededor de estas pequeñas pozas de agua para que anfibios arborícolas puedan también desplazarse. En zonas templadas con pocos meses de lluvias, el paso deberá considerar dispositivos que permitan mantener húmedas estas pozas o franjas lodosas en canaletas, para permitir la movilidad de estos organismos.

En el caso de los reptiles es importante que los grandes pasos para mamíferos incluyan suficiente cantidad de refugios para reptiles pequeños y medianos (iguanas y serpientes) a lo largo de todo el paso, con el fin de que puedan resguardarse de sus depredadores. Entre estos refugios se pueden considerar troncos huecos, pilas de madera, pilas de rocas que formen suficientes oquedades e incluso se pueden utilizar fragmentos de no más de 1.5 m de largo de canaletas de concreto o tubos de Ø menores a los 0.2 m. Algunas ideas se presentan en los diseños del siguiente capítulo.

Asimismo, en zonas húmedas con gran abundancia de anfibios y reptiles pequeños o acuáticos es recomendable incluir series de varios pasos embebidos en la estructura del pavimento, anteriormente descritos, cuya colocación es muy simple y no representa altos costos, por lo que se pueden colocar sin problema en carreteras y vías férreas en operación, así como considerarlas proyectos nuevos, en zonas donde sea elevado el atropello de anfibios o reptiles o de cruce por sitios con alta abundancia de estos grupos.

Fauna voladora

La fragmentación de hábitats por infraestructuras de transporte afecta a las especies voladoras como los murciélagos y aves durante sus movimientos nocturnos y diurnos, en los que se requieren desplazar entre las zonas de descanso y de alimentación.

Es común, además, que algunas especies de murciélagos y de aves ubiquen sus refugios diurnos entre las piezas de prefabricados de las estructuras como los puentes y viaductos, aumentando el riesgo de ser atropelladas al entrar o salir de ellos.

Adicionalmente, existen numerosas especies voladoras que de una manera u otra se sienten atraídas hacia las carreteras, particularmente en casos de aves rapaces ante la presencia de animales atropellados sobre la carpeta, ya que bajan a alimentarse de

⁴⁴ Grupo Selome, S.A. de C.V. Consultoría Ambiental. 2011. Does size matter? Animal crossings in roads of tropical ecosystems in Mexico. International Conference of Ecology and Transportation. Seattle, Washington, EU.

ellos y resultan atropelladas; o en otro caso algunos pequeños mamíferos noctámbulos⁴⁵ que se quedan quietos al ser alumbrados por los faros de los autos, siendo un foco de atracción para las aves rapaces que los cazan en ese momento y son atropelladas. Ello tiene consecuencias negativas, toda vez que el riesgo de mortalidad en regiones de nuestro país donde predomina esta fauna, como son las zonas áridas y semiáridas, es muy elevado.

Sumado a lo anterior, y como se mencionó previamente, se tiene el caso de aves asociadas a cuerpos de agua como garzas, patos, gallaretas, entre otras, que resultan frecuentemente atropelladas al desplazarse de un cuerpo de agua a otro, ya que al estar próximos las aves realizan vuelos rasos y en ocasiones cruzan por las infraestructuras lineales, o muy cerca del área donde circulan los vehículos o trenes. Son abundantes los atropellos de aves cuando particularmente una carretera cruza por zonas con gran cantidad de cuerpos de agua a ambos lados de ésta.

Dada la gran cantidad de aves y en ocasiones murciélagos que resultan atropellados por vehículos en carreteras se ha vuelto necesaria la implementación de medidas para reducir o compensar su posible impacto negativo en la vida silvestre. Ejemplos de esto se observan comúnmente en el Continente Europeo donde se colocan pasos para la vida silvestre, túneles, sitios de descanso y se gestionan zonas que funcionen como corredores hábitats para murciélagos o aves⁴⁶ como puede ser la formación de franjas de arbolado a través de los pasos para fauna de diversos tipos que permitan el descanso de aves y murciélagos, así como la orientación de los segundos fuera del arroyo vial.

Otro ejemplo de medidas para reducir el impacto de fragmentación sobre hábitats de murciélagos derivado de infraestructuras lineales es la adaptación de pasos elevados para fauna terrestre, de tal manera que pueden ser ocupados por los murciélagos, particularmente al colocar estructuras y arbolado que permita que estos animales voladores puedan descansar o establecer sus refugios temporales o refugios de maternidad.

Una adaptación a estructuras existentes para murciélagos y que puede colocarse sobre la infraestructura o en los pasos para fauna, resulta ser la colocación de trabes huecas de madera en los sitios donde previamente se identifiquen colonias o poblaciones de murciélagos que pudieran ser afectadas por la construcción de carreteras, ya que éstos se verán atraídos hacia las alcantarillas, puentes, bóvedas y otras estructuras de la infraestructura para utilizarlas como dormideros o refugios de maternidad. Su presencia en estas estructuras evita que sean funcionales como pasos de fauna para otras especies, ya que la mayoría de los vertebrados terrestres evitan entrar en espacios ocupados por murciélagos.

La colocación de estructuras como la que se presenta en la siguiente figura puede brindar un sitio específico para que los murciélagos coexistan con algún paso para fauna tipo PIFA.

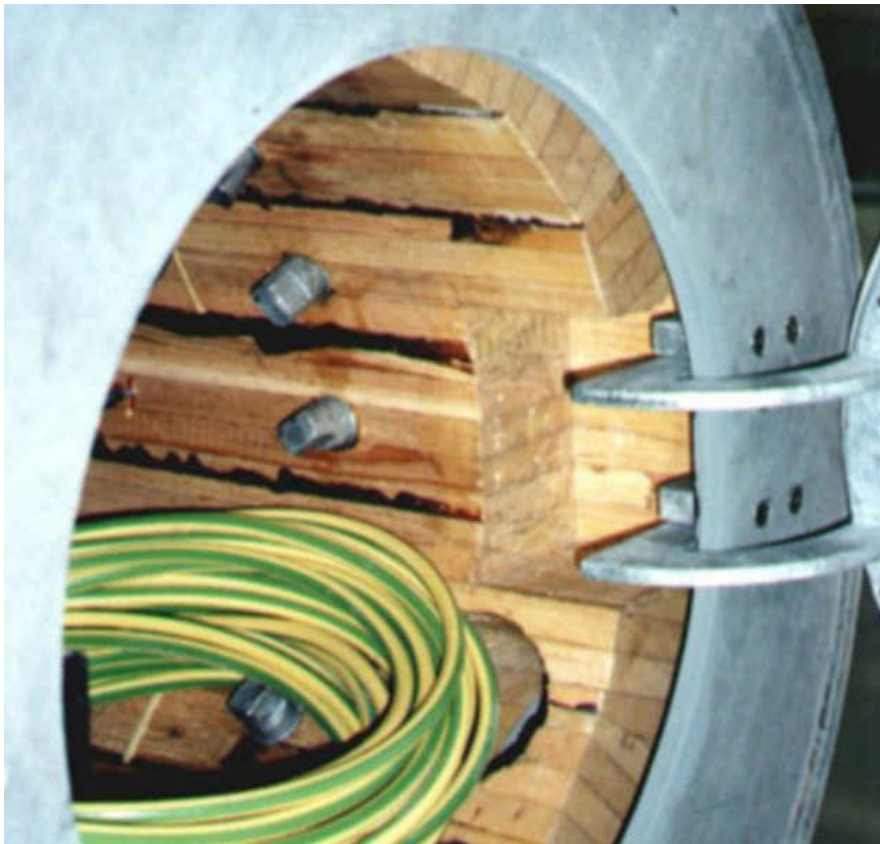
⁴⁵ De hábitos nocturnos.

⁴⁶ Conference of European Directors of Roads, 2013.

Figura 51



a)



b)

a) Vista conceptual (render) de la propuesta de reutilización de una estructura utilizada para el señalamiento vial, que puede ser adaptada para brindar refugio a murciélagos.

b) Detalle del interior (fuente: acceso abierto de internet).

La idea de adaptar estas estructuras es que la parte horizontal sea hueca, sin puertas ni cables y de madera con tornillos salientes hacia el interior para así atraer a los murciélagos y que puedan perchar en ellas. Para ser funcionales se requiere que el diámetro de estas estructuras mida entre 0.5 y 0.6 m y una altura dada por la infraestructura que cruza por debajo o de al menos 4.0 m si se colocan en PIFA para librar con suficiente altura la presencia de otros mamíferos. Las características por considerar dependerán de las especificaciones permitidas para la infraestructura y de lo que un experto en este tipo de fauna señale para las especies que se quiera proteger.

Se debe tener en cuenta también que con las variaciones en las especies de aves y murciélagos y el uso que cada una da a su hábitat, la efectividad de las medidas de mitigación difiere entre los diferentes grupos de aves y de murciélagos, por lo que ciertas medidas pueden ser útiles para un grupo o familia de murciélagos y no resultar ser tan eficientes para otras. En este sentido se requiere el análisis experto para cada caso, considerando el comportamiento específico de las especies y su uso del hábitat, en una amplia área a lo largo de una infraestructura lineal, para tomar las mejores decisiones en lo referente a medidas de adaptación de los pasos para fauna y hacerlos adecuados para la protección de aves y murciélagos.

4.4 Diagrama para toma de decisión sobre tipos de pasos a utilizar

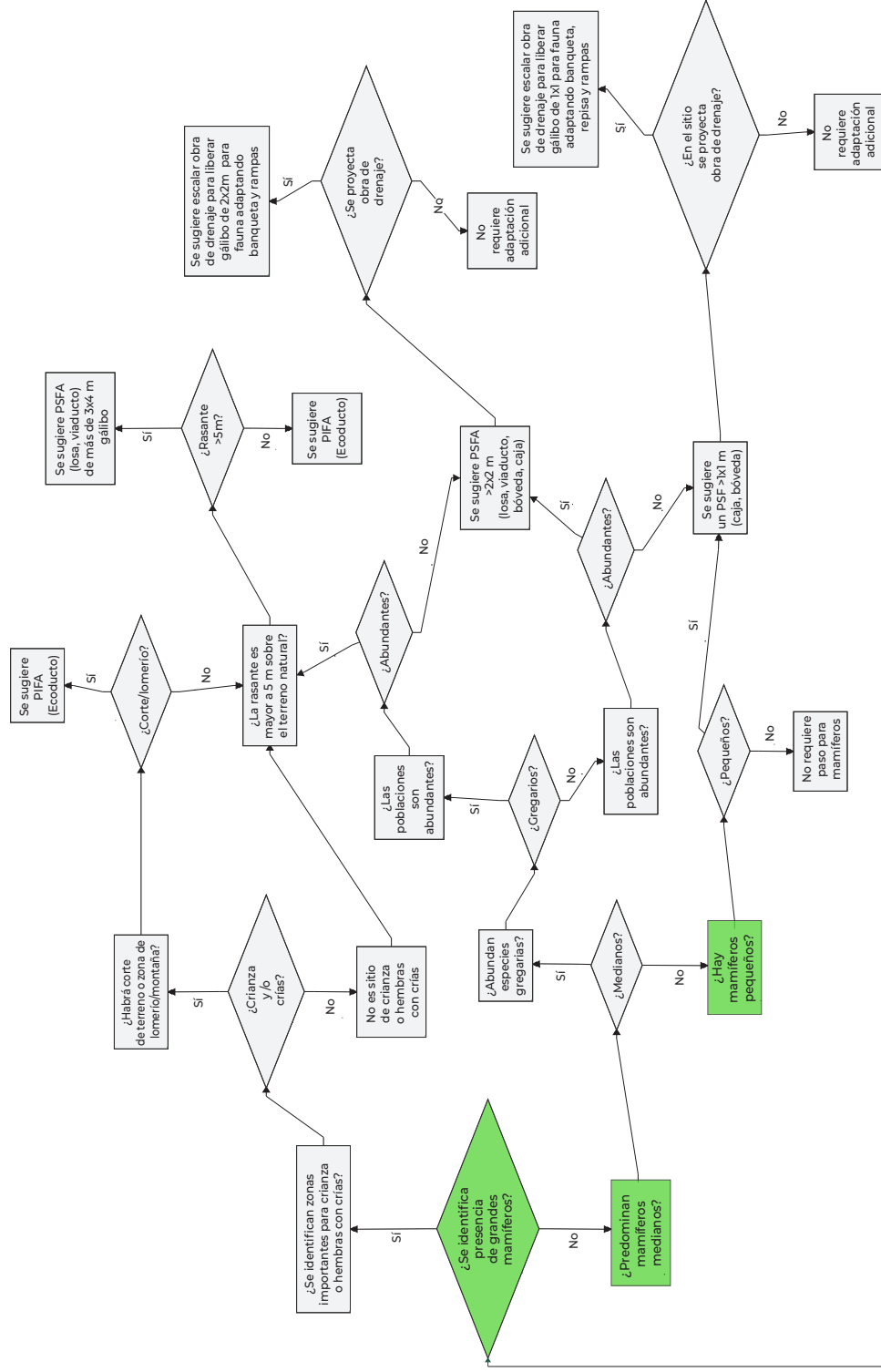
En los anteriores capítulos hemos señalado distintos tipos de pasos para fauna silvestre; sin embargo, puede ser de utilidad para el usuario de este Manual contar con una forma fácil y rápida de identificar cuál puede ser la opción más adecuada de tipo de paso para fauna silvestre para algún sitio en particular. En este sentido hemos desarrollado un diagrama de decisión binaria (sí/no) mediante criterios de definición generales que permiten llegar de un modo rápido a definir el tipo de paso más adecuado para algún punto particular de una infraestructura lineal.

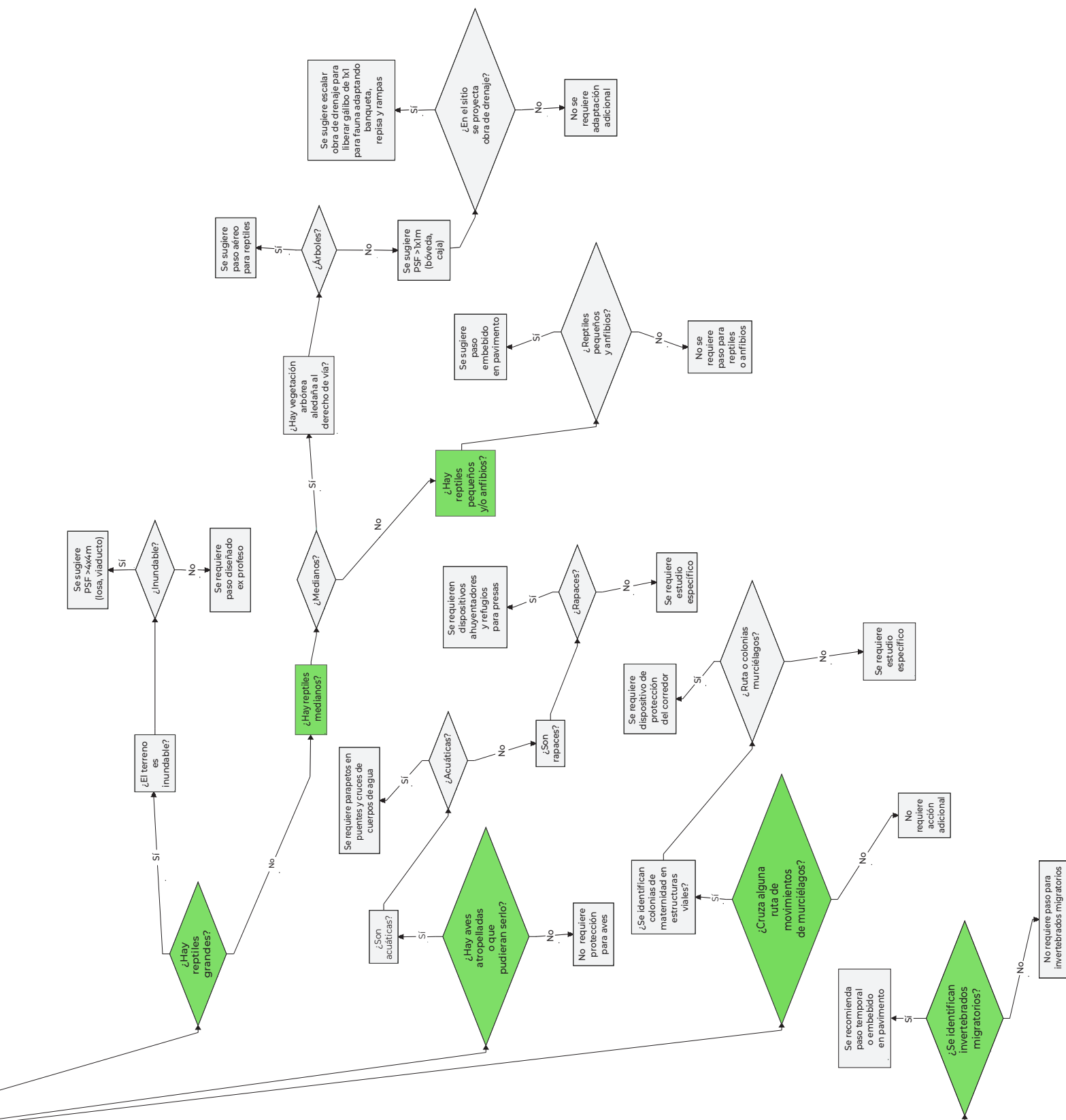
Es importante señalar que de ninguna manera el uso de este diagrama sustituye la opinión experta de un especialista de fauna, cuya visión holística sería fundamental para definir la mejor opción de paso para fauna silvestre. Sin embargo, para efectos presupuestales o de visualización rápida de las distintas opciones de obras de paso para fauna que deberían considerarse en algún sitio, creemos que este diagrama puede ser de utilidad.

Las etapas de planeación y ubicación específica de pasos para fauna arrojarán los sitios críticos donde deban considerarse estas estructuras. Lo siguiente es definir si es factible realizar una estructura para el paso para fauna de una gran variedad de especies animales, o bien se requiere algún tipo de paso específico para algún taxón en particular. En ocasiones es importante buscar una opción de paso que pueda ser utilizado por la mayoría de los grupos de animales presentes, o bien combinar varios tipos de pasos menores en una región para brindar mayores opciones de cruce para distintos animales.

Los criterios que se presentan en el diagrama siguiente permitirán identificar opciones para pasos que puedan ser considerados para algún proyecto de infraestructura lineal.

DIAGRAMA PARA TOMA DE DECISIÓN SOBRE TIPOS DE PASOS PARA FAUNA SILVESTRE A UTILIZAR







COMUNICACIONES
SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

SUBSECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA

DIRECCIÓN GENERAL DE SERVICIOS TÉCNICOS

CAPÍTULO 5

DISEÑO

CRITERIOS GENERALES PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PASOS PARA FAUNA EN LA INFRAESTRUCTURA LINEAL

Generalidades

Este capítulo del Manual contiene las especificaciones y criterios de diseño para las estructuras denominadas “pasos para fauna”, tanto para el diseño y construcción en infraestructura lineal nueva, como para la adaptación de obras de drenaje existentes a fin de que puedan fungir como pasos mixtos (de agua y para fauna).

Las características de los pasos para fauna propuestos en el presente Manual son acordes con la etología, talla y diversidad de las especies de fauna silvestre presentes en nuestro país, a partir de las cuales se describen ocho diseños “tipo”, presentados en el capítulo anterior, que reflejan variantes de pasos para fauna con los que se brindan condiciones apropiadas para el desplazamiento de distintas formas de vida a través de una barrera como puede resultar ser una obra de infraestructura lineal. Adicional a estos ocho tipos de pasos para fauna se incluyen las obras complementarias que se requiere considerar para propiciar el uso de los pasos. Los ocho diseños tipo son los siguientes:

- 1) Paso Inferior para Fauna (PIFA).
- 2) Paso Superior para Fauna (PSFA).
- 3) Obra de drenaje adaptada para función mixta (paso de agua y paso para fauna).
- 4) Paso para fauna embebido en la infraestructura lineal.
- 5) Paso aéreo para fauna arborícola.
- 6) Obras para paso y protección de fauna voladora.
- 7) Paso temporal para invertebrados migratorios.
- 8) Paso para fauna acuática.

Es importante señalar que este Manual se presenta como una guía para la implementación de distintos tipos de pasos para fauna, ilustrando con diseños recomendados y sustentados en la literatura y en experiencias en otros países y en México, con la intención de facilitar la elaboración de los proyectos ejecutivos correspondientes. No obstante, de acuerdo con las características particulares que se presentan en cada sitio y proyecto de carretera se debe realizar el proyecto ejecutivo de cada paso para fauna.

Como se ha mencionado, los pasos para fauna son estructuras diseñadas para restaurar la conectividad afectada por la construcción de una infraestructura lineal que ocasiona la fragmentación del hábitat de fauna silvestre, así como de sus corredores de desplazamiento, necesarios para poder satisfacer las necesidades diarias y del ciclo de vida de la mayoría de las especies registradas en cada proyecto, ya sean éstas de alta o baja movilidad, por lo que se busca maximizar la accesibilidad y desplazamiento libre y seguro de la fauna silvestre.

5.1 Densidad de pasos para fauna

La ubicación y definición de los tipos de pasos para fauna que requiere un proyecto de infraestructura lineal son los primeros elementos que se deben considerar para determinar sus características de implementación. Definir la cantidad de pasos por habilitar y sus distanciamientos en alguna carretera o vía férrea existente o por construir en infraestructura en proyecto, debe resultar de buscar que la infraestructura lineal sea lo más permeable posible para la fauna en la localidad, dadas las condiciones de conectividad y ecosistemas aledaños existentes. Es decir, que la infraestructura lineal permita el mayor paso de animales de diferente índole de forma segura a lo largo de toda la estructura y particularmente en las zonas identificadas como tramos críticos (zonas negras).

Generalmente en la literatura especializada se dan algunas recomendaciones para el distanciamiento y densidad de los pasos para fauna; no obstante, no existen directrices fijas para todos los tipos de infraestructura y hábitats por los que cruzan, ni para todas las topografías y condiciones económicas bajo las cuales se requiere construir una carretera o una vía férrea, por lo que la definición de la densidad de pasos y su distanciamiento debe realizarse de forma particular para cada proyecto, una vez identificados los tramos donde la conectividad ecológica y la seguridad de los usuarios puedan quedar comprometidas. Para realizar esta definición se requiere la participación de un equipo multidisciplinario conformado por ingenieros civiles y especialistas en fauna y ecología, entre otras disciplinas. En cada sitio o tramo donde sea necesaria la implementación de pasos para fauna se deben aprovechar las condiciones existentes de topografía, vegetación, visibilidad, etc., para poder tomar decisiones en cuanto a la cantidad de pasos de cada tipo que deban instalarse, así como su ubicación específica.

La permeabilidad de las infraestructuras lineales para la fauna debe garantizarse tanto en tramos críticos, con ecosistemas de interés para la conservación biótica, como en zonas de hábitats perturbados e incluso agrícolas, en donde también existe fauna silvestre asociada a estos sitios. No obstante, la intensidad e inversión en pasos para fauna es variable y en función de la riqueza faunística o fauna de relevancia ecológica que se busca proteger.⁴⁷

Las densidades de pasos deben definirse según las características de cada proyecto, a partir de un análisis detallado para determinar la ubicación concreta de los pasos para

⁴⁷ Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2015). *Prescripciones técnicas para el diseño de pasos de fauna y vallados perimetrales (segunda edición, revisada y ampliada)*. Documentos para la reducción de la fragmentación de hábitats causada por infraestructuras de transportes (1), 139 pp. Madrid.

fauna, buscando que ésta sea lo más aproximada a las rutas de desplazamiento habitual de las especies incidentes en la región, así como que tomen en consideración sitios que pueden resultar de interés para alimentación, refugio, agua, percha, etcétera.

En el análisis de permeabilidad de la infraestructura se deben considerar todos los tipos de pasos adecuados para los diferentes grupos taxonómicos de referencia en la región, a fin de incluir tanto pasos específicos para algún grupo en particular como pasos multifuncionales (para diferentes grupos y tamaños de animales) como pasos mixtos (de agua y para fauna), sacando el máximo provecho de las estructuras ya existentes y las proyectadas en la carretera o vía férrea.

En diversos manuales y publicaciones internacionales se brindan recomendaciones referentes al distanciamiento mínimo que debe considerarse entre pasos para fauna, a partir de los ámbitos hogareños y capacidad de desplazamiento de diferentes especies. En este entendido, algunos manuales recomiendan que la distancia entre dos pasos para grandes carnívoros no supere la media de las distancias individuales recorridas diariamente. Por citar un ejemplo, para los osos pardos se ha recomendado que la distancia entre dos pasos debe ser como máximo de 1.4 km, mientras que en el caso del lobo puede alcanzar un máximo de 2.2 km. Otras recomendaciones proponen que la distancia entre dos pasos sea como máximo equivalente al valor de la raíz cuadrada del área que recorre en busca de agua, comida o pareja reproductiva alguna especie de referencia.⁴⁹

La densidad adecuada de pasos es un tema que debe estudiarse en cada sitio y bajo cada circunstancia de proyecto, ambiental y topográfica. De manera orientativa, en términos generales, se puede señalar la siguiente recomendación para la densidad de pasos para fauna.

Tabla 4

TIPO DE HÁBITAT	DENSIDAD MÍNIMA DE PASOS PARA FAUNA	
	Pasos para grandes mamíferos	Pasos para fauna mediana y pequeña
Forestal con alto nivel de conservación y sitios de interés para la conservación de la conectividad ecológica. Áreas de importancia ambiental.	1c / 1 a 3 km	1c / 0.5 a 1 km
Vegetación perturbada, acahuals y otros tipos de vegetación secundaria (natural transformados por actividades humanas).	1c / 3 a 5 km	1c / 0.5 a 1 km
Áreas de baja importancia ambiental (cultivos, plantaciones y zonas semiurbanas).	1c / 5 km	1c / 0.5 a 1 km

Recomendaciones de densidad para colocación de pasos para fauna en la infraestructura lineal integrando resultados de propuestas internacionales y considerando fauna mexicana.⁴⁸

⁴⁸ Modificado de Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, *op. cit.* 2015; Luell, B. (2003). "Wildlife and Traffic: a European handbook for identifying conflicts and designing solutions", en The XXIIInd PIARC World Road Congress World Road Association-PIARC.

5.2 Selección del tipo de paso

Como se presenta en el capítulo 4, existen diversas opciones de pasos para fauna, las que estarán en función del sitio, tipo y tamaño de fauna a proteger, así como del tipo de infraestructura lineal y las características de proyecto, entre otras consideraciones para cada caso de estudio. En términos generales podemos señalar que la selección del tipo de paso debe tomar en consideración al menos los siguientes criterios:⁴⁹

1. La importancia del tramo crítico en términos de la conectividad ecológica en general y, en particular, para la movilización de la fauna.
2. La topografía de la zona y del tramo crítico donde se contempla instalar pasos para fauna.
3. Las especies o grupos taxonómicos de referencia.

Como se indica en capítulos anteriores, el análisis del tramo crítico en términos de restaurar o conservar la conectividad ecológica debe considerar la distribución de los hábitats de mayor interés para la dispersión de las especies o grupos taxonómicos de referencia.

Es importante que la evaluación se aplique a tres escalas: sistema terrestre, donde se hace un análisis que identifica las rutas de migración de largo recorrido (escala 1:250,000 a 1:500,000);⁵⁰ la regional, que permite un análisis a escala del paisaje para identificar los corredores y zonas críticas (escala 1:250,000 a 1:50,000), y otra más detallada, unidad natural para identificar sitios donde se deban instalar los pasos (a escala 1:50,000 o inferior a 1:10,000).

El Manual brinda recomendaciones y directrices generales que deben ser adaptadas a los contextos locales y a cada proyecto en particular, ya que pueden requerirse pasos específicos para la fauna en tramos que cruzan ambientes perturbados cuando se analizan de forma específica, puesto que en muchos de estos ambientes pueden encontrarse especies protegidas o de gran importancia para la dinámica ecológica regional. De ahí la importancia de que la elección de los pasos para fauna obedezca al conjunto de estudios previos, indicados en los capítulos anteriores, con el apoyo de especialistas en la materia.

La topografía donde se considera el diseño y construcción de la infraestructura lineal juega un papel muy importante en tanto que obliga a optar por pasos inferiores o superiores. En este sentido, en otros países se brindan las siguientes recomendaciones:

- I. Es preferible que los pasos tengan los accesos al mismo nivel que el terreno natural.
- II. En tramos planos o de lomerío se considerarán tres posibilidades:
 - a) Elevar la rasante de la infraestructura para permitir el diseño y construcción del PSFA.

⁴⁹ Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, *op. cit.*, 2015.

⁵⁰ Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (2007). *Ordenamiento ecológico. Conceptualización*.

- b) Implementar los PIFA con rampas de acceso de poca pendiente si se trata de dar acceso a ungulados y animales pequeños, lo que puede implicar demasías del derecho de vía para construirlos, mas no resulta un requisito para la conservación de felinos, ya que en este caso pueden considerarse taludes con pendientes más abruptas e incluso sustratos rocosos de fuerte pendiente para el acceso de estos organismos a los pasos.
- c) La implementación de los pasos debe dar continuidad a la vegetación aleada natural, la topografía debe permitir esta conectividad con otros espacios vegetados aledaños a la infraestructura.

Los pasos para fauna deben diseñarse para que puedan ser utilizados por el más amplio número posible de especies o taxones. Por ello, y para facilitar la selección del tipo de paso más adecuado a cada situación, en la literatura internacional se han identificado grupos relativamente homogéneos en cuanto a la tipología y dimensiones de los pasos que se requieren para cruzar la infraestructura lineal. A partir de ellos se han definido para este Manual los tipos de pasos más adecuados para la fauna mexicana.

Tabla 5

Necesidades de paso en función del tipo y tamaño de fauna silvestre (Fuente: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2015)	Pasos para fauna adecuados para diferentes tipos de organismos en México
Pasos aptos para todos los organismos	1) Paso Inferior para Fauna (PIFA). 2) Paso Superior para Fauna (PSFA). 3) Obra de drenaje adaptada para función mixta (paso de agua y para fauna).
Pasos para grandes mamíferos	1) Paso Inferior para Fauna (PIFA). 2) Paso Superior para Fauna (PSFA). 3) Obra de drenaje adaptada para función mixta (paso de agua y para fauna).
Pasos para pequeños vertebrados	3) Obra de drenaje adaptada para función mixta (paso de agua y para fauna). 4) Paso para fauna embebido en la infraestructura lineal.
Pasos para anfibios	3) Obra de drenaje adaptada para función mixta (paso de agua y para fauna). 4) Paso para fauna embebido en la infraestructura lineal
Estructuras para peces	8) Paso para fauna acuática.
Necesidades adicionales de la fauna mexicana	
Pasos para fauna arbórea	5) Paso aéreo para fauna arborícola.
Cruces por cuerpos de agua y zonas de alta movilización de murciélagos y aves	6) Obras para paso y protección de fauna voladora.
Zonas con registro de movimientos migratorios de invertebrados (ejemplo: Golfo de México y Caribe)	7) Paso temporal para invertebrados migratorios.

Recomendaciones de pasos para fauna en México.

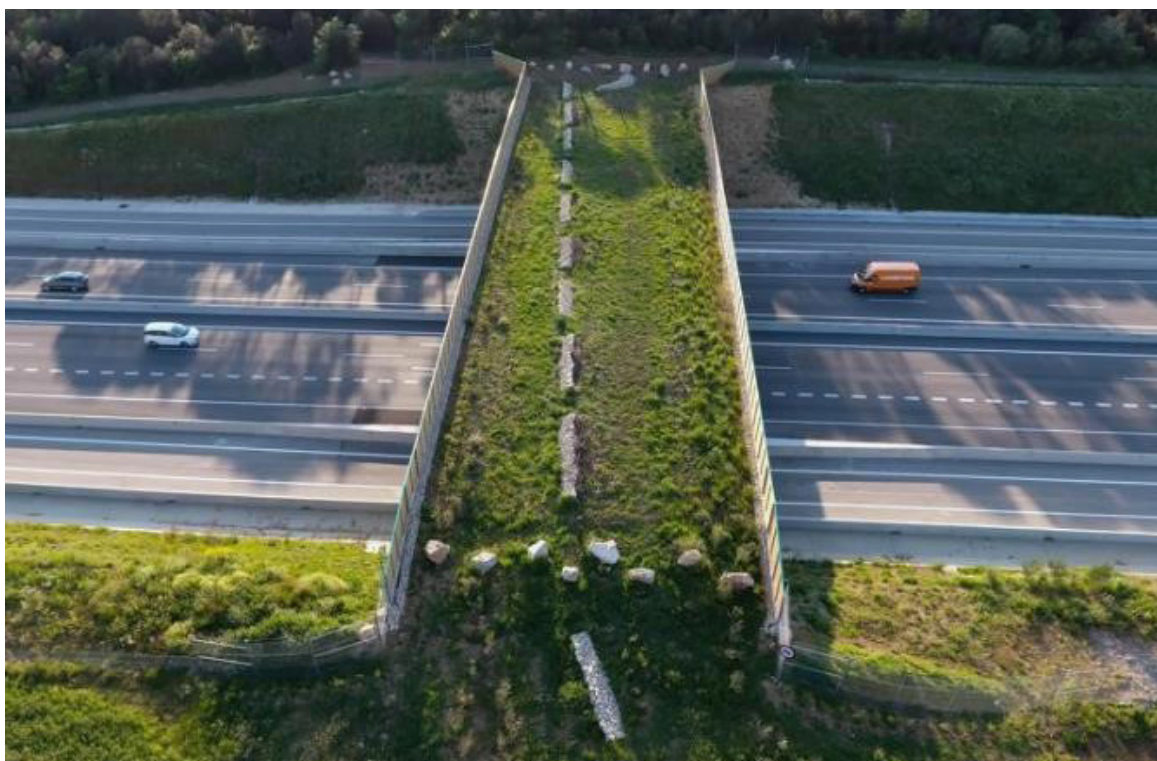
A continuación se presentan las recomendaciones del tipo y dimensiones para cada uno de los pasos para fauna que se proponen en este Manual, así como los planos orientativos para la implementación de estos pasos.

5.3 Dimensiones recomendadas, componentes y criterios a considerar en los pasos para fauna

1) Paso Inferior para Fauna (PIFA)

Este tipo de pasos cruzan sobre la infraestructura lineal, se conocen como “puentes verdes” o ecoductos, los cuales, de acuerdo con la literatura y experiencia internacional y nacional, generalmente se diseñan con un ancho mínimo de 20 m a un máximo de 100 m, considerando que el ancho usual es de 40-50 m, siendo un ancho idóneo de 80 m o mayor, y una longitud variable de acuerdo con las características del proyecto de infraestructura lineal. La superficie de dicha estructura se cubre con una capa de suelo con materia vegetal, acorde a las características estructurales del paso y de la vegetación representativa del ecosistema fragmentado aledaño, permitiendo la continuidad de los hábitats situados a ambos lados de la infraestructura lineal. Asimismo se requiere de la colocación de montículos de rocas y troncos que fungirán como refugios para fauna mediana y pequeña, y rampas de acceso con pendientes (P) no mayores al 25% para que la fauna silvestre pueda hacer uso de este tipo de pasos.

Figura 52



Paso Inferior para Fauna (PIFA), ubicado en la Carretera A2 en Girona, España (fuente: acceso abierto de internet).

La aceptación de los animales con respecto de algún paso depende en buena medida de la manera en que se les induzca hacia los accesos, brindando un paso que ofrezca refugio como tiras de árboles y arbustos, apilamiento de rocas, etc. Adicionalmente se deben colocar barreras como cercos de protección sobre las zonas laterales del paso para fauna, los cuales tendrán una altura de 1.5 a 2.0 m a partir de la capa de suelo con materia vegetal.

Es necesario sembrar árboles y arbustos alineados a la barrera, los cuales funcionan como barrera natural para la reducción del ruido y del haz de luz ocasionado por los faros de los vehículos. En los ecoductos del Parque Nacional Banff en Alberta, Canadá, se construyeron adicionalmente a la barrera de malla del paso, bordos de tierra en las zonas laterales de los pasos para reducir el efecto visual de los vehículos y dar seguridad a los animales a continuar su cruce (Figura 53).

Figura 53



Ecoducto en las Montañas Goats en Montana, Estados Unidos.⁵¹

Figura 54



Bordos en las zonas laterales del Paso Inferior para Fauna (PIFA), Parque Nacional Banff, Alberta, Canadá (fuente: Grupo Selome, S.A. de C.V.).

⁵¹ Alternativa verde (2020). *Ecoductos, puentes naturales para cuidar la fauna*. Disponible en: <https://alternativa-verde.com/2012/10/05/ecoductos-puentes-naturales-para-cuidar-la-fauna/>.

Estos pasos son diseñados principalmente para aquellas especies que no tienden a usar estructuras por debajo de la carretera para cruzar de manera segura a través de la infraestructura vial, como es el caso del jaguar (*Panthera onca*), oso negro (*Ursus americanus*), venado cola blanca (*Odocoileus virginianus*), borrego cimarrón (*Ovis canadensis*), bisonte americano (*Bison bison*), etc. Así como para vertebrados que se desplazan en manadas o grupos grandes, principalmente especies de ungulados.⁵² Su función principal es satisfacer las necesidades de movimiento de un amplio espectro de vida silvestre, desde mamíferos de talla grande hasta organismos de tallas medianas y pequeñas, incluyendo reptiles y anfibios. Además, permite mejorar los cruces de grandes colonias de murciélagos y parvadas de aves al contar con hileras de árboles que sirven de hitos de orientación y zonas de percha entre uno y otro lado de la infraestructura vial.

El tipo de vegetación a implementar en la superficie de este tipo de estructuras deberá ser heterogéneo, tratando de combinar los espacios abiertos con franjas longitudinales de árboles y arbustos, además de considerar mayor densidad de estos ejemplares en los márgenes laterales de las estructuras con la intención de favorecer la orientación de la fauna. La selección de especies vegetales a establecerse tiene que considerar aquellas que presenten raíces ramificadas o fasciculadas, ya que con esto se evitarán daños a la estructura.

Es recomendable conservar el banco de semillas existente que se encuentra en la tierra despalmada del terreno natural, es decir, habilitar las condiciones necesarias para conservar los ejemplares de semillas de distintas especies vegetales que se encuentran en las áreas por afectar.

Es importante que la tierra que cubra el paso para fauna provenga de las áreas de afectación del proyecto, con ello se evita la introducción de especies exóticas y se facilita la cobertura vegetal al ser especies adaptadas a las condiciones climáticas regionales.

Cuando se realice la revegetación en las zonas aledañas al paso para fauna implementado se recomienda utilizar especies nativas de la región donde se desarrolle el proyecto, que sean características del ecosistema por conectar y adaptables a las condiciones de la estructura, que en algunos lugares y periodos estarán en función del mantenimiento que se les aplique.

Para integrar el paso para fauna al ambiente natural se requiere crear un acondicionamiento completo, donde es importante considerar la disposición de montones o hileras de troncos, ya que con esto se favorecerá el establecimiento de refugios y generación de microhábitats para la fauna, ganando presencia de invertebrados, reptiles y otros pequeños animales. Esta actividad es importante en el periodo inicial en el que la revegetación no haya alcanzado todavía su desarrollo óptimo. También se re-

⁵² Los ungulados (*ungulata*) son un superorden de mamíferos placentarios que se apoyan y caminan con el extremo de los dedos, típicamente revestidos de una pezuña.

comienda instalar bordos de tierra sobre las zonas laterales del paso para fauna para evitar la visión hacia la carretera.

Criterios

Los criterios que se deben tomar en cuenta para el diseño y construcción de este tipo de paso para fauna son:

- a) Que la infraestructura ocasione la fragmentación del hábitat de grandes mamíferos, identificando lo siguiente:
 - Presencia de mamíferos de talla grande, ungulados y grandes carnívoros como el jaguar, oso negro, venado cola blanca, borrego cimarrón, bisonte americano, etcétera.
 - Necesidad de orientación del vuelo para aves y murciélagos formando un corredor arbóreo.
 - Afectación a la vegetación arbustiva y arbórea de la zona que requiere medidas correctoras y compensatorias.
- b) Especificaciones:
 - Ancho mínimo de 20 m.
 - Ancho máximo de 100 m.
 - La configuración del PIFA puede ser en tres formas opcionales: “recto” A, “poligonal” B, o “curvo” C (Figura 55).
 - Altura de la barrera de protección lateral de 1.5 a 2.0 m, ésta puede ser de madera tratada o de distintos materiales como malla ciclónica, malla gradual de tres nudos, etc.(Figura 56). La barrera de madera actúa además como un deflector acústico, reduciendo el ruido de la infraestructura hacia el interior del paso.
 - Pendiente máxima en rampas de acceso $P \leq 25\%$.
 - Capa de suelo con materia vegetal de 0.5 a 2.0 m de espesor, revegetada con especies representativas del ecosistema fragmentado aledaño, y colocación de rocas en las zonas laterales y troncos utilizando elementos que se encuentren sobre el suelo natural o aquellos producto del desmonte. No se derribarán árboles para estos fines.
 - Creación de refugios para fauna pequeña mediante la colocación de tubos, preferentemente de concreto o PVC, con diámetro de 8” a 12”, cortados por la mitad en su longitud, en tramos de 1 a 1.5 m, con una distancia entre ellos de 1 a 1.5 m, ubicados en las zonas laterales del paso y del centro del paso para fauna hasta el terreno natural.

Figura 55

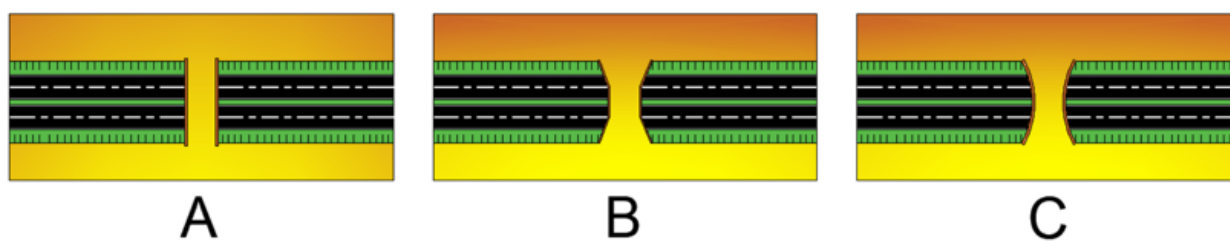
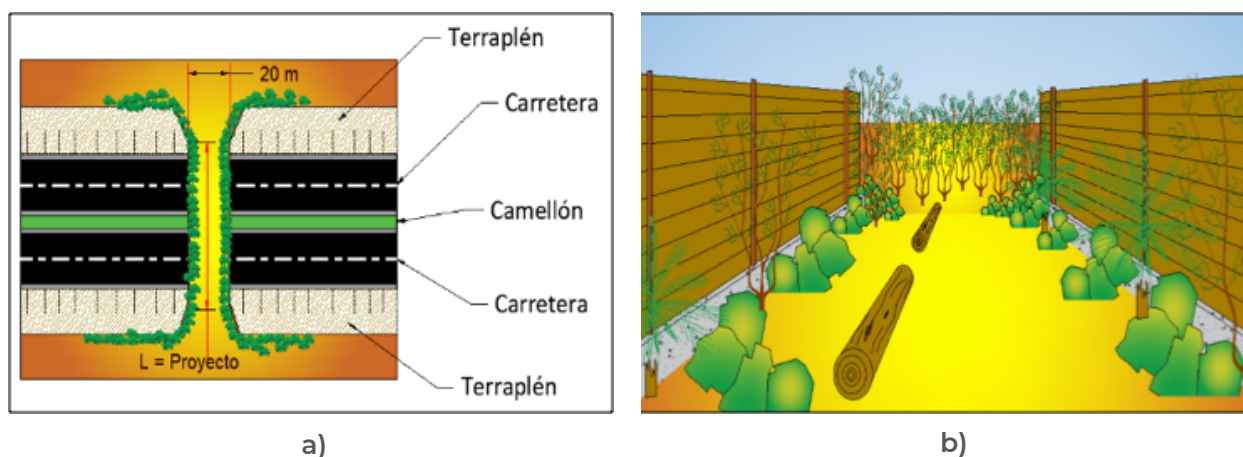
Configuraciones en los pasos inferiores para fauna.⁵³

Figura 56



Representación gráfica del Paso Inferior para Fauna (PIFA), a) vista en planta y b) perspectiva de la barrera de madera como deflector acústico y aislante visual.⁵³

Consideraciones generales

Para el diseño y construcción de estos pasos para fauna se deben tomar en cuenta las siguientes consideraciones generales:

- Para alentar el uso de los pasos por parte de la fauna silvestre se debe colocar una composición vegetativa del ecosistema fragmentado aledaño.
- Para garantizar el uso y la función del paso para fauna se deben ubicar en áreas de corredores de vida silvestre, previo estudio (capítulos 2 y 3).
- Toda el área del paso para fauna debe estar cerrada de acceso al público.
- Entre más grande y robusto sea este tipo de paso se puede incorporar mayor cantidad de árboles y arbustos propios de la vegetación aledaña, de modo que haya continuidad del hábitat de un lado al otro de dicho paso.
- La implementación de barreras sólidas, bermas de tierra o vegetación densa es de suma importancia para reducir el ruido y luz de los vehículos subyacentes al paso para fauna.

⁵³ Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, *op. cit.*, 2015.

- f) El diseño debe contemplar la carga muerta del suelo orgánico, revegetación y todas las obras complementarias que indique el especialista.
- g) El entramado de trabes de concreto armado permite la sujeción de las raíces de la vegetación y puede variar en función de la especie vegetal, por lo que se deben seguir las indicaciones del especialista en vegetación.
- h) En la revegetación de los accesos se deben implementar las pendientes adecuadas para evitar encharcamientos y deslaves del talud.

Diseños tipo

Diseño mediante bóvedas o “superclaros” (elementos prefabricados) para la implementación de un PIFA

Para este tipo de paso a base de bóvedas o “superclaros” (elementos prefabricados) se recomienda el diseño de la cimentación mediante zapatas corridas en tres ejes, es decir en cada lado de la estructura y en el eje central. De esta cimentación se desplantan los muros laterales y el muro central, los cuales dan soporte a la estructura de bóveda o “superclaro” (elemento prefabricado). Esta estructura se coloca mediante un anclaje con punta roscada que se ahoga en los muros laterales y centrales, sujeta un canal tipo “J” donde posteriormente se atornillan las láminas corrugadas y se sujetan con tornillos roscados.

El diseño y construcción de estas estructuras debe apegarse a las especificaciones de los manuales y normas técnicas de diseño, construcción y conservación para puentes de la SCT.

Luego de la colocación de la estructura se construye el cuerpo del terraplén en apego a la normativa SCT vigente.

Una vez que se llega al nivel de proyecto se coloca la capa de suelo con materia vegetal, con el espesor que se haya definido para este tipo de paso para fauna, se realizan los trabajos de revegetación con especies de flora adecuadas al hábitat del tipo de fauna que cruzará por este paso. De la misma forma se colocan los elementos de protección como las barreras de madera u otro material, montículos de tierra, mallas, etc., con la altura y especificaciones recomendadas. También se deben colocar las piedras, troncos y/o refugios para permitir el paso de fauna de talla pequeña, e incluso anfibios y reptiles.

En los planos orientativos 1, 2 y 5, se muestra gráficamente el diseño “tipo” antes descrito para desarrollar un proyecto de PIFA mediante el uso de bóvedas o “superclaros” (elementos prefabricados).

A continuación se enlistan reglas generales para el uso de bóvedas o “superclaros” (elementos prefabricados) en un Paso Inferior para Fauna:

- La ubicación de esta estructura se justifica en áreas donde requiera una alta permeabilidad de la infraestructura lineal para la fauna, que coadyuve a un corredor natural para la fauna silvestre.
- Se debe maximizar la continuidad del suelo nativo adyacente y evitar tener que utilizar suelo traído de banco o de otros sitios fuera del área de proyecto.

Diseño considerando puente o losa para la implementación de un PIFA

Para este tipo de paso mediante puente o losa se tiene como referencia a los pasos inferiores vehiculares (PIV), ya que su diseño es muy similar, teniendo la diferencia que el PIFA funge como paso para fauna silvestre para mamíferos grandes y medianos por la parte superior del mismo. Para esta estructura se recomienda el diseño de la cimentación mediante pilotes o zapatas corridas, o lo indicado en el proyecto. Posteriormente se requiere el desplante de pilas y muros de carga que soporten las trabes que conformarán el cuerpo inferior de la losa del puente. Éstos a su vez apoyados en los cabezales de dicha estructura con su respectiva junta de neopreno.

El diseño y construcción de estas estructuras debe apegarse a las especificaciones de los manuales y normas técnicas de diseño, construcción y conservación para puentes de la SCT.

Una vez que se conforma la estructura tipo puente, sobre su superficie se coloca la capa de suelo con materia vegetal, con el espesor que se haya definido para este tipo de paso para fauna. Como recomendación general en la literatura internacional especializada se han utilizado espesores de suelo, en función de la cobertura vegetal que se esté considerando.⁵⁴

- Para pastos y herbáceas: profundidad de suelo orgánico de 0.3 m.
- Para matorrales y arbustos: profundidad de suelo orgánico de 0.6 m.
- Para árboles: profundidad del suelo orgánico de 1.5 m.

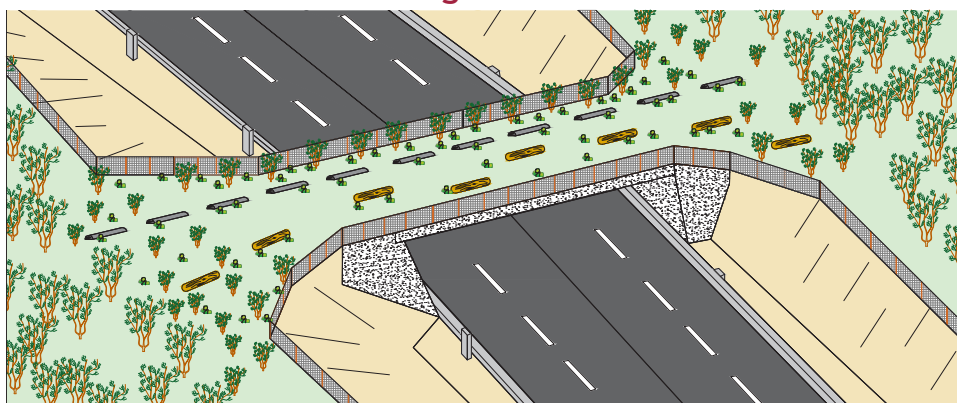
Con la capa de suelo debidamente conformada se realiza la revegetación con especies de flora adecuadas al hábitat del tipo de fauna que cruzará por este paso. De igual forma se deben colocar las piedras, troncos y/o refugios para permitir el paso de fauna de talla pequeña e incluso anfibios y reptiles.

La intención de la vegetación es conducir a las especies que se busca proteger a través del paso para fauna, por lo que deben reflejar las condiciones de hábitat en ambos lados de la estructura utilizando plantas nativas. El uso de suelo orgánico producto del despalme del proyecto es idóneo para utilizar en estos pasos porque incluye un acervo de semillas locales que facilita la colonización vegetal herbácea y arbustiva al menor tiempo y con especies adaptadas a las condiciones climáticas y altitudinales del sitio. Plantas que son alimento natural para las especies locales suelen ser una buena alternativa para que los animales se adentren en el paso para fauna. En el caso de árboles, las raíces pueden representar un riesgo para la estructura, por lo que la selección de las especies debe ser cuidadosa, procurando evitar plantas de raíces pivotantes que requieran gran profundidad o resulten agresivas al concreto.

Para la colocación de la barrera como cerco de protección puede considerarse un bordo de tierra de unos 0.7 m de alto y malla ciclónica en ambos costados de la estructura (Figura 57). Esta barrera ayudará a la disipación de ruidos y luces provenientes de los vehículos que cruzan por debajo de esta estructura. La barrera de protección debe totalizar una altura de entre 1.5 a 2.0 m.

En los planos orientativos 3 y 4 se muestra gráficamente el diseño “tipo” antes descrito para desarrollar un proyecto de PIFA.

⁵⁴ Iuell, B. (2003). “Wildlife and Traffic: a European handbook for identifying conflicts and designing solutions”, en The XXIInd PIARC World Road Congress World Road Association-PIARC.

Figura 57

Vista conceptual de un Paso Inferior para Fauna mediante una estructura tipo puente o losa.

Es importante agregar que los denominados “túneles falsos” conforman también un PIFA cuando conectan extremos de vegetación natural divididos (fragmentados) por la infraestructura lineal y requerirán una adaptación de la superficie superior del túnel, similar a la que se describe en este apartado.

Adaptaciones particulares de los PIFA para el uso por otros grupos de fauna

A continuación se señalan algunas recomendaciones para adaptar estos pasos para otros grupos de fauna, distintos a los mamíferos grandes y medianos que son para los que se proponen inicialmente.

Herpetofauna

Estos pasos para fauna pueden también ser utilizados por especies pequeñas, reptiles y anfibios, que se desplazan por el suelo de diferentes microhábitats y hábitats en busca de los recursos necesarios para satisfacer sus necesidades biológicas diarias y estacionales. Para facilitar sus desplazamientos se deben considerar precisiones que permitan fácil acceso para las especies más pequeñas, tales como:

- Colocación de herbáceas que formen macollos entre los que puedan ocultarse y desplazarse, para generar condiciones microambientales favorables para los reptiles y anfibios.
- Colocación de apilamientos de rocas de mediano tamaño para formar cavidades de menos de 0.15 m y permitirles refugiarse de depredadores. Colocar estos montículos de rocas a lo largo de todo el paso en las zonas laterales, separados no más de 3.0 m entre sí.
- Construir una secuencia de piletas poco profundas donde pueda conservarse agua y tierra lodosa para promover la movilización de anfibios en temporadas húmedas. Estas piletas deben estar protegidas con los macollos de herbáceas para ayudar a conservar la humedad y evitar la exposición de los anfibios hacia los depredadores.
- Colocar trozos de troncos producto del desmonte formando pilas para formar cavidades de diferentes tamaños y crear refugios a lo largo de todo el paso. Separar estos apilamientos de troncos no más de 3.0 m entre sí a lo largo de todo el paso.

Aves y mamíferos voladores

Colocar franjas a tresbolillo de árboles de especies pequeñas con raíces extendidas y cuyo peso esté considerado en los cálculos del paso construido, con altura de al menos cuatro metros de alto. Extender estas líneas desde cada uno de los accesos del paso y a lo largo del mismo. Se pueden intercalar especies, lo cual resulta benéfico colocando plantas que provean de algún tipo de flor o fruto atractivo para las aves o los murciélagos. Los árboles para colocar deberán ser propios de la vegetación aledaña al paso (nativos).

Invertebrados

La colocación de herbáceas en macollo para la herpetofauna sirve también para la movilización de los insectos de distintas especies. Muy importante incluir especies de flores preferidas por las abejas de la zona para promover la sobrevivencia y desplazamiento de estos insectos. Este tipo de pasos se presta para la colocación de herbáceas con flor.

Recomendaciones particulares para los PIFA⁵⁵

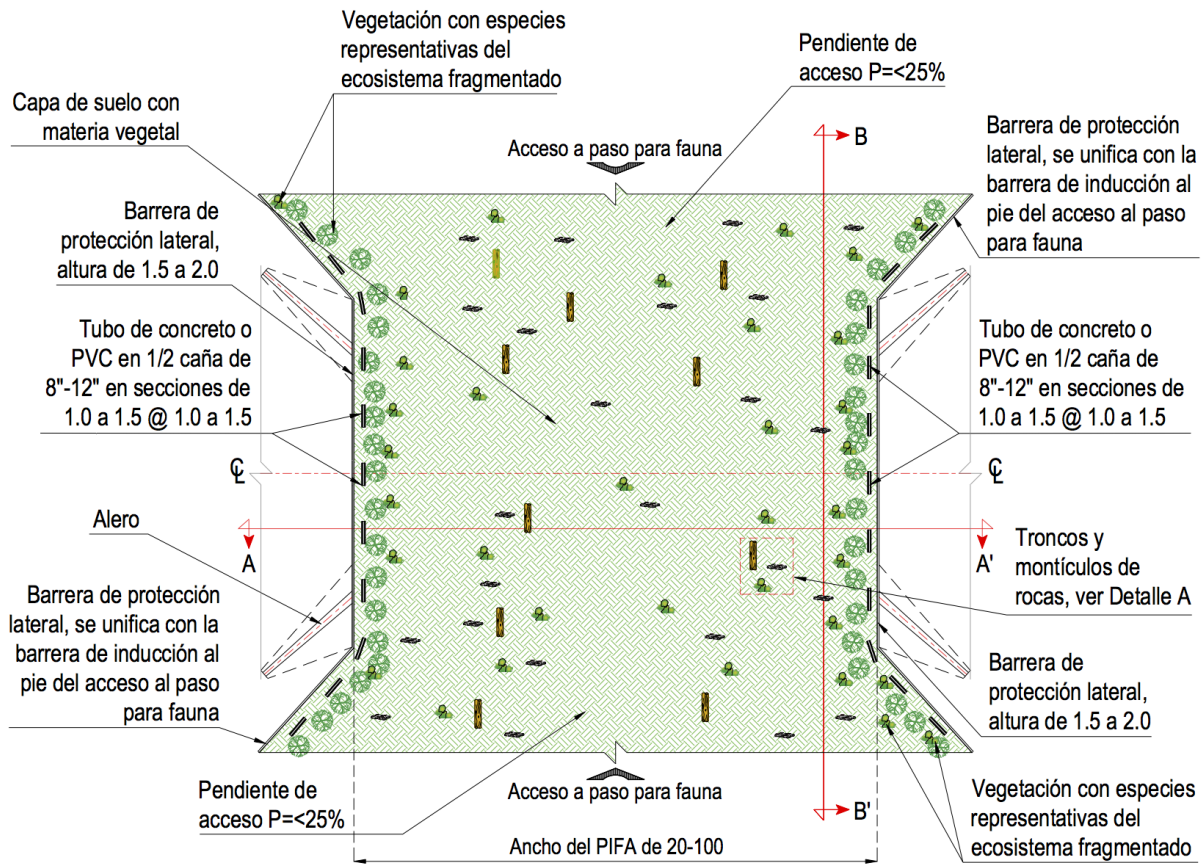
1. Estos pasos para fauna tienen la intensión de contar con una vida útil de 50 a 100 años, por lo que la conservación de los corredores biológicos debe estar alineada con la construcción de la infraestructura lineal, a fin de que no se vuelva obsoleta con el paso del tiempo.
2. No debe permitirse el desarrollo urbano, caminos, o cambios de usos del suelo en los puntos de contacto con el ecosistema natural de estos pasos.
3. No deben utilizarse para la circulación de maquinaria agrícola, ganado o cualquier otro uso que no sea el paso para fauna silvestre. Los animales domésticos pueden transmitir enfermedades hacia la fauna silvestre y viceversa, además de que el uso por humanos desincentiva el uso por la fauna silvestre. De ser necesario se colocarán rocas en los accesos al paso para evitar la circulación de vehículos.
4. Queda terminantemente prohibido realizar la caza o captura de animales en el cruce de estos pasos; situación que deberá salvaguardar el administrador de la carretera o ferrocarril sobre la que se ubican. No deben realizarse actividades de caza o captura en al menos una distancia de 2 km de radio desde el centro del paso.
5. Queda prohibido el uso de los pasos para realizar el cruce peatonal o toma de fotografías de la infraestructura lineal subyacente, salvo bajo consentimiento de la autoridad o concesionaria responsable de la operación de la infraestructura.
6. Este tipo de paso se puede implementar en carreteras y vías férreas. Sin embargo, cada caso debe contar con los estudios y proyectos necesarios para la correcta planeación, diseño y construcción del paso para fauna.

A continuación se presentan los planos orientativos 1 a 5-A, donde se muestra gráficamente el diseño “tipo” de los Pasos Inferiores para Fauna (PIFA) mediante estructuras tipo bóveda, losa o cajón, con la finalidad de orientar el diseño y construcción de estos pasos en obras de infraestructura lineal.

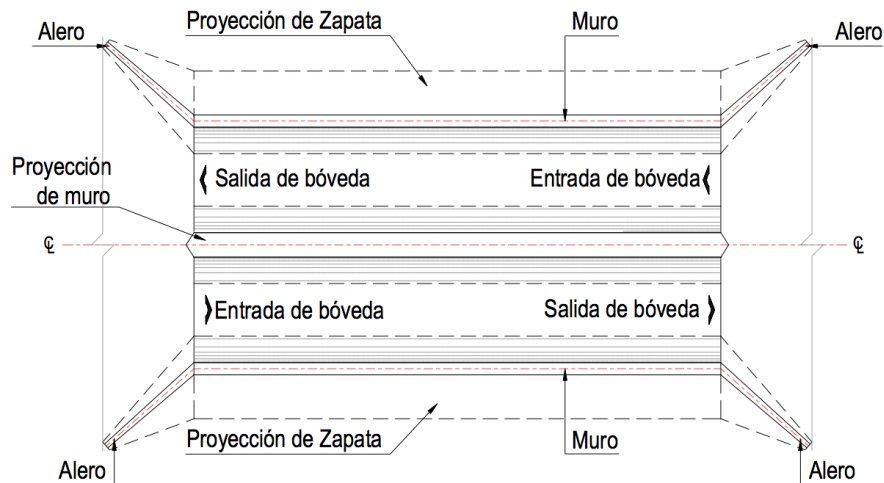
⁵⁵ Iuell, B. (2003). “Wildlife and Traffic: a European handbook for identifying conflicts and designing solutions”, en The XXIIInd PIARC World Road Congress World Road Association-PIARC.

PLANOS ORIENTATIVOS

Plano 1



PLANTA TIPO A NIVEL DEL PASO PARA FAUNA

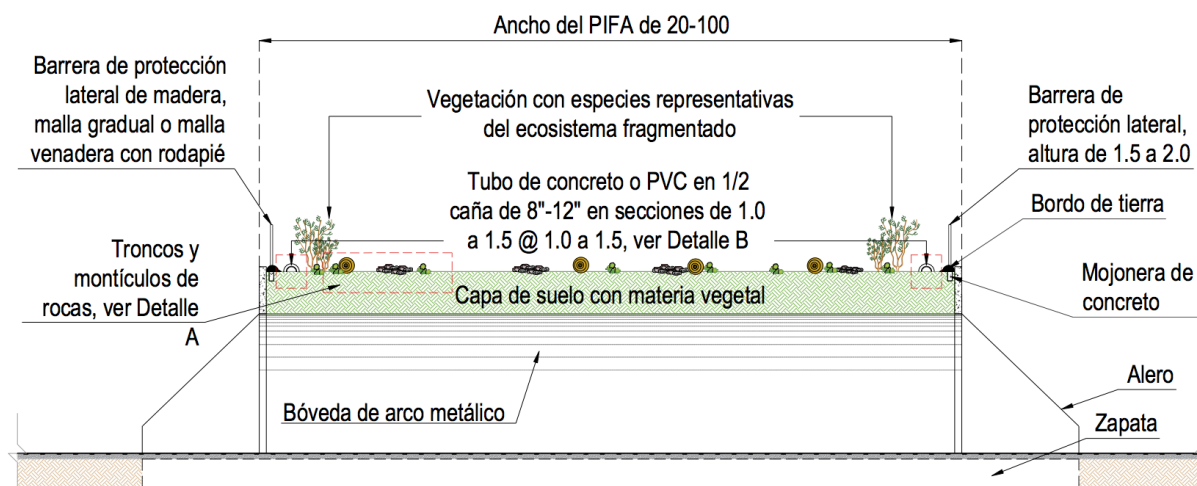


PLANTA TIPO A NIVEL DE LA INFRAESTRUCTURA LINEAL

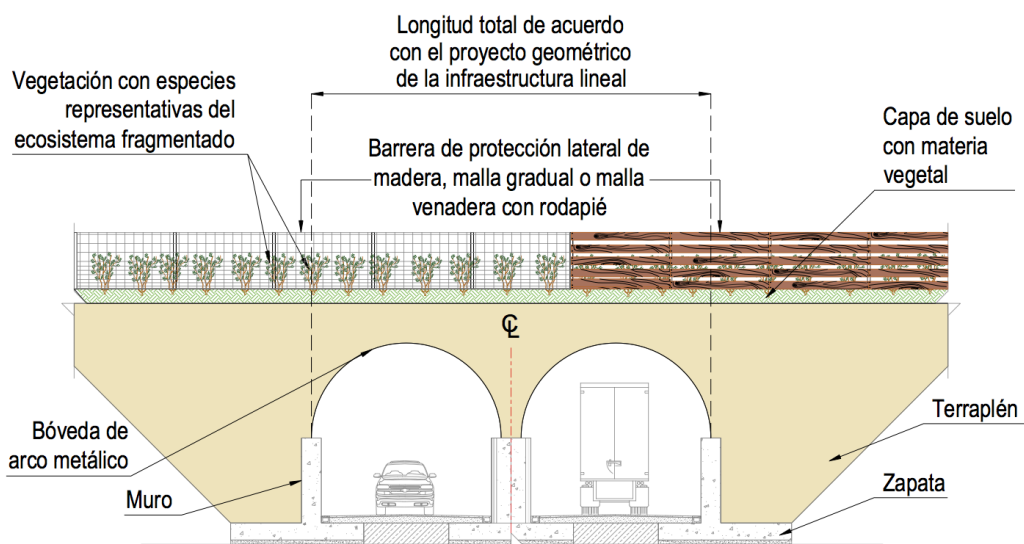
Acotaciones en metros
Dibujos fuera de escala

Planta tipo de Paso Inferior para Fauna (PIFA) mediante bóveda.

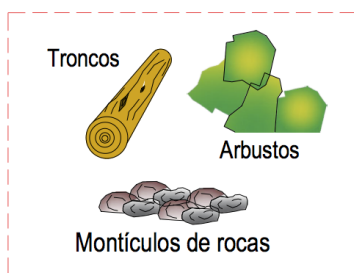
Plano 2



CORTE A-A'

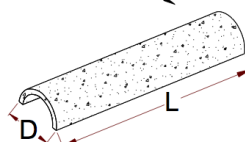


CORTE B-B'



DETALLE A

Refugio para fauna pequeña mediante tubo de concreto o PVC en 1/2 caña de 8"-12" en secciones de 1.0 a 1.5 @ 1.0 a 1.5



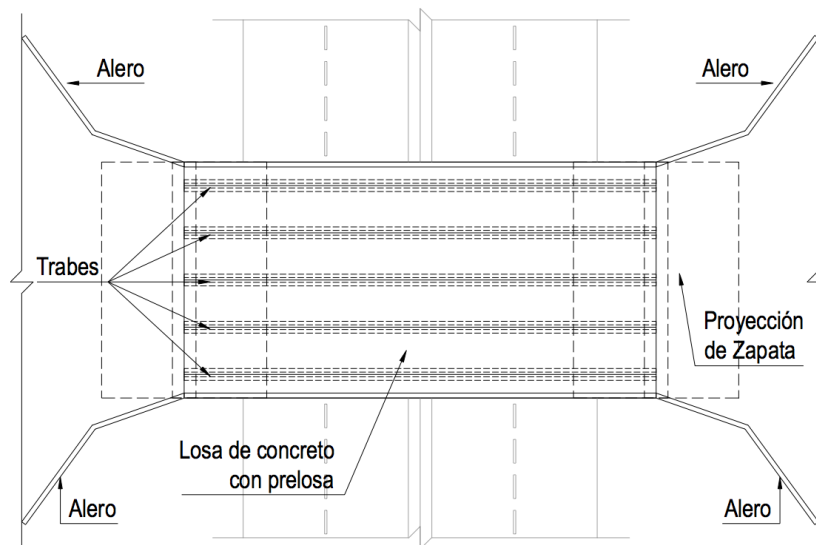
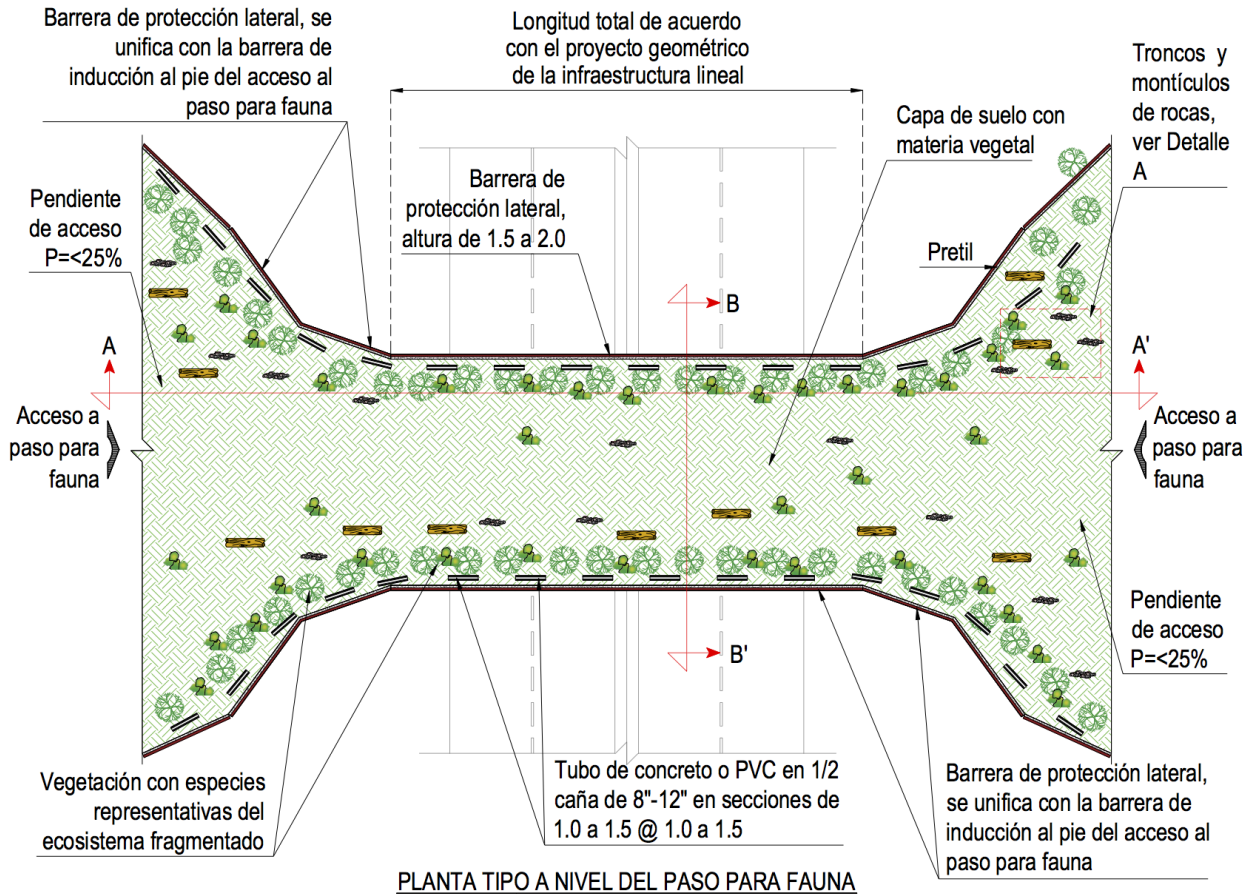
DETALLE B

Especificaciones comerciales		
"D" Nominal (plg)	"D" real (m)	Longitud "L" (m)
8"	0.20	1.30
10"	0.25	1.31
12"	0.30	1.34

Acotaciones en metros
Dibujos fuera de escala

Corte A-A', B-B' y detalles de Paso Inferior para Fauna (PIFA) mediante bóveda.

Plano 3

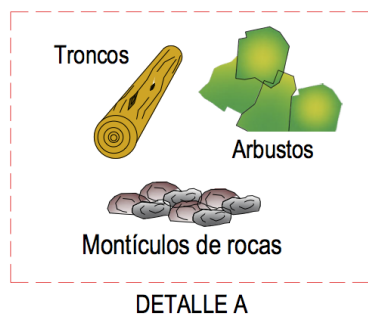
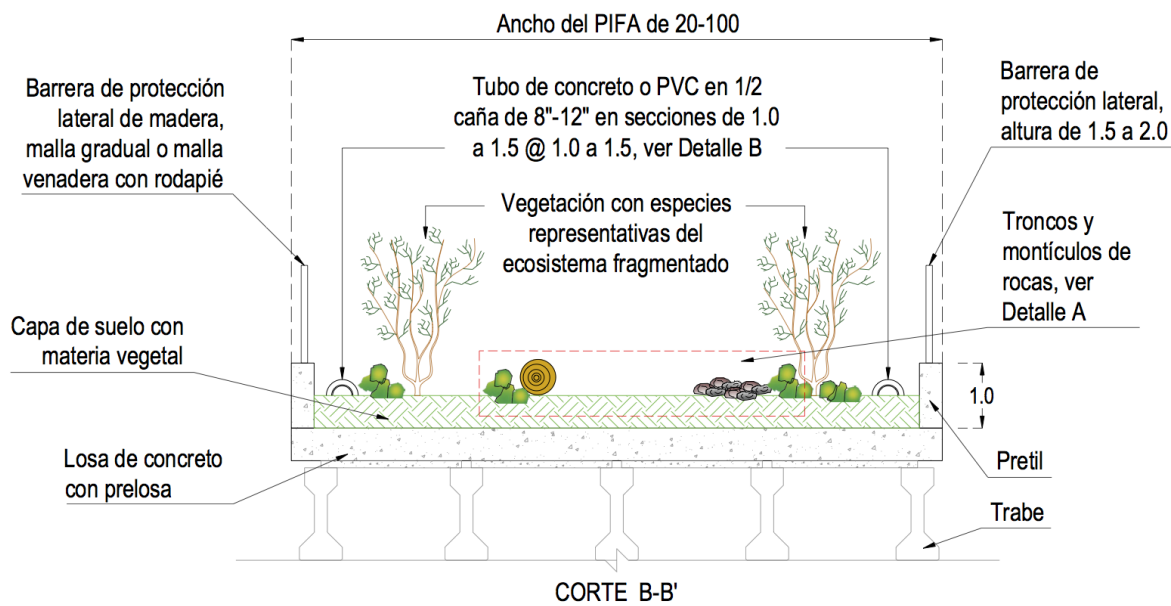
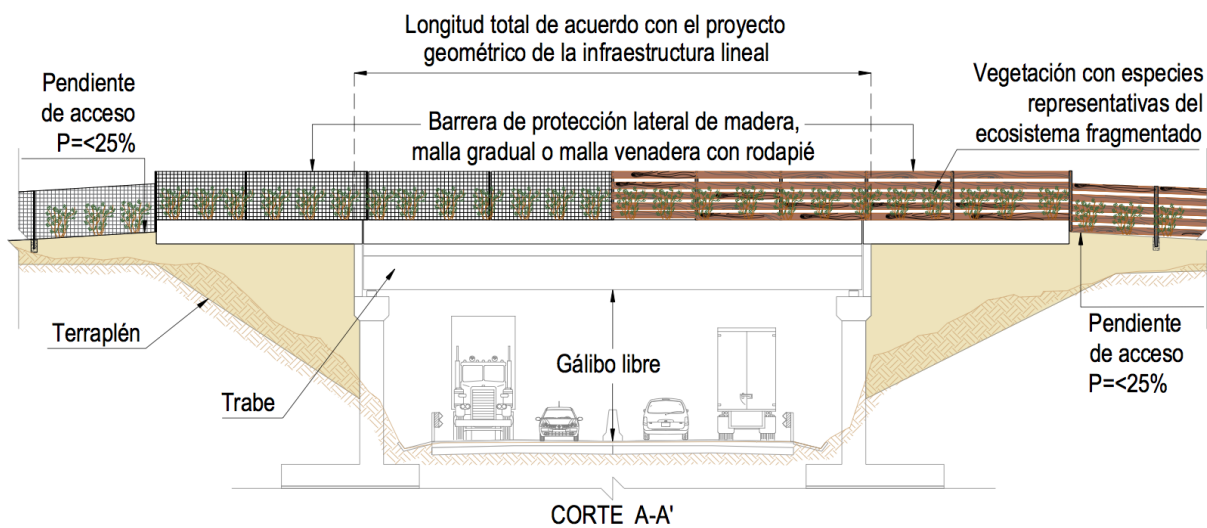


PLANTA TIPO A NIVEL DE LA INFRAESTRUCTURA LINEAL

Acotaciones en metros
Dibujos fuera de escala

Planta tipo de Paso Inferior para Fauna (PIFA) mediante una estructura tipo losa.

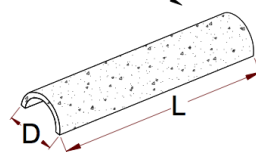
Plano 4



Refugio para fauna pequeña mediante tubo de concreto o PVC en 1/2 caña de 8"-12" en secciones de 1.0 a 1.5 @ 1.0 a 1.5

Especificaciones comerciales

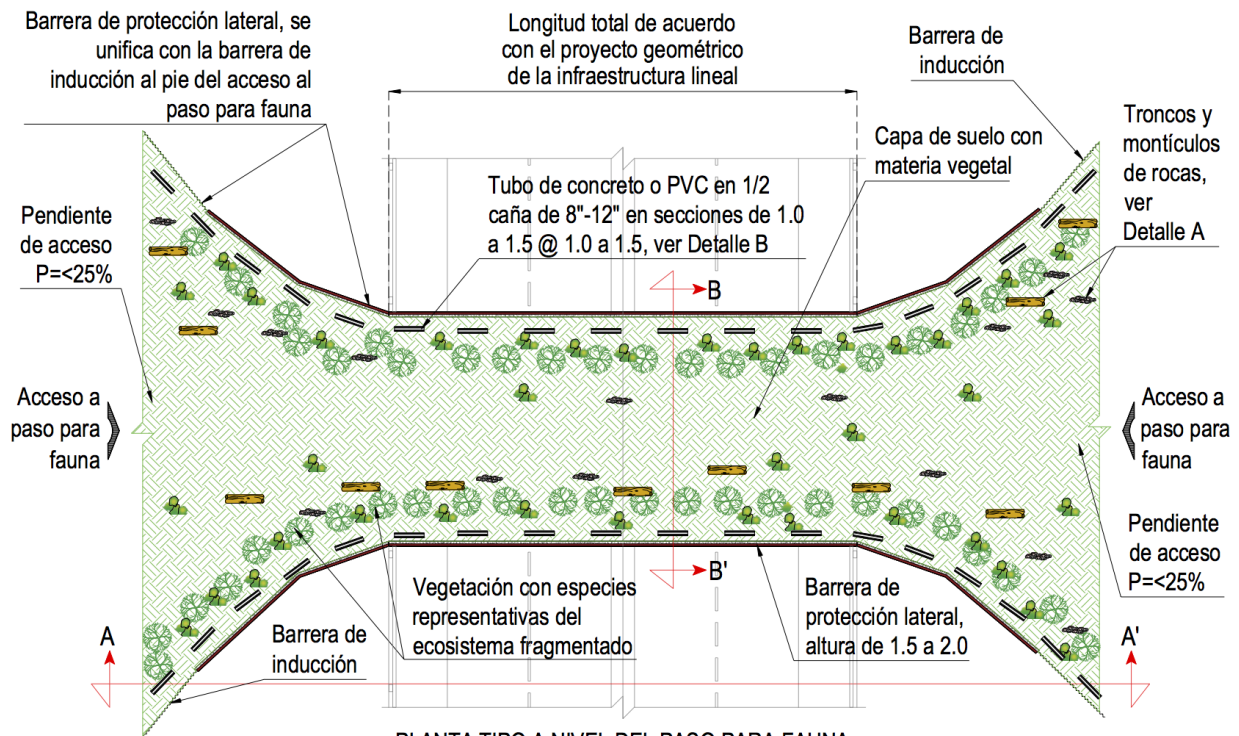
"D" Nominal (plg)	"D" real (m)	Longitud "L" (m)
8"	0.20	1.30
10"	0.25	1.31
12"	0.30	1.34



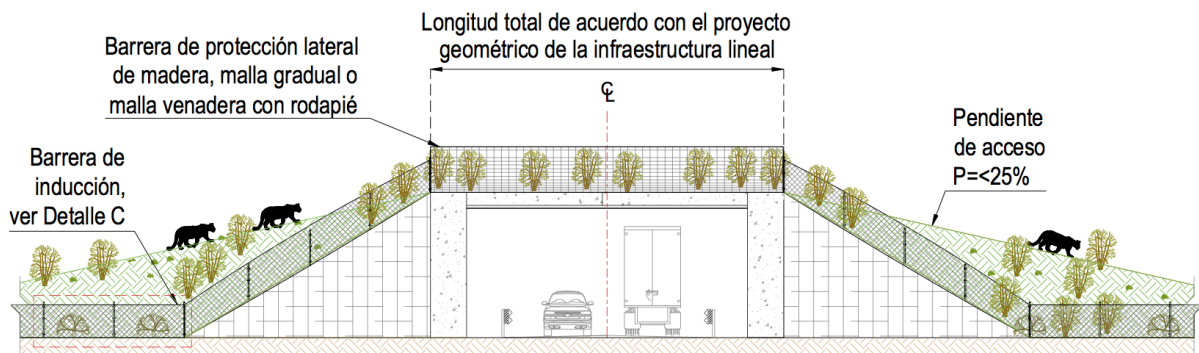
Acotaciones en metros
Dibujos fuera de escala

Corte A-A', B-B' y detalles de Paso Inferior para Fauna (PIFA) mediante una estructura tipo losa.

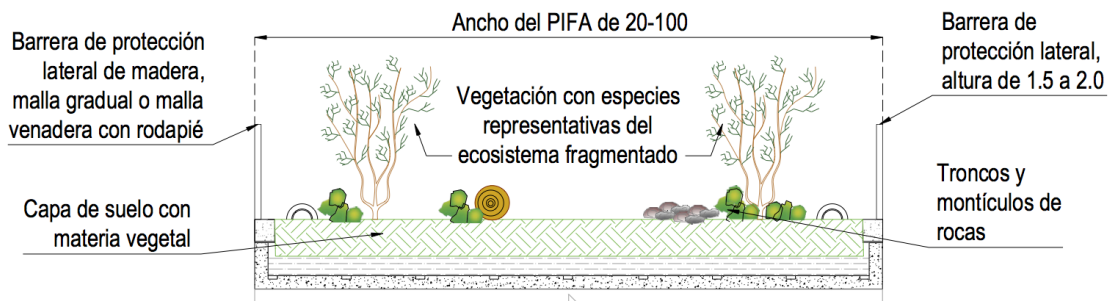
Plano 5



PLANTA TIPO A NIVEL DEL PASO PARA FAUNA



CORTE A-A'

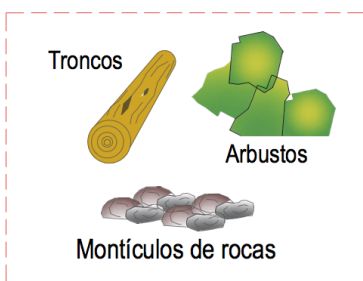


CORTE B-B'

Acotaciones en metros
Dibujos fuera de escala

Planta tipo, corte A-A' y B-B' de Paso Inferior para Fauna (PIFA) mediante una estructura tipo puente o losa.

Plano 5-A

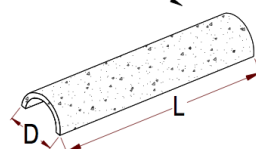


DETALLE A

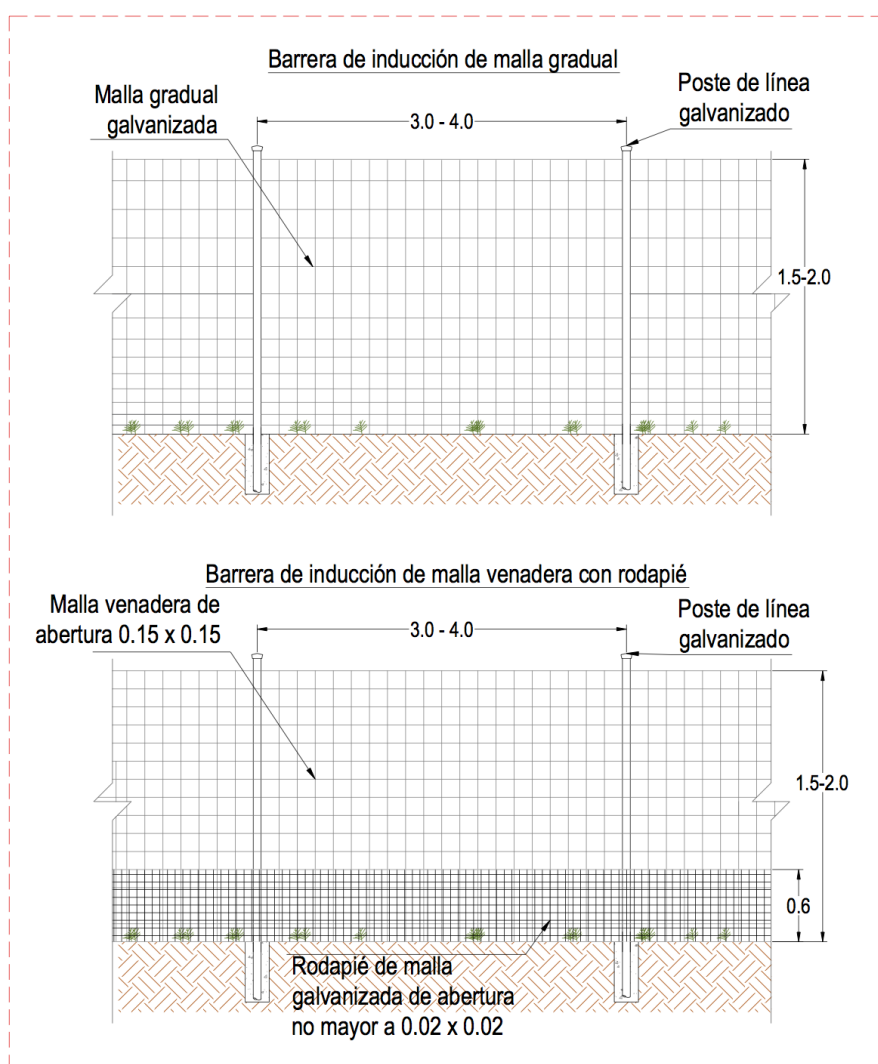
Refugio para fauna pequeña
mediante tubo de concreto o PVC
en 1/2 caña de 8"-12" en secciones
de 1.0 a 1.5 @ 1.0 a 1.5

Especificaciones comerciales

"D" Nominal (plg)	"D" real (m)	Longitud "L" (m)
8"	0.20	1.30
10"	0.25	1.31
12"	0.30	1.34



DETALLE B



DETALLE C

Acotaciones en metros
Dibujos fuera de escala

Detalles de Paso Inferior para Fauna (PIFA) mediante una estructura tipo puente o losa.

2) Paso Superior para Fauna (PSFA)

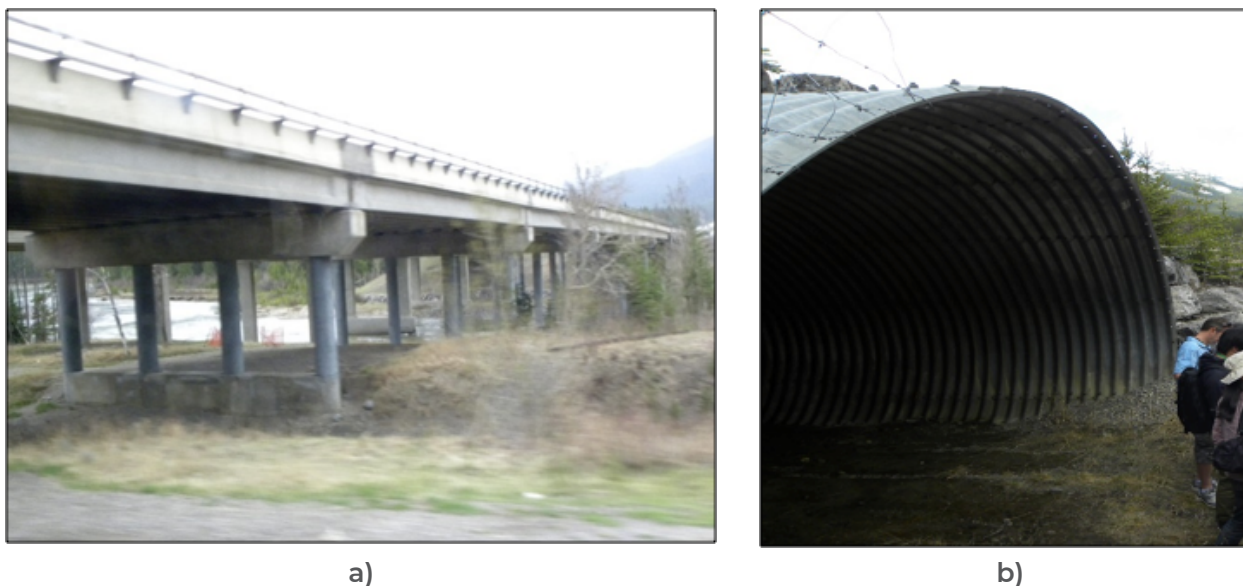
En esta categoría se incluyen de nueva cuenta las bóvedas, “superclaros” (elementos prefabricados) y estructuras tipo puente, viaducto o losa, los cuales suelen ser muy buenas alternativas para la construcción de pasos superiores para fauna debido a sus dimensiones. Lo anterior es particularmente notorio en el caso de puentes y viaductos, que generalmente libran los escurrimientos junto con sus planicies de inundación, lo que da una oportunidad sin igual para el movimiento de fauna a través de la infraestructura lineal.

Los viaductos constituyen una de las mejores opciones de tipo de paso debido a sus dimensiones, por lo que generalmente son considerados como estructuras para mamíferos grandes, medianos y pequeños de acuerdo con la experiencia en otros países y en México. Asimismo, resultan la mejor alternativa en ambientes de humedales, librando grandes extensiones de terreno de humedal y ecosistemas altamente diversos. Con estas estructuras prácticamente no hay impedimentos para la movilización animal en un entorno natural.

Las áreas bajo las bóvedas, “superclaros” (elementos prefabricados) y estructuras tipo puente, viaducto o losa deben mantenerse lo más naturales posible y, en caso de resultar afectadas por la construcción de la propia estructura, su restauración debe realizarse con la meta en lograr recuperar la movilidad de la fauna a ambos lados de ella, utilizando como enlace la revegetación de especies de flora propias de la zona y en la disposición más similar al paisaje natural presente. Se debe promover la cobertura vegetal y restaurar la vegetación riparia (en galería)⁵⁶ que haya sido afectada por la obra y todas las actividades relacionadas con su implementación, como puede ser la extracción de material de banco. El cauce del río debe dejarse sin alteración para permitir la movilización de especies acuáticas y riparias.

Los pasos más funcionales oscilan entre los 4 y 5 m de altura (Iuell, 2003); sin embargo, las dimensiones pueden variar en función de la rasante, la topografía del terreno y el tamaño de la fauna mayor para la que estén destinados.

⁵⁶ La vegetación riparia o en galería representa un ecosistema ubicado linealmente en ambas márgenes de toda corriente, sumamente variable en su estructura, tanto espacial como temporalmente. Son denominaciones de la formación vegetal o bosque caracterizado por su vinculación a la ribera de un río o entidad hidrológica equivalente. Su vegetación se califica de «riparia» (adjetivo propio del sustantivo “ribera”); por lo general, crece frondosamente y da cobijo a gran cantidad de animales. El nombre “galería” proviene del hecho de que su vegetación cubre al río formando una especie de túnel, como en la galería de una mina. Se identifican claramente en el paisaje por ceñirse al curso del río, formando un pasillo o corredor completamente distinto del resto de la vegetación.

Figura 58

Vista de Paso Superior para Fauna (PSFA) tipo a) viaducto y b) construido a partir de elementos prefabricados. Parque Nacional Banff, Alberta, Canadá (fuente: Grupo Selome, S.A. de C.V.).

Se debe garantizar la continuidad de los hábitats, evitando en lo posible la alteración de las comunidades vegetales, es decir, afectar sólo la vegetación necesaria para la construcción de la obra y posteriormente restaurarla ya que en la medida en que el paso se encuentre bien integrado (camuflajeado) dentro del paisaje, es mayor la probabilidad de que la fauna silvestre lo utilice. Además, se deben considerar las acciones para la recuperación y conservación de las comunidades vegetales existentes en las zonas aledañas, con ello se evitan usos incompatibles con el desplazamiento de fauna y se prolongan los corredores biológicos y parches de vegetación natural a ambos lados del paso.

Es importante mencionar que para este tipo de paso no hay limitaciones para la propuesta de especies de flora nativa porque generalmente cualquier sistema radicular puede ser adaptable al suelo aledaño a la obra, que es donde debe realizarse la revegetación para lograr que los accesos de estos pasos se homologuen con el paisaje natural aledaño.

Las dimensiones más usuales encontradas en “superclaros” (estructuras prefabricadas) utilizados para construir pasos para mamíferos grandes varían de 3 a 12 m de ancho, por una altura de 4 a 8 m; sin embargo, siempre están en función de las especies identificadas en el sitio de estudio y la fauna que se desea proteger, así como las dimensiones de cada proyecto y la topografía del lugar. Su longitud será determinada conforme al proyecto geométrico de la infraestructura lineal, de acuerdo con la sección transversal en el punto de ubicación del paso.

Por su parte, los puentes y viaductos permiten librar zonas de lomeríos y valles por donde suelen moverse mamíferos de diferentes tamaños, sobre todo si existe un cauce de agua, permitiendo el movimiento de los animales de una manera más natural.

Una recomendación identificada en la literatura internacional para los viaductos, basada en la fauna europea, es un ancho mínimo de 15 m, altura mínima de 4 m y un índice de apertura (ancho x altura/longitud) no menor a 1.5; no obstante, este índice no debe considerarse como una sola referencia, pues para nuestro país es recomendable que para definir las dimensiones de estos pasos hay que considerar las dimensiones de la fauna de mayor tamaño en el sitio, su gregarismo y movimientos en manadas, rebaños o grupos, la topografía del terreno, altura de la rasante sobre el terreno natural, presencia de escurrimiento de agua, entre otros aspectos.

El terreno al interior de estos pasos debe estar cubierto por suelo natural y la vegetación debe instalarse tan cerca de los accesos e incluso dentro de ellos en la medida en que la luz permita el crecimiento de las plantas dentro del paso. Para compensar la falta de vegetación en el interior del paso para fauna es importante instalar algunos troncos o pilas de rocas formando refugios para la fauna de diferentes grupos taxonómicos y tamaños. Los refugios en este tipo de obras se recomienda instalarlos mediante el acomodo de montones o hileras de piedras, montículos de ramas muertas y tocones de madera, distribuidos a lo largo de todo el paso, sin que obstruyan la circulación de animales grandes y medianos, ayudando a ofrecer refugios y microhábitats para la fauna pequeña y favoreciendo la presencia de invertebrados, reptiles y otros animales. Estos refugios deben estar sujetos a acciones de conservación y no ser promotores de acumulación de desperdicios (debe haber la intención de su colocación para los fines que se busca, no sólo arrojar los materiales al interior del paso). El mantenimiento en estos casos es de gran importancia.

Las recomendaciones antes citadas toman relevancia en las entradas al paso durante el periodo inicial en el que la vegetación no haya alcanzado su establecimiento completo y donde es importante brindar refugios para que los animales se animen a cruzar por el paso. La flora recomendada son combinaciones de herbáceas, arbustivas y árboles que ayuden a dirigir a la fauna hacia el paso, conecten con la vegetación natural aledaña y estén conformadas por especies propias de estas comunidades vegetales naturales (Figura 59).

En las áreas contiguas al derecho de vía también se tendrá que realizar una revegetación con árboles y arbustos, los cuales ayudarán a encaminar a la fauna para la entrada y salida del paso, aun más allá del derecho de vía, por lo que es recomendable analizar con detenimiento las necesidades de liberación del derecho de vía en estos sitios.

El diseño y construcción de estas estructuras debe apegarse a las especificaciones de los manuales y normas técnicas de la SCT.

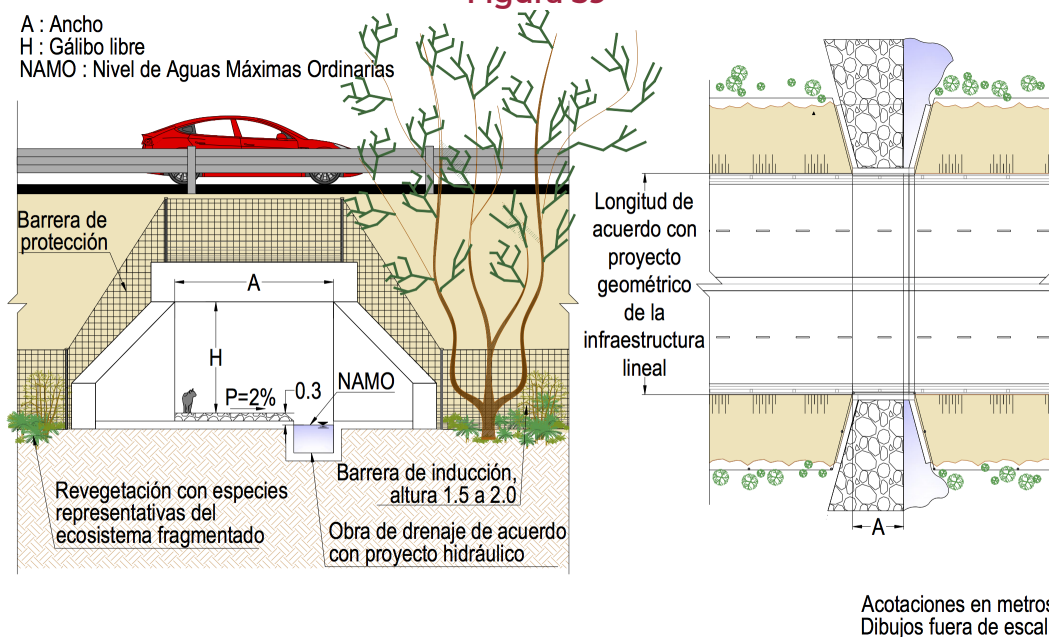
Criterios

Los criterios que se deben tomar en cuenta para el diseño y construcción de este tipo de paso para fauna son:

- a) La necesidad de restaurar la conectividad biológica debido a la fragmentación del hábitat de mamíferos grandes, medianos y pequeños.
- b) Terrenos donde el proyecto cuente con una altura de al menos 4 m sobre el nivel del terreno natural.

- c) Especificaciones para bóvedas, “superclaros” (elementos prefabricados, estructuras tipo puente y viaductos).
- Ancho mínimo de 3 m.
 - Ancho máximo de 12 m.
 - Altura mínima de 4 m.
 - Altura máxima de 8 m.
 - Obras de drenaje para el desalojo de aguas de lluvia, en función de la topografía del terreno para evitar que el paso se inunde, según proyecto.⁵⁷
 - Chimeneas o rejillas para la entrada de luz para el caso de gálidos bajos.
 - La pendiente será definida por las características del proyecto de la infraestructura lineal. Se recomienda que las pendientes de acceso a los pasos sean de 25% o mayores.
 - Barrera de inducción con longitud preferentemente mayor de 25 m a cada lado del paso para fauna, dependiendo de las características del proyecto. La altura mínima de 1.5 m y máxima de 2.0 m, preferentemente la malla debe ser graduada, colocando la parte más cerrada de la malla hacia abajo, es decir sobre el terreno natural. Otra opción es la malla venadera (ganadera) colocando un rodapié de al menos 0.6 m de malla de abertura no mayor a 0.02 x 0.02 m.

Figura 59



Planta y corte transversal sobre eje del Paso Superior para Fauna (PSFA) tipo losa o cajón.

- d) Especificaciones para estructuras tipo losa y cajón.
- Altura mínima de 1.5 m y máxima de 4 m.
 - Ancho mínimo de 1 m y máximo de 6 m.

⁵⁷ Se recomienda la construcción específica de estas estructuras como paso para fauna exclusivamente, no obstante, el terreno natural puede obligar a la construcción de una cuneta para que cuando se requiera el agua pueda fluir por la estructura sin obstruir el paso de los animales.

- Obras de drenaje para el desalojo de aguas de lluvia, en función de la topografía del terreno para evitar que el paso se inunde, según proyecto.⁵⁷
- Chimeneas o rejillas para la entrada de luz para el caso de gálidos bajos.
- La pendiente será definida por las características del proyecto de la infraestructura lineal. Se recomienda que las pendientes de acceso a los pasos sean de 25% o mayores.
- Barrera de inducción con longitud preferentemente mayor de 25 m a cada lado del paso para fauna, dependiendo de las características del proyecto. La altura mínima de 1.5 m y máxima de 2.0 m, preferentemente la malla debe ser graduada, colocando la parte más cerrada de la malla hacia abajo, es decir sobre el terreno natural. Otra opción es la malla venadera (ganadera) colocando un rodapié de al menos 0.6 m de malla de abertura no mayor a 0.02 x 0.02 m.

Consideraciones generales

Para el diseño y construcción de estos pasos para fauna se deberán tomar las siguientes consideraciones generales:

- a) Para alentar el uso de los pasos por parte de la fauna silvestre se debe colocar una composición vegetativa del ecosistema fragmentado aledaño.
- b) Para garantizar el uso y la función del paso para fauna se deben ubicar en áreas de corredores de vida silvestre, siguiendo la metodología de los capítulos 2 y 3 de este Manual.
- c) Toda el área del paso para fauna debe estar cerrada al acceso público. Para ello se recomienda utilizar la barrera de inducción.

Adaptaciones particulares de los PSFA para el uso por otros grupos de fauna

A continuación se señalan algunas recomendaciones para adaptar estos pasos para otros grupos de fauna, distintos a los mamíferos grandes y medianos que son para los que se diseñan.

Herpetofauna y mamíferos pequeños

Estos pasos para fauna pueden también ser utilizados por especies pequeñas de mamíferos que se desplazan por el suelo de diferentes microhábitats y hábitats en busca de los recursos necesarios para satisfacer sus necesidades biológicas diarias y estacionales. Además, pueden ser usados por prácticamente todos los anfibios y reptiles de México (ya sean terrestres, de vida anfibia o acuática), habilitándolos para permitir el cruce por medio de nado, caminata o reptando, según el diseño y la temporada. Las dimensiones de alto y ancho dependerán de las características de cada proyecto de infraestructura lineal, teniendo en consideración los siguientes aspectos:

Para facilitar sus desplazamientos se deben considerar precisiones que permitan fácil acceso para las especies más pequeñas. Es necesario construir ciertas adaptaciones que promuevan el desplazamiento de algunos reptiles y anfibios, teniendo en consideración los aspectos que a continuación se describen:

- a) Colocación de herbáceas en los accesos del paso que formen macollos entre los que puedan ocultarse y desplazarse, así como una combinación de arbustos y otras herbáceas.
- b) Colocación de apilamientos de piedras de mediano tamaño para formar cavidades de menos de 0.15 m y permitirles refugiarse de depredadores. Colocar estos montículos de rocas sobre uno de los costados del paso y a todo lo largo, separados no más de 3 m entre sí, cuidando de no obstruir el paso para otros animales.
- c) Construir una pequeña cuneta poco profunda donde pueda conservarse agua y tierra lodosa para promover la movilización de anfibios en temporadas húmedas, en aquellos ecosistemas de humedales y donde se identifique la abundancia de anfibios (por ejemplo ranas, sapos, salamandras).
- d) En sitios donde la topografía pueda inducir un escurrimiento por el paso para fauna se deberá prever canalizar este escurrimiento y asegurar que el suelo dentro del paso se conserve sin flujo de agua todo el año, es decir, que el paso para fauna no se convierta en una obra de drenaje.
- e) Obras complementarias para incentivar el desplazamiento de fauna pequeña (Figura 60):
 - i. Implementación de banquetas de mampostería o concreto en la base de las paredes laterales del paso para fauna.
 - Deberán ser duraderas y resistentes al caudal en sitios con presencia de agua.
 - Deberán tener un ancho mínimo de 0.4 m.
 - La altura dependerá del cálculo de caudal máximo que pudiera cruzar por la losa o bóveda considerando que al menos la banqueta se ubique 0.3 m por encima del Nivel de Aguas Máximas Ordinarias (NAMO).
 - Las banquetas deben contar con rampas de acceso, con inclinación menor a 25%, para facilitar su uso para las especies de anfibios y reptiles, conectadas con el terreno natural.
 - Deben contar con una cubierta de suelo natural y hojarasca mínimo de 0.15 m de espesor, ya que algunos anfibios evitan desplazarse sobre el concreto (Müller, 1992).
 - No se recomienda que sean de metal debido a que es un material que aumenta o reduce su temperatura drásticamente de acuerdo con la temperatura medioambiental y puede ser un factor repulsivo para la herpetofauna.
 - ii. Se recomienda, para incentivar el desplazamiento de fauna pequeña, implementar repisas de madera densa tratada para la intemperie, concreto colado en sitio para dar la inclinación y altura adecuada, resinas epóxicas u otros materiales. Se colocan a lo largo del paso para fauna, en una o dos de las paredes laterales de la obra dependiendo del gálibo de la misma.
 - Se proyectan hacia afuera del paso hasta conectarse con el terreno natural y la vegetación exterior.
 - La proyección de las repisas se realiza para generar las rampas de acceso a éstas, con pendientes menores a 25%.
 - Es importante colocar la vegetación necesaria que enlace la proyección de las repisas con el terreno natural adyacente.

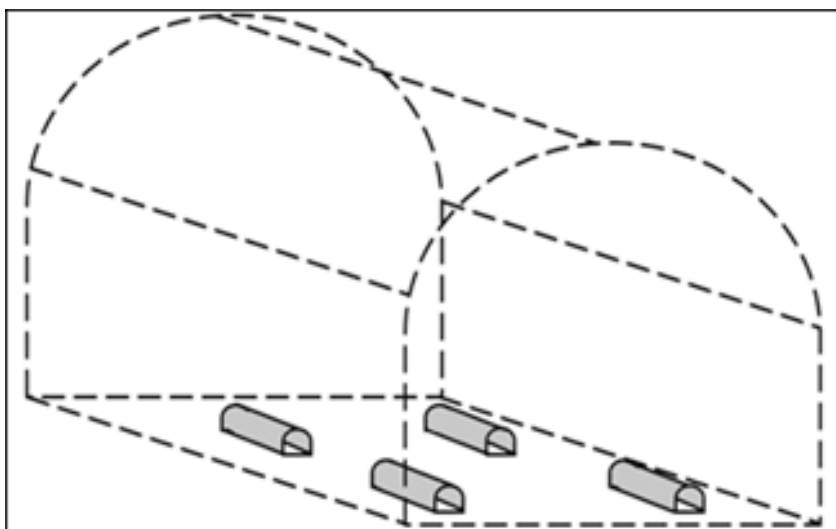
- La altura de colocación debe ser de al menos 0.3 m por encima del NAMO y a una distancia mínima del techo de 0.5 m. El ancho mínimo de las repisas es de 0.3 m y debe soportar un peso de al menos 15 kg.
- iii. Colocar una capa de suelo natural y hojarasca con espesor mínimo de 0.15 m, en sitios donde no se considere la presencia de caudal; colocación de troncos y rocas para generar condiciones microambientales favorables para los reptiles y anfibios. No deberán obstruir el paso para otros animales y deberán conservar una apariencia natural, sin parecer basura dentro del paso para fauna.
 - iv. Colocar refugios para fauna pequeña, los cuales pueden ser medios tubos de concreto, en tramos de 0.5 a 1 m de largo, con una distancia entre ellos de 1.5 m, ubicados en uno de los extremos del paso, sin obstruir la circulación para otros animales. Con lo anterior se impulsa el cruce de especies que evitan sitios despejados por temor a los depredadores.
 - v. Construir rampas de acceso en ambos lados del paso, las cuales deben mantener pendientes menores de 25%, mismas que deben ser zampeadas para permitir el desplazamiento de herpetofauna.
 - vi. Revegetar los accesos al paso, verificando las pendientes adecuadas para evitar encharcamientos.
 - vii. Cuando la rasante queda a menos de 1.0 m del techo del PSFA, se debe colocar una barrera sólida (preferentemente de madera), con una altura mínima de 1.5 m por el ancho de toda la estructura, sobre ambas entradas de la losa dintel para reducir el ruido y luz de los vehículos aledaños al paso de fauna, el cual pueda ahuyentar a la fauna.

Figura 60



Paso Superior para Fauna (PSFA) en el que se ejemplifica el sitio de construcción de banquetas con terminación en rampa para diversas especies (fuente: acceso abierto de internet, modificada para ilustrar).

Figura 61



Boceto del interior del Paso Superior para Fauna (PSFA) mediante elementos prefabricados, en el que se ejemplifica la ubicación de los medios tubos de concreto para generar sitios de refugio para diversas especies.

Figura 62



Ejemplo de Paso Superior para Fauna (PSFA) con repisas de concreto que permiten el libre desplazamiento de diversas especies (fuente: acceso abierto de internet).

Mamíferos grandes y medianos

Para que este tipo de pasos tenga una eficiencia significativa en el cruce de especies de mamíferos y se promueva su desplazamiento se deben considerar ciertas características como son:

- a) Para aquellas regiones del país en donde existe fauna de talla grande como es el caso del venado bura (*Odocoileus hemionus*), el oso negro (*Ursus americanus*) y el jaguar (*Panthera onca*), entre otras especies, el especialista en fauna debe señalar el alto y ancho mínimos necesarios en cada caso.

- b) Es preferible que la superficie de este tipo de paso mantenga el suelo natural, y en el caso de que exista el cruce de un escurrimiento es necesaria la implementación de banquetas o repisas, de concreto con acabado liso, a cada lado del paso para fauna, las cuales deben ser duraderas y resistentes al caudal del agua; o bien la canalización del escurrimiento para permitir la circulación de los animales por una superficie seca dentro del paso.
- c) Las banquetas deben tener como mínimo un ancho de 1 m. La altura dependerá del cálculo de caudal máximo que pudiera cruzar por la losa o bóveda considerando que al menos la banqueta se ubique 0.3 m por encima del NAMO, lo cual será adecuado para mamíferos medianos y algunos carnívoros como los zorrillos, la comadreja, entre otros; sin embargo, las banquetas laterales no serán usadas por los venados y otros ungulados, pues éstos deben poder circular al interior del paso sobre terreno natural.
- d) Es importante considerar el zampeo de ambos lados del acceso al PSFA para mantener pendientes menores de 25% de inclinación para permitir el desplazamiento de mamíferos de talla pequeña a mediana.
- e) Se recomienda la colocación de refugios en las inmediaciones de la entrada y salida de los pasos para fauna, para lo cual se colocarán montículos constituidos por roca y/o troncos.
- f) Revegetar los accesos al PSFA de forma posterior a la obra civil, colocando una pendiente adecuada para evitar encharcamientos, esto con la finalidad de alentar a cruzar a los animales a través de los pasos para fauna.
- g) El terreno circundante debe revegetarse con especies propias de la vegetación natural aledaña y el paso cercarse para evitar que los animales suban a la infraestructura.⁵⁸

Figura 63



Ejemplo de Paso Superior para Fauna (PSFA) con banqueta que permite el cruce de mamíferos medianos y pequeños (fuente: acceso abierto de internet).

⁵⁸ Sánchez-Colomer, M. R. G., A. V. G. García, E. J. Sanz y T. E. Pinilla (2014). "Efecto de la tipología de las estructuras transversales de paso sobre el uso por la fauna en diferentes tramos de carreteras y líneas de ferrocarril de alta velocidad en España". *Revista Digital del Cedex* 176: 49-56.

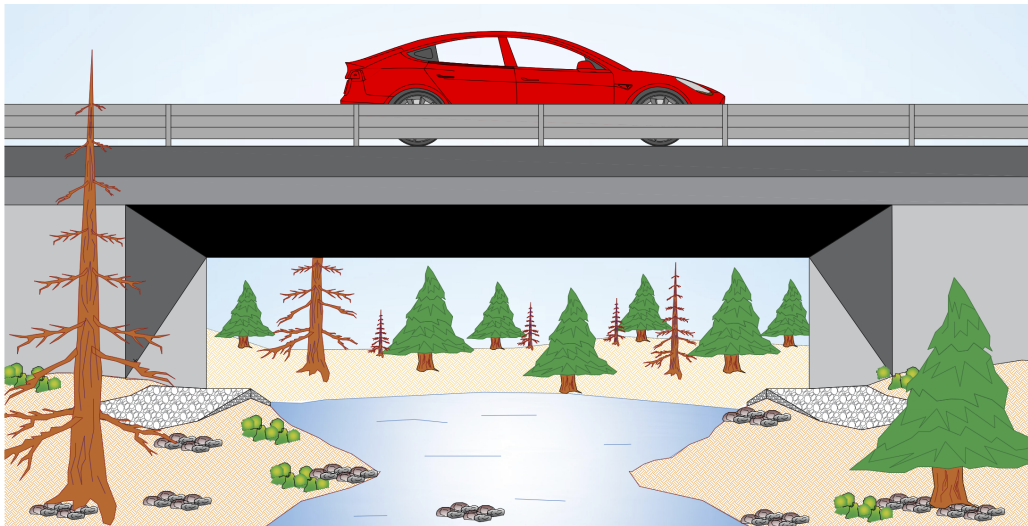
Recomendaciones particulares para los PSFA⁵⁹

1. Estos pasos para fauna tienen la intensión de contar con una vida útil de 50 a 100 años, por lo que la conservación de los corredores biológicos debe estar alineada con la construcción de la infraestructura, a fin de que no se vuelva obsoleta con el paso del tiempo.
2. No debe permitirse el desarrollo urbano, caminos o cambios de usos del suelo en los puntos de contacto con el ecosistema natural de estos pasos.
3. No deben utilizarse para la circulación de maquinaria agrícola, ganado o cualquier otro uso que no sea el paso de fauna silvestre. Los animales domésticos pueden transmitir enfermedades hacia la fauna silvestre y viceversa, además de que el uso por humanos desincentiva el uso por la fauna silvestre.
4. Queda terminantemente prohibido realizar la caza o captura de animales en el cruce de estos pasos; situación que deberá salvaguardar el administrador de la carretera o vía férrea sobre la que se ubican. No puede realizarse la caza o captura en al menos una distancia de 2 km de radio desde el centro del paso.
5. Queda prohibido el uso de los pasos para realizar el cruce peatonal o toma de fotografías, salvo para el monitoreo de los pasos y bajo consentimiento de la autoridad o concesionaria responsable de la operación de la infraestructura.
6. Se recomienda colocar una barrera de rocas pesadas en el acceso al paso para evitar el uso por vehículos.
7. De acuerdo con la literatura internacional se recomienda en áreas con presencia de jabalí o venado cola blanca, un ancho mínimo de 7 m, con un índice de apertura (ancho x altura/largo) > 0.75 . En áreas con presencia de venado grande como el venado bura (o ciervo mulo), se recomienda un ancho mínimo de 12-15 m y con índice de apertura ($a \times h/l$) > 1.5 .⁶⁰ Esta especificación puede aplicar a otras especies en nuestro país, por ejemplo, cimarrones, jaguares, pumas, entre otros mamíferos grandes.
8. La literatura internacional recomienda para las banquetas laterales un ancho mínimo de 1 m cubierto por tierra natural y hojarasca o mampostería.
9. Estos pasos deben tener la mínima longitud posible, por ello, siempre que sea factible se construirán perpendiculares a la vía, y no excederán los 70 m de longitud, asegurándose de contar con suficiente apertura de luz hacia el extremo opuesto del paso que permita ver la vegetación al otro lado (índice de apertura de al menos 0.75) para brindar la confianza que la fauna requiere para utilizarlos.
10. Este tipo de paso se puede implementar en carreteras y vías férreas. Sin embargo, cada caso debe contar con los estudios y proyectos necesarios para la correcta planeación, diseño y construcción de paso para fauna.
11. El diseño y construcción de estas estructuras debe apegarse a las especificaciones de los manuales y normas técnicas de la SCT.

⁵⁹ Iuell, B. (2003). "Wildlife and Traffic: a European handbook for identifying conflicts and designing solutions", en The XXIIInd PIARC World Road Congress World Road Association-PIARC.

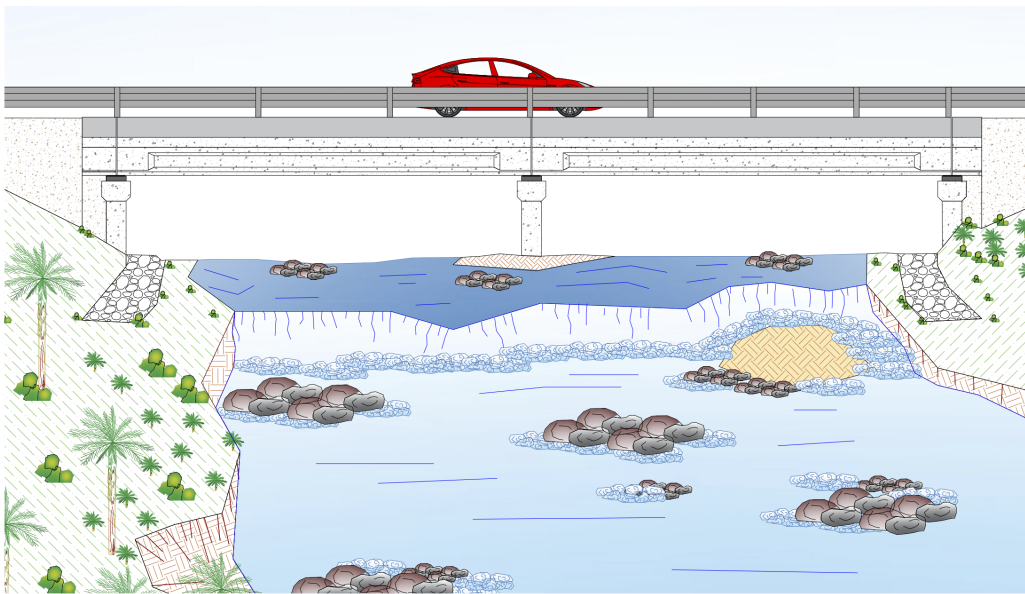
⁶⁰ Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, *op. cit.*, 2015.

Figura 64



Vista conceptual de un Paso Superior para Fauna (PSFA) mediante una estructura tipo losa. Andadores de mampostería y refugios creados con herbáceas, arbustos y rocas para la fauna.

Figura 65

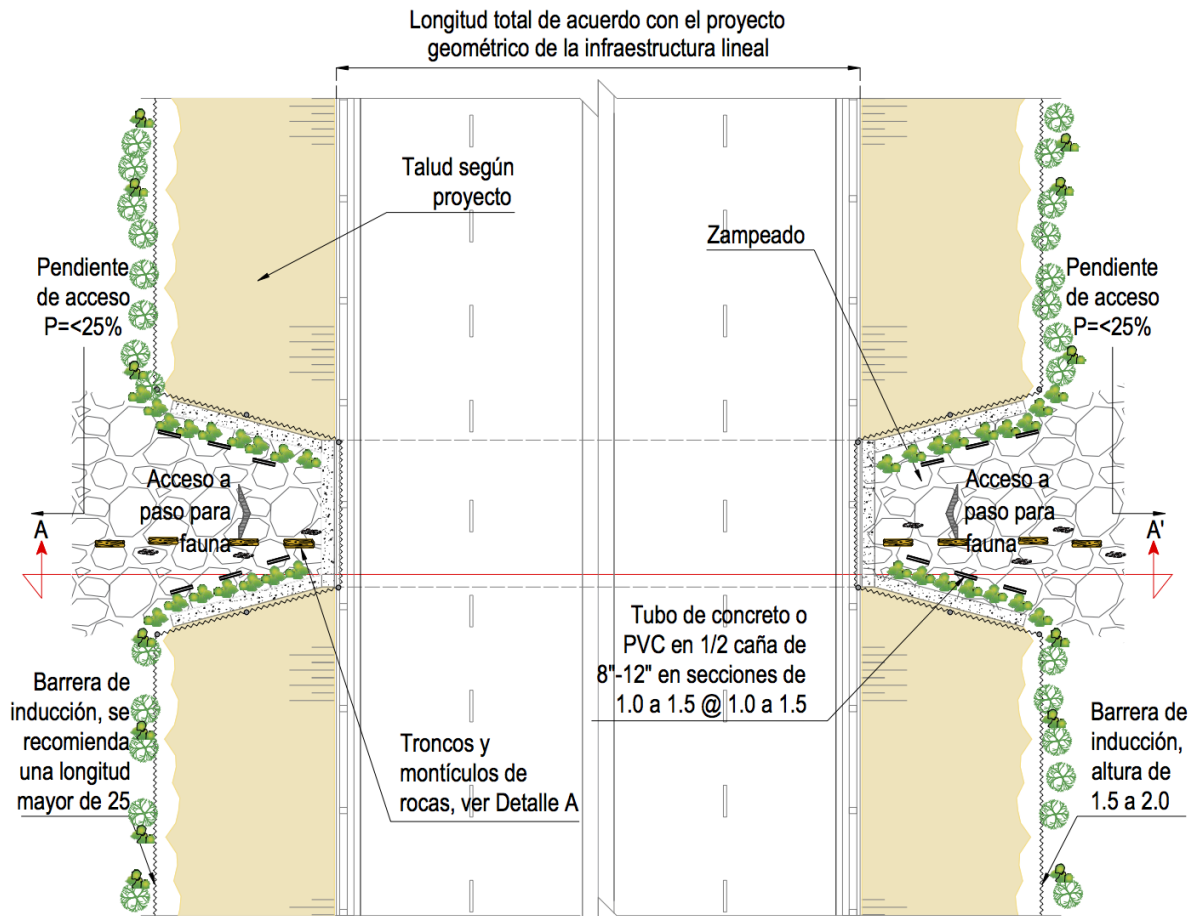


Vista conceptual de un Paso Superior para Fauna (PSFA) mediante una estructura tipo puente. Andadores de mampostería con protección lateral y refugios creados con herbáceas, arbustos y rocas para la fauna.

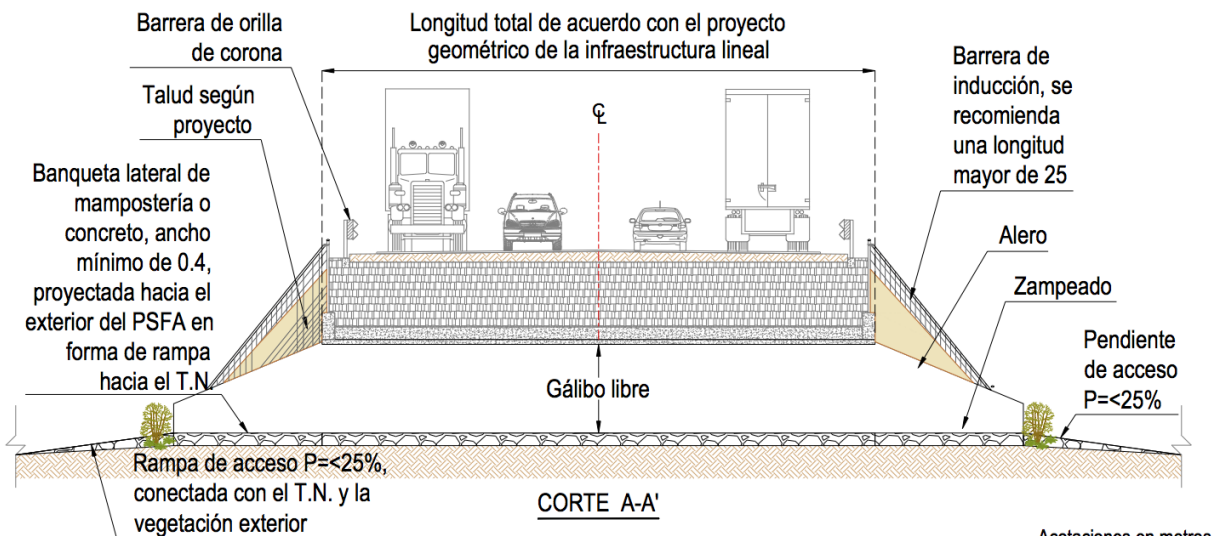
A continuación se presentan los planos orientativos 6 a 10, donde se muestra gráficamente el diseño “tipo” de los Pasos Superiores para Fauna (PSFA) mediante estructuras tipo losa o cajón, con la finalidad de orientar el diseño y construcción de estos pasos en obras de infraestructura lineal.

PLANOS ORIENTATIVOS

Plano 6



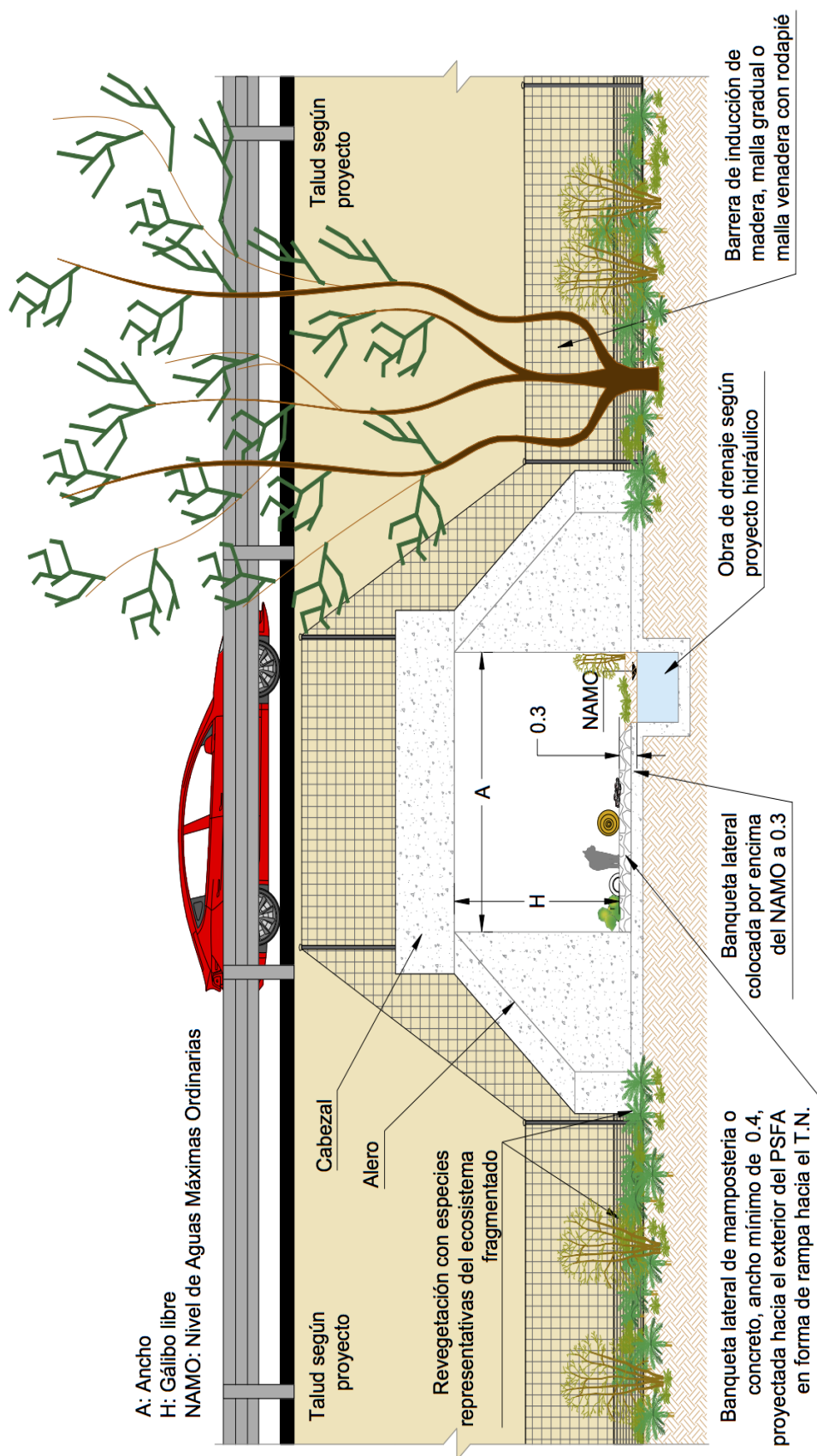
PLANTA TIPO A NIVEL DE LA INFRAESTRUCTURA LINEAL



Acotaciones en metros
Dibujos fuera de escala

Planta tipo y corte A-A' de Paso Superior para Fauna (PSFA) mediante cajón.

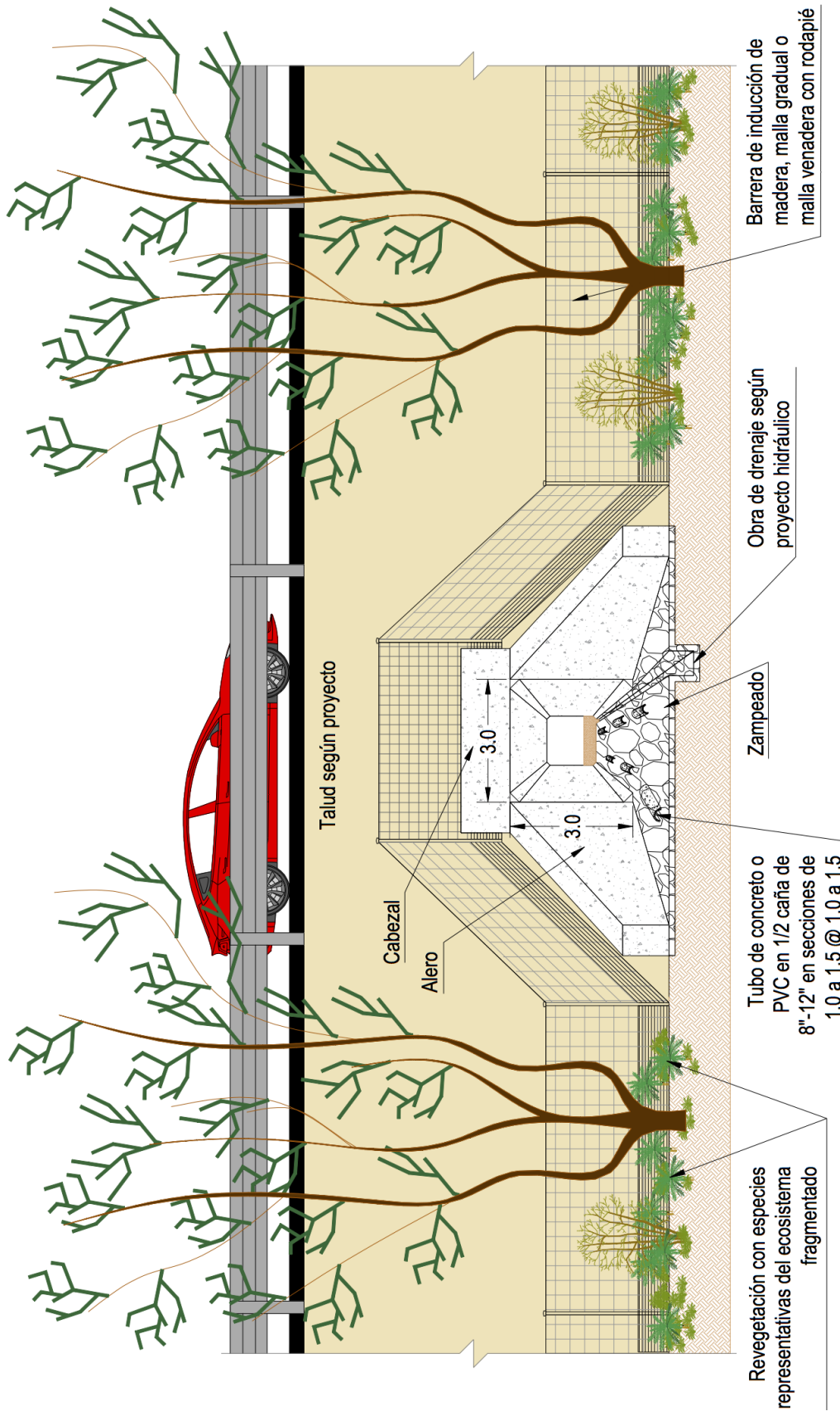
Plano 6-A



Acolaciones en metros
Dibujos fuera de escala

Elevación de Paso Superior para Fauna (PSFA) mediante cajón.

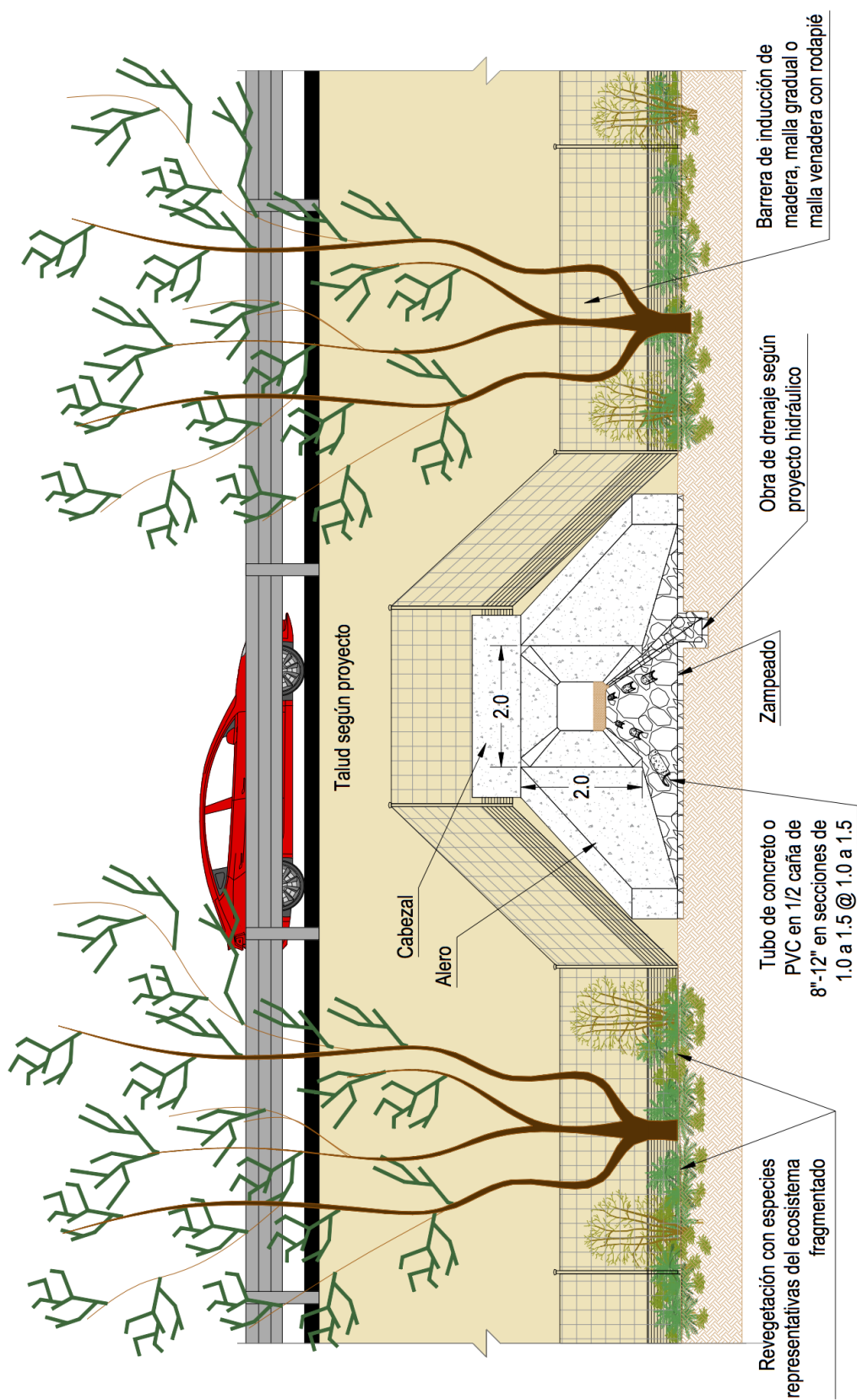
Plano 7



Acolaciones en metros
Dibujos fuera de escala

Elevación de Paso Superior para Fauna (PSFA) de 3x3 m mediante cajón prefabricado.

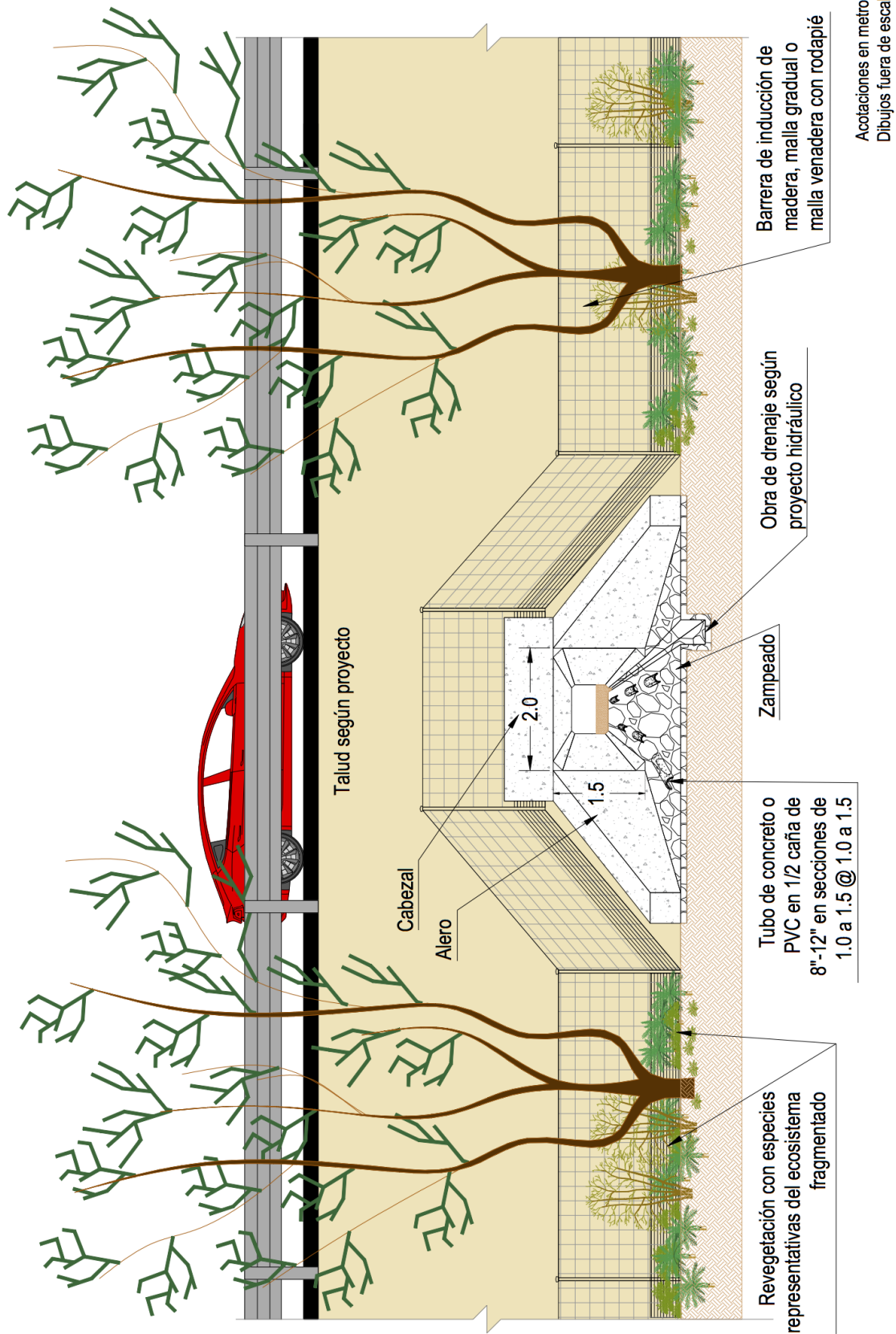
Plano 8



Acotaciones en metros
Dibujos fuera de escala

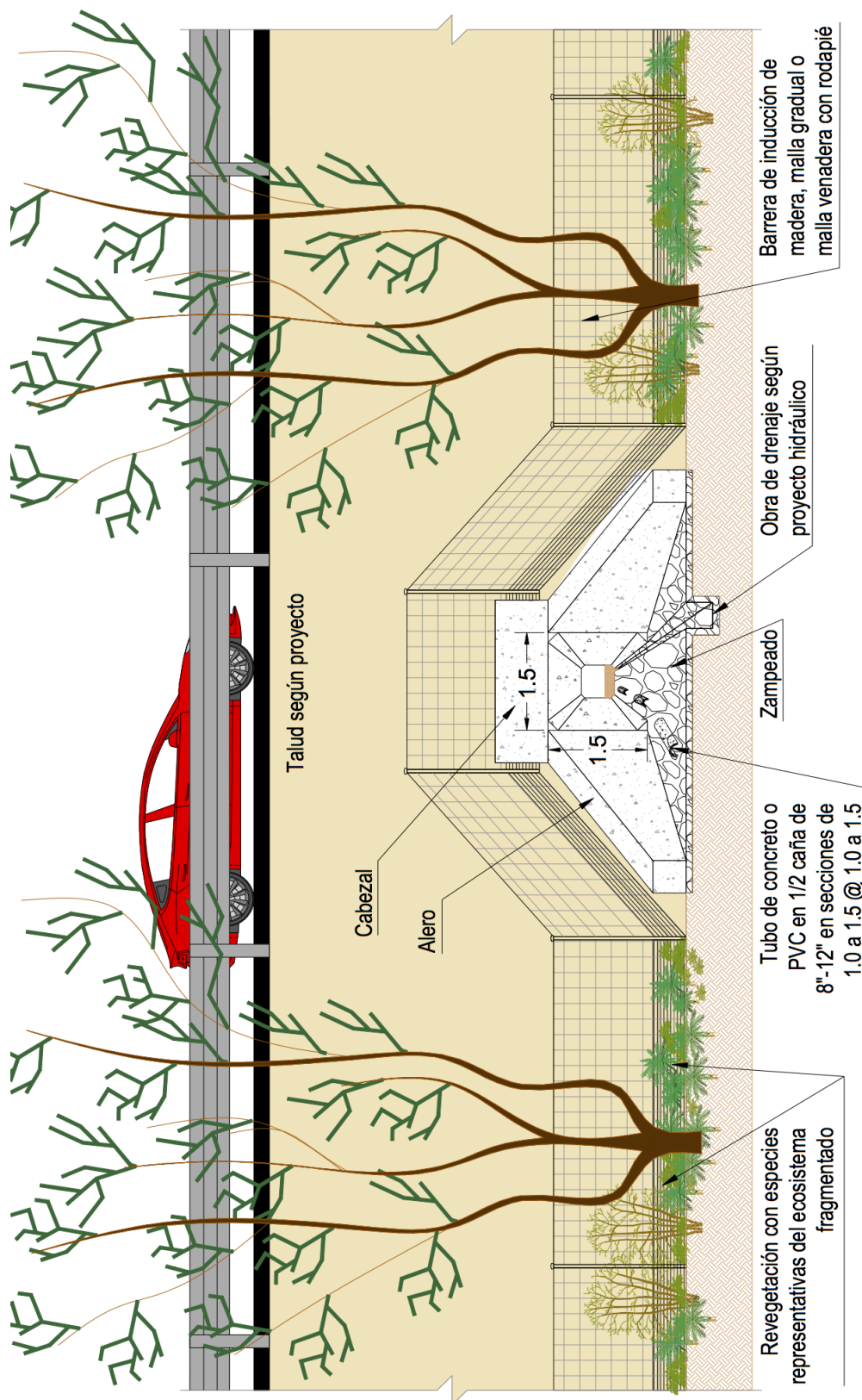
Elevación de Paso Superior para Fauna (PSFA) de 2x2 m mediante cajón prefabricado.

Plano 9



Elevación de Paso Superior para Fauna (PSFA) de 2x1.5 m mediante cajón prefabricado.

Plano 10



Acolaciones en metros
Dibujos fuera de escala

Elevación de Paso Superior para Fauna (PSFA) de 1.5x1.5 m mediante cajón prefabricado.

3) *Obra de drenaje adaptada para función mixta (paso de agua y paso para fauna)*

Pocas carreteras existentes en nuestro país cuentan al día de hoy con pasos para fauna intencionalmente contruidos para la mitigación ambiental del efecto de barrera y atropello de fauna silvestre que los proyectos ocasionan; más escasos aún son los ferrocarriles que cuentan con estructuras específicamente diseñadas y contruidas para estos fines. No obstante, en nuestro país se da la situación de que la fauna silvestre, en especial los mamíferos, al ser especies de menor tamaño en comparación con otras a nivel mundial, han encontrado maneras de cruzar las infraestructuras lineales, aprovechando las obras de drenaje en ellas. Lo anterior resulta de una consecuencia natural, al ser los escurrimientos de agua y su vegetación riparia, zonas por donde la fauna muchas veces se desplaza (corredores) o se acerca para beber, siendo más factible que encuentren forma de pasar hacia el otro lado de la infraestructura. Esto se ha visto particularmente en alcantarillas tipo bóveda y losas mayores a 2.5 m de ancho y alto, y en zonas donde los escurrimientos son de carácter temporal, permitiendo a los animales cruzar en el estiaje o cuando las lluvias no son intensas. No obstante, cuando estas obras conducen agua, función para la que fueron contruidas, la fauna se ve imposibilitada para utilizarlas, buscando cruzar por encima de la carretera con el riesgo de ocasionar un accidente o ser atropelladas.

Las obras de drenaje por sí mismas no constituyen un buen paso para fauna por estas razones, aunado a que no cuentan con tamaños suficientes para dar oportunidad de cruce a una diversidad de organismos; sin embargo, para las carreteras y los ferrocarriles existentes, constituyen una importante área de oportunidad para poder instalar pasos para fauna mediante su adaptación y aumentar con ello la permeabilidad de las infraestructuras hacia estos organismos, disminuyendo la posibilidad de accidentes y atropellos. En virtud de lo anterior, en este inciso del Manual se considera la adecuación de obras de drenaje existentes y proyectadas, y se brindan recomendaciones para adaptarlas y que puedan ser utilizadas con dos fines a lo largo de todo el año: para flujo de agua y paso para fauna.

Es importante señalar que muchas obras de drenaje en carreteras existentes, sobre todo en las más antiguas, se encuentran funcionando a capacidad máxima, por lo que no resultan ser candidatas a ser adaptadas como paso mixto, por lo que en estos casos se debe evaluar la factibilidad de reemplazo de la obra por una mayor (modernización) o construir un paso para fauna específico para este fin en un sitio adecuado.

Las obras de drenaje menor son estructuras que cruzan por debajo de la infraestructura lineal con dimensiones menores a 5 m de ancho y sirven para canalizar el agua de los escurrimientos o cauces que cruzan por la infraestructura vial, diseñadas en función del gasto, niveles, tirantes y velocidad de los cauces a drenar. Estas estructuras se incluyen en caminos de alta velocidad como carretera tipo ET, A y tipo B y carreteras de moderada a baja velocidad como tipo C y D de acuerdo con la clasificación de carreteras del *Manual de Proyecto Geométrico de Carreteras de la SCT*, Capítulo III.

En este apartado se hacen recomendaciones sobre algunos tipos de estructuras de obras de drenaje en proyecto o existentes, proyectadas inicialmente de acuerdo con el *Manual de proyecto de drenaje y subdrenaje de la SCT* (M·PRY·CAR·4·01·002/16), para que puedan funcionar como pasos mixtos mediante la instalación de repisas o banquetas y otras adaptaciones que deberán ser colocadas y planeadas de tal manera que no se afecte el área hidráulica de la obra.

Criterios

Los criterios que se deben tomar en cuenta para el diseño y construcción de este tipo de paso para fauna son:

- a) Para la adecuación de obras de drenaje es necesario aumentar el gálibo de la obra analizada con el fin de poder realizar las adaptaciones necesarias para la fauna, conservando el flujo hidráulico que marca el proyecto, lo que implica en algunas ocasiones la sustitución de la obra de drenaje por una mayor en carreteras existentes, o la sustitución del diseño inicialmente considerado en proyecto para el mismo fin.
- b) En caso de que el criterio anterior no resulte viable, analizar las obras complementarias indicadas en este Manual que se puedan adaptar para funcionar como pasos para fauna sin afectar el área y funcionamiento hidráulico.
- c) Si los dos criterios anteriores no son una opción, es necesario considerar la instalación de un paso para fauna específicamente construido para la movilización de animales, independientemente de que exista una obra de drenaje próxima.
- d) Las adaptaciones para conformar pasos mixtos incluyen actividades y estructuras tanto dentro como fuera de la obra de drenaje, por ejemplo, la colocación de barreras de mallado o sólidas opacas en ambos costados en el exterior de la estructura para reducir el ruido generado por los automóviles o trenes, conducir a los animales hacia el paso y protegerlos en su cruce.
- e) De acuerdo con el *Manual de proyecto de drenaje y subdrenaje de la SCT* (M·PRY·CAR·4·01·003/16) se tienen 4 tipos de obras de drenaje:
 - i. Tubulares de concreto reforzado, de lámina corrugada de acero y de tubo corrugado de polietileno de alta densidad.
 - ii. Losa de concreto hidráulico.
 - iii. Cajón.
 - iv. Bóveda.
- f) Experiencias previas en México y en otros países han mostrado que estructuras de losas de concreto hidráulico, cajón y bóveda son fácilmente adaptadas y utilizadas por la fauna terrestre como pasos; a diferencia de ellas, los tubos suelen ser los menos utilizados debido principalmente a tres factores: la poca luz hacia el final, a la superficie curva y/o corrugada al interior del tubo y lo estrecho del espacio. Por tales motivos, el criterio general, en caso de infraestructuras lineales existentes en las que se requiera implementar pasos para fauna, será el de sustituir los tubos por cualquiera de las otras obras de drenaje con mayores dimensiones y geometría distinta si se tiene la intención de que sean utilizadas como pasos para la fauna.

- g) Los tipos de obras de drenaje mencionados en el criterio e) pueden fungir como pasos mixtos al adaptarlos de acuerdo con las necesidades de las especies que habiten en la zona. En nuestro país, estos pasos pueden ser utilizados por mamíferos grandes, medianos y pequeños, además de anfibios y reptiles, por lo que deben implementarse combinaciones de estas obras de drenaje para dar una mayor capacidad a los animales de diferentes tamaños y formas para movilizarse.
- h) Las dimensiones recomendadas de obras de drenaje adaptadas para pasos para fauna, en el caso de mamíferos grandes, son de 3.0 a 6.0 m de ancho (A), por una altura (H) de 3.0 a 5.0 m y su longitud estará determinada de acuerdo con el proyecto geométrico de la infraestructura lineal.
- i) Por su parte, para mamíferos medianos y pequeños alcantarillas mayores de 1 a 1.5 m de alto pueden ser adecuadas para el paso de varias especies.
- j) En caso de obras tubulares, diámetros menores a 1.5 m sólo son recomendables para sitios donde se busca el paso de anfibios o reptiles pequeños. Tubos con diámetros de 0.3 a 0.5 m pueden resultar aceptados para paso de tejones y otros mamíferos excavadores, pero no son apropiados para establecer pasos multiespecie.⁶¹
- k) Los tubos de polietileno de alta densidad pueden ser buenos pasos para anfibios en zonas húmedas, e incluso para peces, como se describe más adelante.
- l) En cualquier caso, para poder adaptar obras de drenaje con forma tubular como paso para fauna terrestre se requiere establecer un fondo plano en el piso de ésta para que puedan caminar por ahí los animales, lo que implica reducir en al menos $\frac{1}{4}$ el área libre del ducto con la colocación de este relleno formando una pasarela de concreto, lo que hace que sean poco funcionales y por consiguiente menos recomendados.
- m) La colocación de vegetación será viable en las zonas dentro de los límites del derecho de vía y los laterales del cauce de agua dentro y fuera de éste, ya que en el tramo central del paso las condiciones no son las adecuadas para el establecimiento de vegetación pues requiere conservarse la función hidráulica. La colocación de vegetación para ocultar el paso y conectarlo con la vegetación aledaña debe analizarse de forma particular en cada caso y por especialistas en la materia para definir las mejores opciones y la adecuada colocación de las especies de plantas.

Consideraciones generales

Para el diseño y construcción de estos pasos para fauna se deberán tomar las siguientes consideraciones generales:

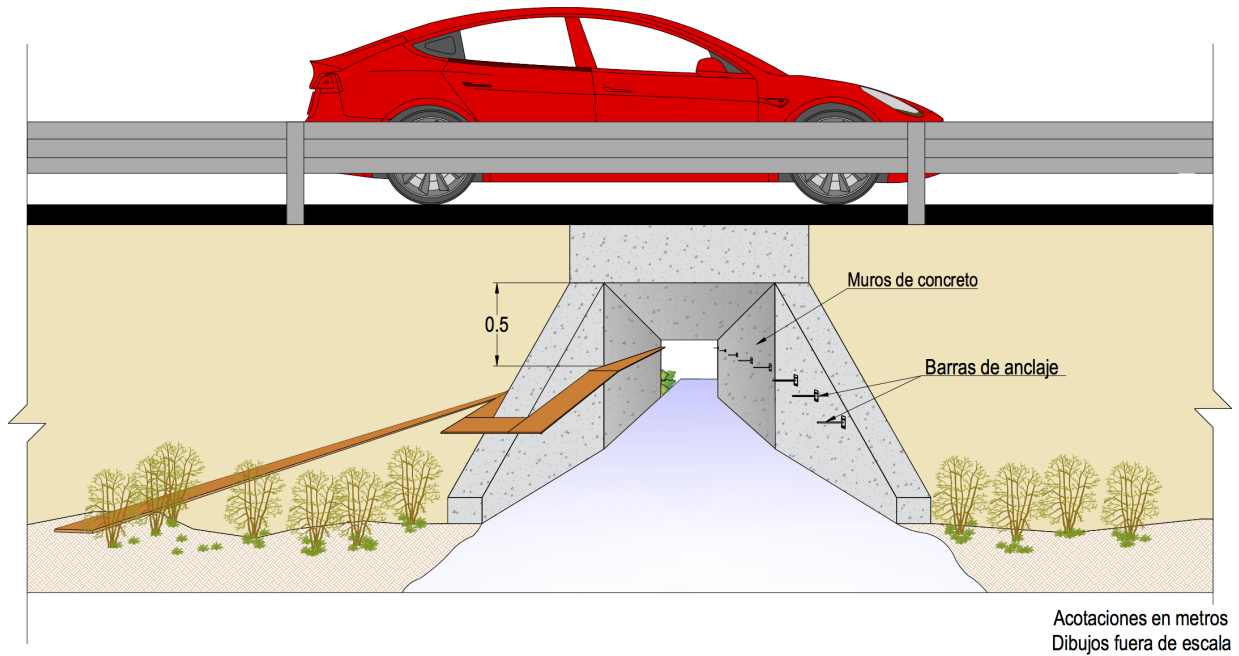
- a) Se recomienda realizar la revegetación en los accesos de la obra de drenaje con la finalidad de guiar a la fauna hacia un cruce seguro. La revegetación

⁶¹ Iuell, B. (2003). "Wildlife and Traffic: a European handbook for identifying conflicts and designing solutions", en The XXIInd PIARC World Road Congress World Road Association-PIARC.

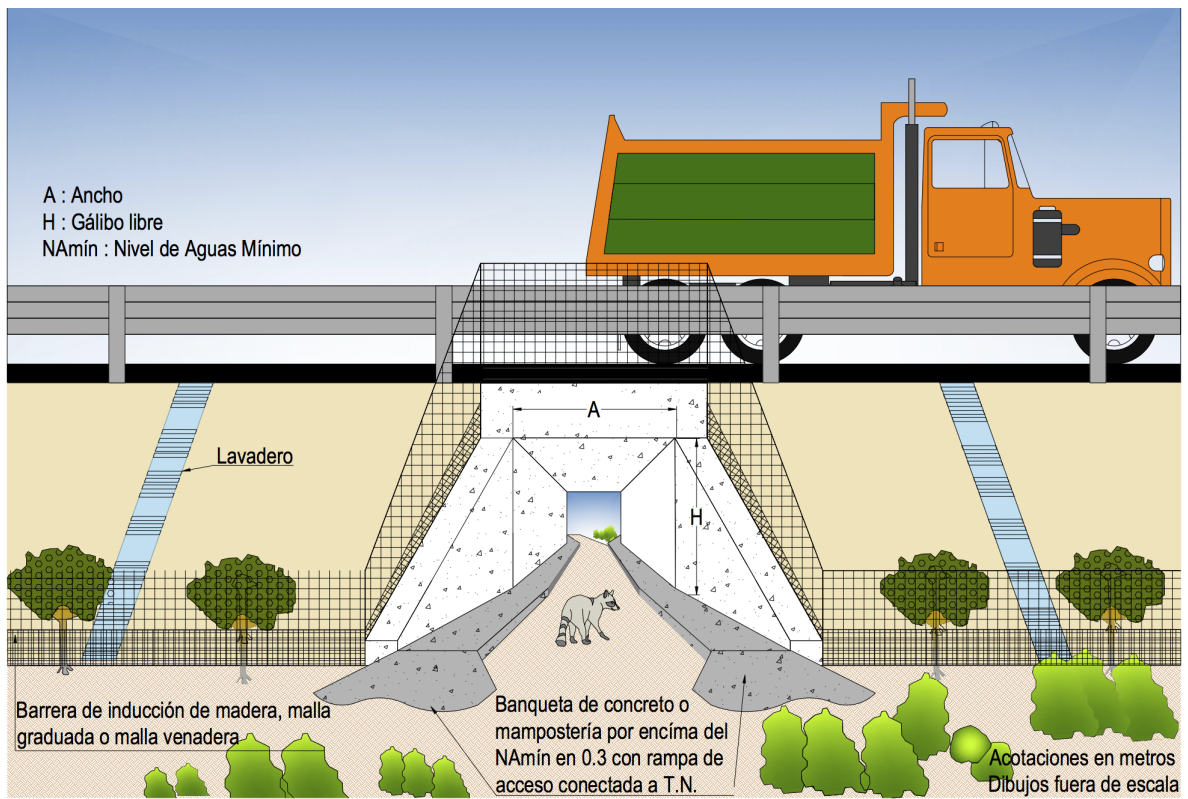
tendrá que considerar combinaciones de especies de árboles y arbustos nativos y con representatividad de los ecosistemas aledaños por conectar.

- b) Dentro de las adaptaciones más comunes para las obras de drenaje a fin de que cumplan con una función mixta, se recomienda, para incentivar el desplazamiento de fauna pequeña, implementar repisas de madera densa tratada para la intemperie, concreto colado en sitio para dar la inclinación y altura adecuada, resinas epóxicas u otros materiales. Se colocan a lo largo del paso para fauna u obra de drenaje adaptada para función mixta (paso de agua y paso para fauna), en una o dos de las paredes laterales de la obra dependiendo del gálibo de la misma. Se proyectan hacia afuera del paso, hasta conectarse con el terreno natural y la vegetación exterior. La proyección de las repisas se realiza para generar las rampas de acceso a éstas, con pendientes menores a 25%. Es importante colocar la vegetación necesaria que enlace la proyección de las repisas con la vegetación natural. La altura de colocación debe ser de al menos 0.3 m por arriba del NAMO y a una distancia mínima del techo de la obra de 0.5 m. El ancho mínimo de las repisas es de 0.3 m y debe soportar un peso de al menos 15 kg. No se recomienda el uso de repisas metálicas pues son muy sensibles a la oxidación al colocarse en drenajes que lleven agua buena parte del año. Asimismo, el metal, debido a que es un material que aumenta o reduce su temperatura drásticamente de acuerdo con la temperatura medioambiental, puede ser un factor repulsivo para ciertas especies.
- c) Para el desplazamiento de fauna mediana y grande se deben implementar banquetas de concreto o mampostería duraderas y resistentes al caudal, garantizando que el área hidráulica de la obra no se vea afectada. Se colocan en la base de las paredes laterales y se proyectan hacia afuera del paso, hasta conectarse con el terreno natural y la vegetación exterior. Las banquetas deben tener sus rampas de acceso con pendientes menores a 25%. Es importante colocar la vegetación necesaria que enlace estas banquetas con la vegetación natural más próxima en el sitio (fuera del cauce de agua). Deben contar con una cubierta de suelo natural y hojarasca con un espesor mínimo de 0.15 m, ya que algunas especies evitan desplazarse sobre el concreto. La altura de la banqueta dependerá del cálculo del caudal máximo, considerando que al menos la banqueta se ubique a 0.3 m por encima del Nivel de Aguas Mínimas (NAMín). El ancho mínimo de las banquetas es de 0.4 m.
- d) Con la finalidad de que las banquetas permanezcan secas la mayor parte del año se recomienda que su nivel final se ubique 0.3 m por encima del NAMín.

Figura 66



a)



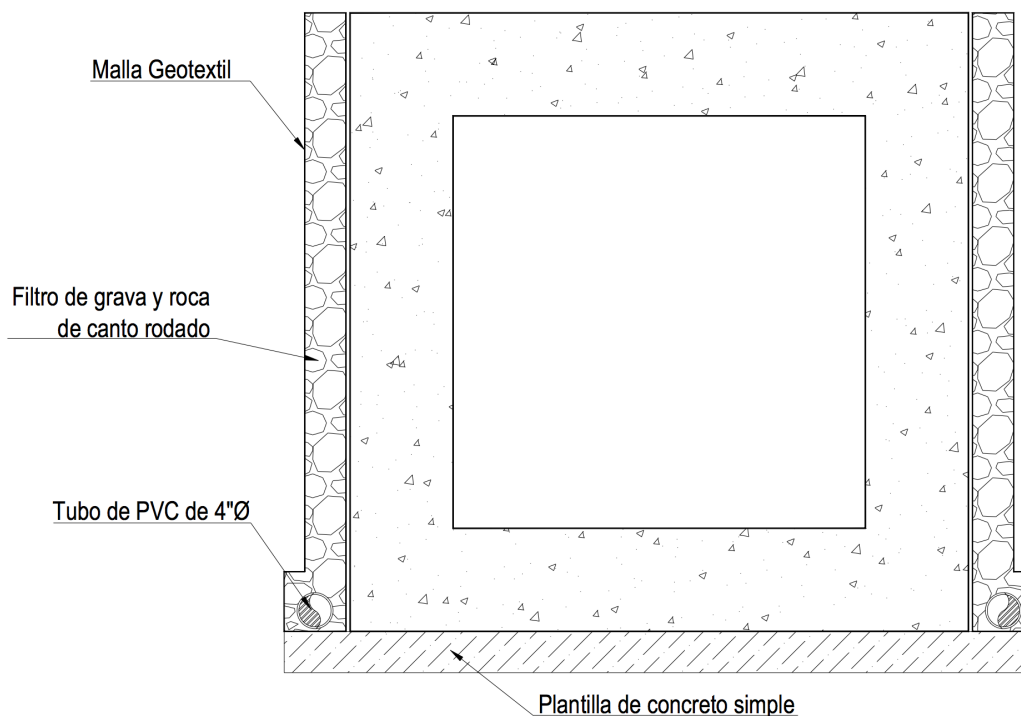
b)

a) Implementación de repisas y b) banquetas en una obra de drenaje para función mixta.

- e) Pueden utilizarse prefabricados de concreto desde 1.0 m x 1.0 m, hasta 3.0 m x 3.0 m, que se encuentran diseñadas bajo las siguientes normativas:
- AREMA (American Railway Engineering and Maintenance Association) Design Manual 2018, parte 2 (Reinforced Concrete Design), parte 12, Reinforced concrete culvert pipe (2018) y parte 16 Concrete Box culverts (2006).
 - AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) LRFD Bridge Design Specifications (8th Edition 2017).
 - Normativa para la Infraestructura del Transporte de la SCT, y que forma parte de la colección de documentos de la Normativa para el Proyecto Puentes y Estructuras (N PRY CAR 6 01 002/01 y N PRY CAR 4 01 003/01).
 - Manual de diseño de obras civiles de la CFE*, Diseño por Sismo (2015).
 - EN-1998-2. Design of structures for earthquake resistance. Part 2: Bridges (2005).
 - Las estructuras prefabricadas cuentan con los siguientes requerimientos:
 - Paredes y losas superior e inferior con un ancho mínimo de 0.25 m.
 - Los materiales de relleno serán de banco de material de préstamo y serán aprobados por la dependencia de acuerdo con lo especificado en el estudio de mecánica de suelos.
 - Recubrimientos en las paredes laterales de malla geotextil y piedra filtro.
 - Dren de Tubería de PVC de 4" Ø.
 - Encofrado de concreto f'c 200 kg/cm².

En la siguiente figura se presenta de manera ilustrativa una obra de drenaje tipo cajón de una sección.

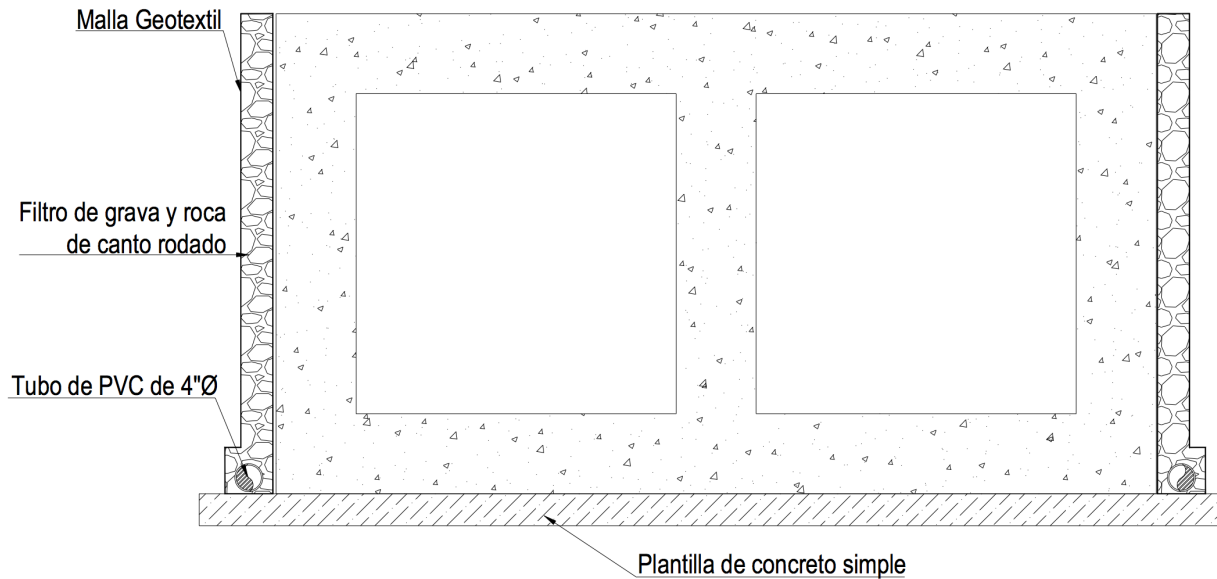
Figura 67



Obra de drenaje de cajón prefabricada de una sección.

En la figura siguiente se presenta de manera ilustrativa una obra de drenaje tipo cajón de dos secciones.

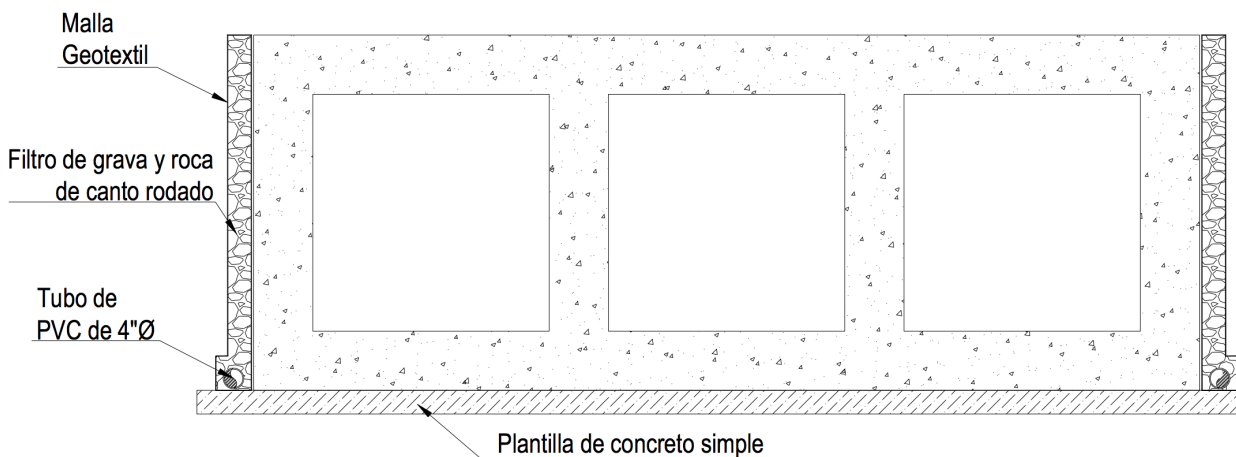
Figura 68



Obra de drenaje de cajón prefabricada de 2 secciones.

En la siguiente figura se presenta de manera ilustrativa una obra de drenaje tipo cajón de tres secciones.

Figura 69



Obra de drenaje de cajón prefabricada de 3 secciones.

Estas estructuras pueden ser funcionales como pasos mixtos, permitiendo el desplazamiento de la fauna que hay en nuestro país de talla mediana y pequeña, todo dependiendo del comportamiento y preferencias de las especies, así como su colocación.

Para su integración en el paisaje, estas estructuras se deben revegetar en los márgenes de sus accesos, con el fin de guiar a la fauna hacia la entrada de la obra dando continuidad a ambos lados de la infraestructura.

Adaptaciones particulares de una obra de drenaje para función mixta (paso de agua y paso para fauna) para el uso por diversos grupos de fauna

A continuación se señalan algunas recomendaciones adicionales para adaptar las obras de drenaje a diversas formas, tamaños y modo de desplazamiento de los organismos.

Herpetofauna

Estos pasos para fauna pueden ser también utilizados por especies pequeñas de herpetos (anfibios y reptiles), los que podrán circular tanto por las repisas como por las banquetas de estas obras. Para promover su uso por estos animales se sugiere observar lo siguiente:

- a) Conservar condiciones microambientales que promuevan el desplazamiento de algunos reptiles y anfibios mediante la colocación de herbáceas que formen macollos entre los que puedan ocultarse y desplazarse, particularmente en los sitios de conexión con las repisas y banquetas.
- b) Cubrir las banquetas con material lodoso y hojarasca.

Mamíferos pequeños

- a) Colocar (fuera del cauce) refugios hechos con troncos o rocas e hileras de herbáceas en la vegetación natural próxima a la obra de drenaje adaptada para función mixta para facilitar el desplazamiento de pequeños mamíferos hacia la entrada del paso.
- b) El acceso a los túneles de estas obras no debe estar obstruido. Es importante brindar el mantenimiento necesario para evitar azolves y obstrucciones con objetos de mediano o gran tamaño que pueda llevar el agua, como se señala en el apartado correspondiente a la conservación de los pasos para fauna.

Mamíferos voladores

- a) Este tipo de estructuras pueden ser adecuadas para formar colonias de maternidad o sitios de percha de las especies de murciélagos pequeños y de vuelo ágil y raso, como *Rhinolophus spp.*, *Myotis spp.* y *Plecotus spp.* Para ello se requiere dejar la superficie superior de la obra con una textura gruesa utilizando lances de concreto con pequeñas gravas adheridas para formar una superficie rugosa y gotas de concreto de la cual puedan prenderse cabeza abajo los murciélagos.
- b) Es importante señalar que las obras de drenaje que se destinan para zonas de maternidad o percha de murciélagos, muy probablemente no serán utilizadas por otros mamíferos mientras en su interior se encuentren estos quirópteros.

Aves que apeonan⁶²

- a) En el caso de codornices (perdices), faisanes, correcaminos y otras aves que apeonan, este tipo de pasos también pueden ser adaptados para facilitar su desplazamiento mediante la construcción de banquetas y su cobertura con tierra natural y hojarasca.

Recomendaciones particulares para obra de drenaje adaptada para función mixta en infraestructura lineal (paso de agua y paso para fauna)

1. Obras de drenaje rectangulares son preferibles para anfibios ya que las paredes rectas brindan una buena dirección de sus movimientos.
2. No se recomienda el uso de estructuras de metal (tubos), ya que son evitadas por varios organismos como liebres y algunos carnívoros, así como por anfibios.
3. El uso de elementos prefabricados de concreto es apropiado para crear pasos rectangulares, sin embargo, se debe verificar que la junta entre los elementos prefabricados sea completamente lisa. Estos elementos pueden incluso diseñarse desde la planta de prefabricados para incluir una banqueta y/o repisas en su interior para cumplir la función de paso mixto.
4. Cuando el caudal sea muy escaso y el agua solamente en temporadas de lluvias extremas se pueden instalar al interior de la obra de drenaje y cementados a la misma, medios tubos de concreto de al menos 8" a 12" de diámetro en tramos de 1.0 m espaciados al menos 1.5 m a lo largo de la obra para brindar refugio a animales pequeños.
5. En caso de elementos prefabricados pequeños a nivel del pavimento, se recomienda incluir perforaciones a manera de respiraderos en la losa superior para mayor penetración de luz. En prefabricados que se colocan dentro del terraplén no aplican estas perforaciones.
6. Es recomendable la construcción de un parapeto en la parte alta de la obra de drenaje para bloquear los reflejos de luces y ruidos de los vehículos que circulan por encima de la obra particularmente cuando el techo de la obra se ubica a menos de un metro de la carpeta.
7. La obra de drenaje debe diseñarse de tal manera que no se cubra totalmente de agua ni se encharque en el interior en temporadas de secas, dando pendiente suficiente para el adecuado escurrimiento de la obra.
8. Obras de drenaje con gran caudal o un cauce permanente no son apropiadas para ser adaptadas como pasos para fauna de este tipo, por lo que deben construirse o considerarse un paso para fauna independiente de la obra en el caso de infraestructuras existentes o en proyecto.
9. Los accesos al paso para fauna deben quedar libres de perturbación humana.
10. Los accesos deben proyectarse por fuera del cercado o malla que delimite la infraestructura, para que estén en contacto con el medio natural aledaño.
11. Los accesos al paso para fauna deben ubicarse sobre terreno natural o contar con rampas de acceso a las mismas desde dicho nivel.

⁶² Apeonan. Dicho generalmente de un ave. Andar a pie y aceleradamente. Que se desplazan por tierra.

12. Instalar barrera de inducción con longitud preferentemente mayor a 25 m a cada lado de la obra de drenaje, dependiendo de la topografía y las condiciones ambientales del cauce. La altura mínima será de 1.5 m y máximo de 2.0 m. Preferentemente la malla debe ser graduada, colocando la parte más cerrada de la malla hacia abajo, es decir sobre el terreno natural. Otra opción es la malla venadera (ganadera) con un rodapié de 0.6 m de malla más cerrada no mayor a 0.02 x 0.02 m de apertura.
13. No debe permitirse el desarrollo urbano, caminos, senderos o cambios de usos del suelo en los puntos de contacto de estos pasos con el ecosistema natural.
14. Queda terminantemente prohibido realizar la caza o captura de animales en el cruce de estos pasos; situación que debe salvaguardar el administrador de la carretera o vía férrea sobre la que se ubican. No puede realizarse la caza en al menos una distancia de 2 km de radio desde el centro del paso.
15. Se recomienda sobrar la obra para asegurar capacidad de conducción del flujo hidráulico y paso para fauna todo el año; si se requiere de un cajón sobrarla a dos, si se requiere de dos, sobrarla a tres (figuras 72 y 73).
16. Deben evitarse las condiciones que se asemejen a lo indicado en la siguiente Figura.

Figura 70



Evitar paredes de la acequia o cuneta altas y verticales que impidan la salida de animales pequeños



Evitar banquetas o repisas que no se conectan mediante rampas con el terreno alledaño fuera de la obra.



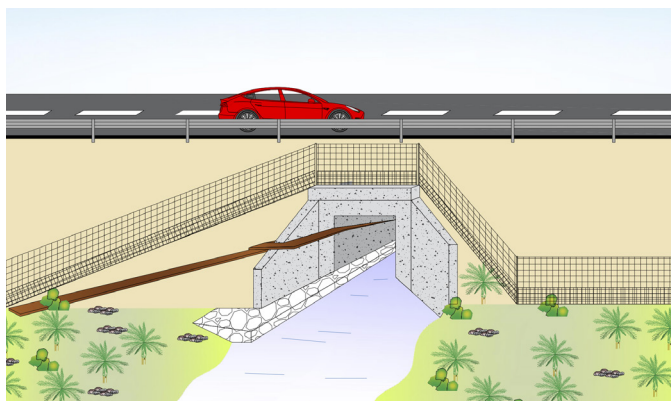
Evitar salidas de agua escalonadas o de caída.

Obras de drenaje inadecuadas para funcionar como pasos mixtos
(fuente: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, España, 2015).⁶³

⁶³ Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, *op. cit.*, 2015.

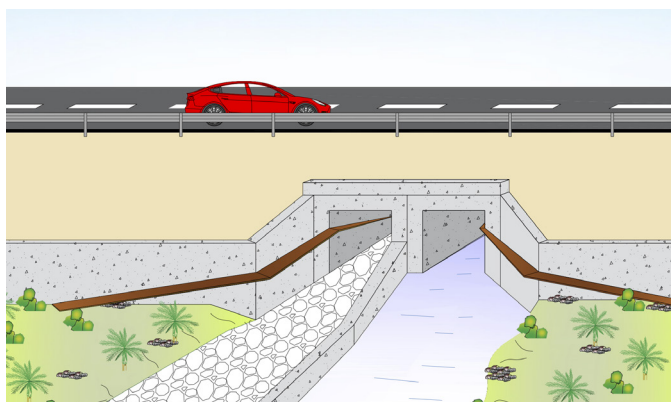
17. Este tipo de paso se puede implementar en carreteras y vías férreas. Sin embargo, cada caso debe contar con los estudios y proyectos necesarios para la correcta planeación, diseño y construcción de paso para fauna.
18. El diseño y construcción de estas estructuras debe apegarse a las especificaciones de los manuales y normas técnicas de la SCT.

Figura 71



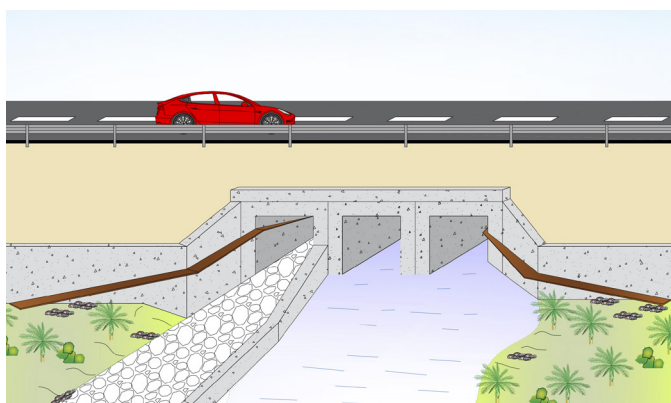
Vista conceptual de una obra de drenaje de cajón prefabricada de una sección para función mixta mediante inclusión de banquetas y repisas conectadas con el terreno natural.

Figura 72



Vista conceptual de adaptación de una obra de drenaje de cajón prefabricada de dos secciones (sobrada) para función mixta (paso para fauna y alcantarillado hidráulico).

Figura 73

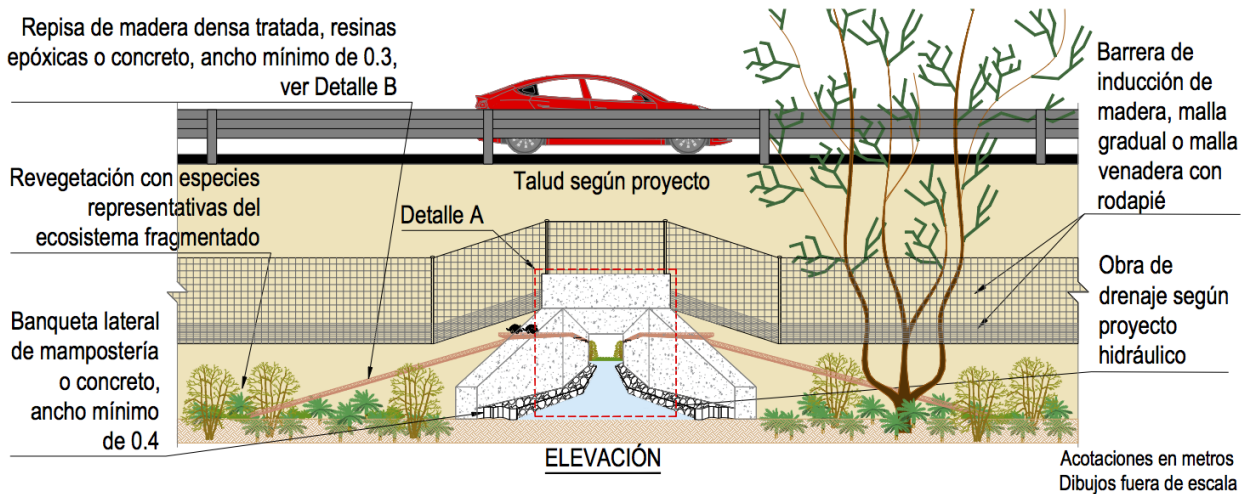
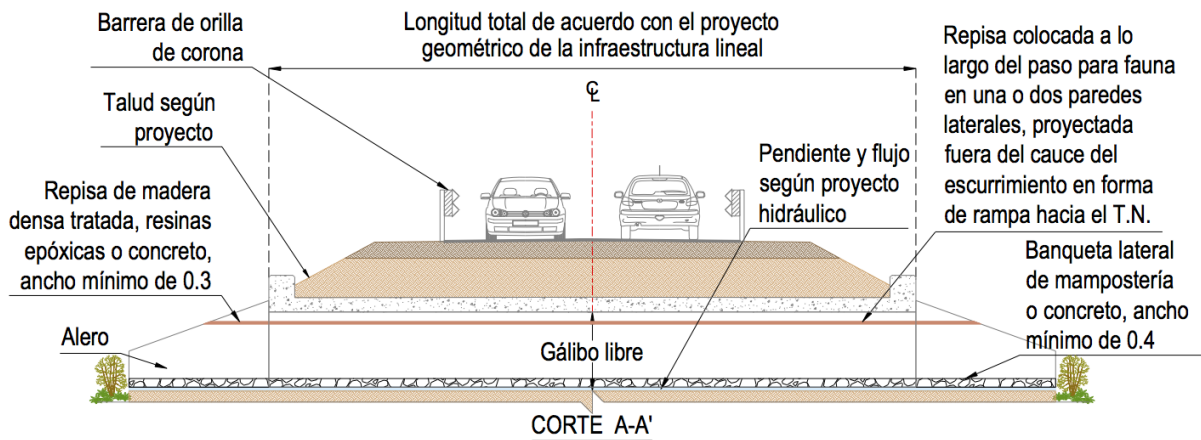
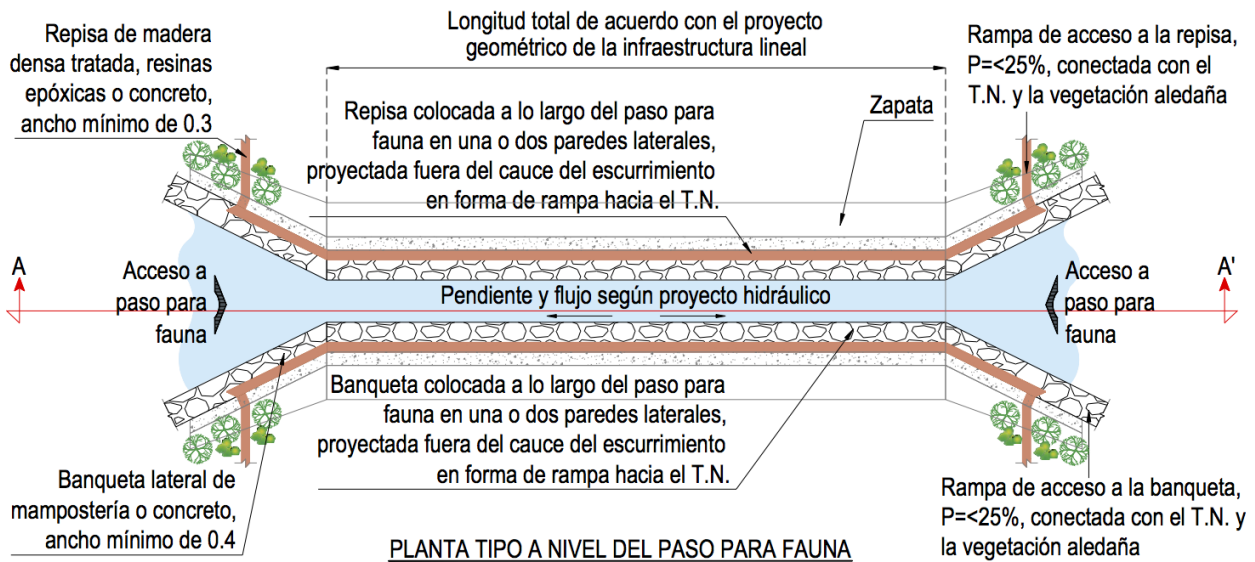


Vista conceptual de adaptación de una obra de drenaje de cajón prefabricada de tres secciones (sobrada) para función mixta (paso para fauna y alcantarillado hidráulico).

En los planos orientativos 11 a 16 se muestra gráficamente el diseño “tipo” antes descrito para desarrollar un proyecto de paso para fauna tipo obra de drenaje adaptada para función mixta.

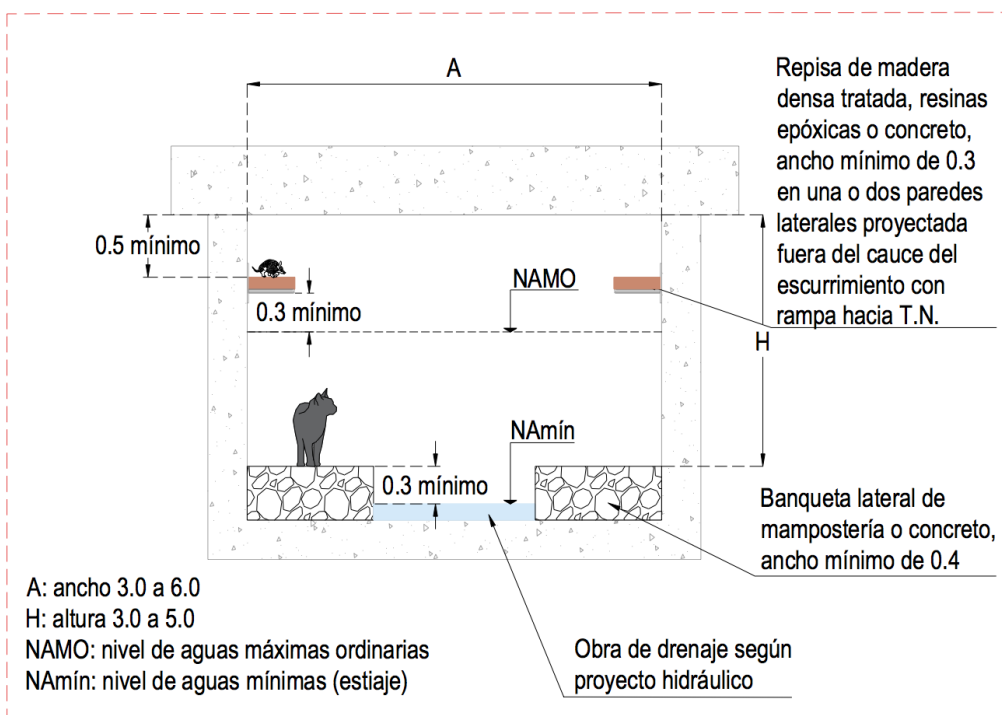
PLANOS ORIENTATIVOS

Plano 11

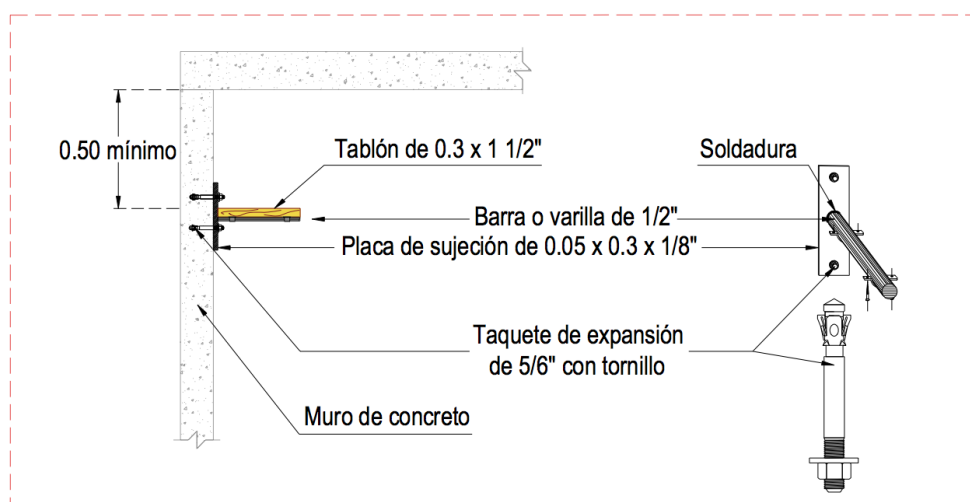


Planta tipo, corte A-A' y elevación de obra de drenaje adaptada para función mixta mediante losa.

Plano 11-A



DETALLE A

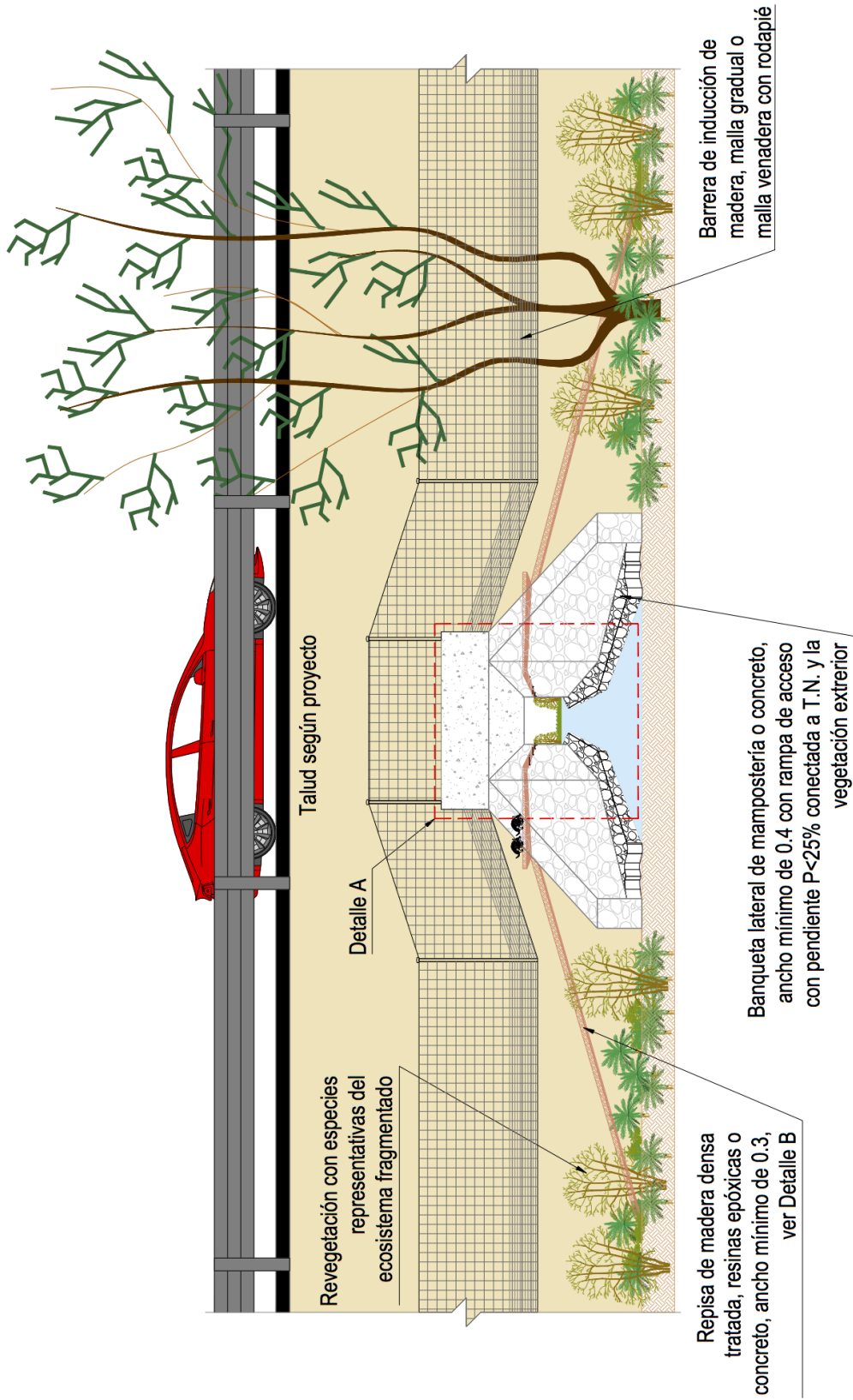


DETALLE B

Acotaciones en metros
Dibujos fuera de escala

Detalles de obra de drenaje adaptada para función mixta mediante losa.

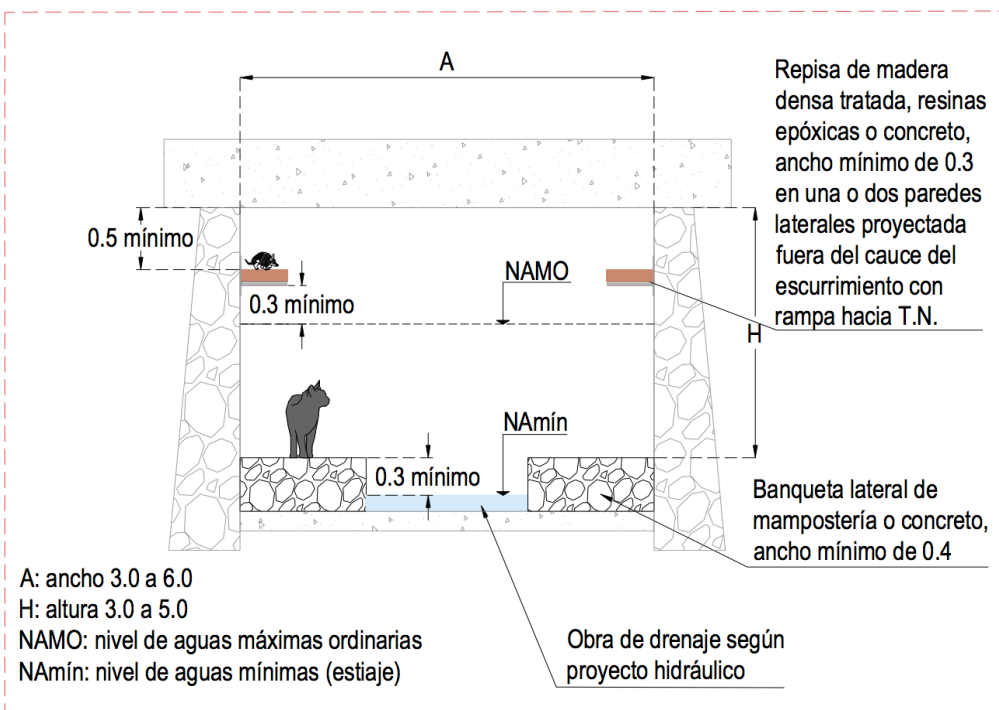
Plano 12



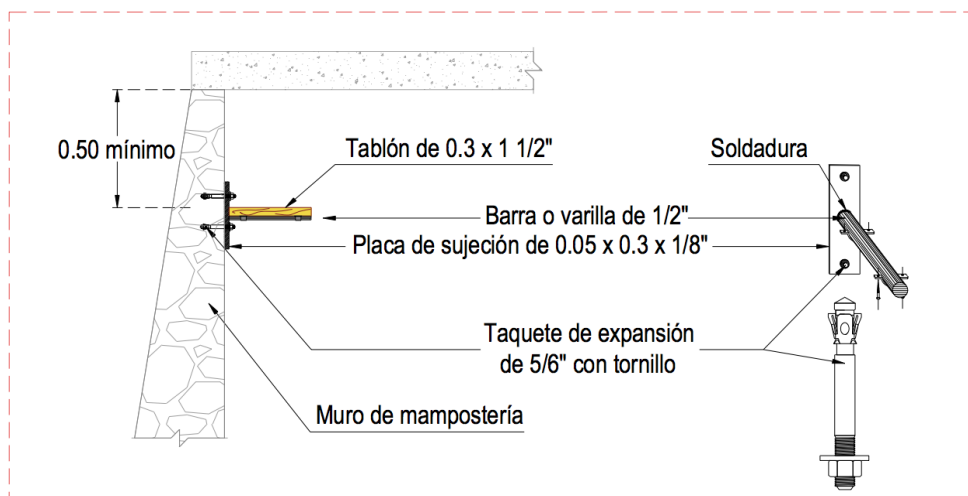
Acotaciones en metros
Dibujos fuera de escala

Elevación de obra de drenaje adaptada para función mixta mediante cajón de mampostería.

Plano 12-A



DETALLE A

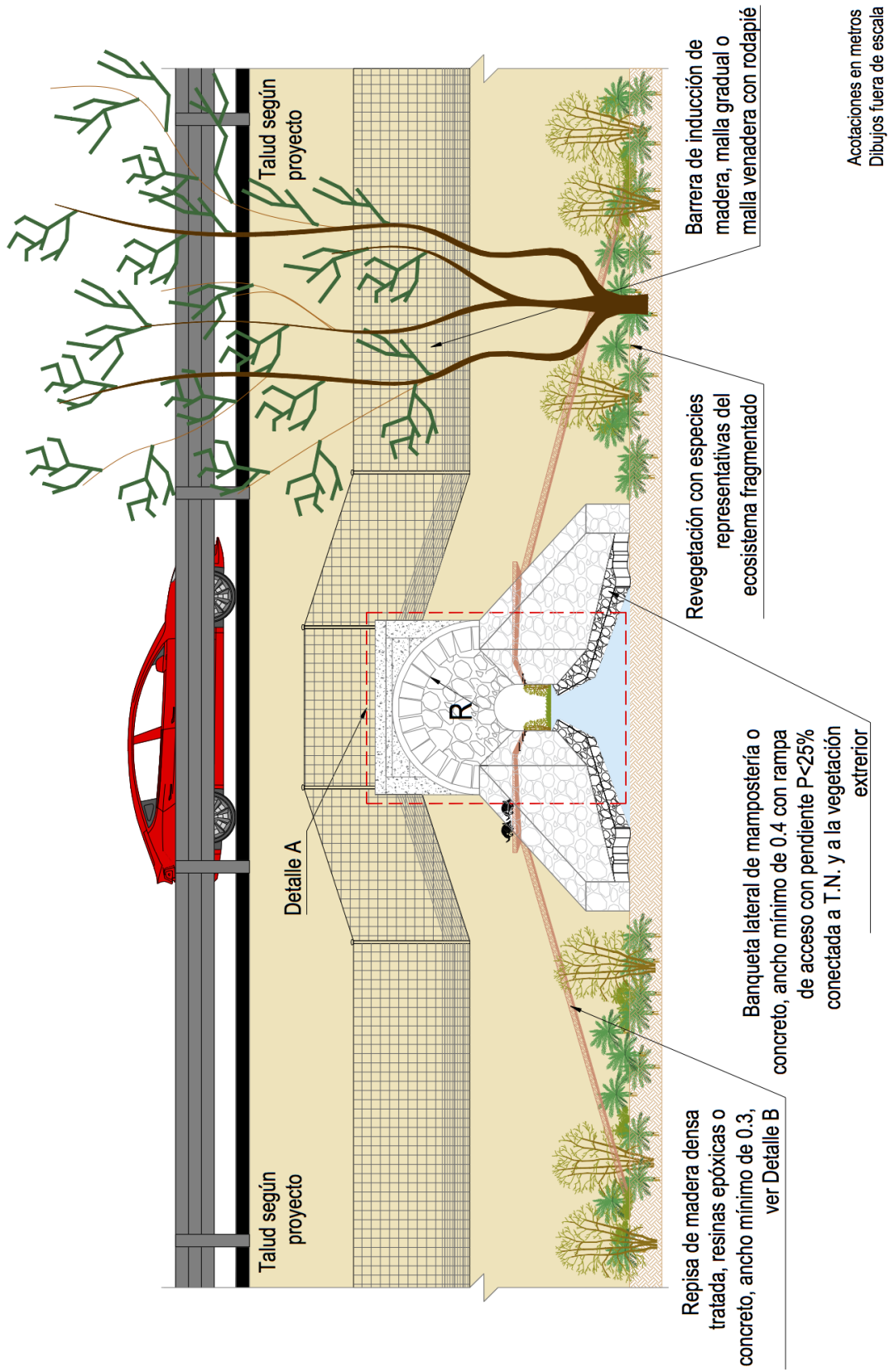


DETALLE B

Acotaciones en metros
Dibujos fuera de escala

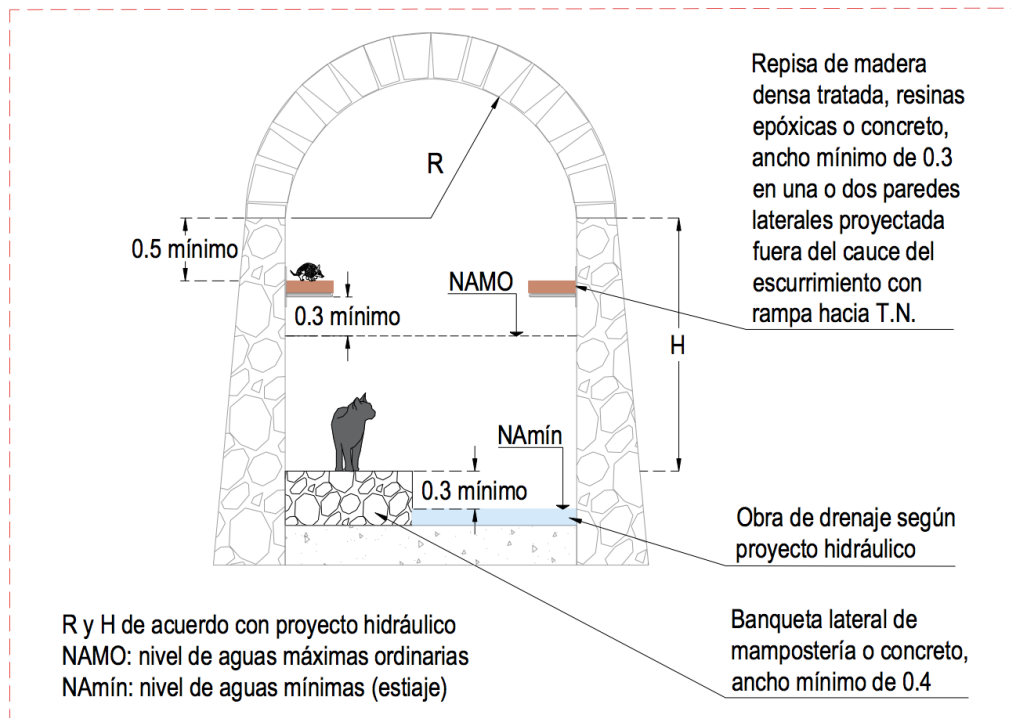
Detalles de obra de drenaje adaptada para función mixta mediante cajón de mampostería.

Plano 13

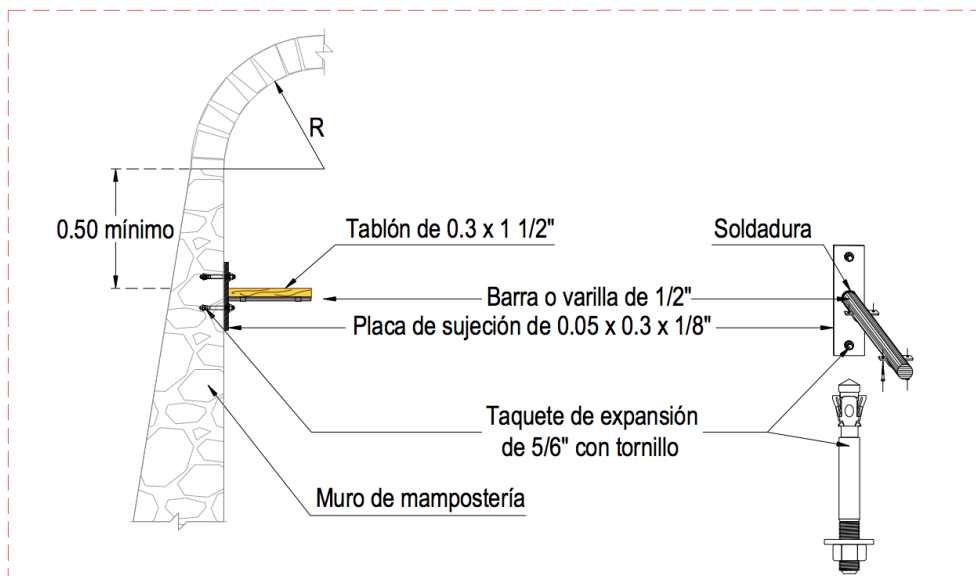


Elevación de obra de drenaje adaptada para función mixta mediante bóveda.

Plano 13-A



DETALLE A

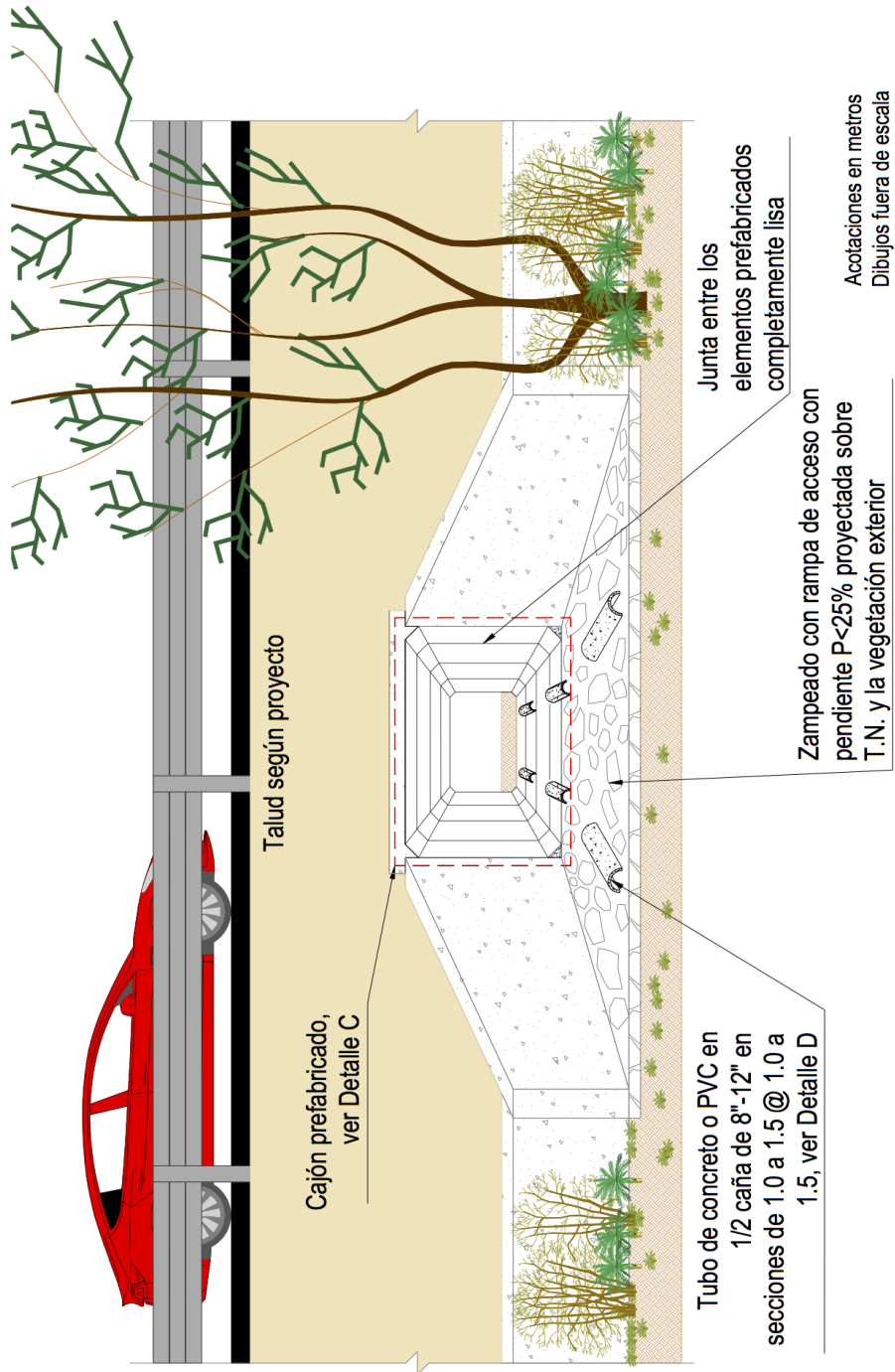


DETALLE B

Acotaciones en metros
 Dibujos fuera de escala

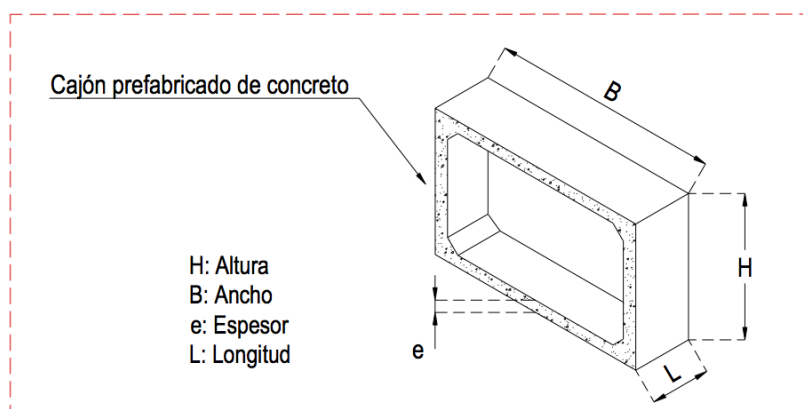
Detalles de obra de drenaje adaptada para función mixta mediante bóveda.

Plano 14

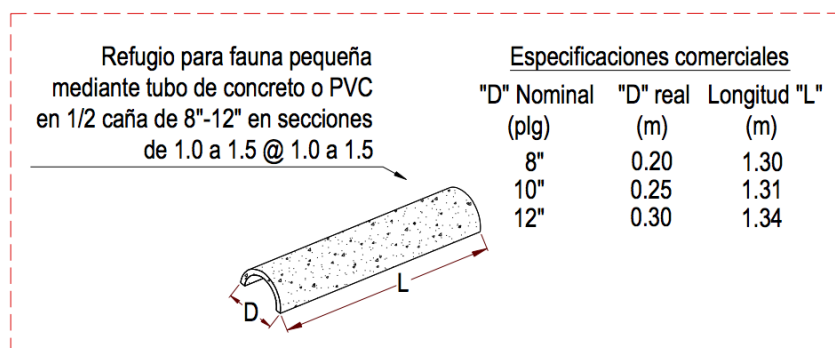


Elevación de paso para fauna habilitado con estructura para obra de drenaje prefabricada de un cajón.

Plano 14-A



DETALLE C

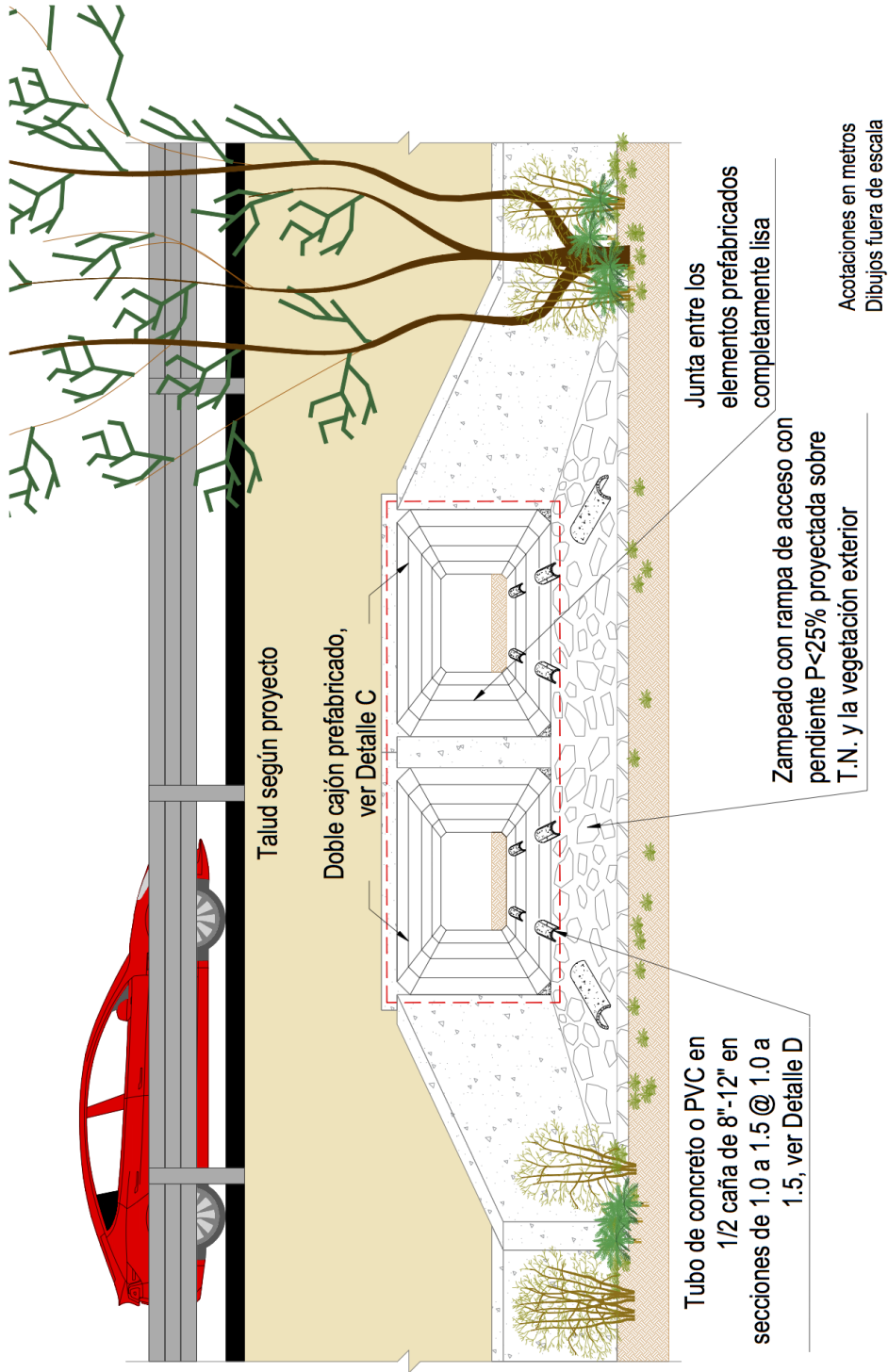


DETALLE D

Acotaciones en metros
Dibujos fuera de escala

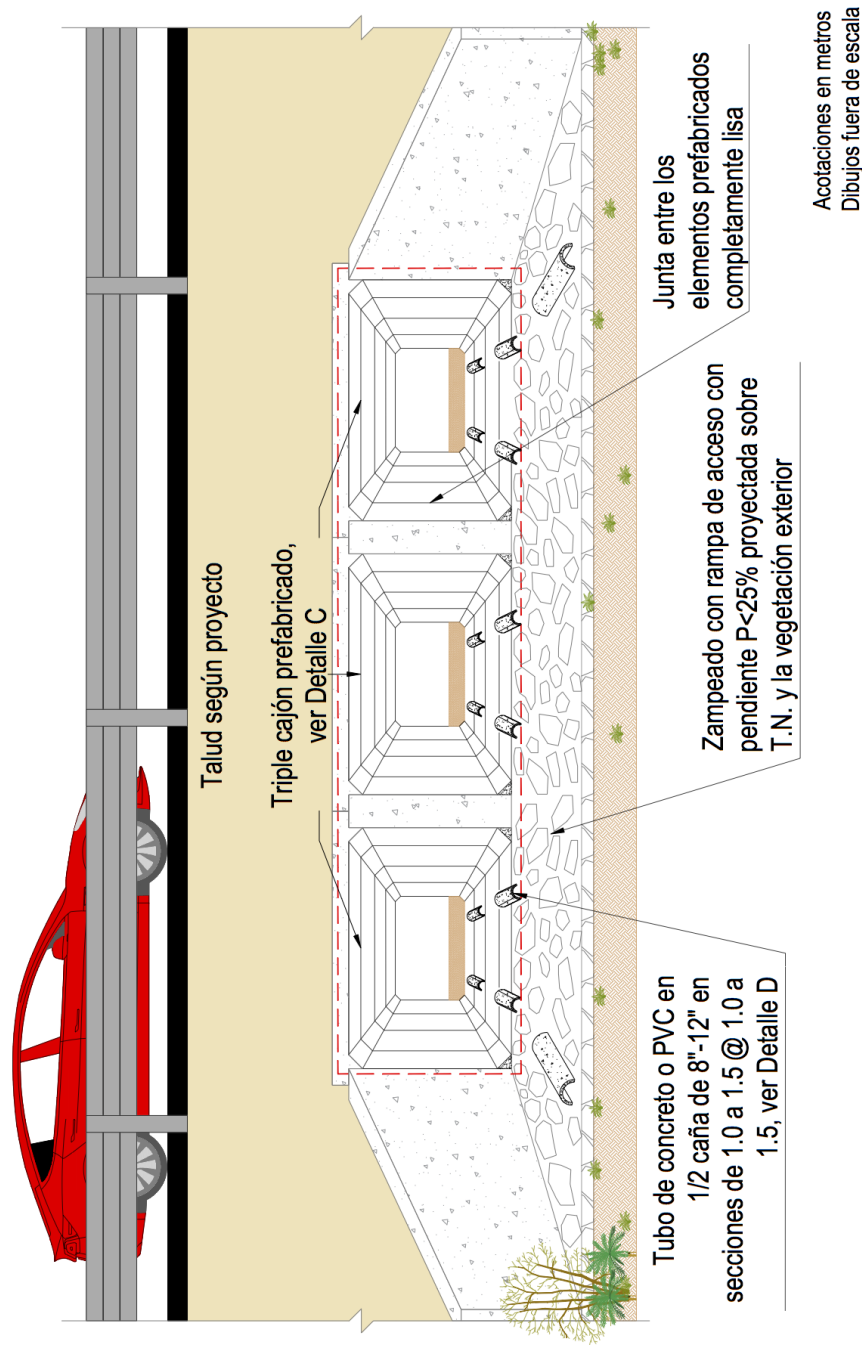
Detalles de obra de drenaje adaptada para función mixta mediante cajón prefabricado.

Plano 15



Elevación de paso para fauna habilitado con estructura para obra de drenaje prefabricada de doble cajón.

Plano 16



Elevación de paso para fauna habilitado con estructura para obra de drenaje prefabricada de triple cajón.

4) Paso para fauna embebido en la infraestructura lineal

En un país como México, que ocupa el 2° lugar en riqueza de reptiles con 804 especies, el 4° lugar en riqueza de anfibios con 361 especies, y con gran cantidad de hábitats de humedal y zonas tropicales húmedas por las que cruzan diversos tipos de infraestructuras lineales, es imperativo instalar en carreteras y vías férreas existentes, pasos para permitir el cruce de estos organismos, así como considerarlos en la infraestructura lineal en proyecto, con la misma importancia con que se consideran pasos para otras especies como jaguares o monos.

La mayoría de los anfibios necesitan cuerpos de agua para su reproducción, no obstante, en temporadas no reproductivas de su ciclo de vida, suelen vivir en agua, márgenes de ríos y embalses o en tierra, algunos de ellos incluso bruman⁶⁴ enterrados cuando las condiciones ambientales son adversas. Muchos de ellos migran estacionalmente entre tipos de hábitats: en primavera, los adultos migran de sus hábitats invernales a sus sitios de reproducción y de ahí a sus sitios de hábitat terrestre; en el verano, después de su metamorfosis, los juveniles dejan sus pozas de nacimiento para migrar a hábitats terrestres; en otoño, algunas especies migran de regreso a sus hábitats de invierno. Asimismo, algunos anfibios regresan a sus pozas de nacimiento año tras año para reproducirse. Todos estos movimientos requieren medidas específicas para el cruce seguro de la infraestructura lineal, lo que implica implementar medidas para facilitar su paso y reducir el atropello. Los anfibios y reptiles pequeños son atropellados con gran frecuencia en carreteras del país, no obstante, por su tamaño y estructura ósea, rápidamente desaparecen de la carpeta asfáltica, quedando poca evidencia de dichos atropellos, por lo que muchas veces son subestimados.

Estas especies no necesitan tipos especiales de pasos, sin embargo, es importante instalar suficiente cantidad de éstos en zonas críticas que permitan la movilización de los animales. Los anfibios son muy susceptibles a deshidratarse, particularmente los juveniles, por ello, los pasos largos y secos no son tan adecuados y es preferible instalar pasos que permitan conservar cierto grado de humedad en su interior.

Los pasos para fauna embebidos en la infraestructura lineal permiten el paso de pequeños organismos, principalmente anfibios y reptiles. Estas estructuras se construyen a partir de resinas sintéticas, concreto hidráulico o concreto polimérico. Este tipo de pasos quedan inmersos en la estructura del pavimento y su altura no rebasa los 0.5 m, por lo que se presentan como muy buenas alternativas para facilitar una cantidad suficiente de pasos para estos organismos con un costo muy bajo.

Asimismo, se han implementado pasos embebidos en la estructura de las vías férreas colocando canaletas, con o sin rejilla, entre los rieles y el balastro de la vía férrea (Figura 74).

⁶⁴ La brumación es un tipo de dormancia o letargo caracterizado por una disminución drástica de la actividad del organismo en condiciones de frío, sequía, falta de alimento, propio de animales ectotermos (de sangre fría) como los anfibios y reptiles. En la hibernación los animales son capaces de mantener su temperatura orgánica constante, con independencia de las variaciones ambientales, mientras que en la brumación esta capacidad no existe, ya que los anfibios y reptiles son incapaces de regular su temperatura corporal por medios propios.

Figura 74



Paso embebido para anfibios con rejilla metálica implementada en una carretera en el Parque Nacional Doñana, España (foto de Joaquim Pedro Ferreira, tomada de internet).



Canaleta abierta inmersa en la estructura ferroviaria para el paso de anfibios y pequeños reptiles instalada en Japón (imagen de Digizona.com).

Criterios

Los criterios que se deben tomar en cuenta para el diseño y construcción de este tipo de paso para fauna son:

- a) Implementar conductos, canales o tuberías de resinas sintéticas, concreto hidráulico o concreto polimérico, entre otros materiales.
- b) Se pueden utilizar módulos de concreto polimérico prefabricado de dimensiones 0.5 x 0.5 m +/- 0.1 m.
- c) La longitud se determina de acuerdo con el proyecto geométrico de la infraestructura lineal, proyectando el túnel hacia el final de la corona (Figura 75).
- d) Instalar barreras de protección de materiales sintéticos, reciclados o de concretos con la mayor longitud que permita el límite de derecho de vía a cada lado de la obra y de acuerdo con la topografía. La altura será de 0.4 a 0.6 m con borde superior curvo para evitar que los animales trepen por la barrera. No se recomienda utilizar mallas pues pueden colarse por las aberturas o trepar por la malla.
- e) Colocar tapa de rejilla o respiraderos en la parte superior de los conductos para el paso de luz, humedad y aire según el tipo de infraestructura.
- f) Revegetación de los accesos y vegetación de la base exterior de la barrera de inducción para evitar que la fauna excave y se fugue por las oquedades del terreno.
- g) Asegurar una pendiente en el paso que permita el bombeo de agua en su interior por gravedad. Se debe considerar una pendiente entre el paso y el terreno natural menor a 25%.

Consideraciones generales

Para el diseño y construcción de estos pasos para fauna se deberán tomar las siguientes consideraciones generales:

- a) Este tipo de pasos para fauna cruzan por debajo de la infraestructura lineal y pueden construirse o instalarse mediante elementos prefabricados. Sus dimensiones varían de acuerdo con la talla de las especies de interés, con especificaciones particulares de diseño para la herpetofauna (anfibios, lagartijas, cocodrilos pequeños, tortugas pequeñas, serpientes, etc.), adicionales a las propuestas para otras especies como los mamíferos.
- b) Estos pasos se pueden fabricar *in situ* o implementar prefabricados según se disponga en el proyecto, observando lo siguiente:
 - i. Para que estos pasos funcionen adecuadamente será necesario que exista una continuidad del hábitat o se planteé la restauración de éste, de modo que dicha continuidad del hábitat cuente con cierto grado de humedad de un lado y del otro de la infraestructura lineal.
 - ii. El diseño y los materiales seleccionados dependerán del sitio y de las especies de interés.

- iii. En carreteras de más de 2 carriles es necesario colocar rejillas o respiraderos, para el paso de luz, aire y humedad al interior de la estructura, esto para alentar el uso de estos pasos para fauna por parte de los anfibios y reptiles.
 - iv. Los módulos prefabricados de concreto polimérico son resistentes a las condiciones climáticas. Su interior liso permite que los anfibios se deslicen con facilidad. Estos módulos se integran a la estructura del pavimento y sus juntas no producen interrupciones en el funcionamiento de la carpeta.
 - v. Los prefabricados contemplan tramos de barrera de protección curva hecha de plástico reciclado ligero y duradero, de fácil instalación, con los que se pueden conformar barreras de diferentes longitudes para encausar el movimiento de los organismos hacia el paso. La curvatura evita que los animales trepen por estas barreras y pasen del otro lado, ya que, por la curva, caen en el sitio de partida. Estas barreras deben cubrirse en su contacto con el terreno natural con arcilla formando un sello y vegetación herbácea para evitar que los animales excaven o se fuguen por el espacio entre el terreno y la barrera.
 - vi. Cubrir el fondo de los pasos con material lodoso y hojarasca.
 - vii. Los accesos a los túneles no deberán estar obstruidos, se debe brindar el mantenimiento necesario para evitar azolves y obstrucciones con objetos que puedan caer o ser acarreados por el agua. Esto se puede evitar con la colocación de rejilla metálica en su parte superior que permita su limpieza periódica.
- c) Para no dificultar los movimientos de los animales, la superficie del terreno adyacente debe descartar desniveles. La cobertura vegetal será útil en los alrededores para ofrecer refugio a los individuos en su aproximación al paso; es recomendable utilizar especies herbáceas y arbustivas que puedan ayudar al camuflaje de las especies o a orientar a los animales desde el paso hacia el medio natural.
- d) Es relevante considerar la colocación de montículos de rocas o material vegetal muerto en las entradas y salidas de las obras, sin obstruir éstas, ya que ayudarán a generar refugios para estos grupos de animales.
- e) Además del uso de este tipo de pasos por parte de anfibios y reptiles, también podrán ser usados por mamíferos pequeños como es el caso de los roedores, martas, tlacuaches, etcétera.

Figura 75

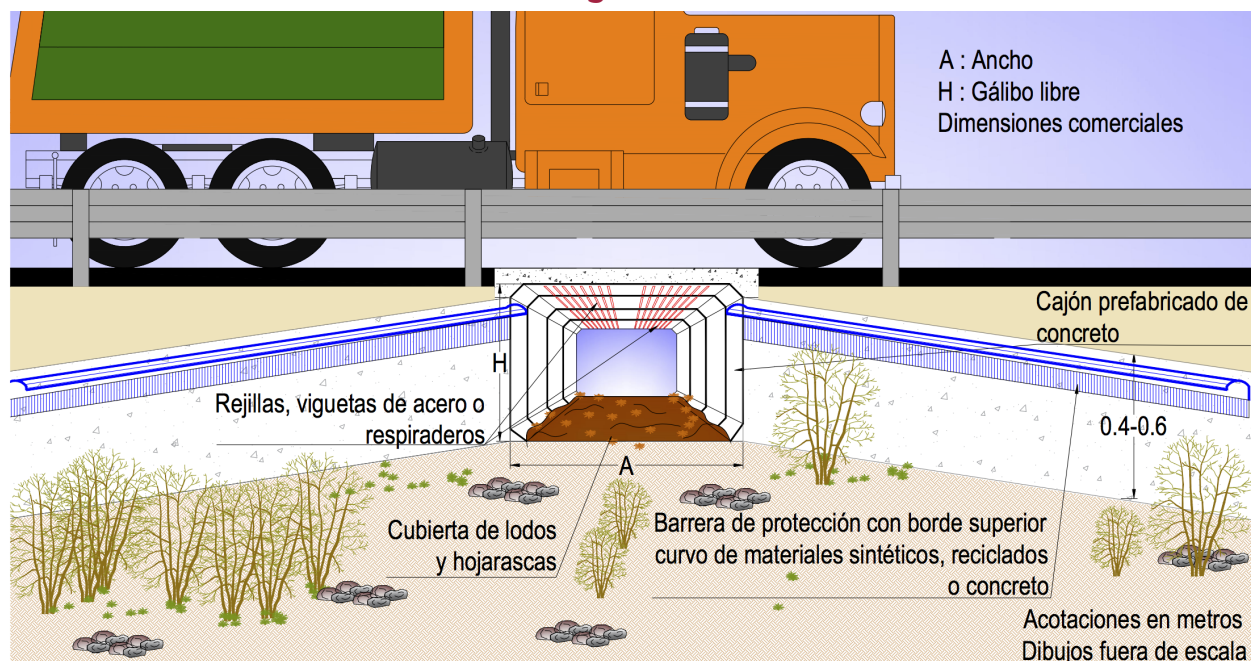
Vista de las barreras sólidas de 0.4-0.6 m de alto, selladas con arcilla en su base y con bordes curvos invertidos para encauzar a los anfibios y reptiles hacia el paso y evitar que trepen por ellas.⁶⁵

Adaptaciones particulares de los pasos embebidos en la estructura de carreteras o vías férreas para el uso por otros organismos

A continuación se señalan algunas recomendaciones adicionales para adaptar estos pasos a diversas formas, tamaños y modo de desplazamiento de los organismos.

Aves que apeonan

En el caso de codornices (perdices), correcominos y otras aves que apeonan, se pueden diseñar dimensiones mayores de este tipo de pasos para considerar la alzada de estas especies.

Figura 76

Esquema de paso para fauna embebido en la infraestructura lineal para reptiles de mediano tamaño, anfibios e invertebrados.

⁶⁵ Iuell, B. (2003). "Wildlife and Traffic: a European handbook for identifying conflicts and designing solutions", en The XXIIInd PIARC World Road Congress World Road Association-PIARC.

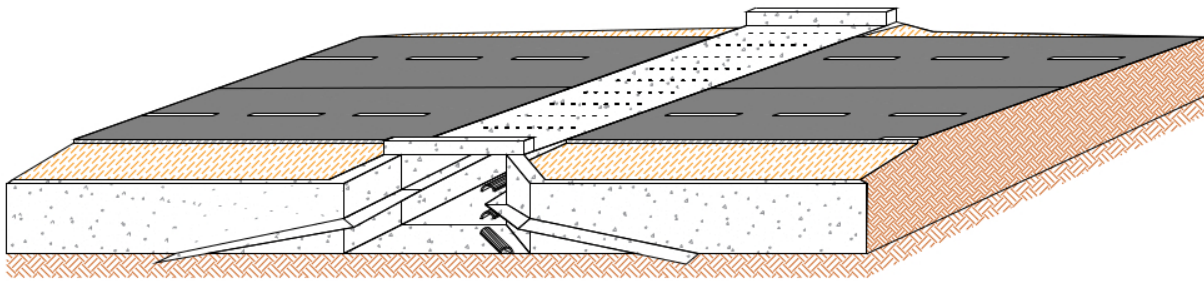
*Recomendaciones particulares para un paso embebido en la infraestructura lineal*⁶⁶

1. Las estructuras rectangulares son preferibles para anfibios ya que las paredes rectas brindan una buena dirección de sus movimientos.
2. No se recomienda el uso de estructuras de metal galvanizado porque son evitadas por varios organismos al tomar una temperatura muy alta en estiaje y muy fría en el invierno y otoño en algunas regiones, lo que desincentiva su uso por animales poiquiloterms.⁶⁷ En caso de utilizar canaletas metálicas, éstas deberán tener un recubrimiento plástico o un fondo con material natural para evitar el efecto repelente del metal.
3. En carreteras o ferrocarriles existentes puede ser más económico y fácil la colocación de canaletas de concreto, resina o metal galvanizado con algún recubrimiento plástico y material natural en el fondo para incentivar el uso.
4. Se debe verificar que la junta entre los prefabricados sea completamente lisa, creando una superficie uniforme.
5. Es recomendable la construcción de un parapeto en la parte alta de la entrada de la obra del paso para bloquear los reflejos de luces y ruidos de los vehículos que circulan por encima de la obra.
6. Los accesos de los pasos deben quedar libres de perturbación humana y conectados con la vegetación aledaña y/o los sitios de humedal próximos mediante la colocación de plantas, troncos y otros elementos del paisaje natural que les sirvan de refugio y orientación hacia las zonas de humedal, ubicados sobre el terreno natural o terraplén con baja pendiente, que permita el acceso a los pasos desde el nivel natural del terreno.
7. Se recomienda instalar varios pasos en forma paralela para maximizar su eficiencia y el área de captación de animales, combinando sus barreras inductoras.
8. No debe permitirse el desarrollo urbano, caminos, senderos o cambios de usos del suelo en los puntos de contacto de estos pasos con el ecosistema natural.
9. Queda terminantemente prohibido realizar la caza o captura de animales en el cruce de estos pasos; situación que deberá salvaguardar el administrador de la carretera o vía férrea sobre la que se ubican. No pueden realizarse actividades de caza o captura en al menos una distancia de 1 km de radio desde el centro del paso.
10. El diseño y construcción de estas estructuras debe apearse a las especificaciones de los manuales y normas técnicas de la SCT.

⁶⁶ Algunas recomendaciones han sido adaptadas de Luell, B. (2003). "Wildlife and Traffic: a European handbook for identifying conflicts and designing solutions", en The XXIInd PIARC World Road Congress World Road Association-PIARC.

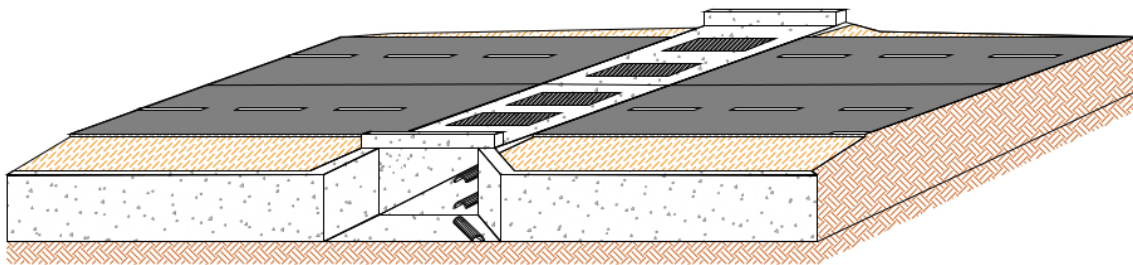
⁶⁷ Que carece de mecanismos internos reguladores de la temperatura del cuerpo, por lo que ésta varía más o menos con la temperatura ambiental. Por ejemplo, anfibios y reptiles.

Figura 77



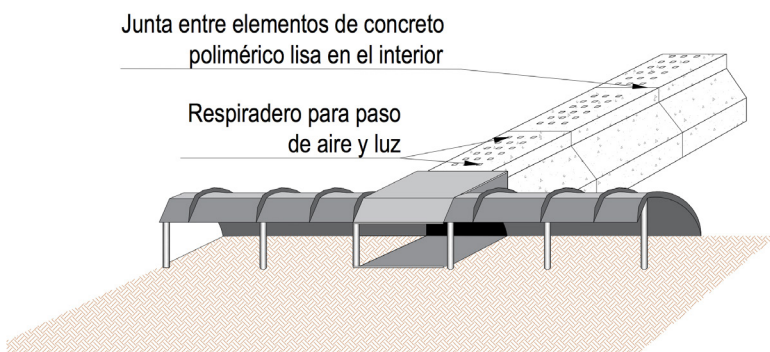
Vista conceptual de un paso para fauna embebido en la infraestructura lineal tipo cajón con respiraderos en tapa superior, repisas y tubos de resguardo apto para herpetofauna.

Figura 78



Vista conceptual de un paso para fauna embebido en la infraestructura lineal tipo cajón con rejilla en tapa superior y tubos de resguardo apto para herpetofauna.

Figura 79

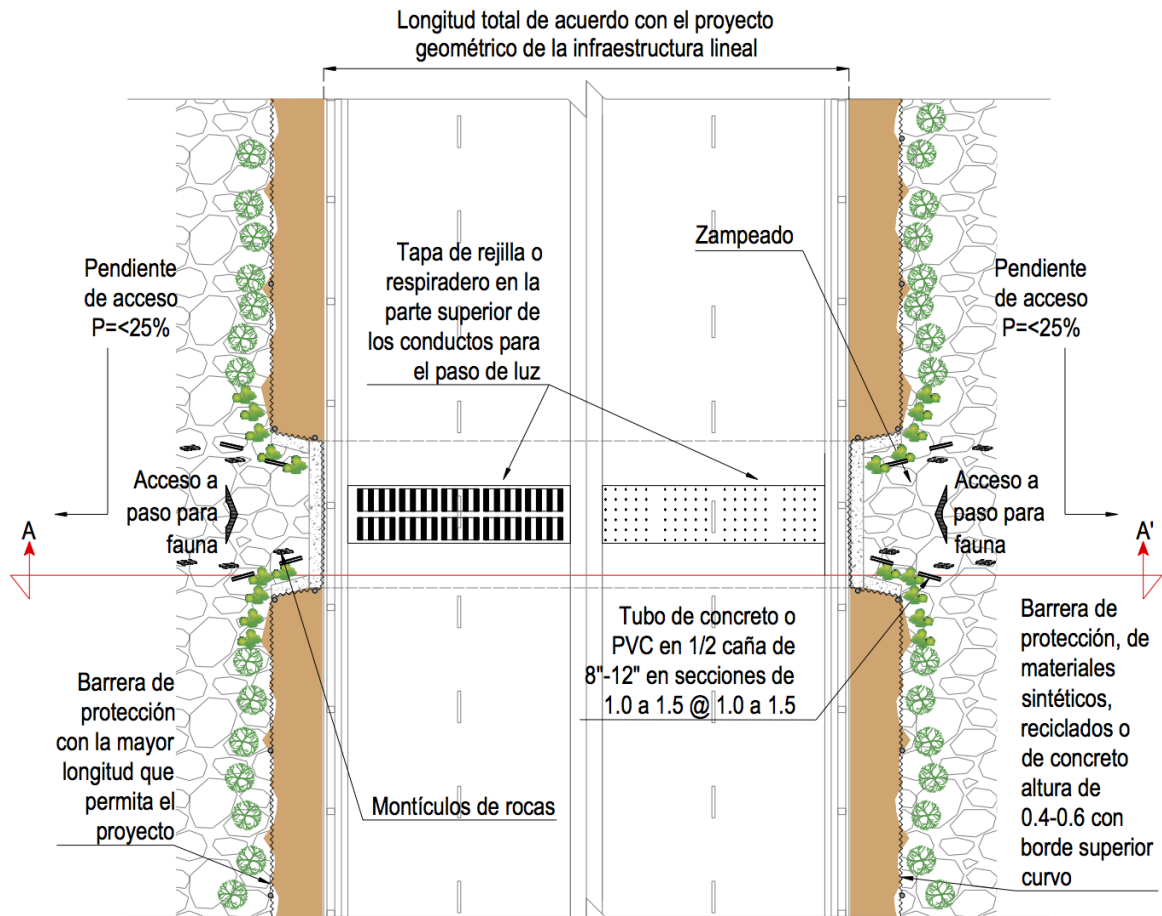


Vista conceptual de un paso para fauna embebido en la infraestructura lineal tipo prefabricada modular de concreto polimérico con barreras curvas de plástico reciclado apto para herpetofauna.

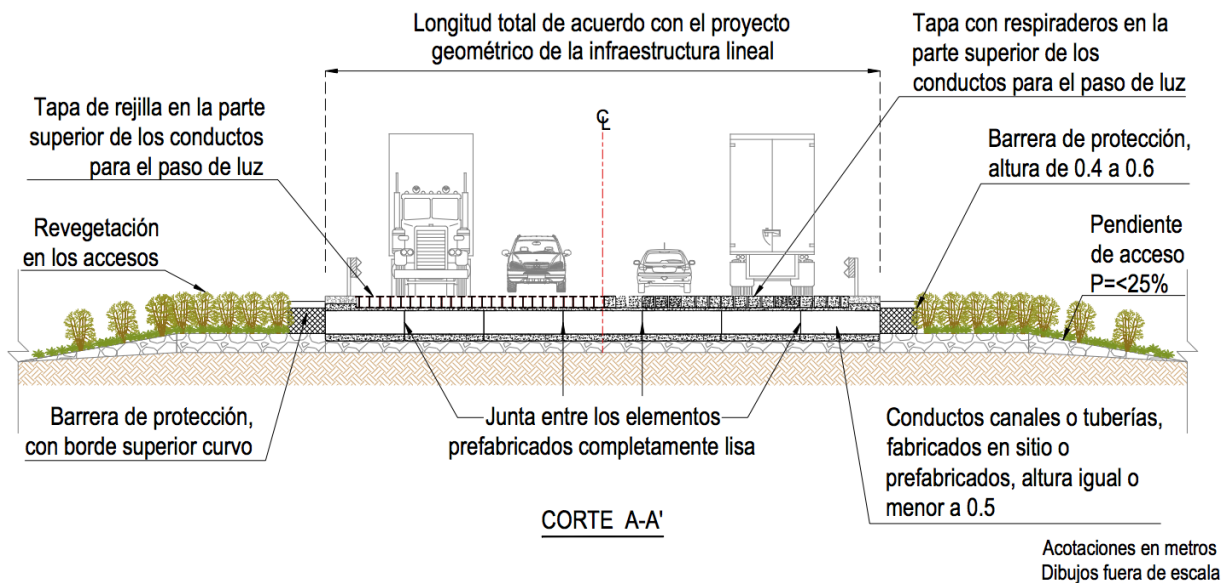
En los planos orientativos 17 a 21-A se muestra gráficamente el diseño “tipo” antes descrito para desarrollar un proyecto de paso para fauna embebido en la infraestructura lineal.

PLANOS ORIENTATIVOS

Plano 17



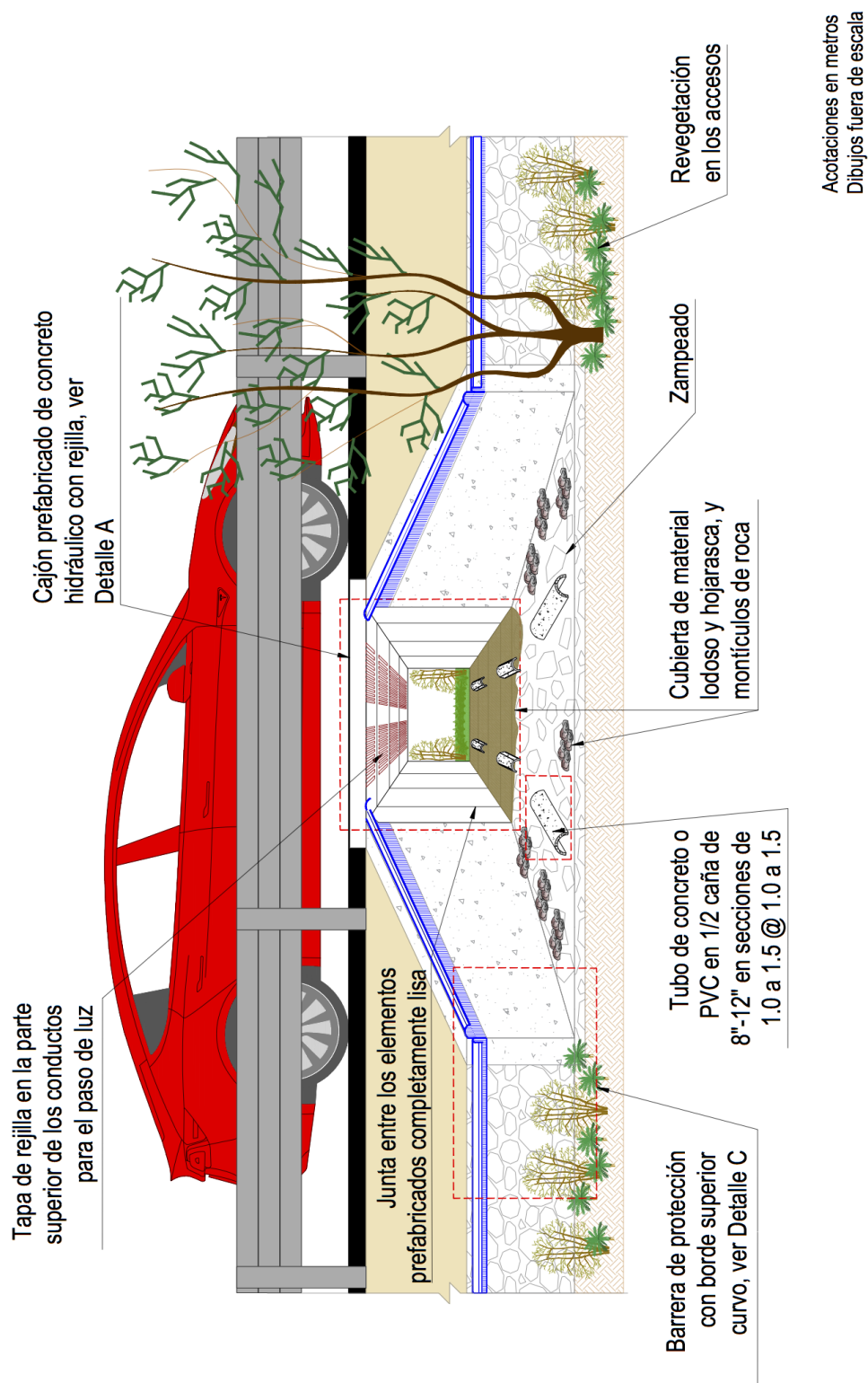
PLANTA TIPO A NIVEL DE LA INFRAESTRUCTURA LINEAL



CORTE A-A'

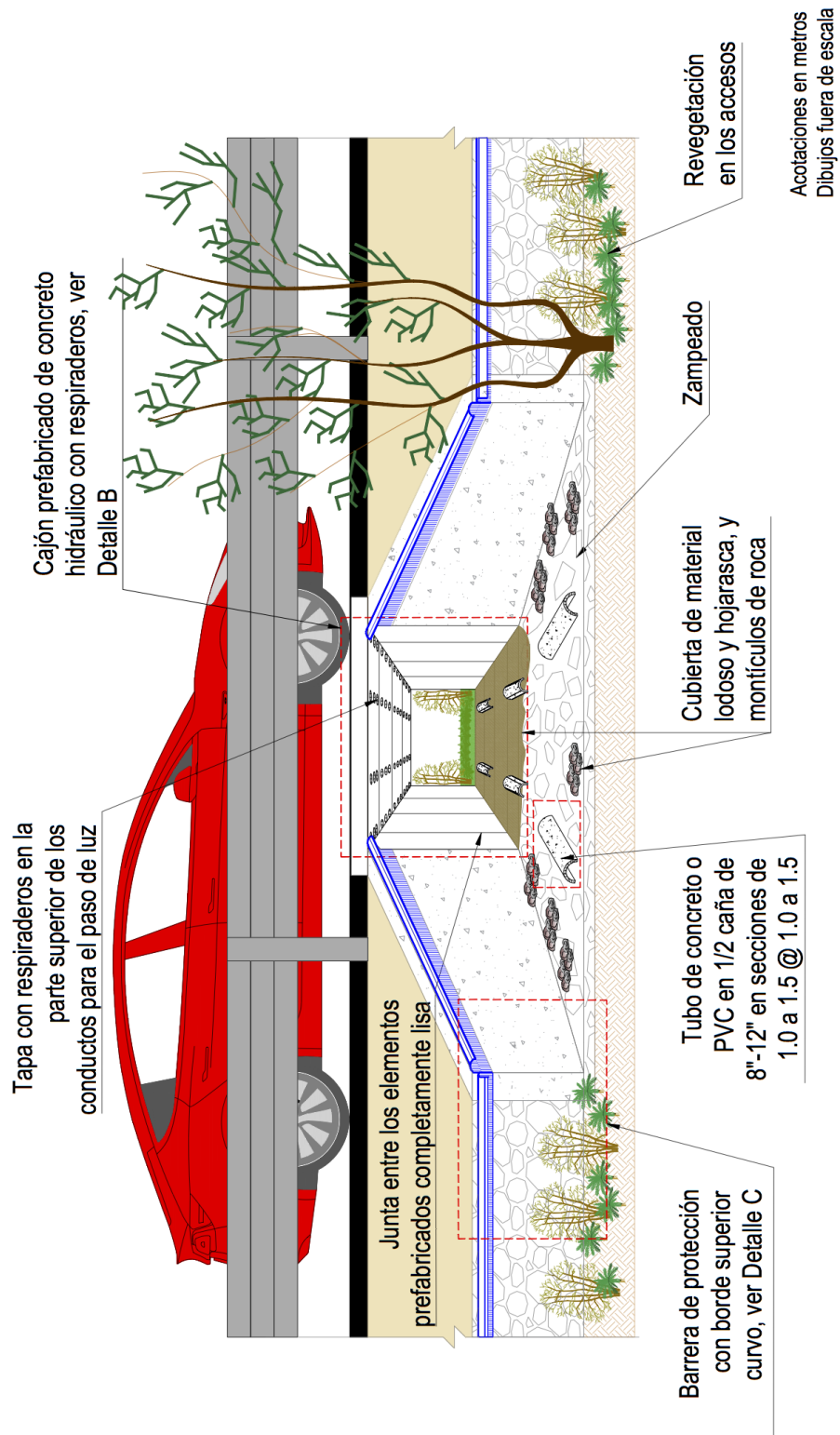
Planta tipo y corte A-A' de paso para fauna embebido en la infraestructura lineal mediante cajón prefabricado.

Plano 18



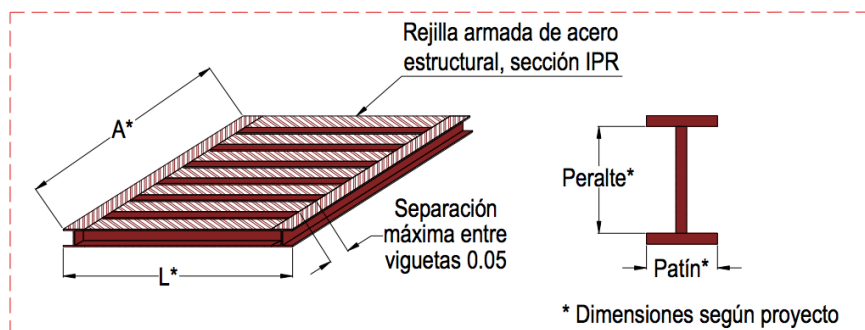
Elevación de paso para fauna embebido en la infraestructura lineal mediante cajón prefabricado con rejilla.

Plano 19

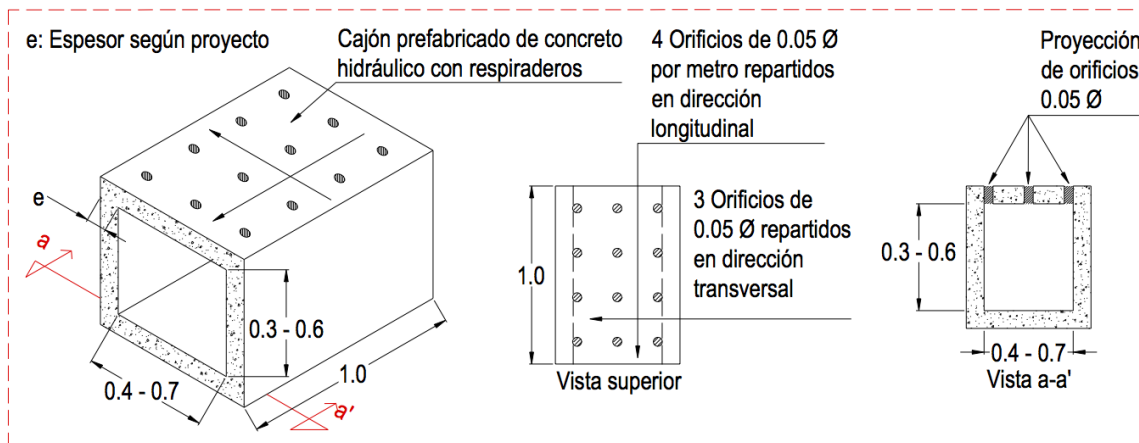


Elevación de paso para fauna embebido en la infraestructura lineal mediante cajón prefabricado con respiraderos.

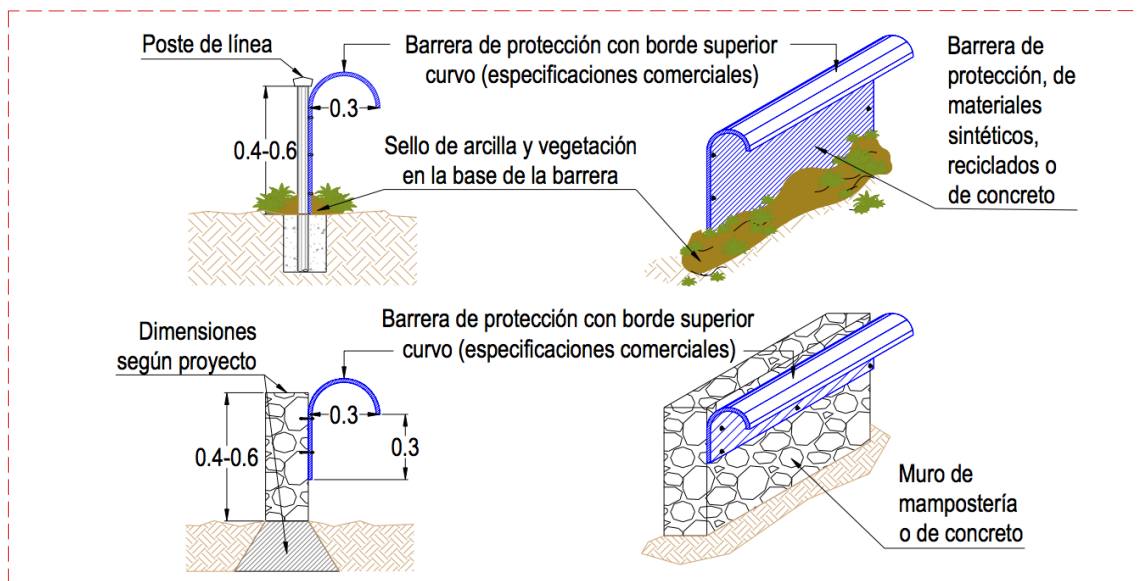
Plano 20



DETALLE A



DETALLE B

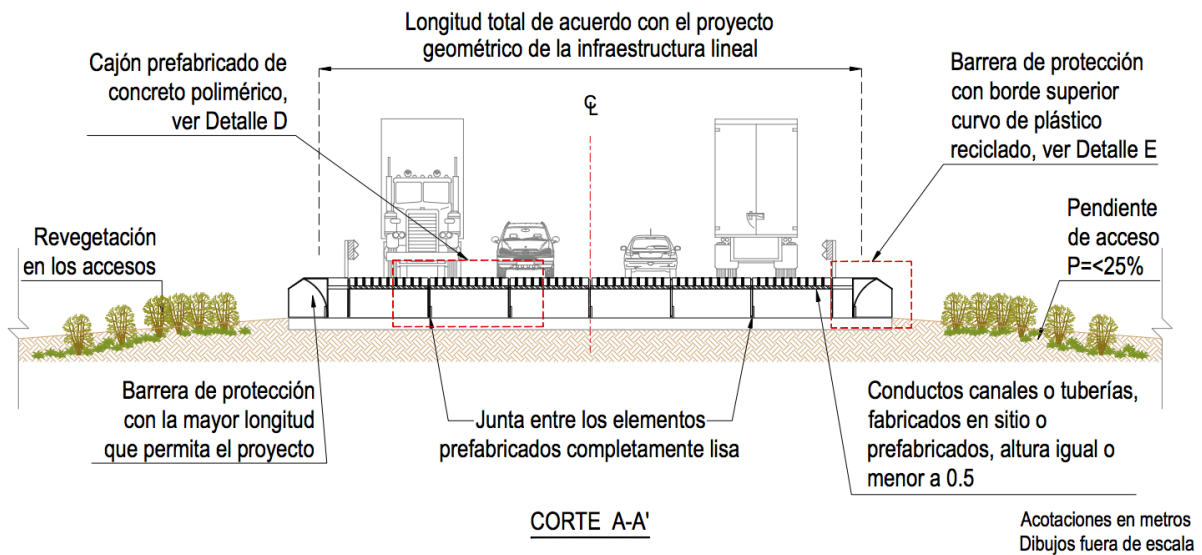
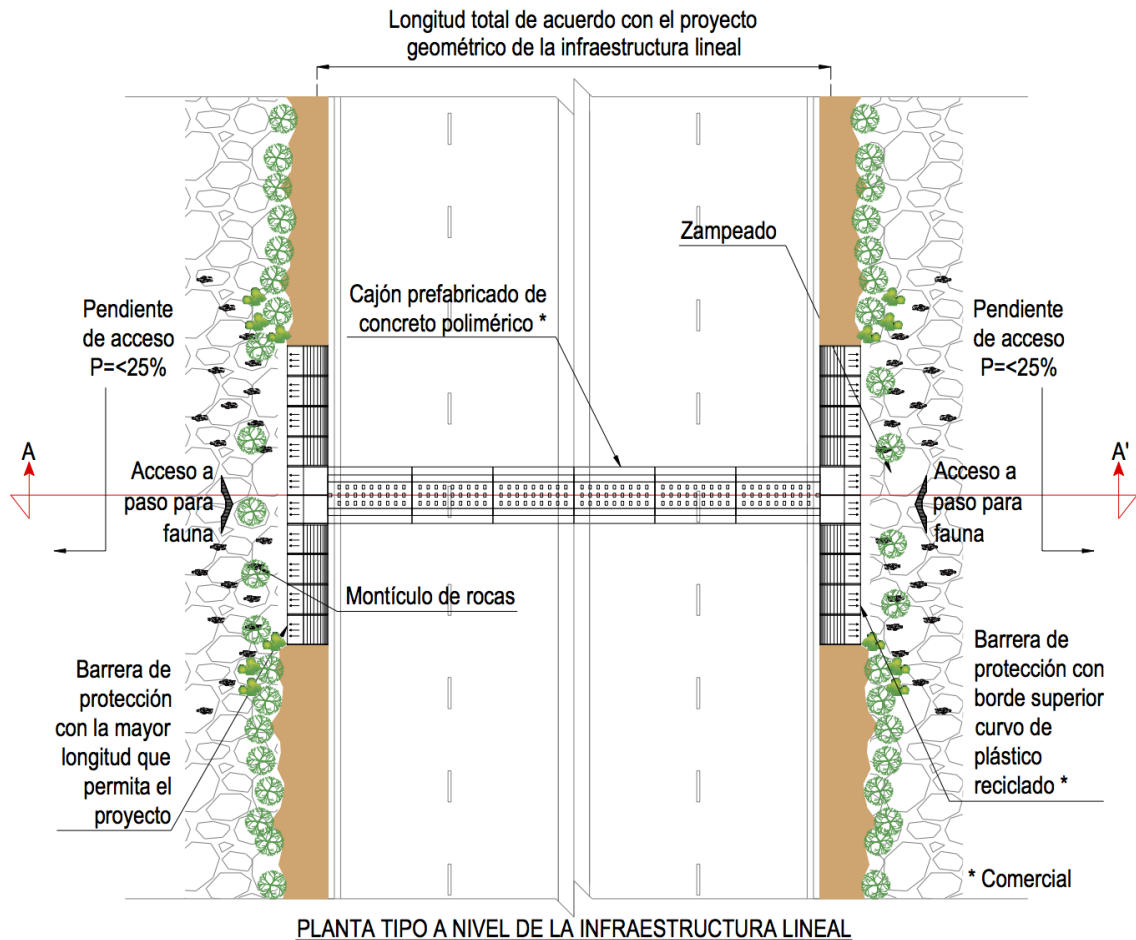


DETALLE C

Acotaciones en metros
Dibujos fuera de escala

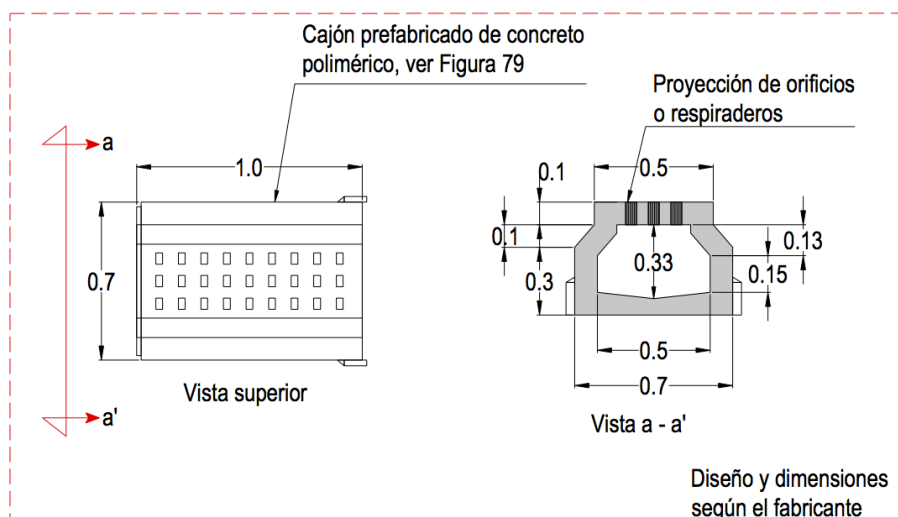
Detalles de paso para fauna embebido en la infraestructura lineal mediante cajón prefabricado.

Plano 21

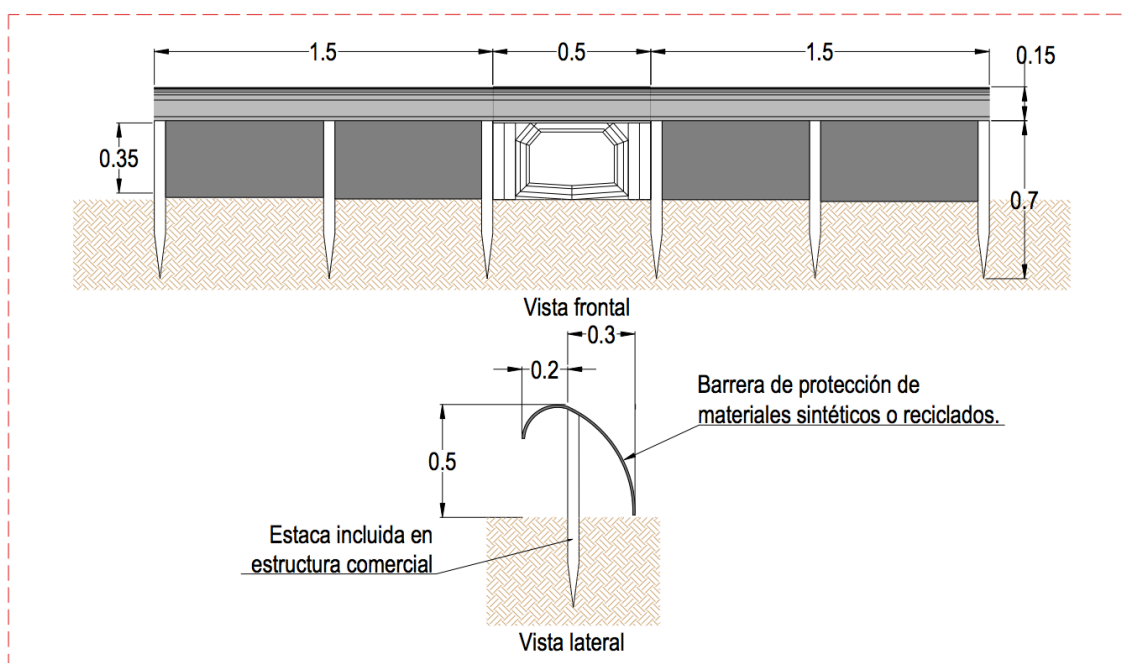


Planta tipo y corte A-A' de paso para fauna embebido en la infraestructura lineal mediante cajón prefabricado de concreto polimérico (ver figura 79).

Plano 21-A



DETALLE D



DETALLE E

Acotaciones en metros
Dibujos fuera de escala

Detalles de paso para fauna embebido en la infraestructura lineal mediante cajón prefabricado de concreto polimérico.

5) Paso aéreo para fauna arborícola

Los mamíferos arborícolas y semiarborícolas, como los monos, ardillas, tlacuaches y los osos hormigueros, entre otros, necesitan de estructuras especiales para cruzar las rutas carreteras y férreas. En algunos países de Centroamérica, la India y África se han diseñado puentes colgantes simples que facilitan el cruce de los primates particularmente. Estas estructuras se construyen con cables de acero recubiertos con manguera de plástico o goma formando tramados a manera de escaleras colgantes. Se instalan desde árboles altos a los costados del camino y/o mediante postes de concreto.

Estudios previos realizados en Brasil,^{68,69} Australia,⁷⁰ India⁷¹ y Kenia⁷² han demostrado la eficacia y funcionamiento de los pasos aéreos, no sólo con monos sino también con otras especies de fauna como tlacuaches y puercoespines, los cuales se encuentran presentes en las zonas tropicales y templadas, y pueden verse favorecidos por la construcción de estos pasos aéreos para fauna. Las especies arborícolas requieren desplazarse por las copas de los árboles en busca de recursos, territorios y parejas. La búsqueda de alimentos representa una actividad muy importante que requiere el constante movimiento de los animales como los monos.⁷³ El desmonte para la construcción o ampliación de la infraestructura lineal en zonas donde habitan tropas de monos u otros animales arborícolas puede traer severas consecuencias ya que estos animales, al no encontrar árboles para desplazarse tratan de cruzar a pie la infraestructura lineal, con consecuencias fatales para la fauna y para los usuarios de la vía. La principal medida de mitigación para reducir este impacto es la construcción de pasos aéreos para fauna arborícola, con el fin de brindar alternativas de cruce para estos organismos en sitios estratégicos y reducir los atropellos de animales y las colisiones vehículo-animal.

La efectividad de estas estructuras puede ser influenciada por el índice de actividad humana en el área de los pasos para fauna, por lo que se recomienda minimizar la actividad antrópica en estas áreas y asegurar la permanencia de la cobertura vegetal arbórea que utilizan las especies arborícolas como hábitat y corredores de desplazamiento, de ahí la importancia de que la instalación de estos pasos cuente con una inserción en planes y proyectos de desarrollo regional y una buena coordinación con las

⁶⁸ Teixeira, F. Z., R. C. Printes, J. C. G. Fagundes, A. C. Alonso y A. Kindel (2013). "Canopy bridges as road overpasses for wildlife in urban fragmented landscapes". *Biota Neotropica* 13(1): 117-123.

⁶⁹ Lokschin, L. X., C. P. Rodrigo, J. N. H. Cabral y G. Buss (2007). "Power lines and howler monkey conservation in Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brazil". *Neotropical Primates* 14(2), 76-80.

⁷⁰ Goosem, M., N. Weston, y S. Bushnell, (2005). "Effectiveness of rope bridge arboreal overpasses and faunal underpasses in providing connectivity for rainforest fauna". En: 2005 International Conference on Ecology and Transportation (ICOET). Raleigh: North Carolina State University.

⁷¹ Karmakar R. (2012). "Primates take to ropeway across killer road". *Hindustan Times*. Disponible en: <https://www.hindustantimes.com/india/primates-take-to-ropeway-across-killer-road/story-wFgOFwP-5G57yA70IKaNTCN.html>.

⁷² Pragatheesh, A. (2011). "Effect of human feeding on the road mortality of Rhesus Macaques on National Highway-7 routed along Pench Tiger Reserve, Madhya Pradesh, India". *Journal of Threatened Taxa* 3(4): 1656-1662.

⁷³ Pozo-Montuy, G., y J. C. Serio-Silva (2006). "Comportamiento alimentario de monos aulladores negros (*Alouatta pigra* Lawrence, Cebidae) en hábitat fragmentado en Balancán, Tabasco, México". *Acta zoológica mexicana* 22(3): 53-66.

autoridades federales, estatales y municipales a cargo de los proyectos de desarrollo, crecimiento urbano y la conservación ambiental.

Los pasos para fauna para especies arbóreas y semi arbóreas generalmente están integrados por cables de acero fijados a postes de concreto a ambos lados de la infraestructura lineal que permiten que estos animales crucen de manera segura sobre la infraestructura lineal.

Como se mencionó previamente, estas estructuras son diseñadas en zonas boscosas y tropicales donde habitan especies como monos, puercoespines, osos hormigueros, ardillas, cuatíes, martas, serpientes, camaleones, iguanas, etc., con hábitos arborícolas y en donde la infraestructura lineal queda inmersa en masas de árboles por cuyas copas se mueven estos organismos.

Los pasos aéreos permitirán movimientos entre parches boscosos en muchos tipos y anchos de infraestructuras, por lo que requieren diseñarse adecuadamente para satisfacer las necesidades de especies particulares de acuerdo con la zona en la que habitan (Figura 80).

Es muy importante que se mantenga la continuidad de la cobertura forestal arbórea con el paso para fauna construido, garantizando que a lo largo del tiempo pueda seguir existiendo la cobertura vegetal requerida, lo que puede fortalecerse con la siembra de juveniles de las mismas especies arbóreas existentes para crear una sucesión generacional. Asimismo, en caso de que sea baja la densidad de árboles presentes en los límites del derecho de vía y terreno aledaño, se recomienda sembrar varios árboles más en las inmediaciones del paso para conectar el paso con éstos, una vez que hayan crecido lo suficiente.

Existe una gran variedad de opciones para la construcción de pasos aéreos para fauna, adecuados a las circunstancias de cada proyecto, topografía y características ambientales del sitio. En este Manual se presentan algunas opciones orientativas más no limitativas. En cada caso particular se debe definir la estructura adecuada para el fin que se persiga.

Figura 80



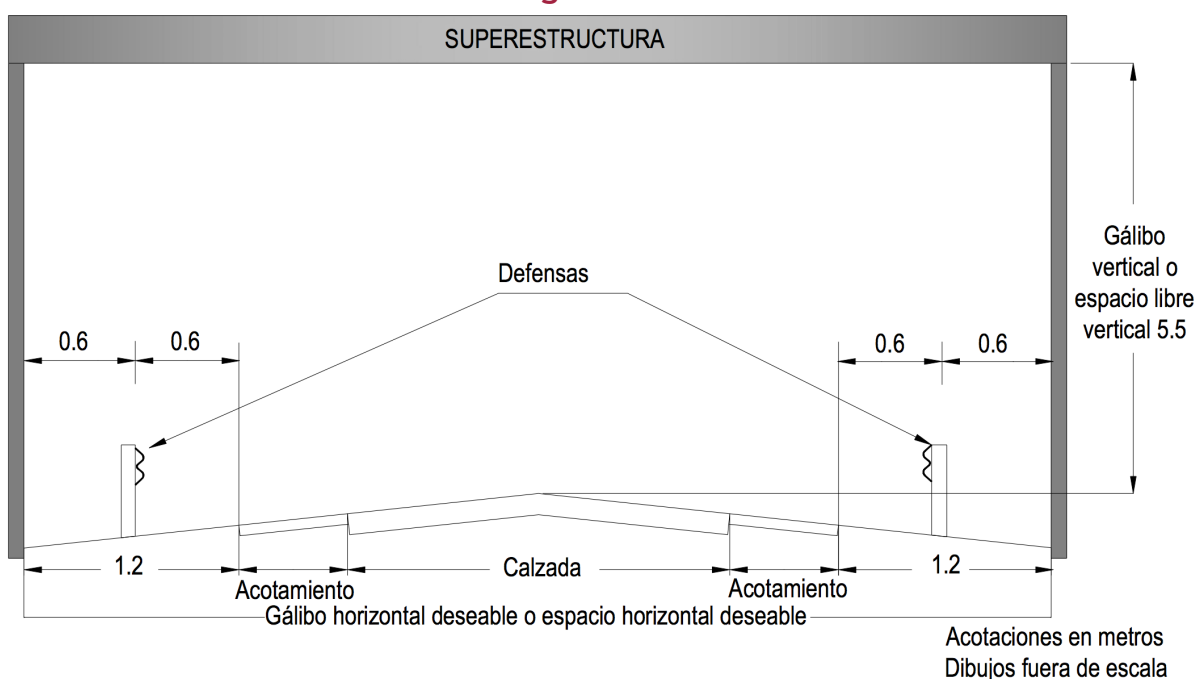
Paso aéreo para fauna arborícola ubicado en la Autopista Kantunil-Cancún, Quintana Roo (fuente: Grupo Selome, S.A. de C.V.).

Criterios

Los criterios que se deben tomar en cuenta para el diseño y construcción de este tipo de paso para fauna son los siguientes:

- Se requiere la implementación de 2 postes de concreto colocados en ambos lados de la infraestructura lineal, separados entre sí a una distancia aproximada de 1.5 m a partir del eje de cada poste. Cada poste cuenta con una retenida de acero anclada al terreno natural.
- De acuerdo con la Norma N-PRY-CAR-6-01-002 Características Generales de Proyecto de Puentes y Estructuras Similares se establece una separación de 0.6 m del acotamiento a la barrera de protección de la carretera y la separación de esta barrera a los postes del paso para fauna arborícola debe tener una distancia de 0.6 m, que conforman un gálibo horizontal deseable y cumpliendo además con un gálibo vertical no menor a 5.5 m.

Figura 81

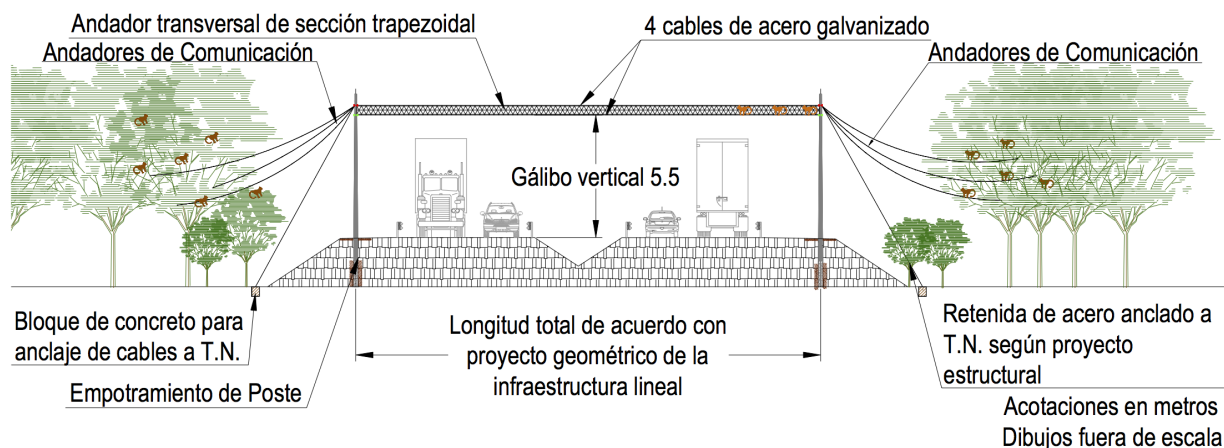


Configuración de los pasos para fauna arborícola con respecto al cuerpo de la infraestructura (N-PRY-CAR-6-01-002).

- Instalación de 4 cables de acero fijados a los postes de concreto, en configuración trapezoidal, separados horizontalmente en el lecho inferior a una distancia de 1.0 m y en el lecho superior de 2.0 m, verticalmente los lechos están separados a una distancia de 0.6 m. Los cables del lecho inferior se extienden hasta los árboles o hasta el terreno natural.
- Adicionalmente colocar andadores de comunicación del paso para fauna hasta las copas de los árboles para facilitar el movimiento de todo tipo de organismos arborícolas, no solamente de los monos. Para estos andadores

de comunicación considerar la colocación de cuerdas y entramados de nylon adecuados para soportar el peso de los animales para los cuales se está considerando el diseño

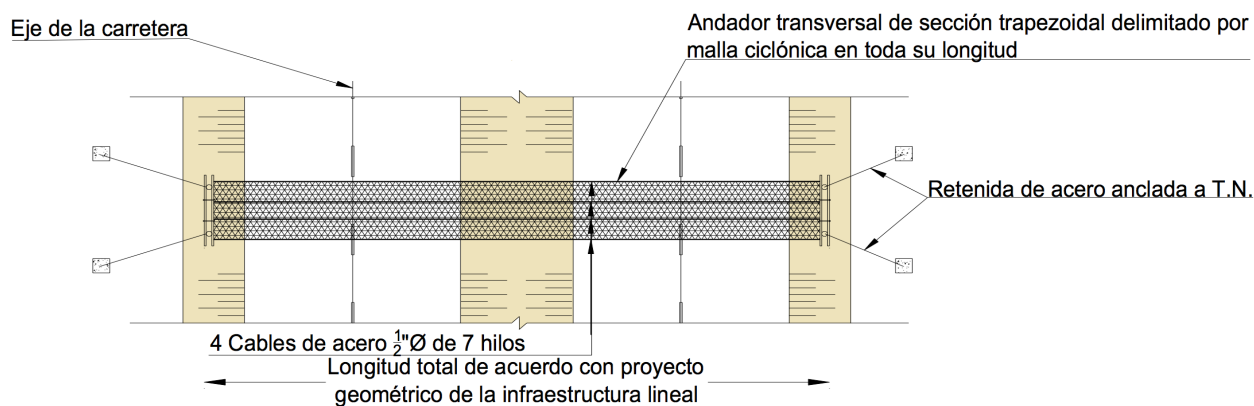
Figura 82



Esquema de paso aéreo para fauna arborícola con dos postes de concreto.

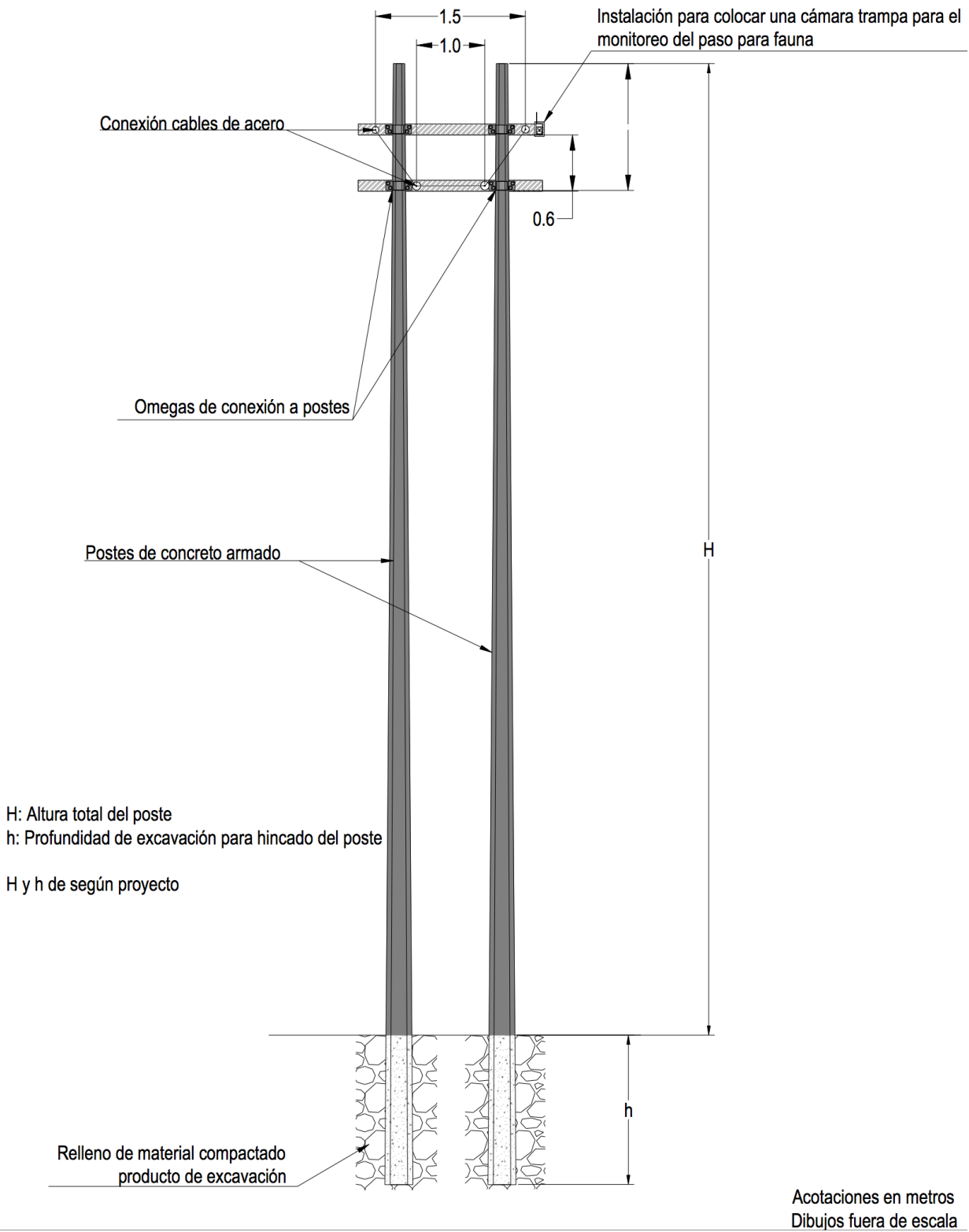
- e) El paso para fauna arborícola situado transversal al eje del camino cubre el ancho total de la calzada de la carretera más sus acotamientos, aunque este ancho total variará según la sección y el esviaje del paso aéreo, pues las condiciones topográficas y de vegetación definirán su orientación con respecto al eje de trazo del camino.

Figura 83



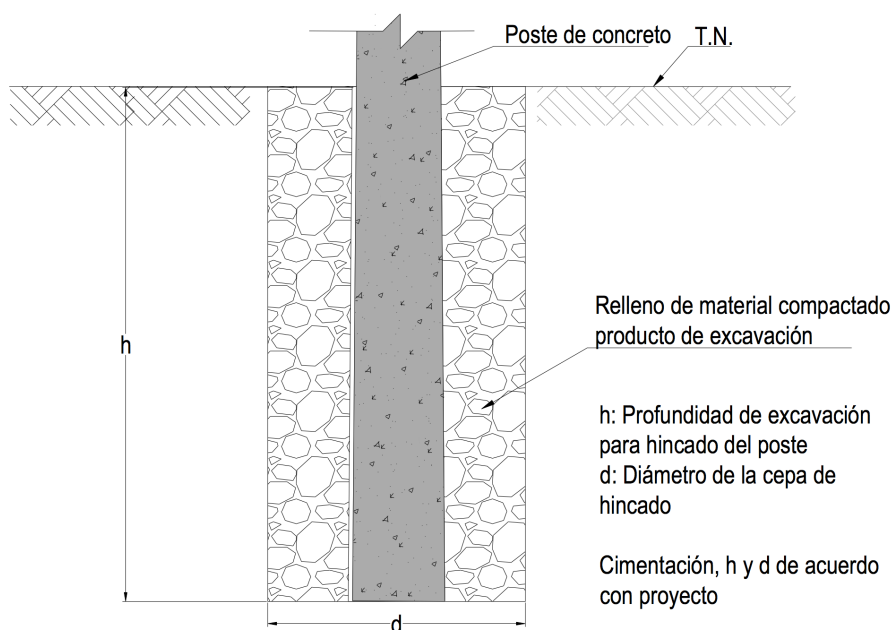
**Esquema en planta del paso aéreo con respecto al eje de la carretera.
En el caso de claros largos se deberán colocar postes intermedios.**

Figura 84



Esquema tipo de los postes de concreto implementados en los pasos para fauna arborícola.

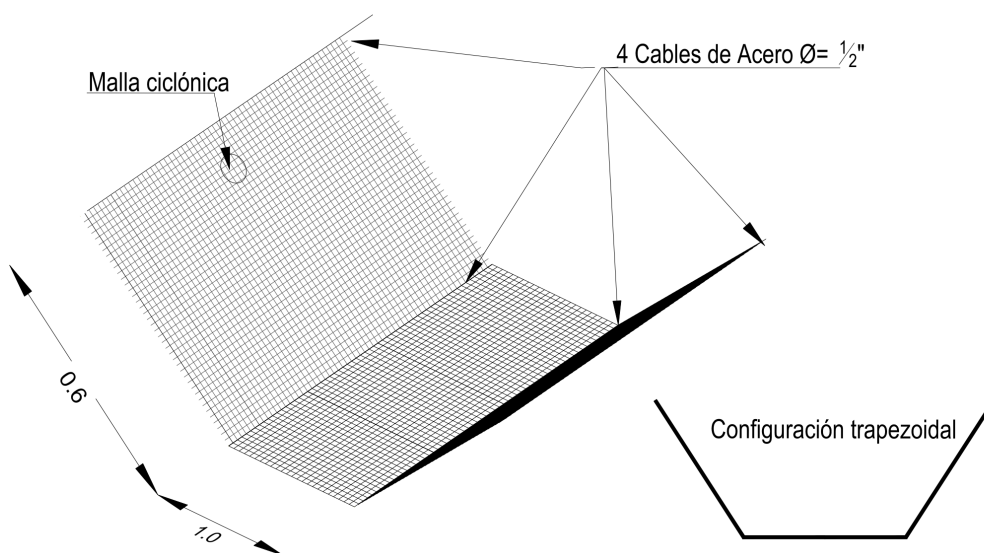
Figura 85



Ejemplo ilustrativo de poste de concreto empotrado al terreno natural.

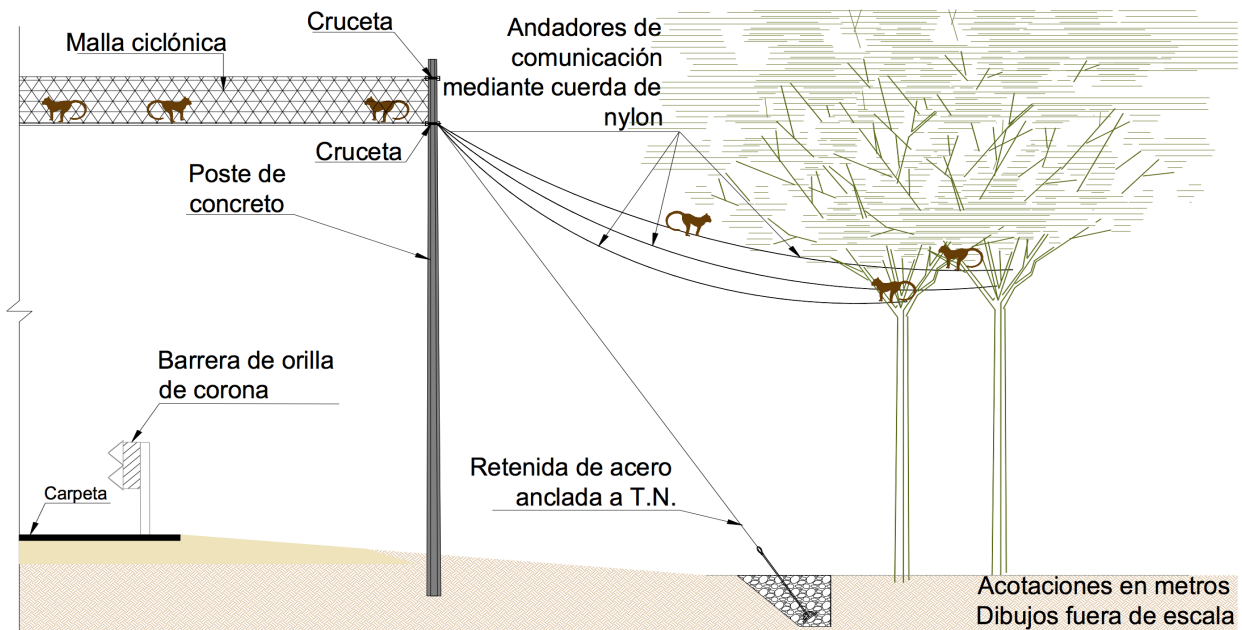
- f) El andador transversal a la infraestructura lineal de sección trapezoidal formado por los cables de acero, se delimita por una malla ciclónica en toda su longitud, misma que estará sujeta a los cables y postes del paso. También se implementan tabloncillos de madera en la base del andador.

Figura 86



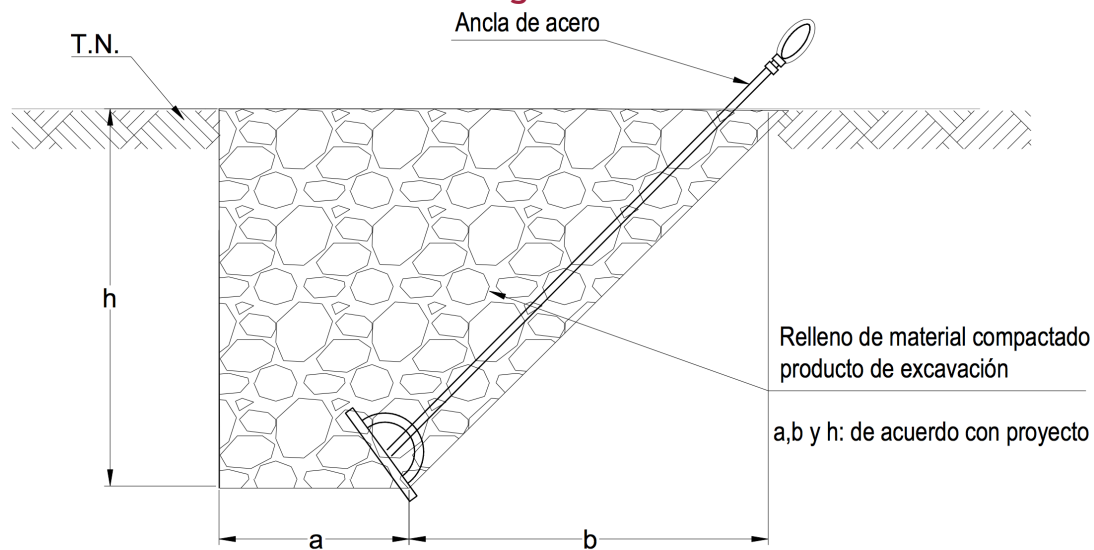
Ejemplo de configuración en planta del andador.

- g) La implementación de pasos para fauna arborícola en ferrocarriles debe sujetarse a estudios específicos que consideren el sitio y las características del proyecto, particularmente cuando se trate de ferrocarriles de alta velocidad, ya que la vibración y turbulencia que generan puede ocasionar la caída de los organismos arborícolas.

Figura 87

Esquema de andadores de conexión con arbolado aledaño en paso aéreo utilizando postes de los usados por la Comisión Federal de Electricidad.

- h) La retenida de acero anclada al terreno natural proporciona estabilidad a los postes y cables, ante los esfuerzos que están sometidos.

Figura 88

Ejemplo ilustrativo de configuración del empotramiento del cable de acero al terreno natural.

- i) En ocasiones una alternativa económica es utilizar postes preconstruidos de concreto utilizados para cableado eléctrico usados por la CFE.
- j) Los postes de concreto utilizado para cableado eléctrico usados por la CFE, deben instalarse de acuerdo a sus especificaciones. Asegurando que al empotrar-se el poste, el suelo cuenta con las características mecánicas suficientes para mantener la verticalidad y nivel de los postes.
- k) Es importante que los postes de concreto que soportan este tipo de pasos para fauna permitan la trepa de personal especializado para la colocación de cámaras trampa para su monitoreo.

Consideraciones Generales

Para el diseño y construcción de estos pasos para fauna se deben tomar en cuenta las siguientes consideraciones generales:

- a) Es importante asegurar que sean adecuados para la fauna y seguros para los usuarios de la infraestructura vial. Dado que se trata de estructuras que se construirán sobre carreteras o vías férreas, es importante garantizar mediante estudios y modelaciones, que los pasos aéreos no constituyan un riesgo para los usuarios de las infraestructuras.
- b) El uso de postes de concreto para cableado eléctrico puede reducir costos y agilizar la construcción.
- c) Para su diseño estructural se debe realizar un análisis por sismo y viento de acuerdo con el *Manual de Diseño de Obras Civiles de la CFE*.

De manera enunciativa se enlistan algunas pruebas aplicadas sobre los diseños estructurales de pasos aéreos para fauna arborícola.

- a) Pruebas de cargas.
- b) Diseño de espectro sísmico.
- c) Modelación tridimensional.
- d) Análisis de desplazamiento lateral (torsión).
- e) Análisis de fuerzas de cable axial y tensor axial.
- f) Tensión horizontal del cable.
- g) Análisis de desplazamiento de juntas.
- h) Empotramiento de postes en función del tipo de suelos.

Recomendaciones particulares para los pasos aéreos para fauna

- a) Este tipo de pasos requiere de estudios específicos para implementarse en ferrocarriles de alta velocidad, ya que la velocidad con la que se conducen puede ocasionar la caída de los animales.
- b) No debe permitirse el desarrollo urbano, caminos o cambios de usos del suelo en los puntos de contacto con el ecosistema natural de estos pasos.
- c) Queda terminantemente prohibido realizar la caza o captura de animales en el cruce de estos pasos; situación que deberá salvaguardar el administrador de la carretera o vía férrea sobre la que se ubican. No puede realizarse la caza en al menos una distancia de 2 km de radio desde el centro del paso.
- d) La mitigación de los impactos de las rutas sobre la fauna silvestre mediante la implementación de pasos es un proceso de resultados a largo plazo que puede requerir varias décadas e influir en la dinámica poblacional de muchas especies, por lo tanto, la responsabilidad ambiental de una carretera o vía férrea en zonas donde abundan grupos de animales arborícolas no termina con el proceso de construcción de los pasos, ya que el monitoreo y mantenimiento de estas estructuras es crucial para asegurar la continuidad de su uso.
- e) La estructura permite la restauración de hábitats fragmentados por la infraestructura lineal, y se tienen que integrar los diseños del paso al tipo de zona donde se desplante la estructura, de modo que haya continuidad del hábitat de un lado al otro de la infraestructura lineal.
- f) Es crucial que el paso se encuentre en todo momento conectado por medio de varios cables, entramados y andadores de comunicación en varios puntos con las copas de los árboles aledaños, los que deberán estar sometidos a un continuo mantenimiento y reposición.
- g) El diseño y los materiales seleccionados dependen del sitio y de las especies de interés. Debe tomarse en consideración que son estructuras sujetas a la acción del sol, la lluvia y el viento, por lo que deben utilizarse materiales resistentes al intemperismo.
- h) En carreteras con bajo Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA) y sección menor a 10 m se pueden instalar entramados de cuerdas o cables entre árboles con estructuras simples hechas de cuerda y cableados, no adecuados para infraestructuras más grandes con mayor TDPA y sección. (Figura 89). Estas estructuras deberán contar con un programa de mantenimiento y remplazo continuo ya que son poco duraderas ante la intemperie.

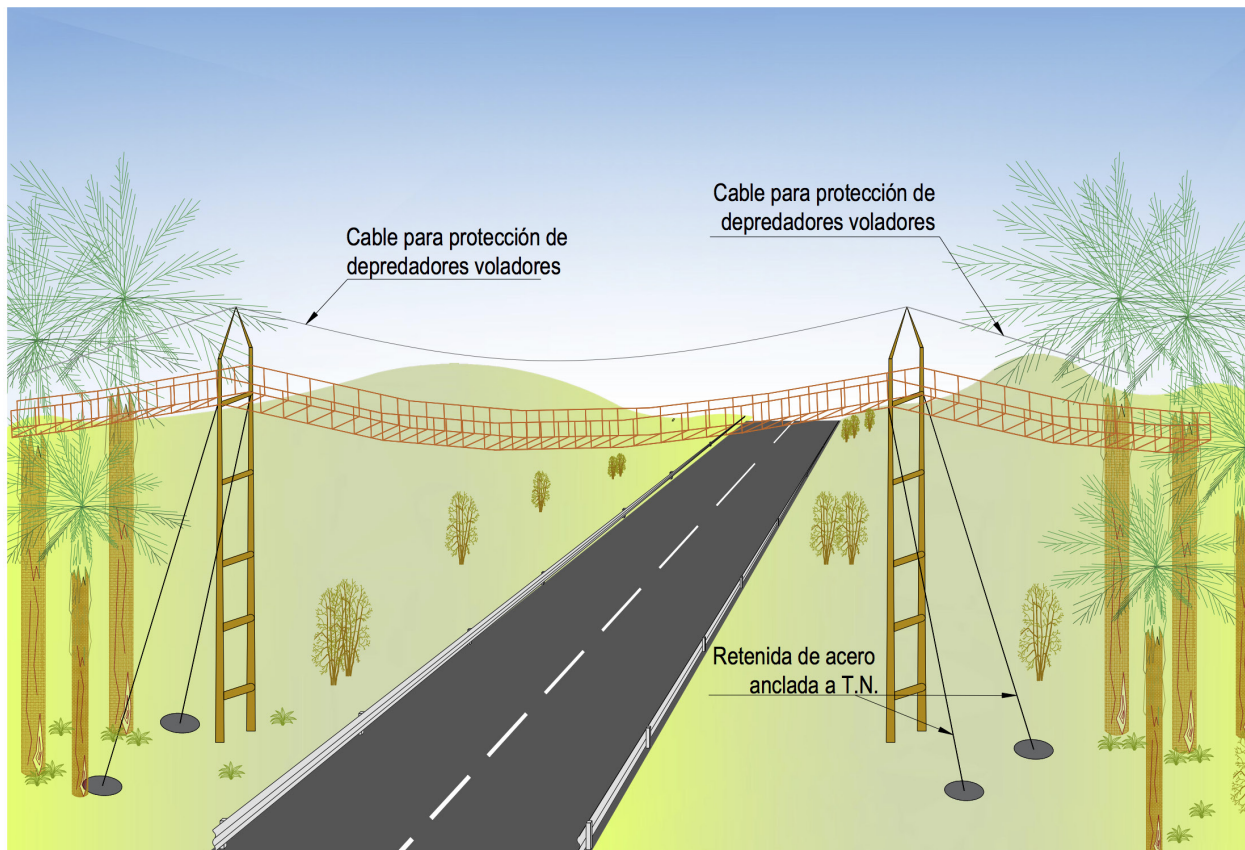
Figura 89



Paso aéreo para fauna arborícola mediante entramado de cuerda y tubos plásticos colocado en caminos de bajo tránsito.

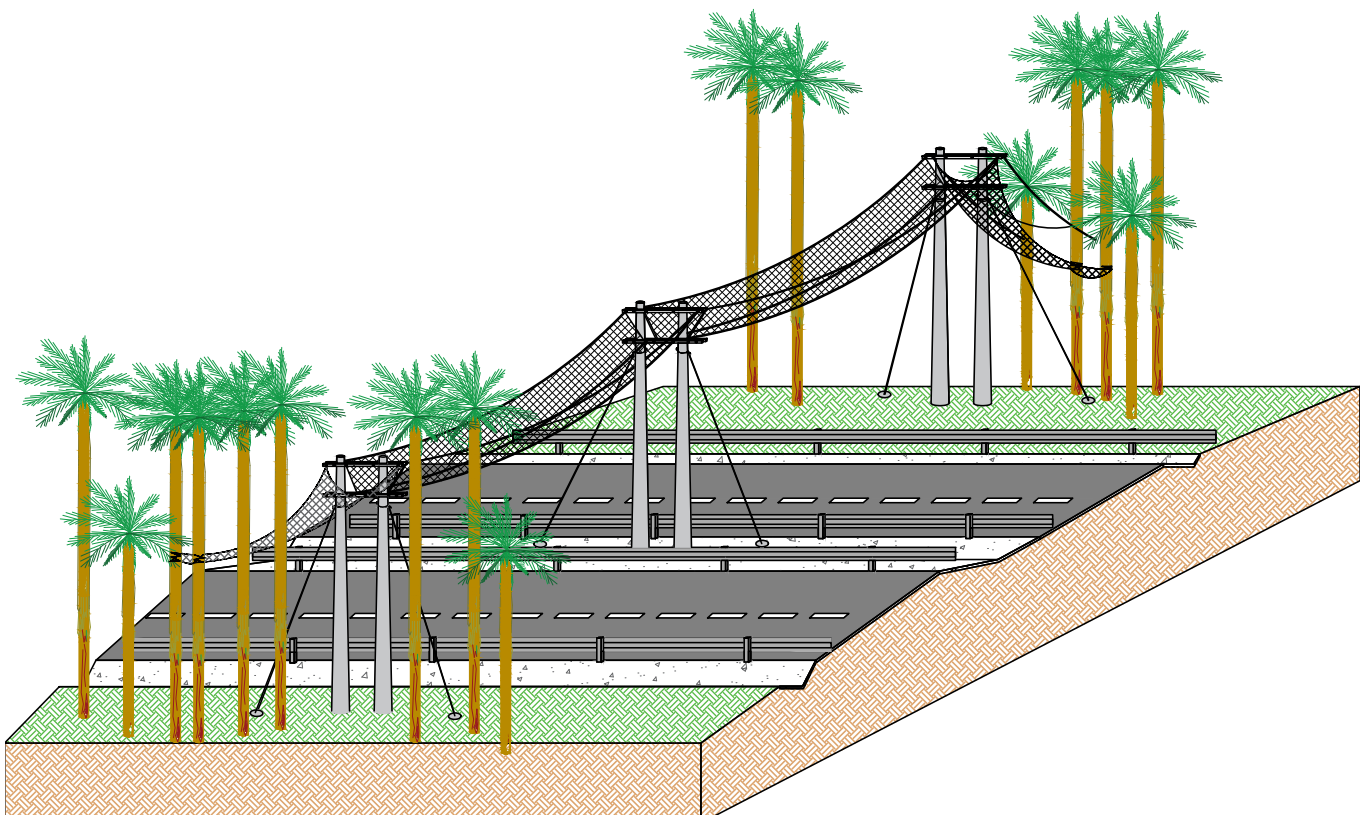
- i) En carreteras mayores a 2 carriles donde hay una mayor distancia entre el dosel de los árboles, se requiere la colocación de postes intermedios permanentes con la finalidad de dar mayor estabilidad y seguridad a la especie que dará uso a estos pasos.
- j) Deben evitarse grandes catenarias ya que los monos pueden cruzar colgados por la parte baja del paso y ser atropellados por las cajas de los camiones de carga, autobuses o trenes en circulación, o derribados por el viento generado al circular. Grandes catenarias repercuten también en la mayor oscilación del paso ante el viento, lo que los hace poco seguros para el cruce de animales.
- k) Para garantizar el uso y la función de estas estructuras de paso para fauna se deben ubicar en áreas de corredores de vida silvestre garantizando que existan corredores de árboles con los cuales conectar el paso.
- l) Se deben considerar varias conexiones desde el paso al arbolado aledaño, conformadas no sólo por cableado sino también por pasarelas y entramados para permitir el uso del paso por diversas especies semiarbóreas.

- m) El acceso a los pasos debe ser restringido para personas ajenas a la brigada que brinde el mantenimiento de la estructura, por lo que deben considerarse facilidades de acceso para el mantenimiento, a una altura que impida que suban personas ajenas al mantenimiento o monitoreo de estos pasos.
- n) La pasarela del paso, en cualquiera de sus posibles variantes, debe ser cerrada o contar con un cable superior para evitar que depredadores voladores (por ejemplo, aves rapaces) aprovechen el cruce de los organismos para atraparlos en una condición ventajosa (Figura 90).
- o) Las dimensiones de alto y ancho dependen de los requerimientos de cada proyecto constructivo, pero se deben tener en consideración las siguientes recomendaciones para la construcción de estas estructuras:
 - i. Procurar la mitigación de la fragmentación del hábitat de fauna arborícola y semiarborícola mediante la colocación del paso.
 - ii. Adecuar el paso al tipo de infraestructura lineal.
 - iii. Asegurar la adecuada conexión con el arbolado de los terrenos aledaños a la infraestructura.
- p) Colocación de cable de acero en la parte superior del andador para protección contra depredadores voladores (Figura 90).

Figura 90

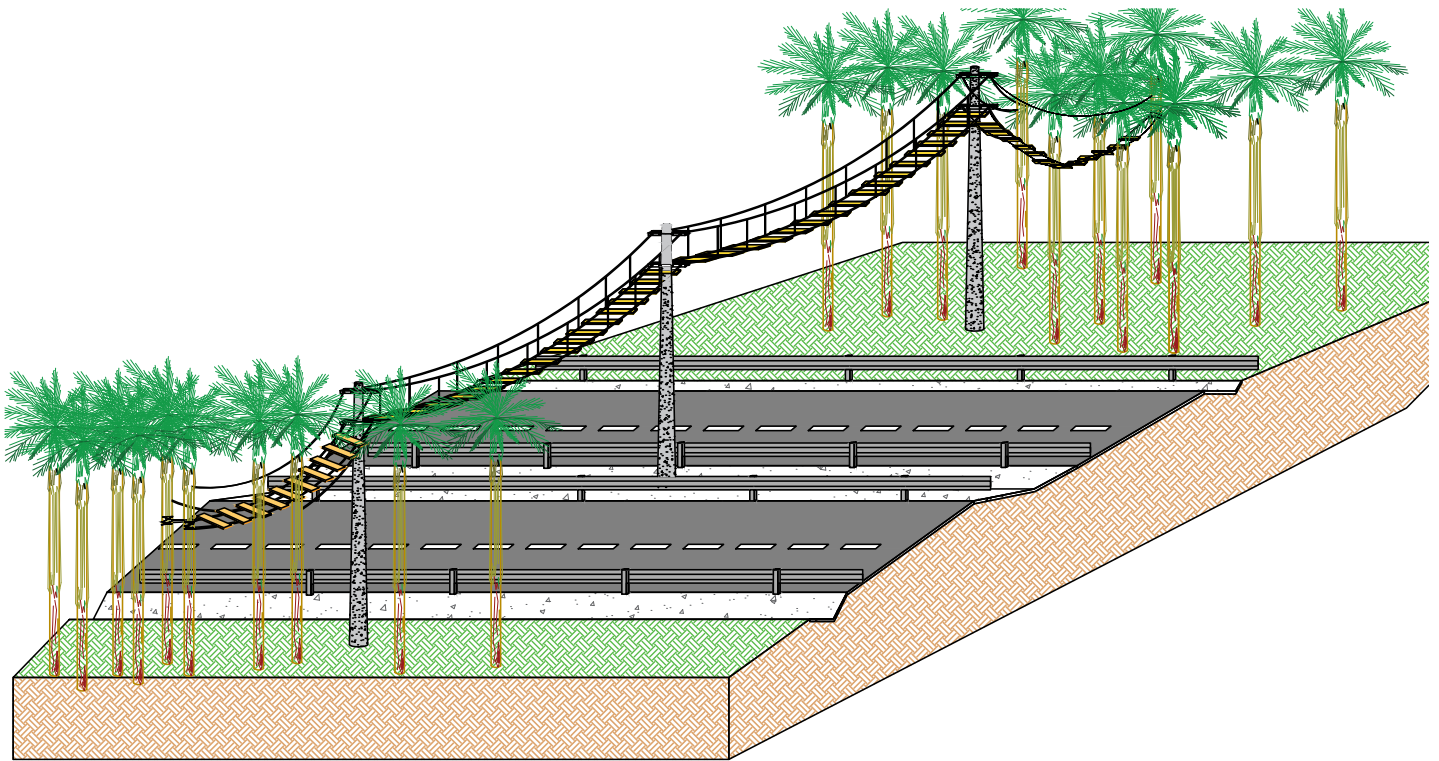
Paso aéreo para fauna arborícola utilizando una canastilla tubular y un cable superior para evitar la aproximación de depredadores voladores.

Figura 91



Vista conceptual de paso para fauna arbórica con andador de malla ciclónica.

Figura 92

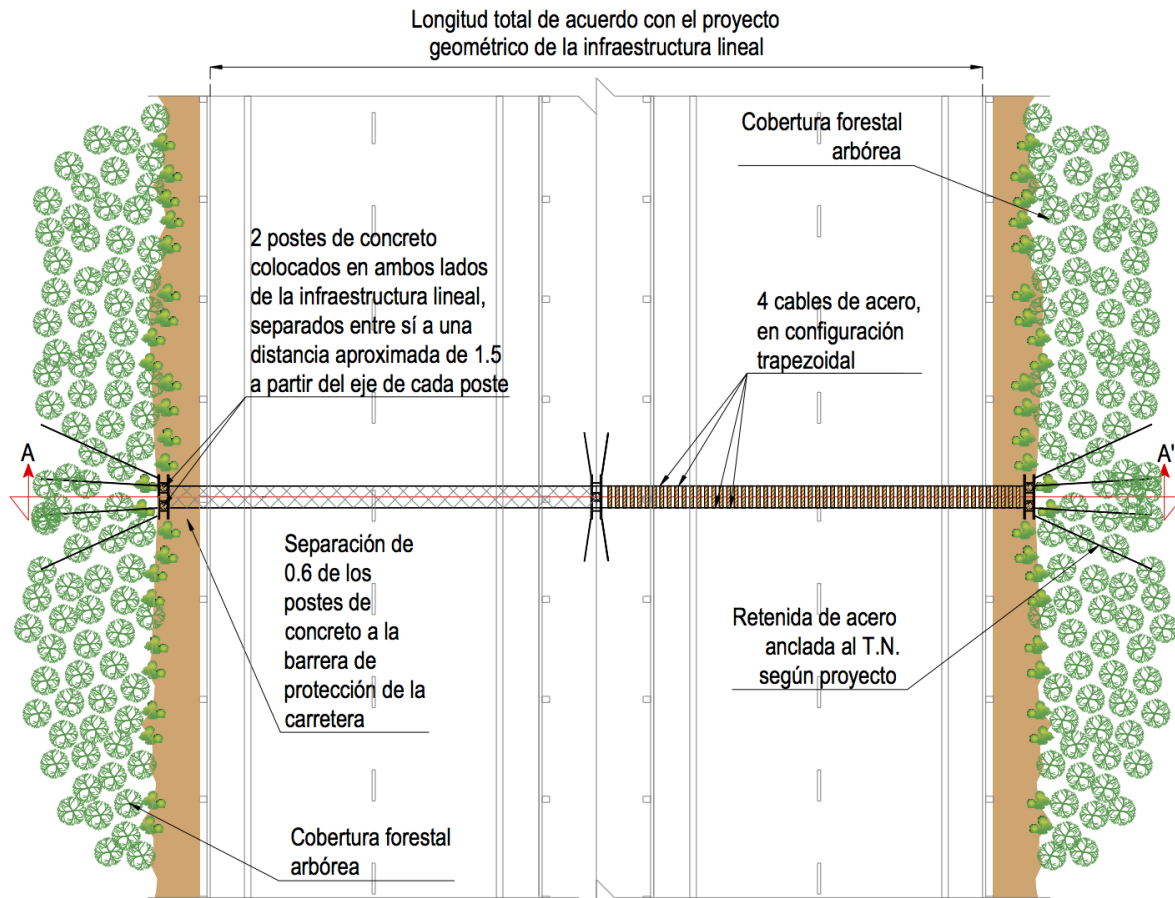


Vista conceptual de paso para fauna arborícola con andador de lecho inferior de madera.

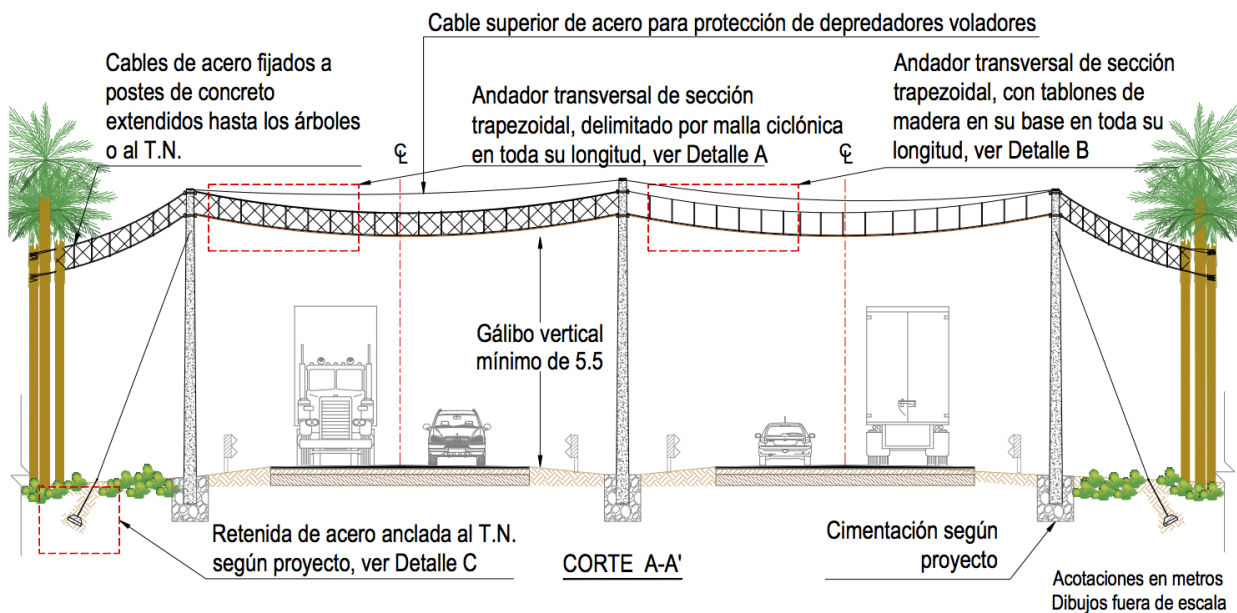
En los planos orientativos 22 a 23-A se muestra gráficamente el diseño “tipo” antes descrito para desarrollar un proyecto de paso aéreo para fauna arborícola.

PLANOS ORIENTATIVOS

Plano 22

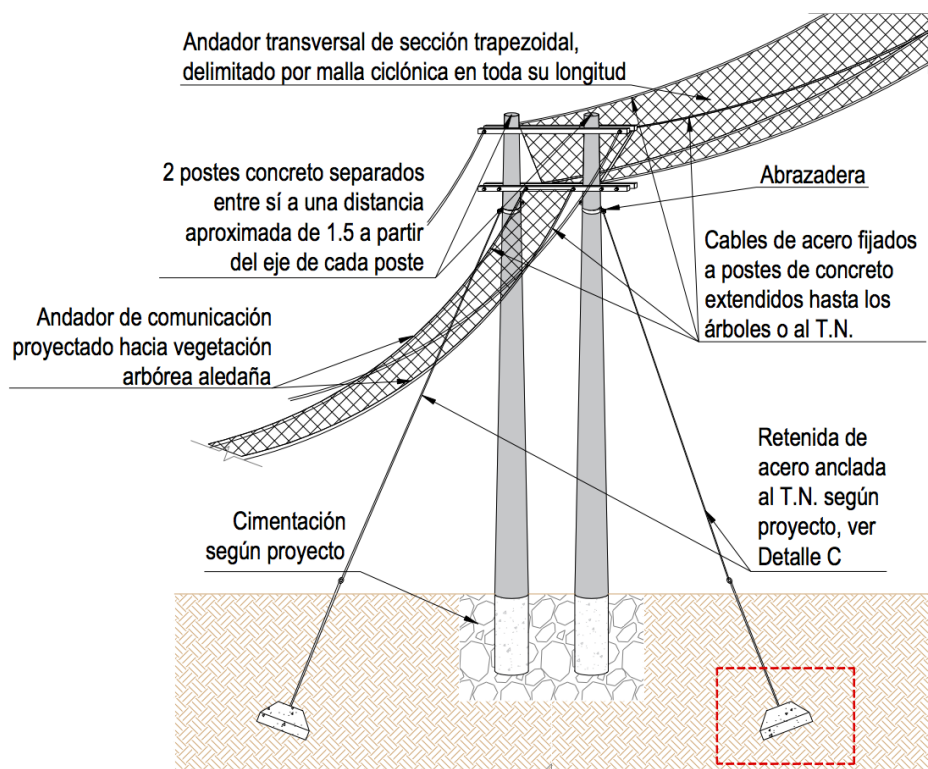


PLANTA TIPO A NIVEL DEL PASO PARA FAUNA



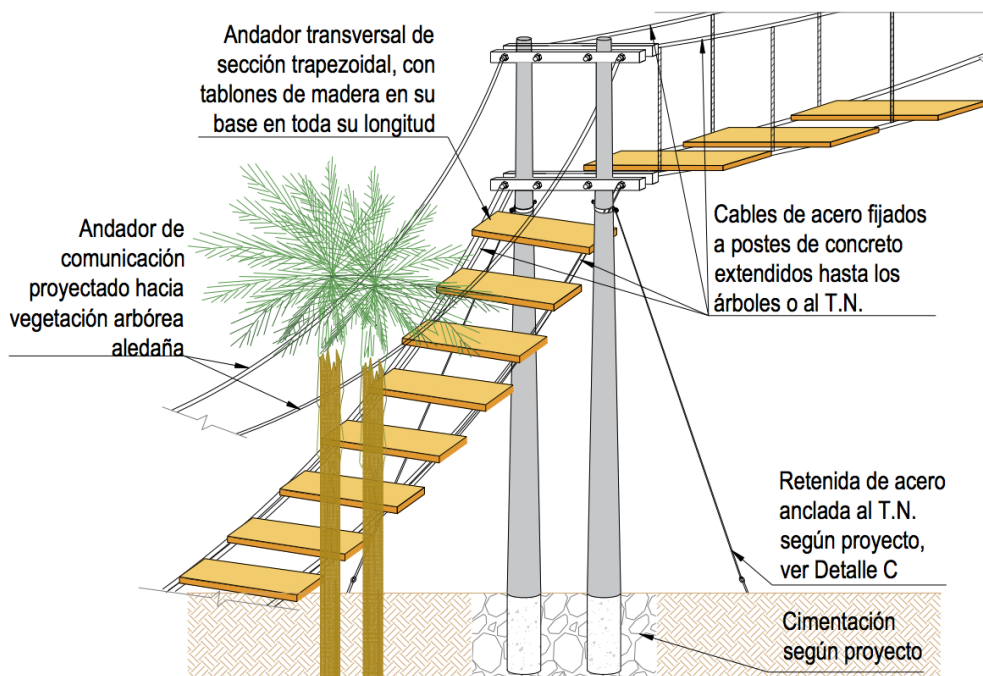
Planta tipo y corte A-A' de paso aéreo para fauna arbórea.

Plano 23



ELEVACIÓN

Andador transversal con malla ciclónica



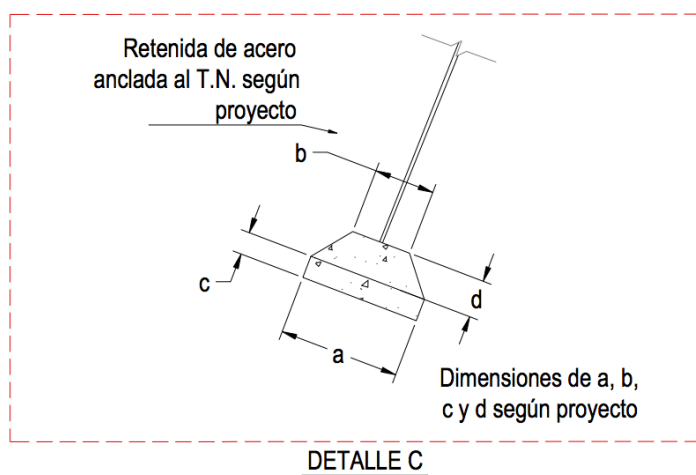
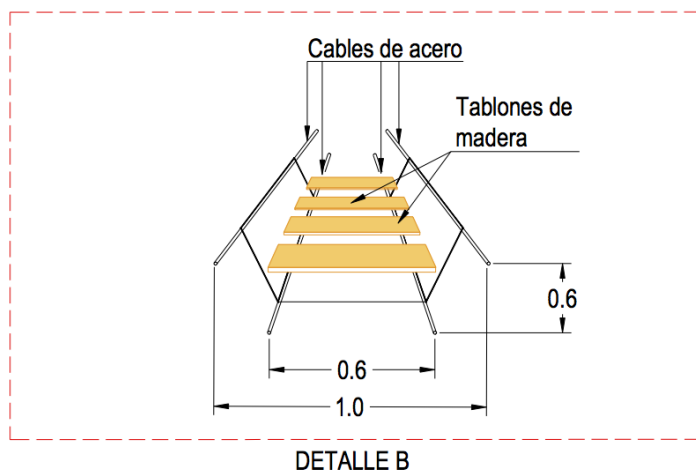
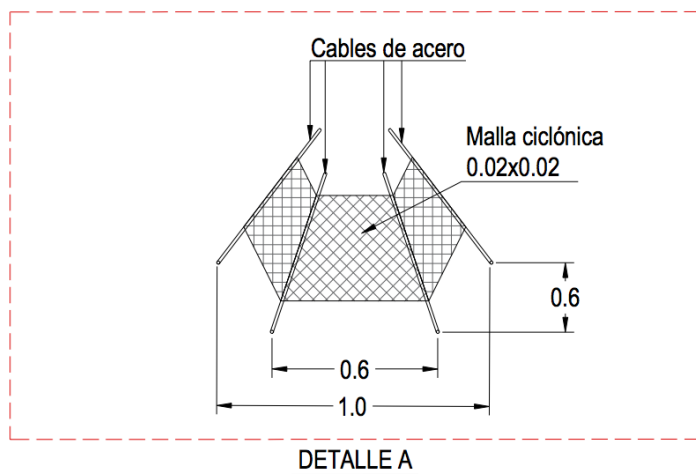
ELEVACIÓN

Andador transversal con tableros de madera

Acotaciones en metros
Dibujos fuera de escala

Elevación de paso aéreo para fauna arborícola.

Plano 23-A



Acotaciones en metros
Dibujos fuera de escala

Detalles de paso aéreo para fauna arborícola.

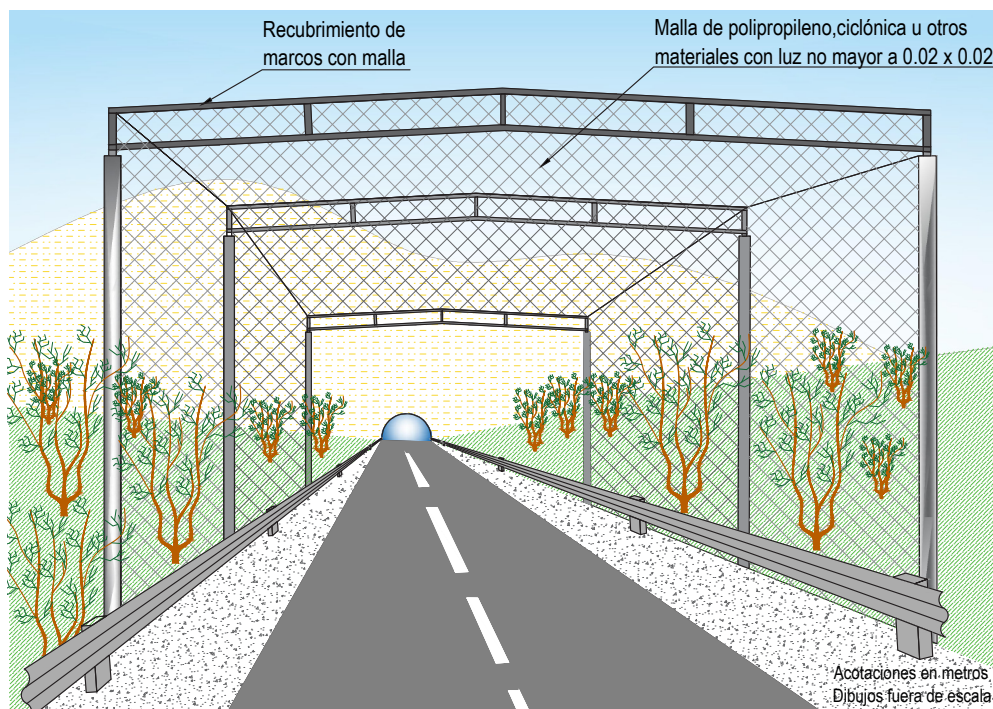
6) Obra para paso y protección de fauna voladora

La fauna voladora es muy vulnerable a ser atropellada en zonas donde la infraestructura lineal cruza muy cerca de cuerpos de agua o cavernas, troncos u otros sitios que sean su hábitat, ya que en ocasiones cruzan muy cerca de la calzada o vía férrea, o pueden volar en grandes números en las proximidades de las zonas de cuevas, cuerpos de agua, como estanques, lagos, estuarios, etc., conformando un importante riesgo de atropello de fauna y colisiones vehículo-animal.

Para protección de los usuarios de las infraestructuras lineales, así como de estas especies, en sitios estratégicos se deben implementar estructuras que permitan el paso seguro de esta fauna voladora (aves y murciélagos).

Para la colocación de estas estructuras se tienen que identificar los corredores biológicos y líneas de vuelo que cruzan por la infraestructura vial de interés, colocando estructuras metálicas en las cuales se sujeta la malla de protección que cubre la vialidad, para que las especies pasen por encima de ésta (Figura 93).

Figura 93



Ejemplo de obra para paso y protección de fauna voladora en carretera.

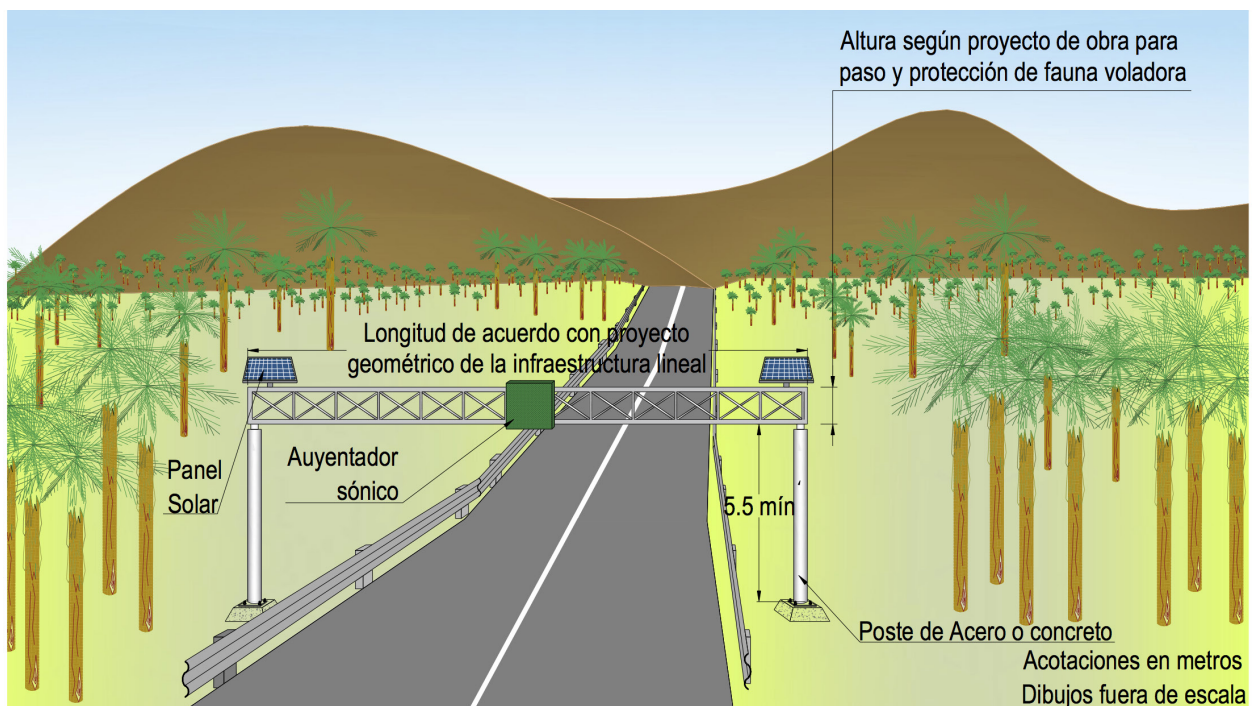
Para la protección de los usuarios ante la posible colisión con especies voladoras en los sitios donde se encuentran cuerpos de agua se han implementado vallados laterales de protección, independientes de los dispositivos de seguridad propios de la vía. Los vallados laterales tienen la finalidad de obligar a las aves con vuelo raso a elevar el ángulo de vuelo por encima de éstos. Con ello se evita que las aves vuelen a la altura de los vehículos. Los vallados pueden ser reforzados con la colocación de ahuyentadores sónicos o ultrasónicos que alejen a los organismos voladores de la zona de riesgo de la infraestructura lineal (Figura 94).

Figura 94



Ejemplo de vallado lateral de protección en cruce de carretera sobre cuerpo de agua.

Figura 95



Esquema de la colocación de ahuyentadores sónicos o ultrasónicos para aves y/o murciélagos. Las dimensiones serán según el proyecto geométrico de la infraestructura lineal.

La vegetación en este tipo de obras está en función del tipo de especie a proteger y de la ubicación de la obra, esto considerando que algunas especies pueden utilizar árboles de portes altos para perchar y a partir de ahí elevar su vuelo para realizar el cruce de la infraestructura lineal.

Criterios

Los criterios que se deben tomar en cuenta para el diseño y construcción de este tipo de paso para fauna son los siguientes:

- a) Colocar marcos de estructura metálica sobre la carretera o vía férrea, para su posterior recubrimiento con malla de polipropileno u otro material, a una altura igual o menor a 5.5 m.
- b) Las dimensiones de alto y ancho dependen de los requerimientos de cada proyecto.
- c) Para el recubrimiento de los marcos se puede implementar malla de polipropileno, malla ciclónica u otro material resistente con retícula de 0.02 x 0.02 m. Considerar reflectores o bandas de cinta plástica o cinta rompeviento para que pueda ser vista por las aves y detectada por los quirópteros.
- d) Colocar ahuyentadores sónicos o ultrasónicos con sus respectivos paneles solares para su alimentación.
- e) En carreteras o vías férreas mayores a 2 carriles y caminos con amplio espacio libre donde hay una mayor distancia, se requiere la colocación de estructuras intermedias con la finalidad de dar mayor estabilidad a dicha estructura.
- f) Para garantizar el uso y la función de estas estructuras de paso para fauna se ubicarán en áreas de corredores de vida silvestre voladora.
- g) Como alternativa al recubrimiento de malla, se puede optar por la colocación de ahuyentadores sónicos sujetos a los marcos de estructura metálica, o bien en postes de concreto. La distribución y altura de estos ahuyentadores será definida por el especialista en fauna.

Consideraciones generales

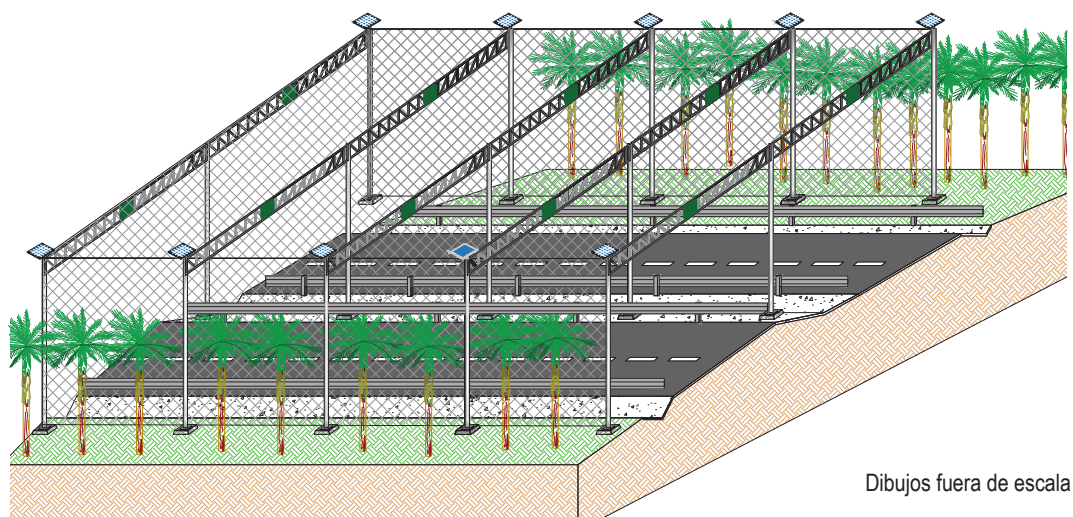
Para el diseño y construcción de estas obras para paso y protección de fauna voladora se deben tomar las siguientes consideraciones generales:

- a) Se deben integrar los diseños al tipo de zona donde se desplante la estructura, de modo que permita el paso seguro de los animales en cuestión.
- b) Para definir su ubicación se debe analizar el cruce de las infraestructuras por humedales y zonas donde se registre gran cantidad de atropellos con aves acuáticas o murciélagos, en el caso de obras en operación.
- c) El diseño y los materiales seleccionados dependen del sitio y de las especies de interés, debiendo ser resistentes a las condiciones climáticas del sitio.

Recomendaciones particulares para las obras para paso y protección de fauna voladora

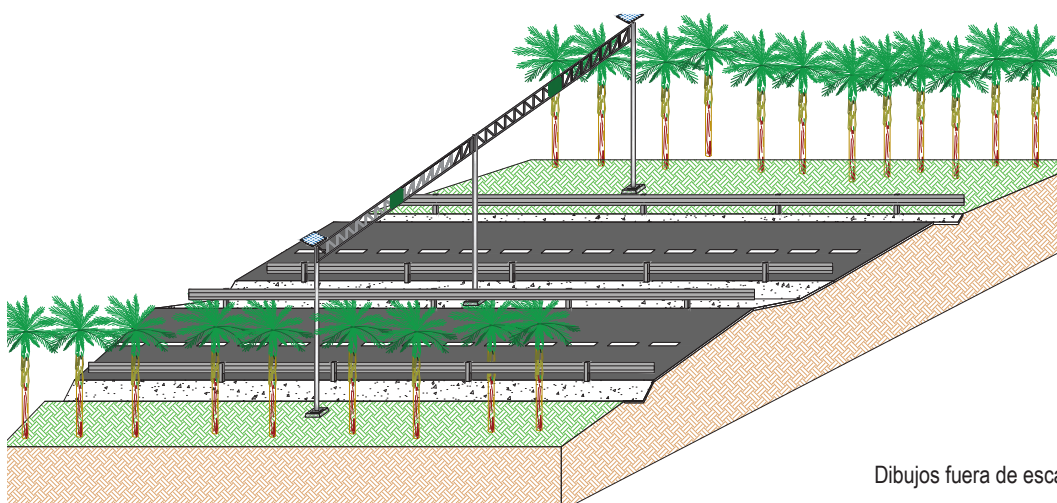
- a) No debe permitirse el desarrollo urbano, caminos o cambios de usos del suelo en los puntos de contacto con el ecosistema natural de estos pasos.

- b) No deben utilizarse para cualquier otro tipo de uso que no sea la protección del paso para fauna silvestre.
- c) Queda terminantemente prohibido realizar la caza o captura de animales en el cruce de estos pasos; situación que deberá salvaguardar el administrador de la carretera o vía férrea sobre la que se ubican. No puede realizarse la caza en al menos una distancia de 2 km de radio desde el centro del paso.
- d) Queda prohibido el uso de estas estructuras para arrojar basura, ramas, troncos o piedras, así como cualquier material producto del mantenimiento periódico de la infraestructura.

Figura 96

Dibujos fuera de escala

Vista conceptual de una obra para paso y protección de fauna voladora mediante una estructura metálica y malla de polipropileno.

Figura 97

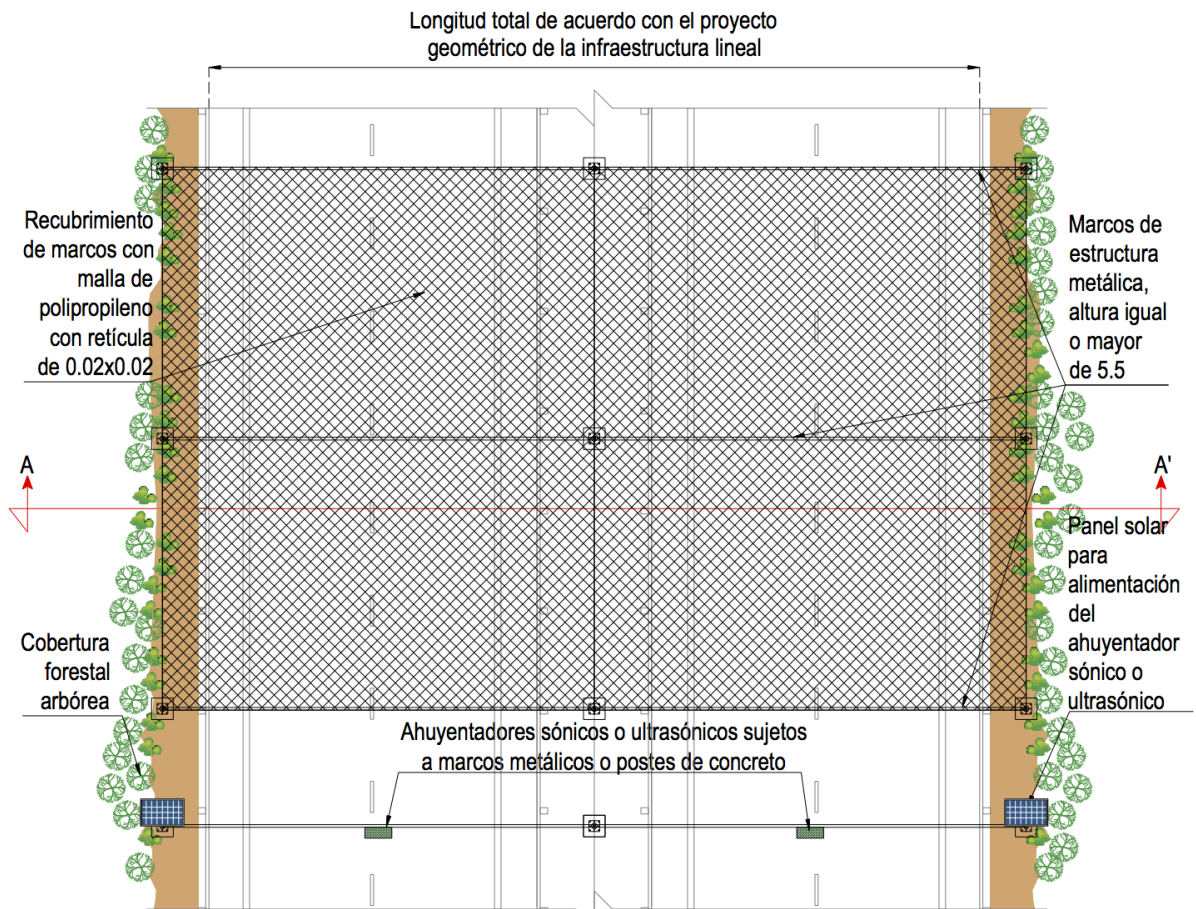
Dibujos fuera de escala

Vista conceptual de una obra para paso y protección de fauna voladora mediante una estructura metálica y ahuyentadores (disuasores) sónicos o ultrasónicos.

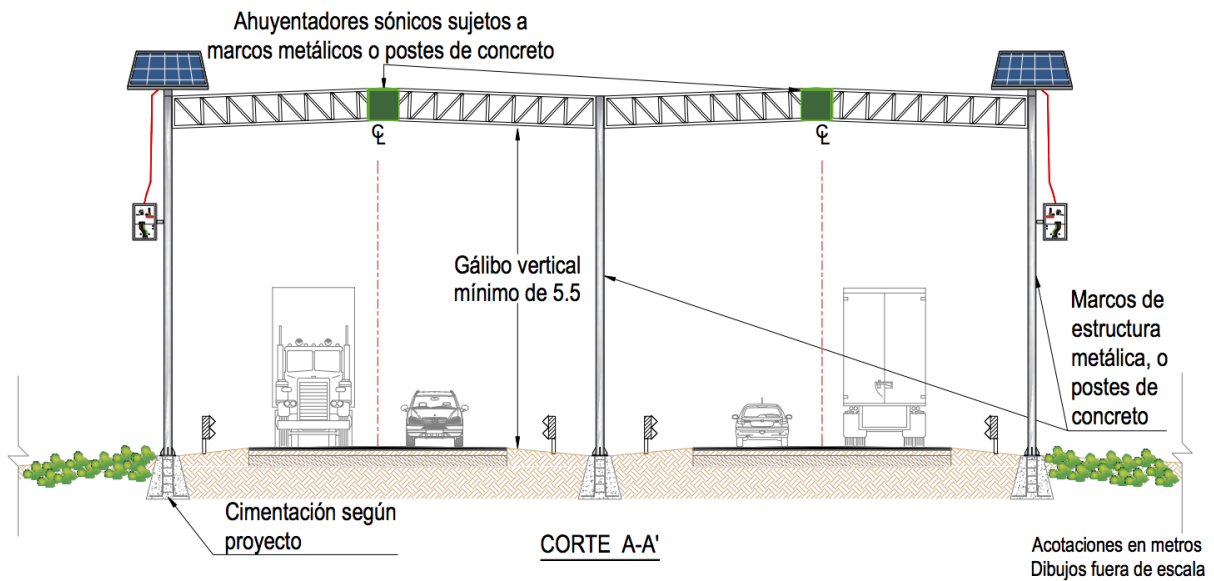
El plano orientativo 24 muestra gráficamente el diseño “tipo” antes descrito para desarrollar un proyecto de obra para paso y protección de fauna voladora.

PLANO ORIENTATIVO

Plano 24



PLANTA TIPO A NIVEL DEL PASO PARA FAUNA



CORTE A-A'

Planta tipo y corte A-A' de obra para paso y protección de fauna voladora implementando malla de protección.

7) Paso temporal para invertebrados migratorios

En el caso de especies migratorias de invertebrados trepadores se recomienda instalar pasos solamente durante la temporada de migración acompañados de los señalamientos correspondientes, en los sitios de mayor incidencia de cruce y colocar bordos en los límites de la infraestructura lineal para dirigir a los organismos hacia el paso.

Las estructuras temporales son aquellas que se colocan cubriendo la infraestructura lineal con el fin de que la fauna silvestre pueda cruzar de manera sencilla para evitar ser atropellada por el paso de los vehículos. Estas estructuras se tienen que colocar en zonas de corredores ecológicos de migración de especies de invertebrados trepadores, como pueden ser algunas especies de cangrejos o tarántulas, con movimientos masivos con fines de reproducción. La colocación de estas estructuras durante las temporadas de migración debe acompañarse de otras medidas en los tramos donde se ubiquen las estructuras, por ejemplo la implementación de señalamiento vial.

Especies de invertebrados migratorios trepadores están presentes particularmente en el Caribe y el Golfo de México; en estados como Veracruz, Tamaulipas y Tabasco, y otros en los que el problema se ha resuelto, en el mejor de los casos, sólo en algunos puntos implementando mallas para bloquear el paso de los animales y utilizando voluntarios para recoger a los crustáceos en recipientes para regresarlos al mar o a los pantanos, deteniendo el tráfico para realizar los traslados de los animales y con alto riesgo para la vida de dichos voluntarios.

Criterios

Los criterios que se deben tomar en cuenta para el diseño y construcción de este tipo de pasos para fauna son los siguientes:

- a) Estos pasos se deben implementar cuando el proyecto ocasiona la fragmentación del hábitat del cangrejo e invertebrados y otras especies migratorias con habilidad de trepar.
- b) Este tipo de paso consiste en colocar puentes de estructura metálica desmontable que se instala sólo en temporada de migración de las especies y en el sitio estratégico del cruce.
- c) El diseño y los materiales seleccionados dependen del sitio y de la especie. Estos materiales deben ser resistentes a las condiciones ambientales, así como permitir el montaje de esta estructura en temporada de migración y su desmontaje al terminar dicha temporada.
- d) Para garantizar el uso y la función de estas estructuras de paso para fauna se deben ubicar en áreas de mayor incidencia para el cruce de estas especies, previo estudio específico.
- e) Se canaliza el flujo de los invertebrados trepadores mediante bordos o barreras de inducción con borde superior curvo, o hechas de madera inclinada ha-

cia el terreno en un ángulo menor o igual a 80° . Lo anterior para impedir el cruce de los animales sobre la infraestructura lineal.

- f) Las dimensiones de alto y ancho de las barreras dependen de los requerimientos de cada proyecto y del sitio, se recomienda una altura de 0.2 a 0.4 m.
- g) Para este tipo de paso, al ser de carácter temporal, se descartan las actividades de revegetación, sin embargo, se tiene que dar atención a la conservación de los hábitats que estas especies necesiten a ambos lados de la infraestructura lineal.

Figura 98



Ejemplo de paso para fauna temporal desmontable para cangrejos migratorios en la Isla Navidad, Australia (fuente: acceso abierto de internet).

Consideraciones generales

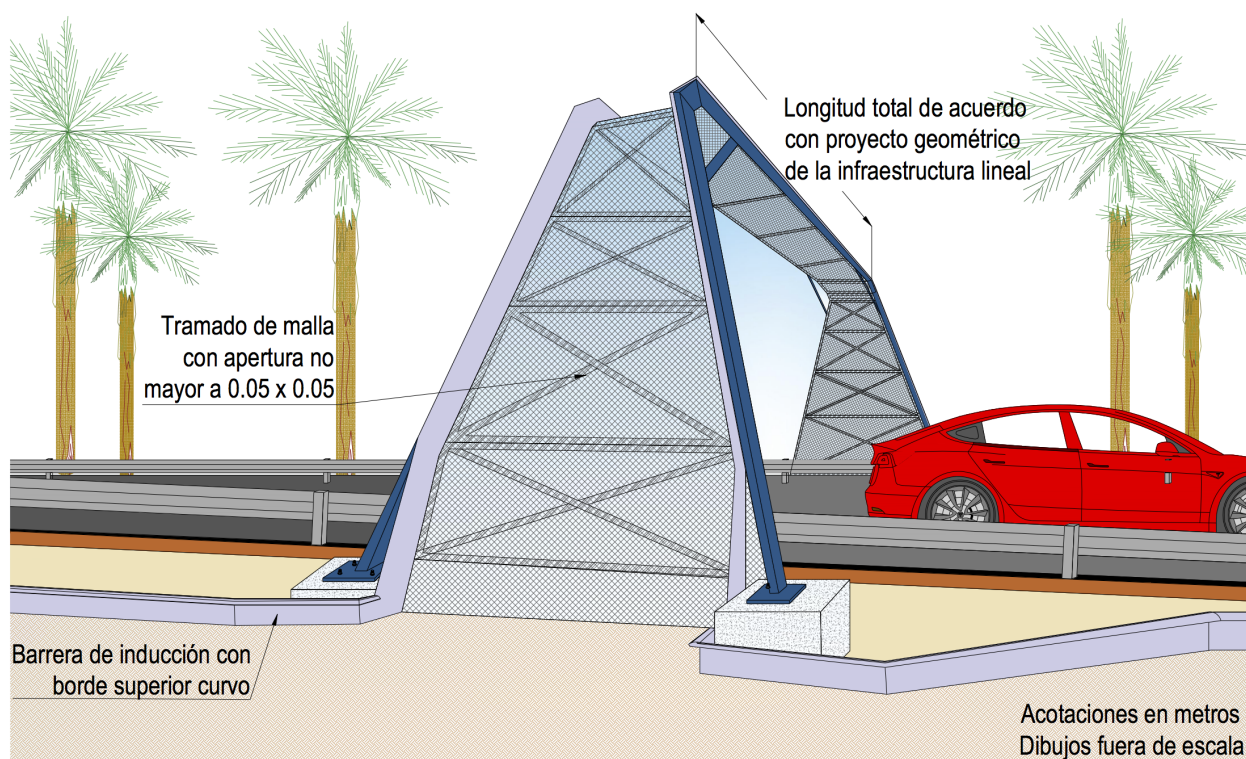
Para el diseño y construcción de estos pasos para fauna se deben tomar en cuenta las siguientes consideraciones generales:

- a) Estos pasos tienen especificaciones particulares de diseño para el cruce de estos organismos con el fin de maximizar la permeabilidad y facilitar sus despla-

zamientos por lo que se deben considerar precisiones que permitan fácil acceso para las especies más pequeñas y las de máxima talla de la zona en donde se contemple la implementación de la estructura.

- b) Debe integrar diseños acordes al tipo de zona donde se desplante la estructura para que brinde continuidad del hábitat de un lado al otro de la infraestructura vial.

Figura 99



Esquema de un paso temporal para invertebrados migratorios.

Recomendaciones particulares para los pasos temporales para fauna invertebrada migratoria

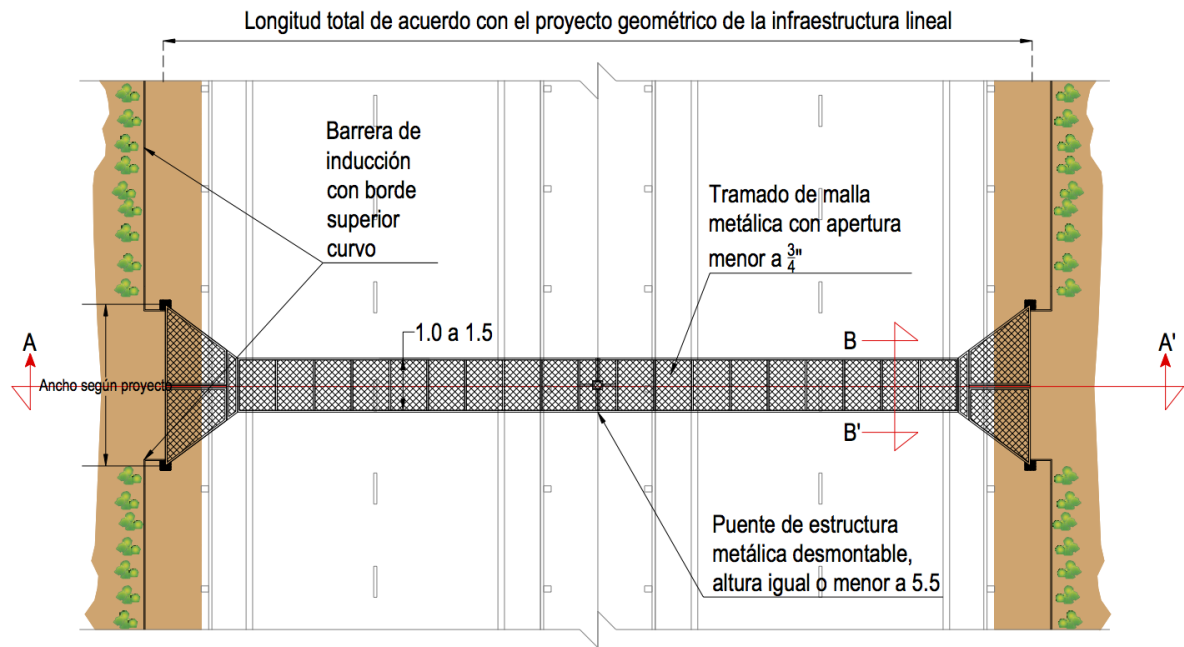
- a) No debe permitirse el desarrollo urbano, caminos, o cambios de usos del suelo en los puntos de colocación temporal de estos pasos con el ecosistema natural.
- b) No deben utilizarse para cualquier otro uso que no sea el paso para fauna silvestre.
- c) Queda terminantemente prohibido realizar la caza o captura de animales en el cruce de estos pasos, situación que deberá salvaguardar el administrador de la carretera o vía férrea sobre la que se ubican. No puede realizarse la caza en al menos una distancia de 1 km de radio desde el centro del paso.

- d) No se recomiendan para ferrocarriles, ya que requeriría una altura mucho mayor.

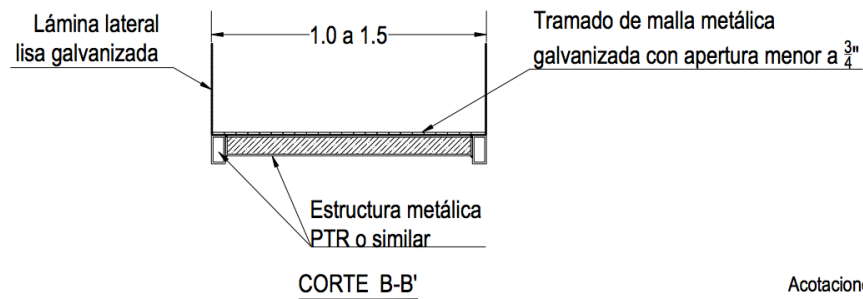
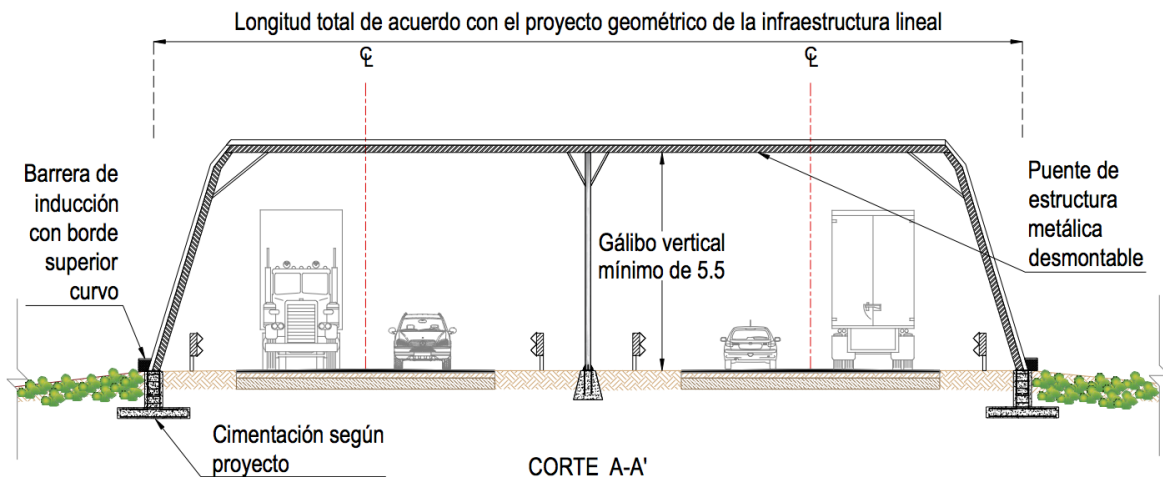
En el plano orientativo 25 se muestra gráficamente el diseño “tipo” antes descrito para desarrollar un proyecto de paso temporal para invertebrados migratorios.

PLANO ORIENTATIVO

Plano 25



PLANTA TIPO A NIVEL DEL PASO PARA FAUNA



Acotaciones en metros
Dibujos fuera de escala

Planta tipo, corte A-A' y corte B-B' de un paso temporal para invertebrados migratorios con capacidad trepadora.

8) Paso para fauna acuática

Los pasos para fauna acuática involucran puentes, viaductos, alcantarillas de cajón, tubo, bóvedas, etc. Generalmente la fauna cruza sin problemas cuando las obras de drenaje están diseñadas para permitir el flujo continuo de agua en escurrimientos permanentes. Los problemas para cruce ocurren cuando existen cambios de nivel que elevan la obra de drenaje por encima del espejo natural del agua en el río o arroyo, así como en escurrimientos temporales, donde una parte del año el tirante de agua es demasiado pequeño para permitir la movilización de la fauna, sobre todo en sentido contracorriente. Los peces e invertebrados acuáticos deben poder desplazarse libremente corriente arriba y corriente abajo en cualquier escurrimiento sin que la presencia de una obra de infraestructura lineal obstaculice dicho movimiento; por ello es necesario en algunas ocasiones implementar pasos para fauna acuática.

Los pasos para fauna acuática se construyen cuando la infraestructura vial atraviesa un río o sobre una presa o dique en un cuerpo de agua en donde las especies acuáticas se ven afectadas en su desplazamiento natural. Los requerimientos de los peces e invertebrados acuáticos en general son muy específicos, teniéndose ya a nivel mundial suficiente experiencia para el diseño y construcción de estos pasos; no obstante, siempre es importante consultar con especialistas para que los diseños y la obra reúnan las características necesarias que garanticen su funcionalidad.

En lugares donde se registre migración y remonte de fauna acuática se proponen estructuras que conformen canales con desniveles a manera de escaleras que formen pequeñas pozas cuyas dimensiones variarán de acuerdo con la cantidad de individuos, especies y espacio existente para la colocación de la estructura, ya sea en canales, acequias, represas o en cualquier cuerpo de agua que presente estas características.

Criterios

Los criterios que se deben tomar en cuenta para el diseño y construcción de este tipo de pasos para fauna son los siguientes:

- a) Los pasos para fauna acuática deben implementarse en obras de drenaje que en todo el año se encuentren inmersas en el cuerpo de agua para que los animales puedan circular libremente hacia ambos lados de la infraestructura lineal.
- b) Los pasos para fauna acuática pueden ser adaptaciones de obras de drenaje como losas, cajones o tubería, ya sea de concreto o poliuretano de alta densidad, siempre conservando un tirante de agua continuo mínimo de 0.3 m, esto con el fin de garantizar un flujo constante de agua para el desplazamiento de la fauna acuática.
- c) En este tipo de obra es importante que el flujo de la corriente de agua se encuentre libre de obstáculos, por lo que se descarta la revegetación en las entradas y salidas de las obras.

Figura 100



Obras de drenaje de caída que ocasionan la fragmentación del hábitat acuático ya que las especies no pueden circular en ambos sentidos de la corriente fluvial o lagunar.⁷⁴

Figura 101



Alcantarilla de tubo y losa con caída de agua que no permiten la circulación de fauna acuática en ambos sentidos del escurrimiento. Carretera Juquila-Peñas Negras, Oaxaca.

⁷⁴ Iuell, B. (2003). "Wildlife and Traffic: a European handbook for identifying conflicts and designing solutions", en The XXIIInd PIARC World Road Congress World Road Association-PIARC.

- d) Para el diseño de estas estructuras se debe de considerar lo siguiente:
- Este tipo de paso debe integrar los diseños adecuados a la zona donde se desplante la estructura, de modo que haya continuidad del hábitat acuático de un lado al otro de la infraestructura.
 - El diseño y los materiales seleccionados dependen del sitio, el proyecto y de las especies a proteger.
 - Un tipo de paso para fauna acuática cuando existe desnivel del terreno (alcantarillas de caída) consiste en colocar rampas de acceso con desniveles formando cajones o pozas permanentemente inundadas que sirvan de descanso para los peces e invertebrados acuáticos en su camino aguas arriba, y un descenso gradual aguas abajo.
 - Otro tipo resulta de crear rampas y canales para proyectar las obras de caída hasta el cuerpo de agua, a manera de tobogán, manteniendo un flujo de agua constante por la alcantarilla (Figura 102).

Figura 102



Diferentes ejemplos de pasos para fauna acuática en obras de drenaje de caída.⁷⁵

⁷⁵ Franklin, P., E. Gee, C. Baker, S. Bowie (2018). "New Zealand Fish Passage Guidelines". *National Institute of Water & Atmospheric Research Ltd. Hamilton.*

- v. Para garantizar el uso y la función de estas estructuras de paso para fauna es necesario que se ubiquen en áreas donde el caudal sea continuo y con el mayor tirante posible.
- vi. Las dimensiones de alto y ancho dependen de los requerimientos de cada proyecto constructivo y su función principal es dejar pasar el agua bajo la infraestructura lineal, y habilitar pasos para fauna acuática cuando la infraestructura ocasione la fragmentación del hábitat acuático.
- vii. En canales de concreto hidráulico o mampostería la pendiente debe ser menor a 10% y se deben construir desniveles para peces (Figura 103) a manera de formación de pozas para brindar descanso, protección y abrigo a los peces, así como un reservorio continuo de agua cuando el caudal del escurrimiento se reduzca.

Figura 103

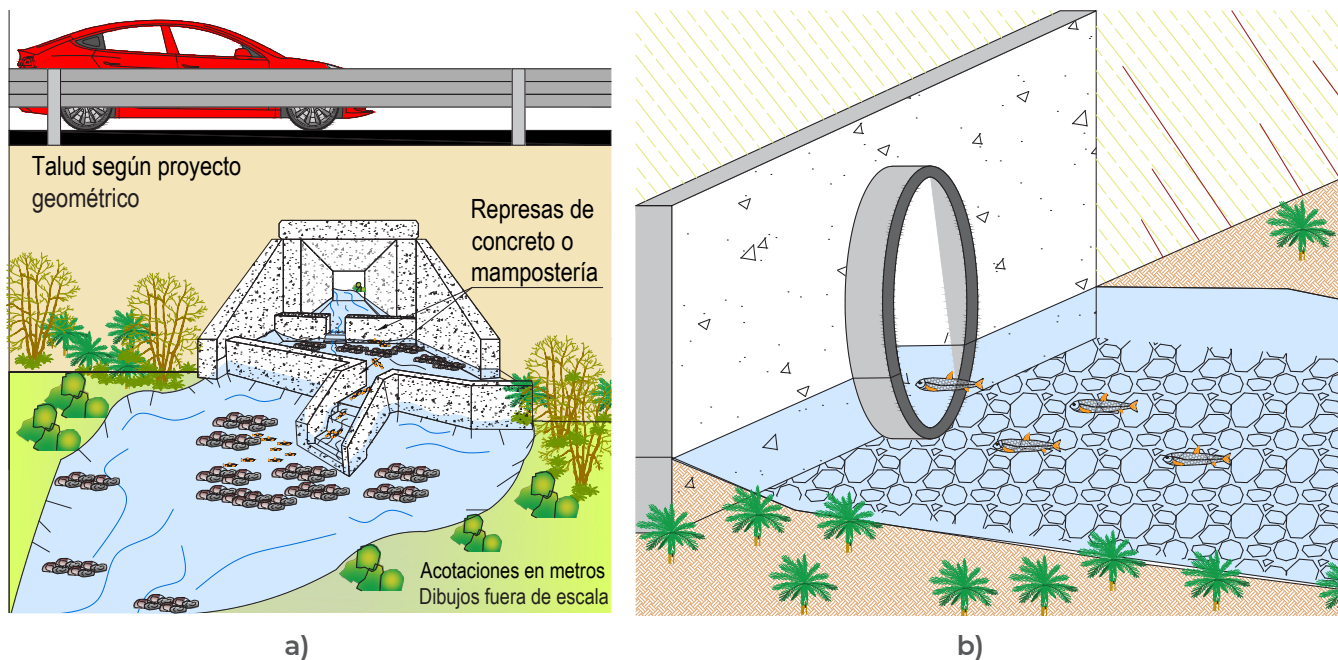


Ejemplo de escalera de peces utilizada como paso para fauna acuática en lugar de alcantarillas de caída.⁷⁶

⁷⁶ Thompson, P. (2014). *Your pictures of Scotland: 6 - 13 June*. BBC News. Disponible en: <https://www.bbc.com/news/uk-scotland-27821914>.

- viii. Se deben colocar rocas y tabiques rugosos en el lecho inferior del canal de manera irregular, a modo de frenar y romper la velocidad del agua.
- ix. En caso de una presa vertedora o dique se apertura un canal rústico sin revestimiento, colocar rocas de manera sorteada para romper la velocidad del agua y descarga aguas abajo.

Figura 104



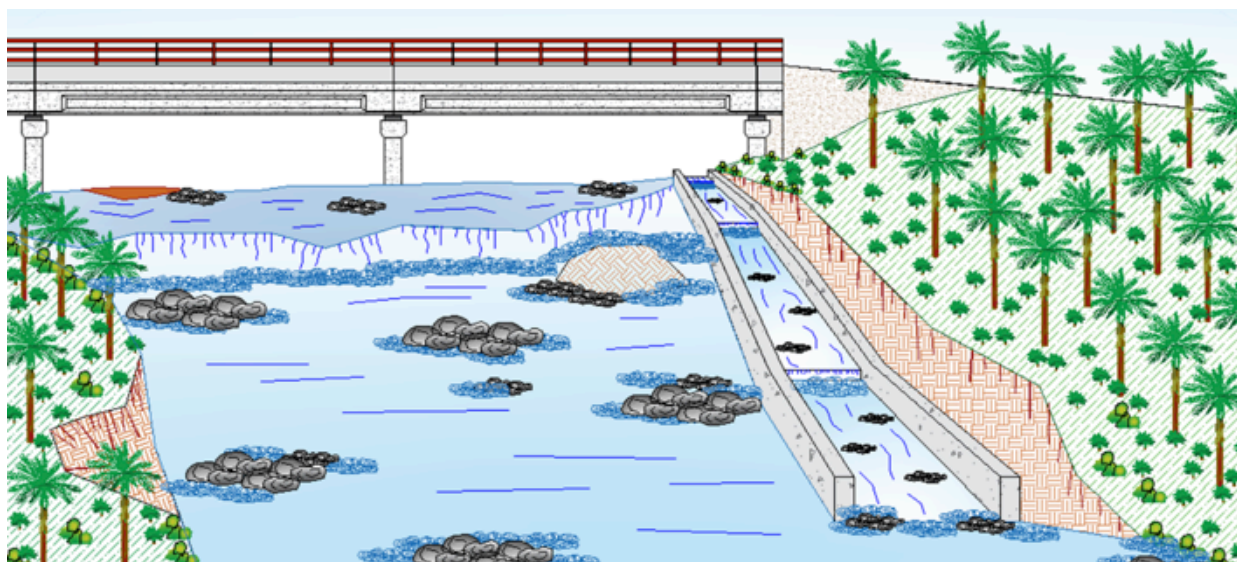
Esquema de dos tipos de paso para peces: a) estructura con desniveles formando represas, y b) tubería de concreto inmersa en el cuerpo de agua.

Consideraciones generales

Para el diseño y construcción de estos pasos para fauna se deben tomar en cuenta las siguientes consideraciones generales:

- a) Los pasos tendrán especificaciones particulares de diseño para el cruce, principalmente de peces e invertebrados acuáticos, para maximizar la permeabilidad y para facilitar sus desplazamientos, por lo que se deben considerar precisiones que permitan fácil acceso para las especies más pequeñas y las de máxima talla de la zona en donde se construirá la estructura.
- b) Estas áreas deben estar cerradas de todo acceso al público y evitar que se arrojen residuos sobre ellas.

Figura 105



Vista conceptual de un paso de fauna para peces mediante una estructura tipo de canal con desniveles formando pozas con rocas adheridas al concreto para reducir la velocidad del agua.

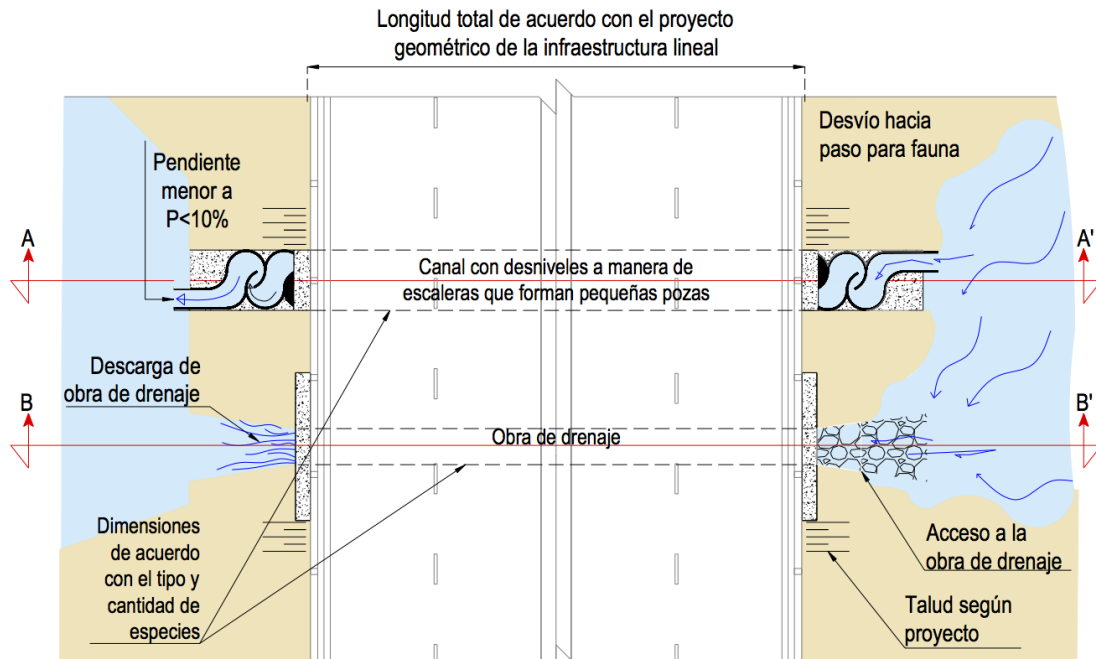
Recomendaciones particulares para los pasos para fauna acuática

- No debe permitirse el desarrollo urbano, caminos, o cambios de usos del suelo en los puntos de contacto con el ecosistema natural de estos pasos.
- No deben utilizarse para la circulación de embarcaciones o cualquier otro uso que no sea el paso para fauna silvestre. El uso por humanos desincentiva el uso por la fauna silvestre.
- Queda terminantemente prohibido realizar la pesca o captura de animales en el cruce de estos pasos; situación que debe salvaguardar el administrador de la carretera o vía férrea sobre la que se ubican. No puede realizarse la pesca en al menos una distancia de 1 km desde el centro del paso.
- Queda prohibido el uso de los pasos para fauna acuática para arrojar basura, ramas, troncos o piedras, así como cualquier material producto del mantenimiento periódico de la infraestructura. Las piedras, troncos y ramas colocadas como refugios obedecen a una estrategia y no deben promover que se utilicen como depósitos de residuos.
- Deben contar con un programa continuo de monitoreo y desazolve para retirar cualquier objeto extraño o depósito de sedimentos que pueda obstruir su funcionamiento como obra de drenaje y como paso para fauna.
- Se recomienda que estas estructuras tengan una composición rústica y se utilicen materiales como arena y rocas de la zona para lograr una continuidad del hábitat y así promover el uso de los pasos por la fauna.

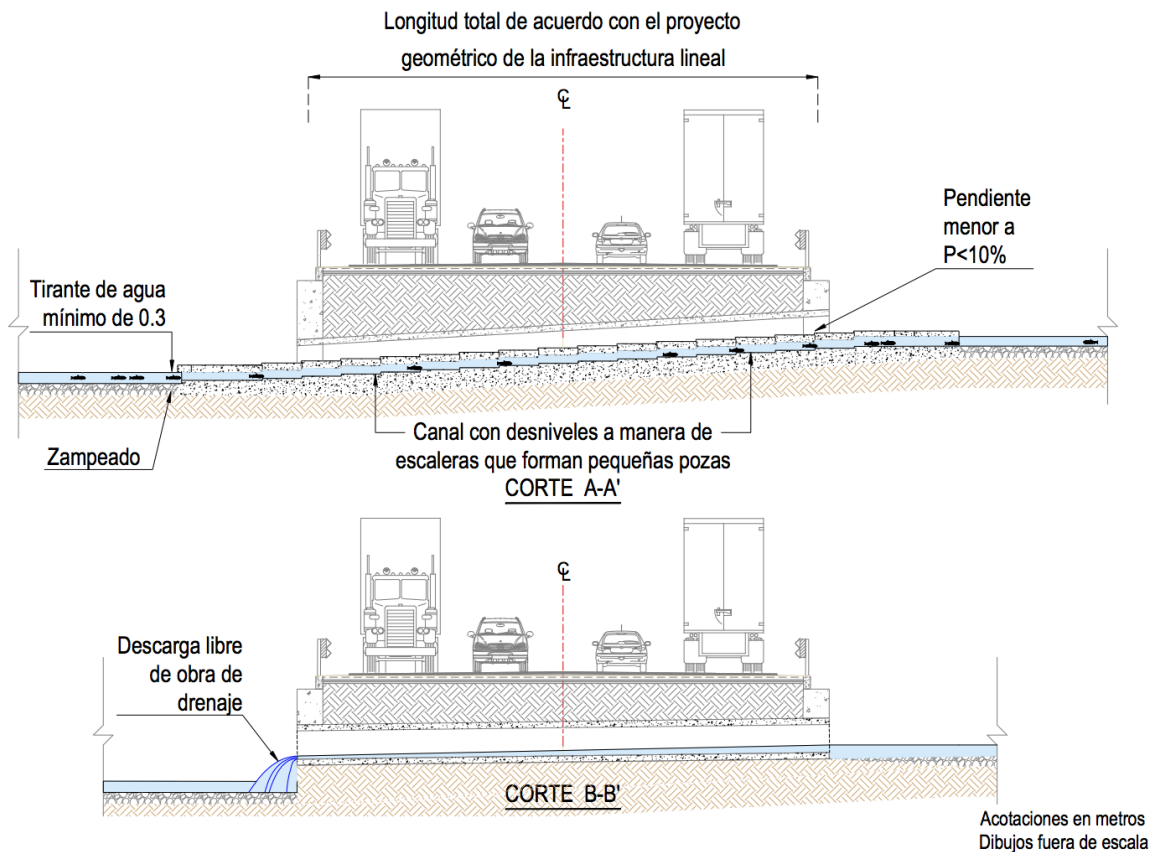
En los planos orientativos 26 y 26-A se muestra gráficamente el diseño “tipo” antes descrito para desarrollar un proyecto de paso para fauna acuática.

PLANOS ORIENTATIVOS

Plano 26

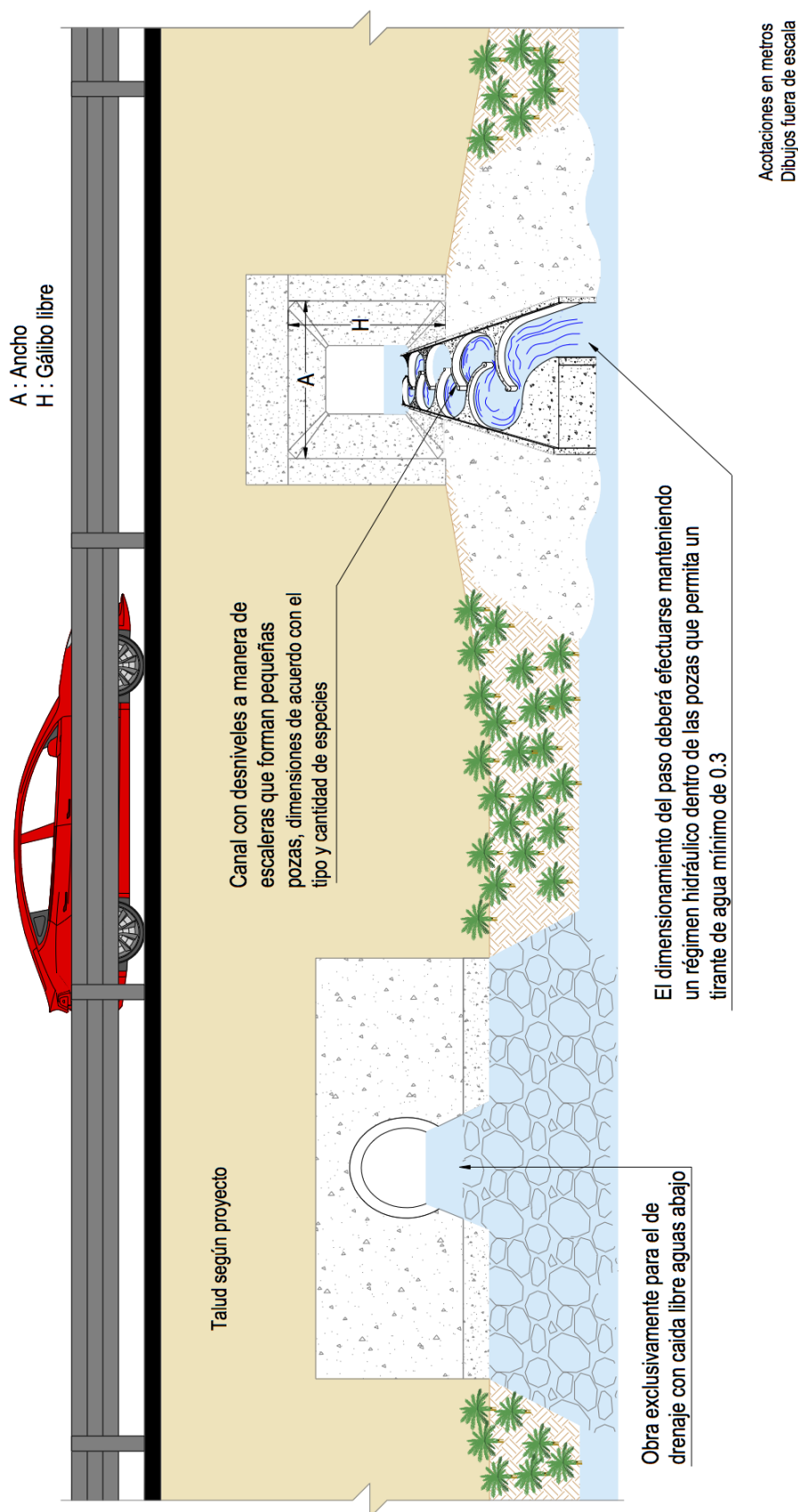


PLANTA TIPO A NIVEL DE LA INFRAESTRUCTURA LINEAL



Planta tipo, corte A-A' y corte B-B' de paso para fauna acuática mediante canal y obra de drenaje.

Plano 26-A



Elevación de paso para fauna acuática mediante adaptación de obra de drenaje.

5.4 Obras complementarias en los pasos para fauna

Las estructuras que complementan a los pasos para fauna como ya se mencionó anteriormente son aquellas cuya función es apoyar al mejor funcionamiento de los pasos, así como direccionar a los animales hacia el mismo y atravesarlo de la manera más segura.

En este apartado se mencionan las consideraciones generales y recomendaciones particulares para la implementación de vallados perimetrales (barreras de inducción y cercados), ya que sus características dependen de la zona y del proyecto de la infraestructura lineal, ya sea que puedan ser vallados, barreras sólidas, o en el caso de aves, pantallas con pegatinas o calcomanías reflectoras.

Estas estructuras juegan un papel predominante en el éxito del funcionamiento del paso, así como en la reducción del atropello de animales, por lo que deben evaluarse y adecuarse para ser implementadas en todos los tipos de pasos para fauna terrestre antes mencionados según corresponda.

Consideraciones generales

Para el caso de los pasos de fauna para mamíferos terrestres se establecen las siguientes consideraciones:

- a) Los materiales más utilizados para el vallado del derecho de vía es el alambre de acero galvanizado cal. 12.5 de púas. Esta alambrada es útil para restringir el acceso de semovientes grandes, como ganado, hacia la infraestructura de transporte; no obstante, dada la separación de los alambres y la talla de nuestra fauna silvestre, este tipo de cercado no es adecuado para proteger la vida de la fauna silvestre y evitar que incursionen en la infraestructura lineal, por lo que se debe optar por otro tipo de cercados para reducir los atropellos, al menos a lo largo de los tramos que se identifiquen como tramos críticos o zonas negras en las infraestructuras.

Figura 106



Vista tendido de posteriza y alambrado de acero galvanizado de púas en derecho de vía de carretera.

- b) Una mejor alternativa resulta del uso de malla cinegética o venadera, no obstante, los animales pequeños pueden cruzar a través de ella, por lo que para su protección se debe colocar adicional a dicha malla, un rodapié de malla con menor apertura o incluso de material metálico o madera lisa y en una franja de no menos de 0.6 m de alto sobre el terreno natural, para evitar el cruce de animales pequeños por la parte inferior del cercado.
- c) Otra opción es el uso de malla gradual de tres nudos, que tiene un espaciamiento menor en la parte basal, incrementándose gradualmente conforme la malla toma altura. Ésta resulta una buena alternativa para la contención de animales pequeños, principalmente mamíferos.
- d) En el cruce de la infraestructura con zonas de gran abundancia de fauna silvestre y/o ecosistemas bien conservados, es importante poder cercar en su totalidad la infraestructura, permitiendo que los animales crucen solamente por los pasos establecidos (para lo que deben considerarse los criterios adecuados de distanciamiento, tipos, cantidades de pasos y su ubicación previamente).

Figura 107



Tendido de malla gradual y cerca ganadera en carreteras.

Figura 108



Tendido de malla ciclónica con rodapié metálico continuo y rodapié de malla metálica cerrada para protección de especies de mamíferos pequeños, anfibios y reptiles.⁷⁷

⁷⁷ Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, *op. cit.*, 2015.

- e) La malla debe rodear y cerrar completamente cualquier espacio en cunetas, lavaderos u otras obras de drenaje, así como accesos al derecho de vía para evitar que por las pequeñas perforaciones puedan pasar animales pequeños.
- f) Si se opta por el cercado de todo el derecho de vía de la infraestructura lineal, se deben implementar trampillas y rampas que permitan el escape hacia el exterior del derecho de vía, de aquellos animales que logren cruzar la cerca (Figura 109).

Los sistemas más recomendables son rampas de tierras compactadas. Consisten en la acumulación de materiales adosados en los márgenes de la parte interior del cerco, formando una rampa que alcance la altura de la malla. De este modo los animales atrapados que se desplacen por las áreas libres del derecho de vía pueden ascender por las rampas y saltar a la parte exterior sin poder regresar a la vialidad. Las dimensiones de estas rampas deben ser determinadas a partir de las características de la vía y, en particular, de la anchura de sus márgenes, así como de las especies a las que se destinen.

Figura 109



Ejemplos de rampas para escape del derecho de vía cercado sin posibilidad de que los animales regresen a éste.⁷⁸

⁷⁸ Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, *op. cit.*, 2015.

- g) Hay otros sistemas en los cuales las rampas se construyen a partir de paredes laterales de madera tratada que se rellenan con tierras y se revegetan. Estos sistemas son los más comúnmente aplicados para ungulados en países del centro de Europa, aunque requieren una notable inversión para su conservación.
- h) Otro método que se aplica para facilitar el escape de animales es la instalación de puertas con muelles, basculantes o de otro tipo a manera de trampillas, de tamaño y forma acorde a las especies a las que van destinadas. Estas puertas con muelles se abren hacia el exterior cuando el animal presiona desde el interior del derecho de vía, no obstante, requieren continuo mantenimiento para asegurar el funcionamiento de las trampillas ya que al estar a la intemperie es fácil que se oxiden y dejen de funcionar.

Figura 110



Ejemplos de a) rampa de escape conformada con tierra compactada dentro del derecho de vía permitiendo la salida hacia el exterior (diseñada para ungulados de mediano y gran tamaño); b) trampilla metálica para permitir el escape de fauna mediana.

- i) Otro punto importante a cuidar durante el cercado son los caminos de acceso. En ellos se pueden implementar diferentes alternativas para restringir el paso para fauna silvestre hacia el derecho de vía de alguna infraestructura lineal, tales como guarda ganados (que consisten en una fosa transversal al camino de acceso de unos 0.3 m de profundidad, cubierta con rejas y tubos o barras metálicas, preferentemente móviles, cubriendo todo el largo del camino y en un ancho no menor de 2 metros.
- j) En caminos poco transitados se pueden colocar puertas o falsetes que permitan el acceso de vehículos pero restrinjan el paso de animales.
- k) Asimismo, cuando se requiere restringir el acceso de la fauna sin interferir en la circulación de vehículos, en algunos países se colocan las placas electrificadas que se disponen transversalmente integrándose en el aglomerado de la vía. Estas placas integran una malla metálica electrificada alimentada por paneles solares, y cuando un animal pisa la placa recibe una pequeña descarga eléctrica que lo obliga a retroceder evitando su cruce. Estos dispositivos han probado su eficacia para osos y ciervos en Estados Unidos.

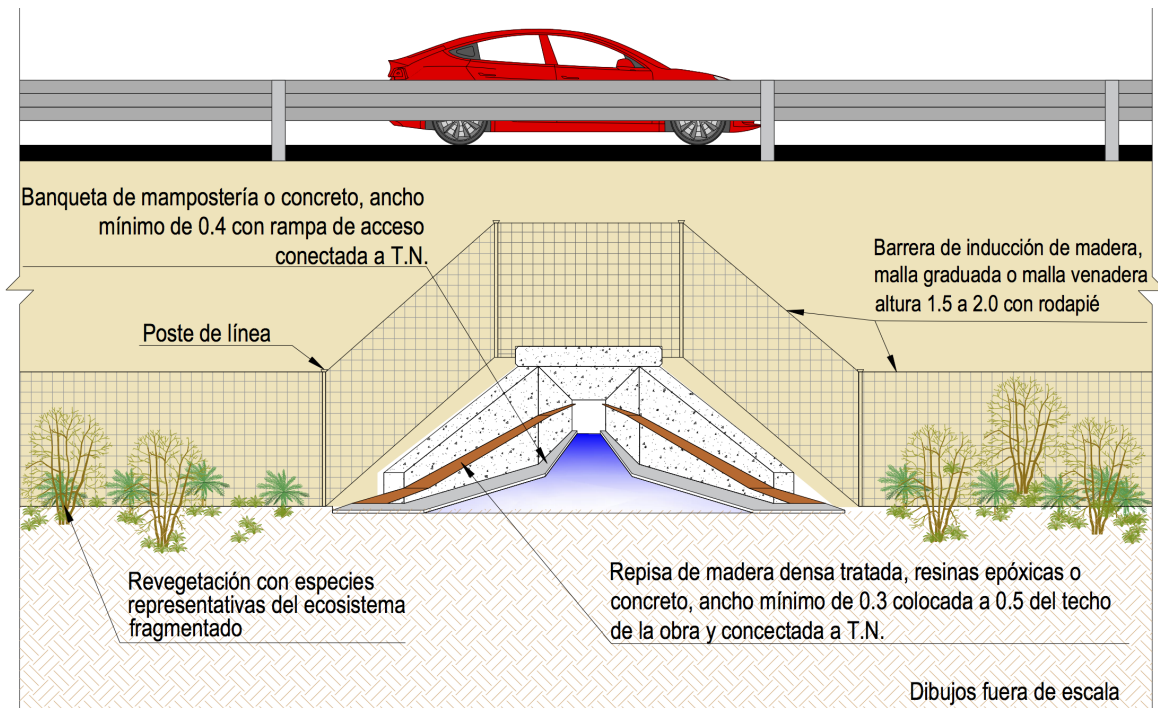
Figura 111



Ejemplos de a) guarda ganado (diseñada para mamíferos de gran tamaño);
b) pacas electrificadas para evitar el cruce de fauna silvestre sin afectar el tránsito vehicular.

- l) Finalmente, otro punto importante a cuidar al momento de cercar el derecho de vía de una infraestructura lineal, o bien colocar cercos de inducción de la fauna silvestre hacia los pasos instalados, es el asegurar que la malla rodee y cierre completamente las obras de drenaje o paso instalados, ya que, de lo contrario, los animales pueden cruzar hacia la corona a través de los espacios que queden libres.

Figura 112



Esquema de colocación de malla para protección y guía de fauna cerrando completamente la obra de paso con respecto del talud del terraplén.

Recomendaciones particulares para el vallado

En los siguientes incisos se dan algunas recomendaciones generales para la colocación del cercado, ya sea con malla ciclónica, ganadera (venadera) o gradual de tres nudos.

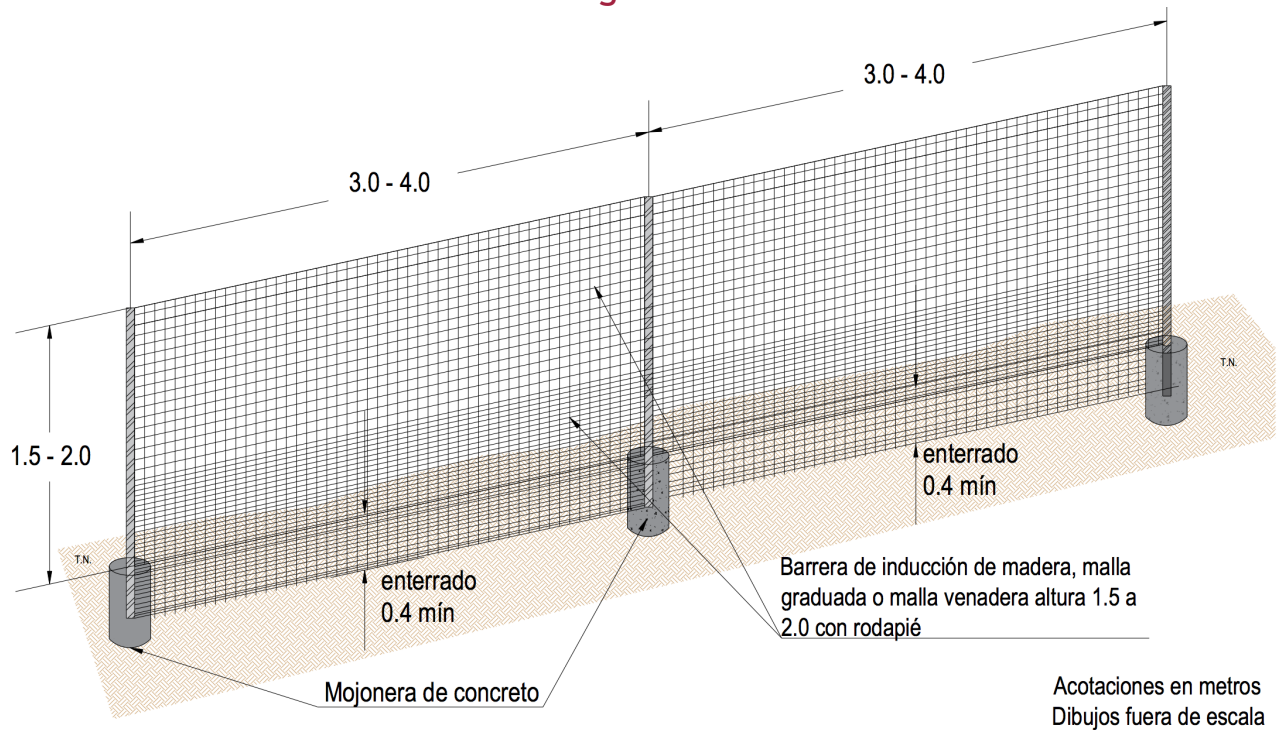
- a) La colocación de malla ciclónica para impedir el paso de la fauna silvestre debe cuidar la base para evitar que los animales puedan excavar e introducirse en ella. Para el caso de fauna excavadora, la malla debe colocarse enterrada dentro del terreno natural en una profundidad de al menos 0.4 m por debajo del nivel del terreno natural y anclada en un firme de concreto.

Figura 113



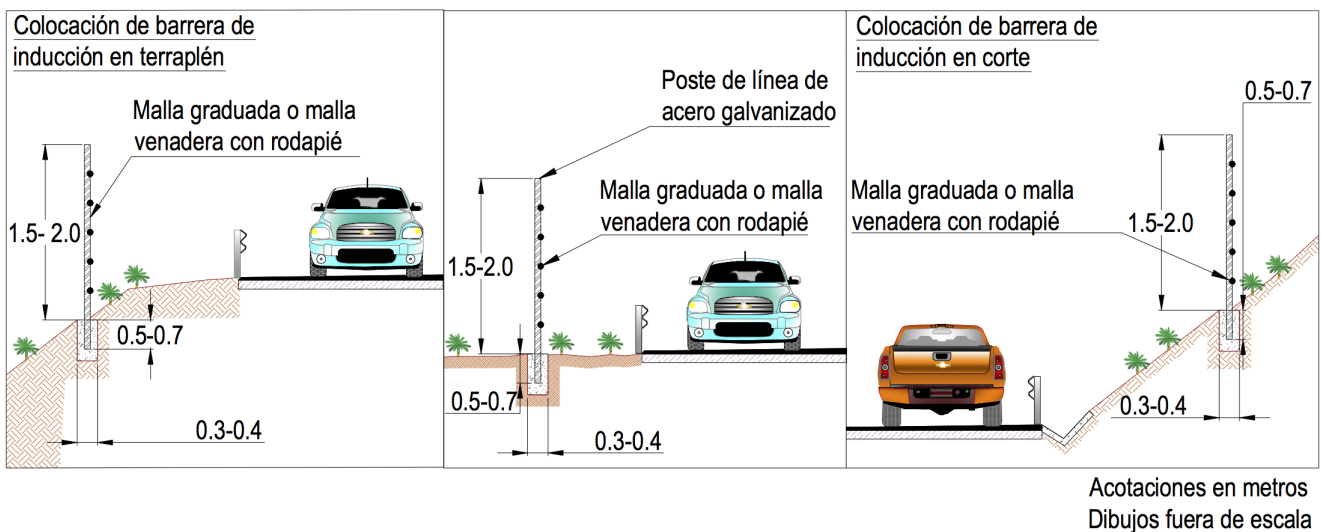
Tendido de malla ciclónica junto a vialidad carretera con colocación de piedra para evitar que la fauna excave y cruce por debajo de la malla.

- b) Se recomienda instalar los postes de fijación de malla a una distancia no mayor de 4.0 m entre ellos.
- c) El hincado del poste debe tener una profundidad de 0.5 a 0.7 m y ser relleno con concreto. En sitios donde exista fauna excavadora se debe colocar la malla inmersa en un firme de concreto a 0.4 m de profundidad.

Figura 114

Esquema de hincado y colocación de malla ganadera o gradual de tres nudos para protección y guiado a paso de fauna.

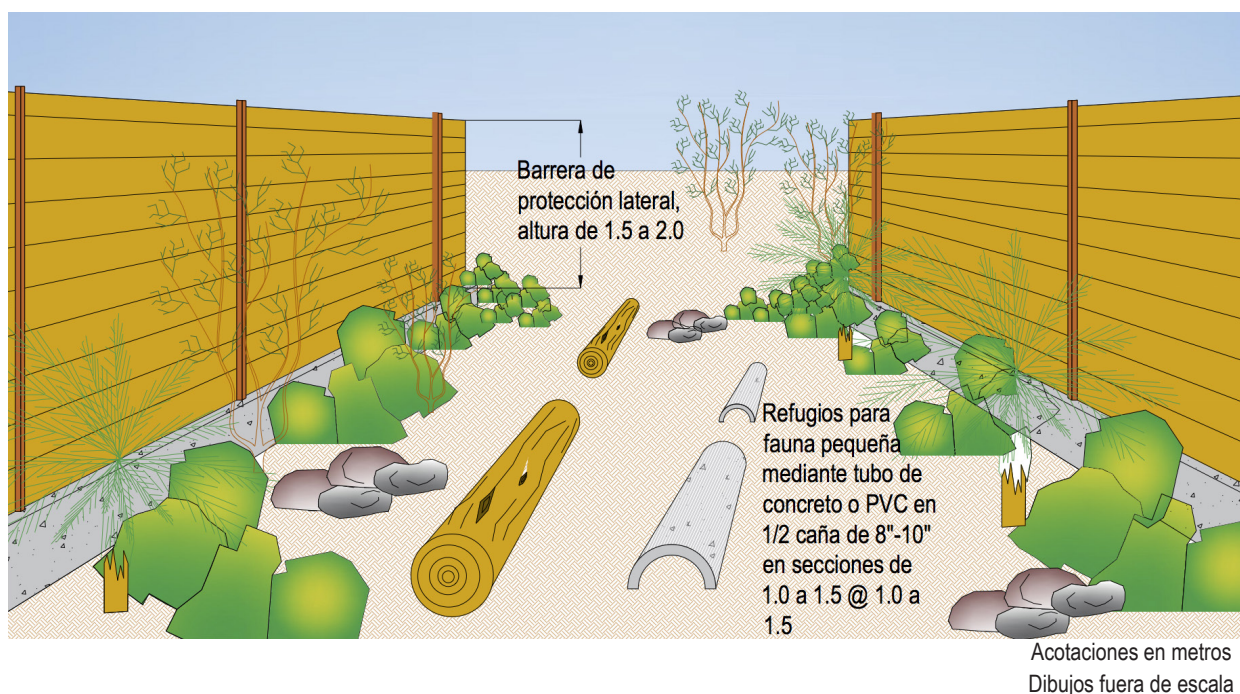
- d) La altura del vallado se determina por la especie de mayor tamaño y capacidad de salto en la zona.
- e) La altura y forma de colocación depende de la configuración del terreno natural (terraplén, llano y corte) (Figura 115).

Figura 115

Esquemas de colocación e hincado de posteriza en zona de terraplén, llano y corte junto a vialidad carretera.

- f) En el caso de barreras de madera sobre los PIFA, éstas se deben desplantar al costado de la carretera y del paso para fauna, con el fin de reducir el ruido y la luz de los vehículos que transitan por la vialidad. Los postes de sujeción pueden ser de estructura metálica o polines de madera tratada y no deben tener una separación mayor a 4.0 m.
- g) El hincado de los postes de madera debe tener una profundidad de 0.5 a 0.7 m y ser rellenado con concreto.
- h) La altura de la barrera varía de acuerdo con las especies que transiten en la zona y puede ser de 1.5 m hasta 2.0 m considerando la fauna en nuestro país.

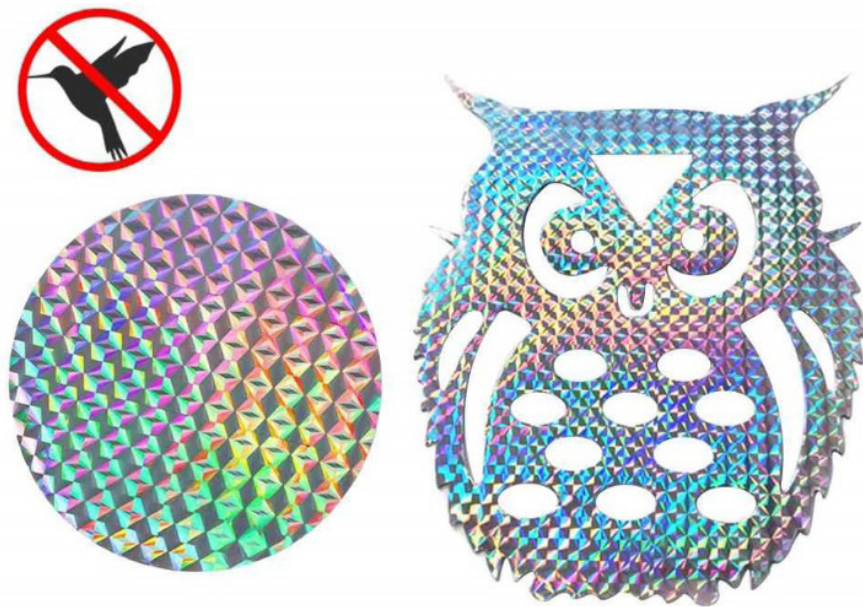
Figura 116



Ejemplo de colocación de barrera de madera en el Paso Inferior para Fauna (PIFA) tipo ecoducto o losa.

- i) En el caso de vallados sobre cuerpos de agua para protección de fauna voladora se puede considerar la colocación de barrera o pantalla de policarbonato en el cruce de escurrimientos o cuerpos de agua para no restringir la vista desde la carretera hacia las zonas de humedales y cuerpos de agua. No obstante, en estos casos resulta de gran importancia colocar siluetas de aves depredadoras (rapaces) o elementos reflejantes (calcomanías) sobre el policarbonato para evitar que las aves se estrellen en la barrera transparente.
- j) Los postes de sujeción para pantallas de policarbonato deben ser de estructura metálica con una altura no menor a 3.0 m.
- k) El hincado de los postes de metal debe tener una profundidad de 0.5 a 0.7 m y ser rellenado con concreto.

Figura 117



Pantalla de policarbonato con calcomanías o pegatinas reflejantes, así como figuras con siluetas de aves depredadoras para evitar que las aves choquen con la barrera transparente.

CAPÍTULO 6

SEÑALIZACIÓN VIAL

PREVENCIÓN AL USUARIO DE LA

INFRAESTRUCTURA LINEAL

SOBRE LA PRESENCIA DE FAUNA SILVESTRE

Generalidades

La implementación de un adecuado sistema de señalización vial en la infraestructura lineal debe transmitir a los usuarios las indicaciones relacionadas con su seguridad y con la protección de las vías de comunicación, para regular y canalizar correctamente el tránsito de vehículos y peatones, por lo que, con el propósito de facilitar que los usuarios comprendan esas indicaciones, dicho sistema debe ser uniforme en todo el territorio nacional, para disminuir la ocurrencia de accidentes.⁷⁹

Las señales verticales son uno de los elementos que componen el sistema de señalización vial y tienen el objetivo de transmitir al usuario la información suficiente para orientarlo sobre el sitio en que se encuentra y la forma de alcanzar su destino, prevenir sobre las condiciones prevalecientes en la vialidad y regular el tránsito, además de coadyuvar a su seguridad vial durante su trayecto.⁸⁰

Las señales verticales preventivas (SP) tienen por objeto prevenir al usuario sobre la existencia de algún peligro potencial en el camino y su naturaleza.⁸¹

Las señales verticales informativas (SI) tienen por objeto guiar al usuario a lo largo de su itinerario por carreteras y vialidades urbanas, e informarle sobre nombres y ubicación de las poblaciones en dichas vialidades, lugares de interés, las distancias en kilómetros y ciertas recomendaciones que conviene observar.⁸²

De acuerdo con la clasificación funcional de las señales informativas (SI), en el sistema vial se cuenta con las señales informativas de recomendación (SIR). Estas señales se utilizan con fines educativos para proporcionar al usuario información relevante acerca de disposiciones o recomendaciones de seguridad que debe observar durante su recorrido, incluyendo las limitaciones físicas de la vialidad o prohibiciones reglamentarias.⁸³

⁷⁹ NOM-034-SCT2-2011, Señalamiento horizontal y vertical de carreteras y vialidades urbanas.

⁸⁰ Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2014) *Manual de señalización vial y dispositivos de seguridad*.

⁸¹ NOM-034-SCT2-2011, Señalamiento horizontal y vertical de carreteras y vialidades urbanas.

⁸² NOM-034-SCT2-2011, Señalamiento horizontal y vertical de carreteras y vialidades urbanas.

⁸³ Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2014) *Manual de señalización vial y dispositivos de seguridad*.

Con el propósito de coadyuvar a la protección de la fauna silvestre en nuestro país, se han implementado las señales antes descritas en las zonas donde se ha detectado el cruce de la fauna para inducir a los conductores a extremar precauciones debido a la presencia de la fauna silvestre.

Las señales verticales resultan ser una medida adicional de mitigación para la protección de la fauna y de los usuarios de la infraestructura vial. Tienen como objetivo disminuir los atropellos de la fauna y las colisiones vehículo-animal y, por lo tanto, reducir las lesiones, muertes y daños que se derivan. Es necesario mencionar que a pesar de su implementación común, la evidencia de su efectividad es inconsistente y en la mayoría de los casos no se ha evaluado la eficacia de éstas.⁸⁴

Aunque la señalización normalizada que advierte de la probable irrupción de fauna silvestre en la infraestructura vial es poco efectiva,^{85, 86} existen muchos estudios que han demostrado la eficiencia de su uso bajo distintas circunstancias, en función del tipo de señalamientos.

Por ejemplo, las señales de advertencia parpadeantes temporales o carteles vistosos y con mensajes han mostrado mayor efectividad, aunque también se ha visto que no en todos los casos su efecto es duradero.^{87, 88}

Las señales con luces intermitentes que se activan con la presencia de animales y con mensajes electrónicos, o las señales que se activan por la alta velocidad del vehículo, han resultado casos de éxito por parte de los conductores. Sin embargo, se cree que los conductores podrían volverse menos sensibles si las señales en el caso de las activadas por animales producen con frecuencia disparos falsos (por ejemplo, de vegetación en movimiento).

Aquellas que son activadas por la alta velocidad han demostrado ser muy eficientes por parte de los conductores, supone tal vez a la naturaleza interactiva de los letreros que consiste en activar mensajes electrónicos de alerta cuando un vehículo excede la velocidad y posteriormente el segundo mensaje se activa si el vehículo a exceso de velocidad la disminuye.

Algunos autores analizaron su aplicación incluyendo medidas adicionales como reductores de velocidad y, lo más importante, mediante campañas de concientización pública que han registrado hasta un 41% en la baja de las colisiones.⁸⁹

⁸⁴ Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, *op. cit.*, 2015.

⁸⁵ Pojar, T.M., R.A. Prosenice, D.F. Reed, T.N. Woodard (1975). "Effectiveness of a lighted, animated deer crossing sign". *Wildlife Management* 39: 87-91.

⁸⁶ Al-Kaisy, A., A. Hardy, C. Nemfakos (2008). "Static warning signs of occasional hazards: Do they work?" *ITE Journal* 78: 38-42.

⁸⁷ Sullivan, T.L., A.F. Williams, T.A. Messmer, L.A. Hellings, S.Y. Kyrychenko (2004). "Effectiveness of temporary warning signs in reducing deer-vehicle collisions during mule deer migrations". *Wildlife Society Bulletin* 2004, 32 (3): 907-915.

⁸⁸ Al-Ghamdi, A.S., S.A. AlGadhi (2004). "Warning signs as countermeasures to camel-vehicle collisions in Saudi Arabia". *Accid Anal Prevent* 36: 749-760.

⁸⁹ Rea, R.V. (2012) "Road safety implications of moose inhabiting an urban-rural interface". *Urban Habitats* 7, 8 pp. Disponible en: http://www.urbanhabitats.org/v07n01/moose_full.html [Consulta: 9 de diciembre de 2013].

En el contexto internacional se ha visto la implementación de carteles con fotografías de la fauna de gran impacto emocional que ayudan a sensibilizar a los usuarios de la infraestructura lineal. Sobre estos casos se detectó que los conductores mostraron mayor respuesta a las señales de advertencia de vida silvestre que incluyen el número de animales muertos en la infraestructura lineal durante un periodo de tiempo anterior. Asimismo descubrieron que un breve programa de retroalimentación donde se incluyeron multas acompañadas de un documento informativo sobre el número de colisiones, lesiones y muertes que habían ocurrido en esa infraestructura lineal específica, ayudó a reducir el número de conductores que aceleran ante la señalización.⁹⁰

Los resultados obtenidos en cuanto a la respuesta de los usuarios ante las señales y medidas de prevención que se puedan implementar varían dependiendo de la región o país en el que se apliquen y esto depende de la cultura, la educación o el interés de los conductores por las distintas medidas que se muestran en las señales. Por lo anterior es recomendable evaluar el antes y después de la implementación de estas medidas para analizar su efectividad.

Es importante resaltar que la señalización vial es parte importante de la infraestructura lineal, por lo que se requieren como medidas adicionales al sistema vial, no como solución única o absoluta a las problemáticas que se presentan y en este caso al atropellamiento de fauna o a las colisiones vehículo-animal.

El presente capítulo proporciona la señalización vial que debe utilizarse para indicar las zonas donde se implementen pasos para fauna silvestre, así como para indicar a los conductores la necesidad de reducir la velocidad y extremar precauciones, en apego a lo establecido en la normativa vigente NOM-034-SCT2-2011, Señalamiento horizontal y vertical de carreteras y vialidades urbanas, y el *Manual de señalización vial y dispositivos de seguridad 2014* de la SCT.

6.1 Señales reglamentarias

El *Manual de señalización vial y dispositivos de seguridad 2014* de la SCT, proporciona la señal preventiva SP-48 la cual se utiliza para indicar los sitios o zonas donde exista la posibilidad o se tenga la certeza de la presencia de fauna silvestre sobre la vialidad. La señal preventiva SP-48 FAUNA SILVESTRE está constituida por un pictograma que representa de manera general a las diferentes especies, sin embargo, éste puede representar a otra especie en particular (Figura 118).

⁹⁰ Bond A.R.F. y D.N. Jones (2013). "Wildlife warning signs: Public assessment of components, placement and designs to optimise driver response". *Animals* 3: 1142-1161. Australia.

Figura 118



Señal preventiva SP-48 FAUNA SILVESTRE.

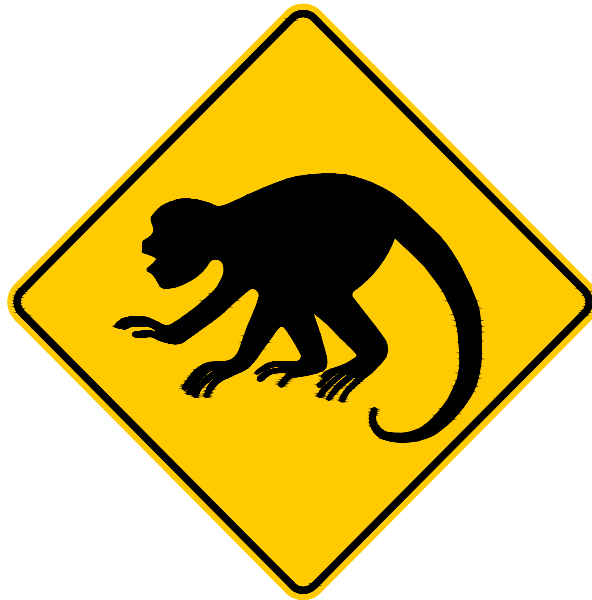
La Dirección General de Servicios Técnicos de la SCT ha autorizado la implementación de cuatro pictogramas en la señal preventiva SP-48 FAUNA SILVESTRE, representados por las siguientes especies de nombre común: jaguar, mono, oso y zorra (figuras 119 a 122). Los pictogramas guardan una normalización gráfica dentro del sistema, a través de rasgos simples y comunes de todos sus componentes, y fueron seleccionados como representantes de la numerosa biodiversidad que existe en nuestro país, ya que a través de las señales viales no es factible proporcionar al usuario toda la información que pudiera encontrarse al transitar por la infraestructura lineal.

Figura 119



Señal preventiva SP-48 FAUNA SILVESTRE con el pictograma “jaguar”.

Figura 120



Señal preventiva SP-48 FAUNA SILVESTRE con el pictograma “mono”.

Figura 121



Señal preventiva SP-48 FAUNA SILVESTRE con el pictograma “oso”.

Figura 122**Señal preventiva SP-48 FAUNA SILVESTRE con el pictograma “zorra”.**

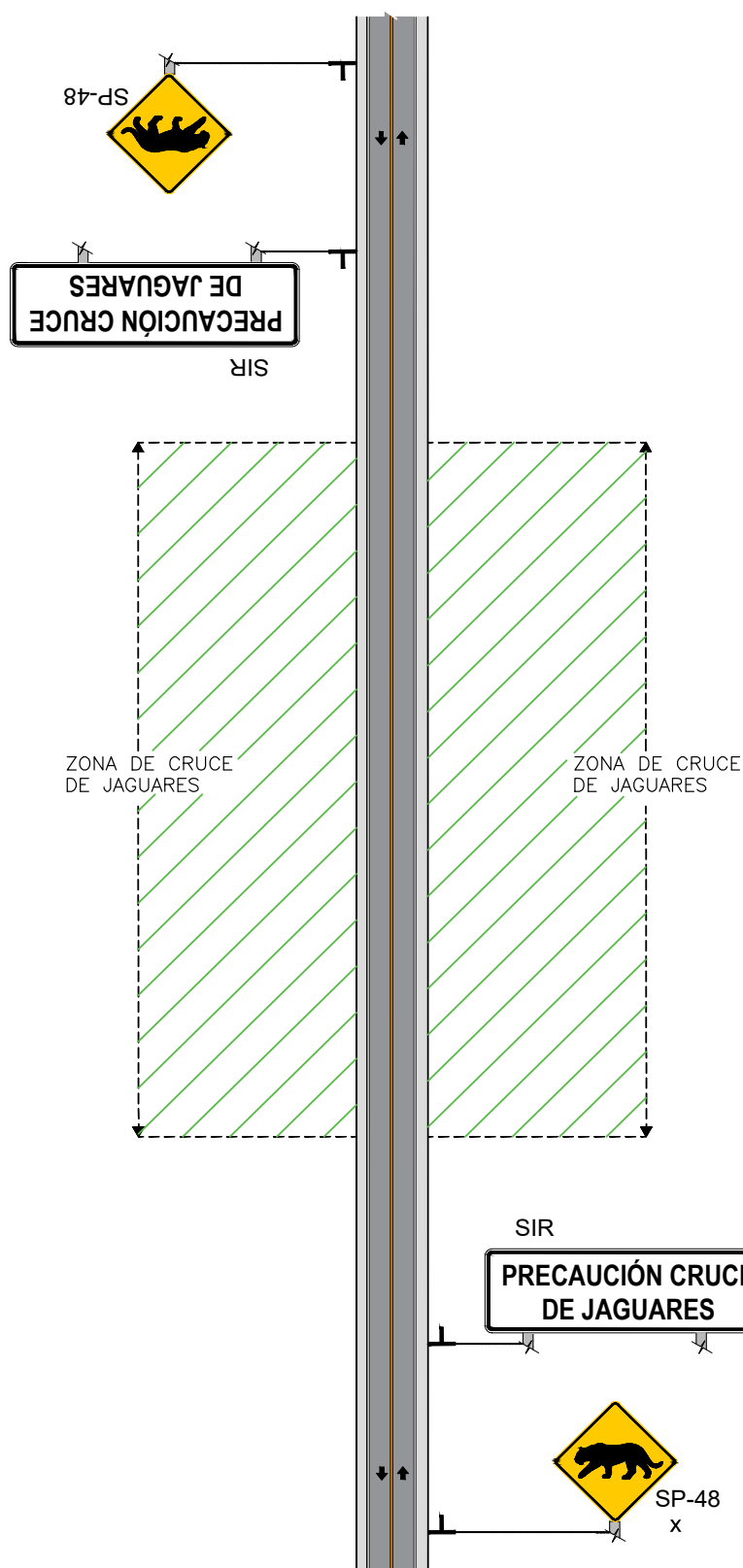
Las especies indicadas en estos pictogramas están consideradas en la NOM-059-SEMARNAT-2010 “Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo; por lo que se requieren proteger”.

A continuación se presenta de manera esquemática un ejemplo de aplicación de la señal preventiva SP-48 FAUNA SILVESTRE (Figura 123), con los pictogramas antes mencionados, para indicar a los usuarios de la infraestructura lineal la necesidad de extremar precauciones en sitios o zonas donde exista la posibilidad o la certeza de la presencia de fauna silvestre.

Se debe considerar que el tamaño de la señal preventiva SP-48 FAUNA SILVESTRE con el pictograma “jaguar”, así como la separación entre dicha señal y la señal informativa de recomendación SIR, ambas indicadas en el ejemplo de aplicación, deben determinarse conforme a lo establecido en el *Manual de señalización vial y dispositivos de seguridad 2014* de la SCT.

Las señales indicadas en el ejemplo de aplicación deben integrarse al señalamiento vial existente en la infraestructura lineal.

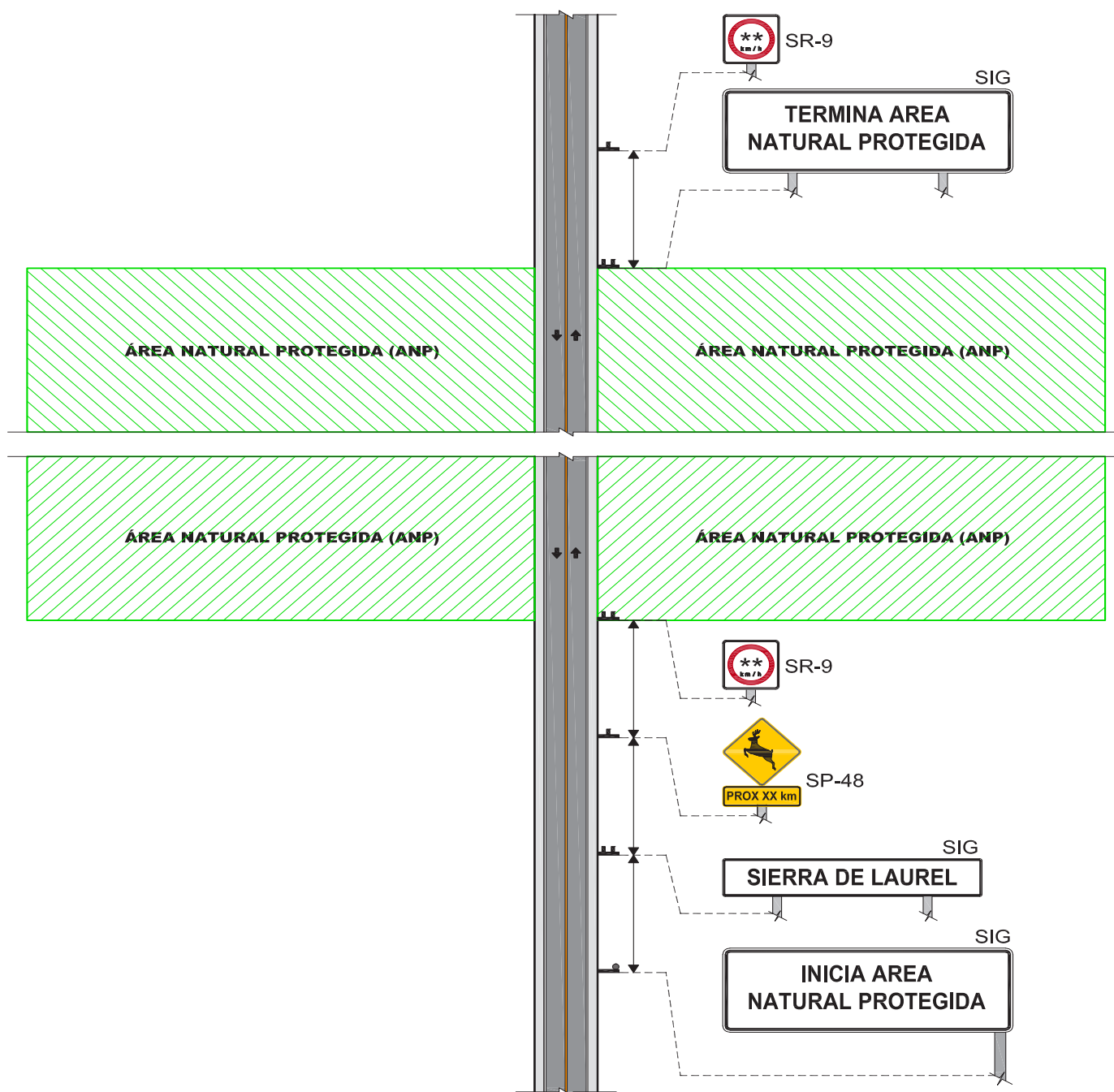
Figura 123



Ejemplo de aplicación de la señal preventiva SP-48 FAUNA SILVESTRE con el pictograma "jaguar".

En el siguiente esquema se muestra un ejemplo de aplicación de la señal preventiva SP-48 FAUNA SILVESTRE previa a un ANP (Figura 124). Se debe considerar que el tamaño y la separación de las señales indicadas en el ejemplo de aplicación deben determinarse conforme a lo establecido en el *Manual de señalización vial y dispositivos de seguridad 2014*. Las señales indicadas en el ejemplo de aplicación para informar el inicio y término del ANP se instalan en ambos sentidos de circulación y deben integrarse al señalamiento vial existente en la infraestructura lineal.

Figura 124



Ejemplo de aplicación de la señal preventiva SP-48 FAUNA SILVESTRE previa a un Área Natural Protegida (ANP).

La señal preventiva SP-48 FAUNA SILVESTRE y la señal restrictiva SR-9 VELOCIDAD deben instalarse adicionalmente dentro del ANP a cada 10 km. El límite máximo de velocidad permitido en el paso por el ANP es establecido por los especialistas en fauna silvestre conforme a los estudios realizados en cada proyecto y la fauna que se requiera proteger. Asimismo, las señales indicadas en el ejemplo de aplicación deben integrarse al señalamiento vial existente en la infraestructura lineal.

Otra especie que ha sido considerada dentro de los pictogramas autorizados por la Dirección General de Servicios Técnicos de la SCT, dada la importancia de su fenómeno migratorio, es la Mariposa Monarca.

Cada año las mariposas Monarca arriban a México procedentes de Estados Unidos y Canadá después de realizar un recorrido de más de 4 mil km para dirigirse a su hábitat de hibernación en los santuarios de los estados de México y Michoacán. Para disminuir la mortandad masiva de esta especie por el cruce que hacen en algunas carreteras del Noreste y centro del país, se diseñaron cuatro diferentes señales que se autoriza instalar para este propósito.

Las señales consisten en un conjunto modular integrado por una señal restrictiva SR-9 VELOCIDAD, una señal de información general que indica el motivo de la restricción y su temporalidad (Figura 125). Así como tres señales de información general para incentivar a los usuarios a proteger a esta especie en peligro de extinción (figuras 126 a 128).

Figura 125



Señalización vial para indicar el motivo de la restricción y su temporalidad.

Figura 126



Señalización vial para incentivar a los usuarios a proteger a las mariposas.

Figura 127



Señalización vial para incentivar a los usuarios a proteger a las mariposas.

Figura 128



Señalización vial para incentivar a los usuarios a proteger a las mariposas.

De forma similar como ocurre para los señalamientos de la mariposa monarca, en el caso de señalamientos para fauna silvestre es importante considerar que en los sitios donde exista la probabilidad de cruce de fauna silvestre, tanto especialistas de fauna como los ingenieros de proyecto definan la recomendación de señalización para el tramo con base en elementos tanto biológicos como de ingeniería, tales como: las especies presentes, temporalidad, topografía del terreno y características propias del proyecto de infraestructura lineal, entre otros. Con esta información es posible definir el tipo de pictograma adecuado, la ubicación de los señalamientos, distanciamiento, límite de velocidad, etc., en apego al *Manual de señalización vial y dispositivos de seguridad 2014* de la SCT.

6.2 Pictogramas adicionales

La necesidad de incluir pictogramas adicionales a los autorizados por la Dirección General de Servicios Técnicos de la SCT obedece a que gran parte de la fauna atropellada y de especies protegidas por la NOM-059-SEMARNAT-2010 “Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo; por lo que se requieren proteger”, son los reptiles y las aves. El usuario al estar esperando encontrarse con fauna silvestre mediana a grande, no pone atención a la presencia de reptiles sobre la carpeta ni a las aves que pueden impactarse en el parabrisas.

En nuestro país existe una mayor posibilidad de que un usuario atropelle a un reptil, a un ave o a un invertebrado, que a un mamífero mediano o grande, debido a que estos son grupos con gran cantidad de especies y tamaños que muy frecuentemente inciden sobre la infraestructura vial.

Figura 129



Ejemplo de a) Ranera Perico (*Leptophis ahaetulla*) y b) Garrobo (*Ctenosaura similis*) reptil. Atropellados en las carreteras Tintal-Playa del Carmen, Quintana Roo, y Villahermosa-Escárcega, Tabasco, respectivamente (fuente: Grupo Selome, S.A. de C.V.).

México ocupa el segundo lugar del mundo en cuanto a riqueza de reptiles se refiere, con 1,016 especies; lo que representa el 9.12% de todas las especies de reptiles descritas en el planeta.⁹¹ En el territorio nacional se distribuyen 522 especies de reptiles con distribución restringida a México, entre las que se pueden señalar 439 lagartos, 380 serpientes y 37 tortugas.⁹²

Considerando la alta diversidad de especies de reptiles en México se puede señalar que 443 de éstas se encuentran listadas en la NOM-059-SEMARNAT-2010 bajo alguna categoría de protección, lo que implica que el 43% de ellas están distribuidas de la siguiente manera: 142 “Amenazadas”; 274 con “Protección especial”, y 27 en “Peligro de extinción”. De las anteriores, 200 especies son serpientes y están protegidas por las leyes mexicanas debido a que sus poblaciones son demográficamente inestables; un fenómeno similar ocurre en otros grupos taxonómicos como los lagartos.⁹³

Entre los factores que han afectado a las poblaciones de reptiles en el mundo se encuentran las carreteras, en donde el atropello es el impacto más evidente. En diversos estudios de varios países se ha identificado que, después de los mamíferos, los reptiles y anfibios (herpetofauna) son el grupo más afectado por atropellamiento.

⁹¹ The Reptile Database (2020). The Reptile Database. Disponible en: <http://www.reptile-database.org>. [Consulta: 20 de noviembre de 2020].

⁹² Johnson, J. D., L. D. Wilson, V. Mata-Silva, E. García-Padilla, y D. L. De Santis (2017). “The endemic herpetofauna of Mexico: organisms of global significance in severe peril”. *Mesoamerican Herpetology* 4: 544–620.

⁹³ Naranjo, E., M. Guerra-Roa, S. Gallina-Tessaro, S. Calmé (2010). “Uso de fauna silvestre en el norte de Mesoamérica: aspectos generales”. *Uso y manejo de Fauna Silvestre en el norte de Mesoamérica*. Instituto de Ecología, A.C., ECOSUR. México.

Entre los reptiles más atropellados se encuentran las serpientes, las iguanas y las lagartijas, ya que una carretera funciona como un atractor para los reptiles, debido a que estos organismos al ser de sangre fría requieren regular su temperatura corporal mediante la absorción de calor del medio, por lo cual se acercan a las carreteras para aprovechar el calor captado por el pavimento.⁹⁴

En México, por ejemplo, se tiene que en un monitoreo realizado una vez cada quince días, de febrero de 2010 a junio de 2016 (177 días), en un tramo carretero de 39 km de longitud cerca de la ciudad de Chetumal, Quintana Roo, México, se registraron un total de 578 observaciones de serpientes de 31 especies, de las cuales 433 estaban atropelladas sobre la carretera y 145 más se desplazaban sobre ésta.⁹⁵

Las especies atropelladas con mayor frecuencia en este tramo carretero fueron *Dipsas brevifacies* (endémica y bajo protección especial) (100 especímenes); *Sibon sanjoli* (70); *Leptodeira frenata* (45); *Ninia sebae* (45); *Boa imperator* (42); *Bothrops asper* (42); *Tropidodipsas sartorii* (bajo protección especial) (40); *Imantodes tenuissimus* (bajo protección especial) (28); *Micrurus diastema* (bajo protección especial) (25); y *Coniophanes imperialis* (24).

Por su parte se tiene que las condiciones ambientales son un factor importante en la frecuencia con que aparecen los reptiles sobre las carreteras ya que en este estudio se encontraron más ejemplares durante los meses de verano, correspondiente a la época de lluvias, que durante los meses más secos del invierno.

Figura 130



Ejemplo de aves atropelladas a lo largo de los tramos en operación de carreteras en México:
a) Chachalaca Oriental (*Ortalis vetula*) y b) Carpintero Cheje (*Melanerpes aurifrons*)
(fuente: Grupo Selome, S.A. de C.V.).

⁹⁴ Cupul, F. (2002). "Víctimas de la carretera: fauna apachurrada". *Gaceta CUC*. Departamento de Ciencias. Centro Universitario de la Costa. México.

⁹⁵ Köhler, G., J. R. Cedeño-Vázquez y P. M. Beutelspacher-García (2016). "The Chetumal Snake Census: generating biological data from road-killed snakes. Part 1. Introduction and identification key to the snakes of southern Quintana Roo, Mexico". *Mesoamerican Herpetology*, 3(3).

En el caso de las aves se puede señalar que de aproximadamente 10,500 especies que se distribuyen en todo el mundo, México cuenta con 1,119 de esas especies (cerca del 11% del total mundial). Esto coloca a nuestro país en el onceavo lugar de acuerdo con su riqueza avifaunística. El 77% de las especies se reproducen en México y la mayor parte son especies residentes permanentes, seguidas en número por las visitantes de invierno y las migratorias de paso. Un total de entre 124 especies son endémicas de México, lo que representa el 11% del total de especies registrado en el país.⁹⁶

A pesar de esta alta riqueza de especies de aves registrada en México, se tiene que 341 especies (30.47%) se encuentran en alguna categoría de riesgo de acuerdo con la NOM-059_SEMARNAT-2010: 153 “Amenazadas”; 118 con “Protección especial”, y 70 en “Peligro de extinción”.⁹⁷

Las aves son un grupo de animales cuyas poblaciones se ven fuertemente impactadas por el efecto de las carreteras en todo el mundo debido a colisiones con vehículos. En México son pocos los estudios que han evaluado de manera sistemática dicho impacto, sin embargo, se ha evidenciado tal fenómeno en varias carreteras. Como ejemplo se puede mencionar un estudio realizado en 1.2 km de carretera en el Istmo de Tehuantepec, Oaxaca, por 49 días, en el que se registraron 40 aves muertas pertenecientes a 16 especies, con un promedio de 0.82 aves en 1.2 km/día.⁹⁸

Si los números siempre se mantuvieran en un estándar de atropellos en cualquier época del año, se podría estimar que 5.74 aves morirían por semana, 24.6 por mes y 299.3 anualmente en el tramo pequeño de 1.2 km de carretera en La Ventosa-Tapanatepec, Oaxaca.

Se tiene como evidencia del alto índice de atropello de aves, un monitoreo de atropellamientos en la carretera federal 2 en el tramo entre Ímuris y la frontera estatal con Chihuahua, realizado entre 2016 y 2018 en colaboración con Sky Island Alliance y Cuenca Los Ojos. Este estudio reveló que, después de los mamíferos medianos y pequeños, las aves fueron el segundo grupo de especies más afectado, representando el 15.8% de los animales atropellados registrados. Las especies más atropelladas fueron el Búho Cornudo (*Bubo virginianus*) y el Correcaminos Norteño (*Geococcyx californianus*). Entre las especies de aves afectadas por colisión con vehículos en esta carretera se registró la presencia del Gavilán de Cooper (*Accipiter cooperii*) y la Codorniz Montezuma (*Cyrtonyx montezumae*), ambas especies con protección especial de acuerdo con la NOM-059-SEMARNAT-2010.⁹⁹

⁹⁶ Berlanga, H., H. Gómez de Silva, V. M. Vargas-Canales, V. Rodríguez-Contreras, L. A. Sánchez-González, R. Ortega-Álvarez y R. Calderón-Parra (2019). *Aves de México: Lista actualizada de especies y nombres comunes*. CONABIO, Ciudad de México.

⁹⁷ NOM-059-ECIL-1994. Norma Oficial Mexicana que determina las especies y subespecies de flora y fauna silvestres terrestres y acuáticas en peligro de extinción, amenazadas, raras y las sujetas a protección especial, y que establece especificaciones para su protección. *Diario Oficial de la Federación*, 16 de mayo de 1994.

⁹⁸ Grosselet, M., B. Villa-Bonilla, y G. Ruiz Michael, (2009). “Afectaciones a vertebrados por vehículos automotores en 1.2 km de carretera en el Istmo de Tehuantepec”. *Proceedings of the Fourth International Partners in Flight Conference: Tundra to Tropic* 1–5.

⁹⁹ Sonoran Joint Venture (2020). Highways, Laws and Birds. Arizona, EU. Disponible en: <https://sonoranjv.org/highways-laws-and-birds/>.

En las zonas cercanas a humedales se registra un aumento en el número de especies de aves atropelladas conforme se acerca el final del año, lo cual se debe a la mayor presencia de aves migratorias que llegan al humedal para pasar el invierno.

Es fundamental mencionar que muchos de los humedales en México constituyen un Área de Importancia para la Conservación de las Aves (AICA), y muchos de ellos están catalogados como sitios Ramsar (Convención relativa a los humedales de importancia internacional especialmente como hábitat de aves acuáticas o Convenio Ramsar) por lo que son sitios de alta importancia para la conservación de la diversidad biológica de aves, pues reciben cada invierno gran cantidad de aves migratorias procedentes del norte del continente.

Figura 131



a) Ejemplar de Tarántula Yucateca (*Tliltocatl epicureanus*) atropellada en el tramo carretero El Tintal-Playa del Carmen, Quintana Roo (fuente: Grupo Selome, S.A. de C.V.).
b) Cangrejos Azules (*Cardisoma guanhumi*) propensos de atropello en Veracruz durante su época reproductiva (fuente: Licea-Vélez, 2020).

Los cangrejos y las tarántulas, así como otros invertebrados, son animales que por su comportamiento reproductivo presentan grandes movilizaciones terrestres, incidiendo muchas veces sobre infraestructuras lineales como las carreteras, por lo que en dicha temporada son muy susceptibles de atropellamiento. A este fenómeno no se le ha puesto la suficiente atención ni se ha documentado formalmente en nuestro país, siendo que las especies de invertebrados también forman parte de la biodiversidad y genéticamente hablando forman una unidad (una especie) tanto como un jaguar, un mono o un oso (cada uno es una especie).

Los cangrejos terrestres de ciertas especies de las familias *Grapsidae*, *Gecarcinidae* y *Ocypodidae* se encuentran bien representados en México, habitando zonas de dunas y humedales costeros de nuestro país. Estos organismos se caracterizan por depender del océano para la crianza y desarrollo de sus larvas,¹⁰⁰ factor que propicia que realicen grandes desplazamientos en ciertas épocas del año hacia el

¹⁰⁰ Brusca, R. C. y G. J. Brusca (1990). *Invertebrates*. Sinauer Associates Editors. USA, pp. 622-624.

mar; trayectos durante los cuales son fuertemente atropellados por los vehículos en circulación en las carreteras.

Una de las especies más afectadas por este impacto es el Cangrejo Azul (*Cardisoma guanhumi*), que se distribuye en las costas de todo el Golfo de México, el Pacífico y Mar Caribe de nuestro país, cuyo hábitat natural son las zonas de manglares y las partes arenosas alejadas de la playa, por lo que muchas carreteras se cruzan en su migración hacia el océano para completar su proceso natural de reproducción. En la ciudad de Tulum, Quintana Roo, durante la temporada de reproducción de los cangrejos, diversos voluntarios trabajan durante las tardes-noches con la finalidad de ayudar a esta especie a cruzar la vialidad y evitar que sean atropellados, ya que desde hace 10 años la migración de los cangrejos azules ha disminuido por el tránsito que se presenta en la zona costera que prácticamente comenzó a atropellarlos en grandes cantidades.¹⁰¹

Asimismo las especies de tarántulas también son organismos que se ven gravemente afectados por efecto del atropellamiento ya que de acuerdo con su comportamiento durante la época reproductiva, las hembras se mantienen dentro o cerca de su escondite, pero los machos tienden a migrar en oleadas de cientos de organismos en búsqueda de una hembra para aparearse, por lo que al cruzar sobre la carpeta asfáltica mueren atropellados, lo que puede derivar en un gran problema genético en las poblaciones debido a que estos atropellos implican una mortandad mayor sobre los machos, ocasionando un desbalance en la distribución de los sexos de la especie.

Es importante que en México se protejan a las especies de tarántulas, principalmente durante su época reproductiva, cuando se presentan estas grandes migraciones ya que nuestro país ocupa el segundo lugar a nivel mundial en cuanto a número de especies registradas (92 especies), de las cuales el 93% son endémicas del país y de acuerdo con la NOM-059-SEMARNAT-2010, siete especies se encuentran dentro de una categoría de riesgo.¹⁰²

En un estudio realizado en el tramo carretero Ramal El Tintal-Playa del Carmen, Quintana Roo, se observó que en tres días 174 ejemplares de la Tarántula Yucateca (*Tiiltocatl epicureanus*) fueron atropelladas durante el mes de septiembre, cuando los machos cruzan a través de la carpeta asfáltica en busca de hembras para aparearse, lo que puede resultar en una importante afectación a la población de esta especie en el ecosistema al haber una mortandad selectiva hacia un determinado género (machos); población que podría verse comprometida a mediano plazo por este efecto.

Por lo anterior, este Manual en sus capítulos 4 y 5 considera la implementación de obras para paso y protección de fauna voladora, así como los pasos temporales para invertebrados migratorios. Asimismo, en el presente capítulo se resalta la im-

¹⁰¹ Cambio 22. (2020). Empieza la Travesía del Cangrejo Azul en Tulum. Disponible en: <https://cambio22.mx/empieza-la-travesia-del-cangrejo-azul-en-tulum/>. [Consulta: 26 de noviembre de 2020].

¹⁰² Profepa (2020). "México, segundo lugar en diversidad de tarántulas en el mundo". Disponible en: <https://www.gob.mx/profepa/es/articulos/mexico-segundo-lugar-del-mundo-en-diversidad-de-tarantulas>. [Consulta: 26 de noviembre de 2020].

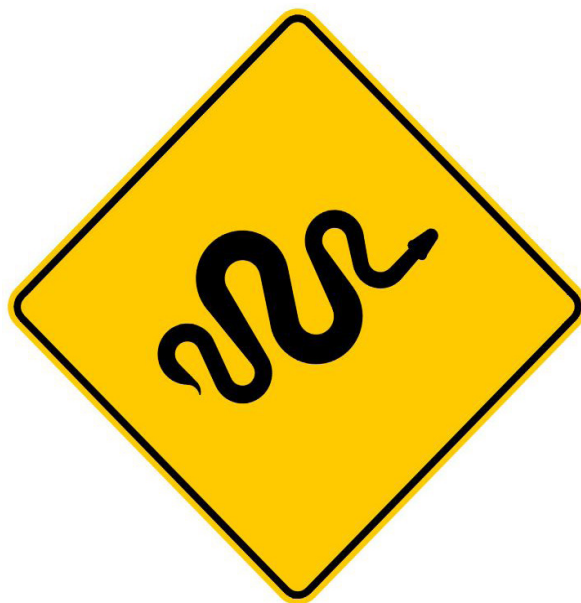
portancia de contar con pictogramas que permitan alertar al usuario de la infraestructura lineal, sobre la posible incidencia de aves, reptiles e invertebrados.

La instalación de los siguientes señalamientos tiene que estar sujeta a revisión de la Dirección General de Servicios Técnicos, ya que sólo se aplican para los casos que se justifique de acuerdo con el tipo de paso para fauna a implementar.

Para lograr la efectividad de las siguientes señales en las zonas donde se implementen los pasos para fauna silvestre específicos es necesario indicar a los conductores la necesidad de reducir la velocidad y extremar precauciones, en apego a lo establecido en la normativa vigente NOM-034-SCT2-2011, Señalamiento horizontal y vertical de carreteras y vialidades urbanas, y el *Manual de señalización vial y dispositivos de seguridad 2014* de la SCT.

Se propone el siguiente pictograma para los reptiles, representados por la serpiente Boa o Mazacuata (*Boa constrictor imperator*), una de las especies protegida por la NOM-059-SEMARNAT-2010, y que, como se explicó anteriormente, después de los mamíferos son los vertebrados más afectados por atropellamiento en la infraestructura lineal debido a que estos organismos, al ser de sangre fría, requieren regular su temperatura corporal mediante la absorción de calor del medio, por lo cual muchas de ellas se acercan a las carreteras para aprovechar el calor captado por el pavimento.¹⁰³

Figura 132



Propuesta de señal preventiva SP-48 FAUNA SILVESTRE con el pictograma "reptiles".

Asimismo, se propone el siguiente pictograma para las aves, representadas por la silueta de un pato como el pato mexicano (*Anas platyrhynchos diazi*), endémico

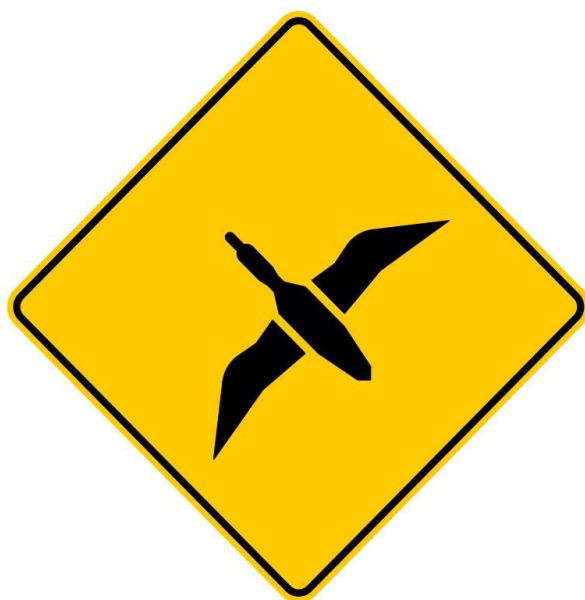
¹⁰³ Cupul, F. (2002). "Víctimas de la carretera: fauna apachurrada". *Gaceta CUC*. Departamento de Ciencias. Centro Universitario de la Costa. México.

y con categoría de “Amenazado” por la NOM-059-SEMARNAT-2010; se contempla para efectos del pictograma, como representante de las diversas aves de humedal que frecuentemente son atropelladas al desplazarse entre cuerpos de agua aledaños a carreteras (garzas, tordos, gallaretas, garcetas, cisnes, pelícanos, flamencos, cormoranes, etc.). Estas aves usualmente realizan vuelos bajos cuando se movilizan de un punto del humedal a otro, siendo susceptibles de atropello cuando una infraestructura lineal se encuentra cercana o fragmentando zonas inundables y cuerpos de agua.

Varias especies de aves migratorias como los patos realizan desplazamientos desde Canadá y Estados Unidos, para resguardarse del invierno en países como el nuestro, así como en otros países de América del centro y sur. Por ello, la Convención entre los Estados Unidos Mexicanos y los Estados Unidos de América obliga a las partes a proteger las aves migratorias, cualquiera que sea su origen, que en sus viajes habiten temporalmente en los Estados Unidos de Norteamérica o en México, a fin de que sus especies no se extingan, siendo entonces importante buscar la protección de las aves en carreteras, dada la considerable connotación de su conservación a nivel internacional.

Es importante señalar que adicional a las aves de humedal, las aves rapaces (búhos, halcones, águilas, lechuzas, zopilotes) también son atropelladas con alta frecuencia en carreteras, como resultado de la caza nocturna de presas o su alimentación carroñera. Estas aves aprovechan la luz de los automóviles para capturar a sus presas (pequeños mamíferos) que, al ser alumbrados por los faros de los vehículos se detienen y son más fáciles de capturar, resultando atropelladas en el proceso; o bien descenden a la carpeta para alimentarse de algún animal atropellado y desafortunadamente también son arrolladas.

Figura 133



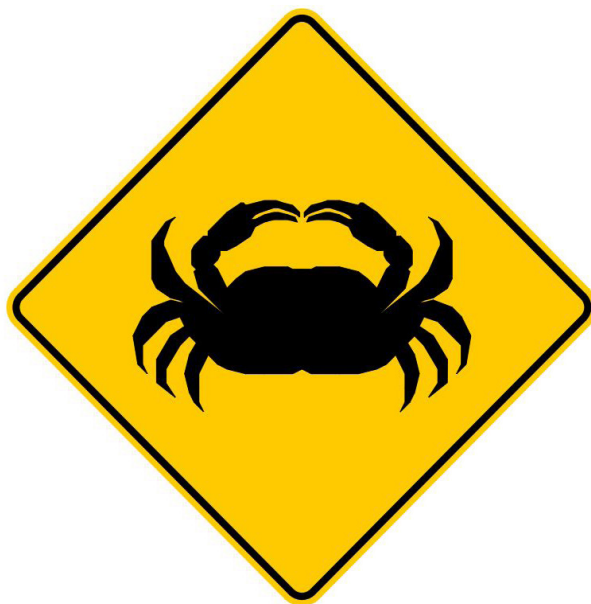
Propuesta de señal preventiva SP-48 FAUNA SILVESTRE con el pictograma “aves”.

En complemento a lo anterior, se incluye el siguiente pictograma para representar a los invertebrados migratorios que son atropellados en carreteras durante sus grandes movilizaciones con fines de reproducción, como resulta ser el Cangrejo Azul (*Cardisoma Guanhumi*) que habita en manglar, cocotales y playas fangosas, así como algunas especies de tarántulas.

Los cangrejos *C. Guanhumi* se caracterizan por tener un ciclo reproductivo vinculado a los patrones climáticos estacionales y el ciclo lunar. Con el inicio de las fuertes lluvias tropicales inician también las migraciones masivas en las que las hembras transportan sus huevos hacia la costa para que eclosionen en el mar y las larvas puedan sobrevivir. Es en este recorrido donde estos invertebrados son muy vulnerables a ser atropellados en las carreteras y vialidades a su paso.

México ocupa el segundo lugar en diversidad de tarántulas en el mundo. Las tarántulas, al igual que la mayor parte de los arácnidos, son depredadores y juegan un papel fundamental en el medio ambiente, ya que se consideran agentes de control biológico eficiente, debido a que contribuyen en la regulación del tamaño de poblaciones de insectos y pequeños vertebrados. Asimismo, son alimento de mamíferos como coatíes, mapaches, zorras, y otros mamíferos de tamaño similar, así como de aves carnívoras. Debido al instinto canibalístico que poseen, estos arácnidos son solitarios y solamente se reúnen con sus congéneres durante la época de apareamiento durante el verano, coincidiendo con las lluvias, tiempo durante el cual cientos de tarántulas macho suelen salir de sus madrigueras en busca de hembras. Es durante estas movilizaciones masivas con fines reproductivos que estos invertebrados son atropellados en grandes cantidades en las carreteras de nuestro país.

Figura 134



**Propuesta de señal preventiva SP-48 FAUNA SILVESTRE
con el pictograma "invertebrados".**

CAPÍTULO 7

MONITOREO DE PASOS PARA FAUNA

METODOLOGÍA PARA QUE EL OPERADOR DE LA INFRAESTRUCTURA LINEAL PUEDA DAR SEGUIMIENTO A LA EFICACIA Y EFICIENCIA DE LOS PASOS

Generalidades

Los pasos para fauna permiten que los animales crucen con seguridad por debajo o por encima de la infraestructura lineal, con lo que se logra disminuir los incidentes viales que pueden tener efectos negativos en la seguridad de las personas, así como en la conservación de la biodiversidad.

La evaluación periódica del uso de los pasos para fauna es el primer punto para poder determinar su eficiencia y eficacia. Con ello se obtiene información tangible que permite mejorar el diseño y construcción de dichos pasos para obtener mejores resultados.

El monitoreo de los pasos para fauna debe preverse desde la etapa de proyecto, ya que para tener resultados confiables se necesita planificar oportunamente las formas como se realizará el seguimiento de la operación de los pasos y los resultados sobre el atropello de fauna en la infraestructura lineal, y así dotarlos de las estructuras de soporte necesarias para el procedimiento de monitoreo desde el momento de su construcción.

Para ello, es necesario tomar en consideración las diferencias que existen entre los pasos para fauna, las especies objetivo para las que ha sido construido, los ecosistemas circundantes y su variabilidad estacional; particularmente el efecto de las condiciones climáticas en los dispositivos de monitoreo, así como condiciones de operación que presenta la infraestructura lineal. El diseño y los métodos para la evaluación de los pasos para fauna deben ser adecuados para cada caso a partir de los lineamientos y recomendaciones generales que se brindan en el presente capítulo. Estas recomendaciones se basan en estudios de diferentes países, incluyendo el nuestro, y han resultado ser prácticas, económicas y funcionales.

Es importante resaltar la importancia de realizar el monitoreo de los pasos y los atropellos ya que de ello depende el poder implementar mejoras y tomar medidas adicionales que aseguren que la inversión realizada en los pasos sea “rentable”, es decir, que produzca los beneficios esperados en términos de seguridad vial, de reducción de la fragmentación de hábitats y de protección a la fauna silvestre.

En este capítulo del Manual se presentan algunas recomendaciones para realizar el monitoreo de los pasos e identificar la eficacia y eficiencia de la implementación de éstos; entendiendo como **eficacia** “la capacidad de alcanzar el efecto que se espera o se desea tras la realización de una acción”, es decir, el construir pasos para fauna que sean utilizados por gran variedad de grupos animales silvestres y reducir con ello el efecto de barrera y la fragmentación del hábitat que ocasiona una infraestructura lineal; y **eficiencia**, “el uso racional de los medios para alcanzar un objetivo predeterminado”, es decir, el uso de los recursos económicos y técnicos al construir los pasos para fauna con el fin de reducir el riesgo de colisiones vehículo-animal en la infraestructura lineal.

7.1 Datos a considerar para la selección de los pasos para fauna silvestre que deben ser monitoreados

Para la adecuada selección de los pasos para fauna que se deben monitorear es importante considerar los siguientes datos y que el especialista en fauna defina cuáles son los más adecuados a monitorear a partir de los siguientes criterios:

- Conectividad ecológica. Identificar si la superficie en donde se encuentran inmersos los pasos para fauna permite la conexión de un hábitat de interés para la conectividad ecológica de las especies.
- Conexión con áreas de recursos. Identificar si los pasos para fauna permiten conectar el hábitat con áreas de uso diario, en donde los animales acceden a recursos como es el caso de alimento, agua, refugio, entre otros. Se requiere esta identificación con mayor detenimiento cuando se trata de áreas en donde se conecta un hábitat natural con zonas agrícolas.
- Presencia de especies objetivo. Identificar las especies objetivo para las cuales fueron contruidos los pasos para fauna, con énfasis en aquellas especies que se encuentran protegidas por las leyes mexicanas, sean endémicas o tengan una importancia ecológica o económica.
- Frecuencia de atropello. Examinar las inmediaciones de la zona del tramo carretero en donde se encuentran inmersos los pasos para fauna, e identificar las evidencias de incidentes viales en donde la fauna se ve involucrada.
- Características topográficas. Revisar que los accesos a los pasos para fauna subyacentes alcancen el mismo nivel que los terrenos adyacentes a la infraestructura vial.

Es necesario validar los datos mencionados anteriormente mediante un recorrido en campo, antes de iniciar con la evaluación de los pasos para fauna seleccionados.

A continuación se presenta un procedimiento recomendado para evaluar la eficiencia y eficacia de los diferentes tipos de pasos para fauna mencionados en este Manual.

7.2 Análisis del ecosistema aledaño al paso para fauna silvestre

Identificación del uso de suelo y vegetación presente en las inmediaciones de los pasos para fauna

La estructura de la vegetación adyacente a los pasos para fauna tiene un impacto en la frecuencia de uso por parte de la fauna, por lo que es necesario registrar las características de la vegetación y determinar cómo esas características influyen en la frecuencia de uso de los pasos por parte de los animales.

Es necesario observar el antes y el después de la temporada de lluvias para identificar las condiciones existentes y cambios en la vegetación que pueden afectar la efectividad de los pasos para fauna. Se requiere medir la densidad de la vegetación, la composición de especies y la distribución espacial. Estos datos también se utilizan para orientar la conservación de los pasos y en forma de gestión adaptativa para aumentar la frecuencia de su uso por la fauna. Como parte de este monitoreo se requiere identificar y controlar el establecimiento de plantas exóticas, ya que su proliferación puede ser perjudicial para la efectividad de los pasos para fauna.

Se sugiere que las características de la vegetación se observen en un área circular alrededor del paso para fauna, con un radio aproximado de 100 m en las inmediaciones del paso en estudio.

Lo anterior será sustentado con la siguiente información:

1. Fotografía panorámica del paso para fauna en estudio. Con esta evidencia se puede conocer la estructura general que tiene la vegetación.

Figura 135



Fotografía panorámica en donde se ubica el paso para fauna
(fuente: Grupo Selome, S.A. de C.V.).

2. Fotografías de los accesos a los pasos. Con esta evidencia los especialistas en fauna y vegetación pueden distinguir sobre qué tipo de especies vegetales están sirviendo como camuflaje en la ruta de escape de los animales que están utilizando el paso para fauna.

Figura 136



Fotografías de los accesos del paso para fauna (fuente: Grupo Selome, S.A. de C.V.).

3. Registro de especies de flora. Con estas imágenes se puede reconocer la composición florística de los accesos de los pasos para fauna. Se debe indicar el nombre científico o nombre común de las plantas y forma de vida junto con la evidencia fotográfica de cada especie.
4. Para el caso de los pasos aéreos para fauna arborícola es necesario considerar la evaluación de las especies arbóreas que conectan a ambos lados de la infraestructura lineal. Es importante que se registre el nombre científico o común de las especies, estado de conservación de la vegetación y altura de los individuos arbóreos, este último dato servirá de referencia para el diseño del paso para fauna y evaluar su efectividad.
5. Es necesario validar los datos mencionados anteriormente mediante un recorrido en campo, de 100 m pendiente arriba y abajo del paso en estudio, reconociendo la composición florística y el estado de conservación de la vegetación.

Con lo anterior se identifican los diferentes usos de suelo y vegetación del paso en estudio y se puede reconocer el ámbito hogareño y medio de movimiento de las especies que cruzan por el paso para fauna.

Caracterización de la fauna presente en las inmediaciones de los pasos para fauna

La frecuencia de uso de los pasos para fauna probablemente se encuentre parcialmente relacionada con la abundancia de animales en el hábitat adyacente.¹⁰⁴ Es importante considerar la disponibilidad de animales para utilizar los pasos, por lo que es recomendable hacer un muestreo a escala local para identificar y estimar la densidad de organismos de las especies que se identifican en la proximidad del paso antes de colocar las cámaras trampa y demás dispositivos para el monitoreo.

Resulta muy complejo poder tener una relación de la cantidad de organismos de cada especie probable a nivel regional, por lo que este muestreo permite bajar la escala del estudio y obtener datos cuantitativos sobre las poblaciones de animales en el área y así contrarrestar estos números con la cantidad de animales que cruzan de cada especie durante los monitoreos, a la luz de los animales presentes en la zona, con lo que se pueden analizar proporciones de especies y de organismos de éstas que se aventuran a utilizar los pasos.

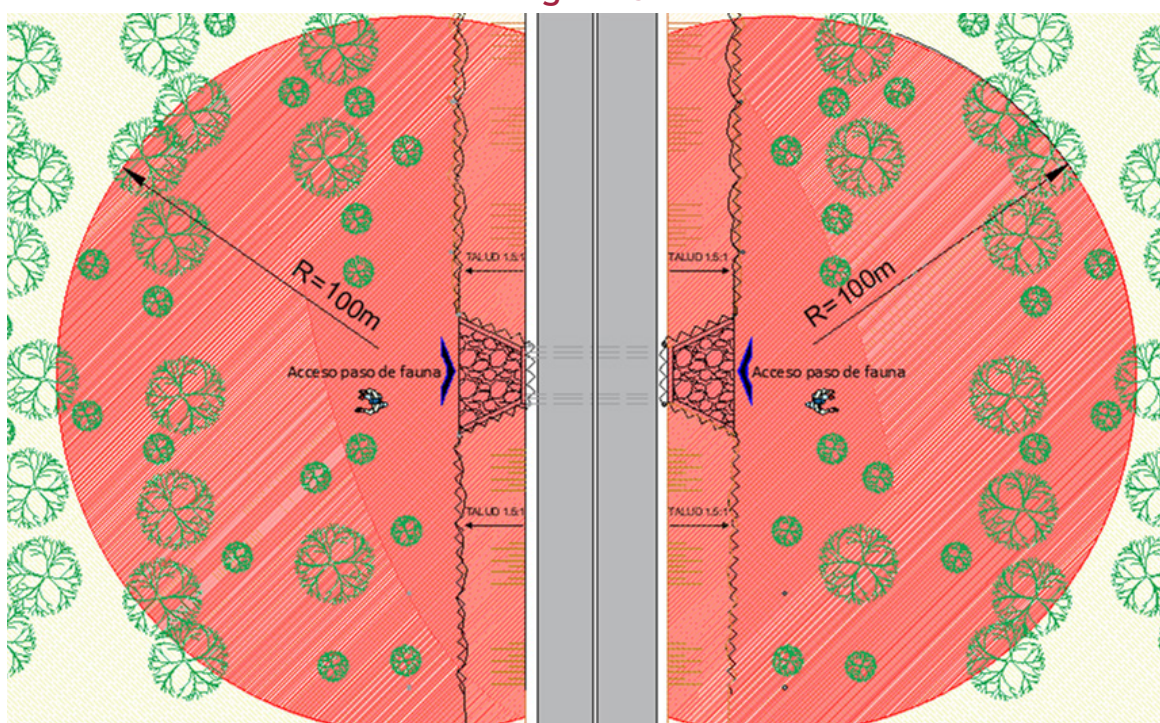
1. Área de monitoreo

La realización de un muestreo cuantitativo en las inmediaciones de los pasos para fauna permite hacer una estimación del número de organismos que potencialmente podrían hacer uso de éstos, y de ser necesario realizar todas aquellas adecuaciones que potencialicen el cruce por parte de la fauna, es decir, definir si se requieren acciones para hacer que pase un mayor número de organismos y/o especies de mayor tamaño o con ciertas preferencias para utilizar los pasos.

Para definir el área a muestrear se tienen que considerar diversos parámetros como la topografía, densidad y tipo de vegetación contigua a cada paso, características de la infraestructura lineal, usos de suelo aledaños a la vegetación silvestre, temporada del año, etc. Se manejan radios de diferentes tamaños a partir de los accesos de cada paso a ambos lados de la infraestructura lineal para establecer dentro de ellos transectos de muestreo para estimar densidades de especies de fauna silvestre. Para cada taxón de fauna existen diversas técnicas, por lo que se recomienda diseñar un muestreo acorde a cada grupo taxonómico.

Idealmente la recolección de la información se realiza en las inmediaciones del paso para fauna, en un radio no menor de 100 m (Figura 137), sin embargo esto dependerá de las diferentes condiciones ambientales en el sitio, así como de la lista de fauna potencial que con mayor probabilidad estará presente en la zona, considerando afinidad al tipo de hábitat y su nivel de degradación.

¹⁰⁴ Yanes, M., J.M. Velasco y F. Suárez (1995). "Permeability of roads and railways to vertebrates: the importance of culverts". *Biological conservation*, 71(3): 217-222.

Figura 137

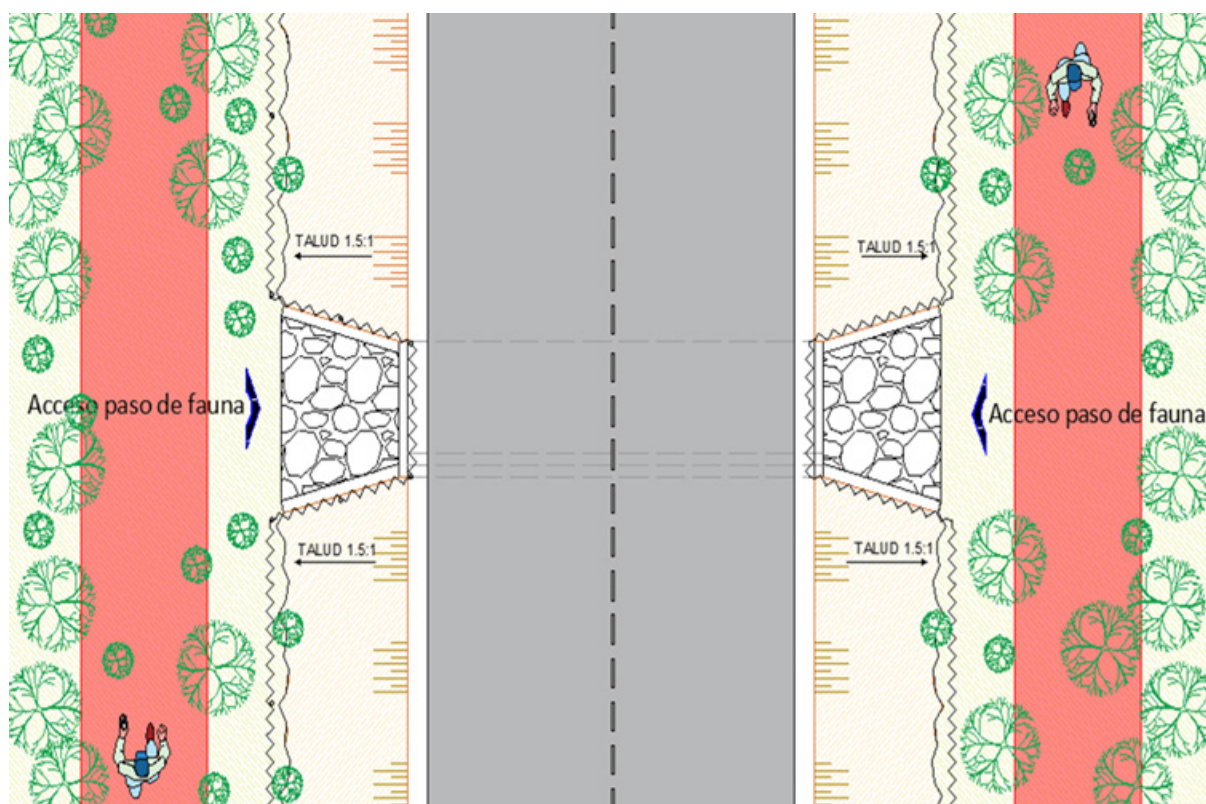
Representación esquemática de la superficie con un diámetro aproximado de 100 m sugerido como distancia mínima de los transectos a utilizar para realizar el muestreo de la fauna en las inmediaciones de los pasos para fauna.

En ocasiones existen circunstancias que impiden realizar el monitoreo de la fauna en una superficie a la redonda del centro del paso en un radio no menor a 100 m, por lo que puede recurrir a un muestreo por medio de recorridos para la verificación de la fauna silvestre. Se recorren franjas paralelas a la infraestructura lineal a lo largo de por lo menos 200 m, a cada lado del paso para fauna (Figura 138). La longitud y ancho de estas franjas paralelas deberán ser definidas por los especialistas en fauna silvestre conforme al grupo taxonómico y características particulares de la fauna en cada sitio. Entre más pequeña sea la longitud y el ancho de las franjas de muestreo se sugiere aumentar el número de éstas dentro del área considerada, para cubrir la mayor cantidad de superficie estudiada.

Es importante señalar la necesidad de que las franjas de muestreo se ubiquen en la principal zona de efecto del paso, es decir, fuera del límite del derecho de vía. Lo anterior debido a que la presencia y abundancia de las especies va a estar afectada por el área de influencia que representa la zona inmediata de la infraestructura lineal.

En términos generales podemos señalar que la zona de efecto suele ser asimétrica y variable en función de la topografía y vegetación aledaña. El especialista en fauna determinará el tamaño aproximado de la zona de efecto de la infraestructura para establecer la ubicación de las franjas lineales de muestreo y la longitud de los transectos de muestreo, en su caso.

Figura 138



Representación esquemática de las franjas de muestreo en paralelo a la infraestructura lineal (franjas achuradas) fuera del derecho de vía y a cada lado del paso para fauna.

2. Técnicas de muestreo

Una vez determinadas las zonas de los muestreos se deben considerar combinaciones de técnicas de muestreo directas e indirectas para la caracterización de la fauna presente en las inmediaciones del paso.

Resulta importante elegir métodos que permitan estimar la estructura de las comunidades de fauna silvestre tales como: riqueza, abundancia relativa y densidad de los taxa bajo estudio. Las técnicas por emplear y los indicadores deben ser definidos por el especialista en fauna.

Se seleccionan las metodologías que permitan confirmar la existencia de especies y determinar la distribución y abundancia de la fauna silvestre en las proximidades de la infraestructura lineal, siendo prioritarias las especies enlistadas en la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010. Dichas metodologías deben considerar técnicas de muestreo directo (observación, captura-liberación) e indirecto (rastros: huellas, heces, cadáveres, indicios auditivos, etc.). A continuación se proporcionan las técnicas más utilizadas para estos estudios:

Registro de especies por métodos directos

Para caracterizar a la fauna presente en el área de estudio se procede a la captura (directa o con ayuda de trampas) y registro de especies por medio de la observación (con ayuda de cámaras trampa digitales). A continuación se describen brevemente algunas de las técnicas más utilizadas para el registro de especies por grupo faunístico:

- a) Anfibios. Para confirmar la presencia de este grupo de vertebrados se procede a la observación, captura y liberación de anfibios, mediante la selección específica del hábitat. Para ello se revisarán de forma específica potenciales sitios de resguardo de estos animales (troncos de árboles huecos y hendiduras, tocones, bajo troncos caídos o piedras, entre la hojarasca, plantas epífitas, grietas, charcas temporales y permanentes, etc.). Las vocalizaciones de los anuros (ranas y sapos), particularmente sus llamados de anuncio que son especie-específicos, pueden ser usadas por los especialistas en este grupo para determinar cuáles especies se encuentran presentes en los diferentes sitios bajo estudio, aun cuando no fuesen vistas. El uso de redes de cuchara en escurrimientos y cuerpos de agua, así como trampas de caída para su captura temporal también suelen ser útiles.

Figura 139



**Muestreo directo de anfibios
(tomado de León-Vigara, 2020).**

- b) Reptiles. El registro de las distintas especies de reptiles se realiza utilizando la técnica de transectos al azar a lo largo de los diferentes tipos de vegetación que se identifiquen en las inmediaciones de los pasos.

Este método considera el desplazamiento lento del especialista a través del área elegida (transecto), revisando cada microhábitat potencial con el fin de localizar a las especies de reptiles que pudieran estar presentes, levantando, moviendo y revisando objetos tales como troncos de árboles huecos y hendiduras, tocones, bajo troncos caídos o piedras, entre la hojarasca, plantas epífitas, grietas, charcas temporales y permanentes.

La colecta de los ejemplares se realiza directamente con la mano¹⁰⁵ o con ayuda del gancho y/o pinzas herpetológico; particularmente cuando se trata de especies venenosas. También pueden ser útiles las trampas de caída o uso de redes con manubrio largo.

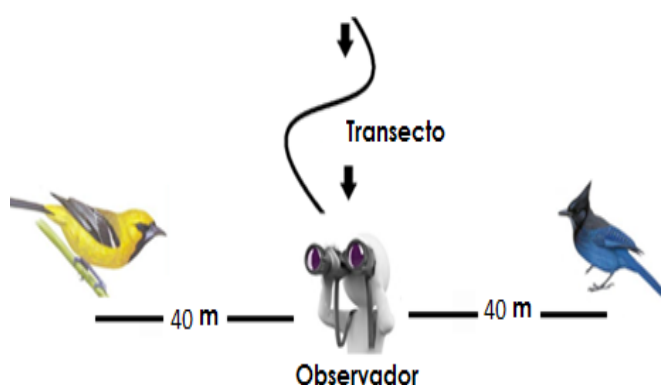
Figura 140



Ejemplo de la búsqueda y manipulación de los reptiles para su identificación y registro (fuente: Grupo Selome, S.A. de C.V.).

- c) Aves. Se realiza la búsqueda utilizando vocalizaciones de aves y observaciones directas para documentar la presencia de diversas especies distintivas por su color, tamaño y cantos. Las observaciones de aves se efectúan en los puntos de muestreo definidos a distancias regulares a lo largo del transecto para detenerse y hacer la observación por un tiempo definido, y en cada tipo de vegetación o en su caso en puntos estratégicos en las inmediaciones del paso. Para los avistamientos de aves se utilizarán binoculares con aumento de al menos 10 x 42 o 10 x 50 para poder tener un buen alcance, así como cámaras con zoom óptico de por lo menos 50X o telefoto para identificar a las especies con mayor facilidad. También se puede optar por muestreos utilizando redes de niebla.

¹⁰⁵ La recomendación hoy en día de la SEDEMA, derivada de la pandemia ocasionada por el virus SARS-CoV-2, es que toda manipulación de fauna de forma manual debe realizarse con guantes o pinzas y el uso de cubrebocas, así como equipo de protección personal para evitar propagar contagios. Hasta finales de 2020 se desconoce qué animales han sido el origen y el eslabón de la infección hacia el humano, por lo que la manipulación manual debe ser evitada. Todo el equipamiento utilizado en la manipulación y captura de organismos debe ser desinfectado con una solución de lavandina (también conocida como cloro) diluida en agua en una concentración de 10.000 ppm, siempre que sea compatible con el material.

Figura 141

Ejemplo de la técnica de registro de aves mediante el recorrido a lo largo de un transecto con estaciones de observación definidas a distancias regulares e identificación de aves que se ubican a distancias establecidas a partir del tipo de vegetación y topografía de la zona (fuente: Grupo Selome, S.A. de C.V.).

- d) Mamíferos. El registro de mamíferos dentro del área de estudio a lo largo de transectos se realizará por medio de observaciones y considerando los hábitos de vida de cada especie reportada.

Generalmente los mamíferos medianos y grandes se identifican sin tener que capturarlos, de forma visual o utilizando cámaras trampa colocadas en sitios estratégicos a lo largo del transecto. No obstante, en ocasiones puede ser necesario el uso de trampas tipo Tomahawk para ello.

En el caso de las especies pequeñas como roedores, ardillas y otros, generalmente requieren ser atrapadas momentáneamente para su identificación, para lo que se utilizan trampas tipo Sherman o similares.

Una vez identificados los especímenes se procede a liberarlos en el área de captura.

Figura 142

a)



b)



c)

Ejemplo de los métodos directos para el registro de la fauna silvestre: a) uso de trampa Tomahawk, b) colocación de cámara trampa y c) captura temporal de roedor para su clasificación taxonómica (fuente: Grupo Selome, S.A. de C.V.).

Registros de especies por métodos indirectos

A continuación se describen brevemente algunas de las técnicas más utilizadas para el registro indirecto de especies por grupo faunístico:

- Anfibios y Reptiles. Se suelen realizar estos registros a partir de entrevistas informales con gente de la región mostrando fotografías de las especies potencialmente presentes en la zona, la identificación de cadáveres, huesos, mudas de reptiles, nidadas con huevos, etcétera.
- Mamíferos. El registro indirecto de los mamíferos se realiza a través de recorridos en transectos a lo largo del área de estudio de manera que se incluyan las distintas especies presentes en la proximidad del paso. Durante los recorridos se registran diversos tipos de evidencias de la presencia de mamíferos como: huellas, huesos, refugios, cadáveres, pieles y heces.

Para ello suelen utilizarse diversas guías de identificación de especies a partir de huellas y otros rastros.¹⁰⁶

Figura 143



Ejemplo de identificación de especies de mamíferos por medios indirectos:
 a) cráneo de jabalí (*Pecari tajacu*); b) cadáver de venado cola blanca (*Odocoileus virginianus*); c) piel de tlalcoyote (*Taxidea taxus*),
 y d) cadáver de liebre (*Lepus alleni*) (fuente: Grupo Selome, S.A. de C.V.).

¹⁰⁶ Aranda Sánchez, J. M. (2012). *Manual para el rastreo de mamíferos silvestres de México*. CONABIO (no. 599 A7).

Asimismo, y si las condiciones climáticas lo permiten, se pueden colocar estaciones de sedimento o utilizar zonas con depósitos de sedimentos finos formados de manera natural en las orillas de los cuerpos de agua y zonas arenosas para obtener evidencias de huellas y rastros. Como complemento se realizan entrevistas informales a cazadores y pobladores locales con catálogos ilustrados para obtener información sobre la presencia de mamíferos grandes y medianos.

Figura 144



Ejemplo de identificación de especies de mamíferos por medio de huellas:
 a) Puma (*Puma concolor*); b) Mapache (*Procyon lotor*); c) Tlacuache (*Didelphis virginiana*),
 y d) Cacomixtle (*Bassariscus astutus*) (fuente: Grupo Selome, S.A. de C.V.).

7.3 Identificación de la fauna silvestre presente en las inmediaciones de la infraestructura lineal

La identificación de las especies para las que se consideró el diseño y construcción de un paso para fauna, denominadas especies objetivo, es de gran importancia, ya que influye en las técnicas a utilizar para valorar la eficacia y eficiencia de los pasos. Una de las técnicas es la colocación de estaciones de sedimento dentro de los pasos para fauna para el registro de huellas. Estas estaciones deben adaptarse al tamaño y tipo de fauna para la cual fue considerado el paso, pues no todos los sedimentos a utilizar son adecuados para el registro de todos los organismos.

Un tipo de sedimento puede ser adecuado para registrar el cruce de grandes y pesados mamíferos, como es el caso de los carnívoros y ungulados. Pero ese mismo material puede no ser adecuado para la mayoría de las especies de mamíferos medianos con menor peso y huellas más pequeñas, e incluso puede no ser funcional para especies de mamíferos pequeños como es el caso de los roedores y la herpetofauna en general. De igual manera, para el uso de cámaras trampa la altura de colocación y sitios para el monitoreo va a depender de la fauna objetivo que se espera sea la que utilice el paso, que puede implicar una combinación de puntos de monitoreo y varias cámaras para la obtención de imágenes de los diferentes grupos taxonómicos.

Especies focales

Idóneamente, para la identificación de las especies focales se debe hacer una delimitación regional de la infraestructura lineal, considerando enmarcarla dentro de un sistema ambiental a partir de los límites de cuencas, subcuencas o microcuencas, según la escala de la infraestructura, y realizar en ella una caracterización y estimación cuantitativa de la fauna silvestre presente en esa región y que pueda incidir sobre la infraestructura y uso de los pasos, tomando en cuenta al menos un ciclo anual completo, esto debido a que las épocas de lluvias o sequías tienen una influencia en el comportamiento de dispersión de muchos animales, que si sólo se realiza el monitoreo en una temporada podrían subestimarse los resultados obtenidos.

En la práctica se hace uso de publicaciones formales como es el caso de artículos científicos, tesis profesionales, estudios de impacto ambiental y estudios técnico-justificativos para el cambio de uso de suelo forestal, así como de libros especializados que hacen referencia a las especies animales presentes en la región de interés, y con ello obtener un listado confiable de las especies objetivo.

Actualmente existen bases de datos libres de descarga de diferentes organizaciones como la CONABIO, cuya información puede obtenerse de sus páginas electrónicas.

La información recopilada debe ser revisada y depurada por especialistas en fauna silvestre a fin de poder integrar una lista de especies que, por distribución, afinidad de hábitat, recursos presentes, topografía, consideraciones climáticas y tipos de vegetación, constituyan especies que potencialmente podrían encontrarse en la región donde se ubica la infraestructura y, por consiguiente, hacer uso de los pasos analizados.

Se debe definir el tipo de uso de los pasos para fauna. De manera general se pueden distinguir tres tipos de uso y la frecuencia de éstos:

- i) uso diario, para acceder a recursos dentro del área de distribución de un individuo de forma diaria o casi diaria, por ejemplo, para acceder a zonas de alimentación, agua, refugio, entre otros recursos. Esto es más común en áreas en donde se conecta un hábitat natural con zonas agrícolas.
- ii) uso estacional, para acceder a hábitats estacionales, por ejemplo migración anual en donde los animales acceden a áreas de reproducción, zonas de hibernación o estivación.

- iii) uso ocasional, donde ciertos animales, como es el caso de los osos y felinos, realizan grandes movimientos de desplazamiento para establecer su propio territorio, es decir, movimientos de dispersión.

Con la información anterior se puede generar un listado de las especies objetivo, así como el tipo y frecuencia de su recurrencia por los pasos permite además identificar las preferencias de las especies hacia ciertos tipos de paso para fauna, lo cual sólo puede identificarse si se dispone de información de referencia sobre la presencia/ausencia y/o abundancia de las especies objetivo del área circundante.

Con la información analizada de la fauna presente en las inmediaciones de la infraestructura lineal y el listado obtenido de las especies objetivo se tiene un panorama de cuáles especies se espera que utilicen los diferentes tipos y tamaños de pasos bajo estudio y con ello definir las técnicas, métodos y tiempos de monitoreo.

7.4 Evaluación de la eficacia de los pasos para fauna silvestre

Una vez analizado el ecosistema aledaño al paso para fauna de interés, así como la identificación de la fauna presente en las inmediaciones de la infraestructura lineal, los especialistas en fauna y vegetación definirán las técnicas, métodos y tiempos de monitoreo del paso en estudio. A continuación se proporcionan las técnicas más utilizadas y recomendadas para el monitoreo de pasos para fauna.

Cámaras trampa

Con la finalidad de evaluar el funcionamiento de los pasos para fauna es necesario monitorear de forma continua y por el mayor tiempo posible, tratando de abarcar todas las estaciones del año, principalmente en las épocas de lluvia y sequía. Para ello se utilizan cámaras trampa con diferentes características, las cuales permiten la identificación confiable de las especies (sexo, edad, comportamiento y marcas únicas) y proporcionan los datos necesarios para calcular la frecuencia de uso por parte de los animales, documentando su interacción con el paso para fauna.

Las cámaras trampa pueden ser activas o pasivas y constan de una cámara digital con un sensor de movimiento y/o calor, enlazado al disparador, y un sistema de flash infrarrojo que permite la toma de fotografías sin perturbar la actividad de los animales fotografiados.

Para el monitoreo de los pasos para fauna se recomienda el uso de cuatro cámaras trampa, cada una cubriendo un segmento de la estructura a evaluar, colocadas a una altura sobre el nivel del suelo, definida por el especialista y los estudios previos. Estas cámaras se instalan de manera perpendicular a la dirección del movimiento de los animales.

Las cámaras trampa se programan para que tomen una fotografía y 30 segundos de video, esto con la finalidad de poder contar a los animales que se mueven en grupos. Las cámaras trampa funcionan de forma continua durante todo el día con un retraso de un minuto entre dos eventos. El tiempo que permanecen activas dependerá de los objetivos del monitoreo. Por ejemplo, si el objetivo es

evaluar hasta qué punto un paso para fauna restaura el acceso a los hábitats estacionales (por ejemplo, la migración primaveral de anfibios a los estanques de reproducción), el seguimiento puede limitarse al periodo en el que ocurren esas migraciones. En el caso del monitoreo a largo plazo, las cámaras trampa se inspeccionan aproximadamente cada dos meses, se recuperan fotografías de las tarjetas de memoria y se recomienda cambiar las pilas de cada cámara.

Es importante que el campo de visión frente a cada cámara trampa se limpie de vegetación para proporcionar fotografías sin obstáculos y evitar que los dispositivos se activen con el movimiento de la vegetación. Asimismo se realizan pruebas para detectar su capacidad de registro y enfoque de las tomas. A continuación se muestran algunas imágenes donde se aprecia la colocación de las cámaras trampa dentro de los pasos para fauna.

Figura 145



Procedimiento de la colocación de cámaras trampa en los accesos de los pasos para fauna.
(fuente: Grupo Selome, S.A. de C.V.).

En el caso de los pasos aéreos para fauna arborícola se colocan las cámaras trampa sobre las estructuras de sostén (postes o árboles) a la altura del paso, apuntando hacia el interior de éste. Una segunda opción es colocar la cámara trampa en algún punto del paso, apuntando hacia su entramado, y fotografiar a las especies que cruzan (Figura 146).

Figura 146

Ejemplo del procedimiento de la colocación de cámaras trampa para el monitoreo de pasos aéreos para fauna arborícola (fuente: Grupo Selome, S.A. de C.V.).

Con los datos obtenidos de las cámaras trampa se determina el número de cruces y las especies que hacen uso de los pasos. Para ello se calcula el índice de frecuencia de uso o de cruce (IFU) de una especie o grupos de especies a partir de la siguiente fórmula:

$$IFU = \frac{C}{EM} * 1000 \text{ días trampa}$$

Donde:

C = Cantidad de capturas o eventos fotografiados.

EM = Esfuerzo de Muestreo (número de cámaras utilizadas * días trampa de monitoreo).

1000 días trampa = Unidad Estándar.

Estaciones de sedimento

La implementación de las estaciones de sedimento son un método complementario a las cámaras trampa, esto debido a que en dichas estaciones pueden imprimirse las huellas de ciertos animales que por su velocidad de desplazamiento puede exceder las sensibilidades del sensor de movimiento de las cámaras trampa.

Es importante que las estaciones de sedimento no se utilicen como único método para evaluar la frecuencia de uso de los pasos para fauna u obras de drenaje adecuadas o que funcionan como tal, ya que presentan dos limitaciones importantes:

- a) Mayor incertidumbre en la identificación de las especies.
- b) Degradación de la calidad de los datos por factores ambientales y uso de los animales. El efecto de las condiciones ambientales sobre las estaciones de sedimento es más evidente en los pasos elevados que en los pasos subterráneos.

Es necesario colocar por lo menos una estación de sedimento en cada extremo de cada paso subterráneo, los cuales deben abarcar el ancho del paso y al menos 2.0 m de largo en el eje de movimiento de los animales, con un espesor de aproximadamente 0.04 m, en función de la rugosidad del terreno. En el caso de los pasos elevados se recomienda la colocación de una estación de sedimento ubicada en el centro, extendida a lo ancho del paso, con aproximadamente 4 m de largo en el eje de movimiento de los animales (Figura 147).

El material que constituye las estaciones de sedimento es arena muy fina, arcilla, limo, o en su defecto se debe comprar y transportar polvo de mármol gris (cero finos). Es importante no hacer uso de yeso ya que éste podría afectar la salud de los anfibios que llegan a cruzar por las estaciones de sedimento.

Figura 147



Ejemplo de la colocación de las estaciones de sedimento (capa cero finos) para el registro de huellas dentro de los pasos para fauna u obras de drenaje que funcionan como tal (fuente: Grupo Selome, S.A. de C.V.).

De los datos obtenidos a partir de las estaciones de sedimento se calcula como en el caso de las cámaras trampa el índice de frecuencia de uso utilizando la misma fórmula sustituyendo el valor “C” por la cantidad de huellas de diferentes animales.

Con la finalidad de calcular el sesgo de detección para cada especie que hizo uso de los pasos para fauna monitoreados se deberá utilizar la siguiente fórmula:

$$\text{Sesgo de detección} = \frac{\left(\begin{array}{c} \text{número de detecciones} \\ \text{por estación de sedimento} \end{array} - \begin{array}{c} \text{número de detecciones} \\ \text{por cámara trampa} \end{array} \right)}{\left(\begin{array}{c} \text{número de detecciones} \\ \text{por estación de sedimento} \end{array} + \begin{array}{c} \text{número de detecciones} \\ \text{por cámara trampa} \end{array} \right)}$$

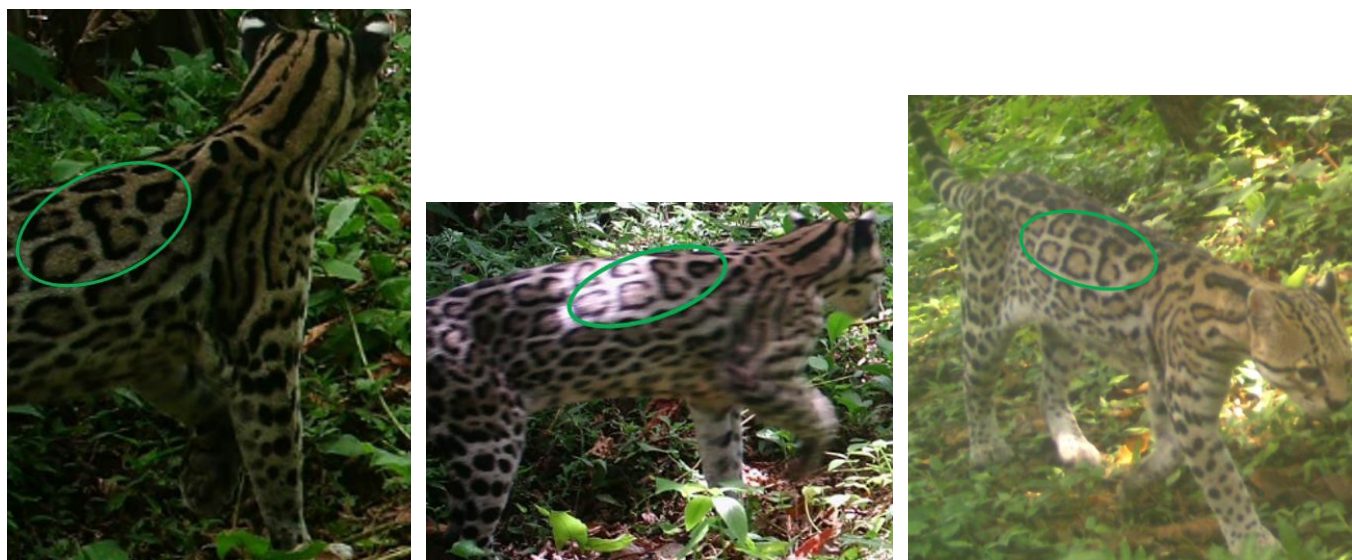
A medida que el valor de sesgo se acerca a 1.0 se indica que las estaciones de sedimento tienen más efectividad en el registro de las especies en comparación con los registros obtenidos en las cámaras trampa, mientras que a medida que el sesgo se acerca a -1.0 las especies tienen más probabilidades de ser detectadas por las cámaras trampa. Un sesgo con valor de cero indica que ambos métodos detectaron el mismo número de especies que se dirigen en la misma dirección.

Identificación de individuos que hacen uso de los pasos para fauna

Reconocimiento mediante marcas distintivas

Es importante reconocer a nivel de individuo a los animales que hacen uso de los pasos para fauna, para lo cual se deben detectar las características físicas del animal fotografiado cuando sea posible, tales como marcas corporales, tamaño y forma de las astas o cuernos, manchas, cicatrices y otras deformidades que permitan su identificación.

Figura 148

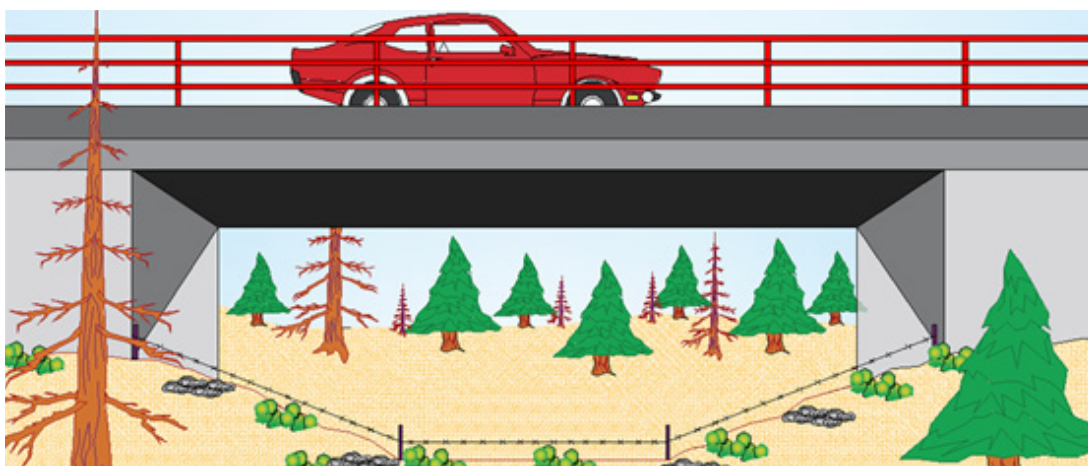


Ejemplo de la identificación de individuos de ocelote a partir del patrón presente en sus manchas (imágenes de Guzmán-Báez, 2017).

Trampas de pelo para estudios genéticos

En ocasiones es importante monitorear si un paso en particular es utilizado por varios individuos de una determinada especie o se trata de un mismo individuo que utiliza el paso con mucha frecuencia, y por consiguiente se registran varias fotografías del mismo individuo con las cámaras trampa. En estos casos se suele recurrir a realizar estudios especializados que implican análisis genéticos de DNA. Esta técnica se ha convertido en una herramienta muy útil para una gran variedad de estudios en ecología y conservación de las especies. Para realizar dicho análisis genético se requiere de una muestra de pelo de los individuos que cruzan a través de los pasos para fauna, por lo que se requiere de la colocación de trampas de pelo, las cuales consisten en alambres de púas en la entrada y salida de los pasos en los que queda atrapado pelo de los animales que lo cruzan.

Figura 149



Ejemplo de la colocación de alambre de púas que funciona como trampa de pelo en los accesos del Paso Superior para Fauna (PSFA).

La altura del alambre es ajustada a la altura de la especie objetivo, con la intención de enganchar un mechón de pelo cuando el animal cruce encima o debajo del alambre, como se muestra en las siguientes fotografías.

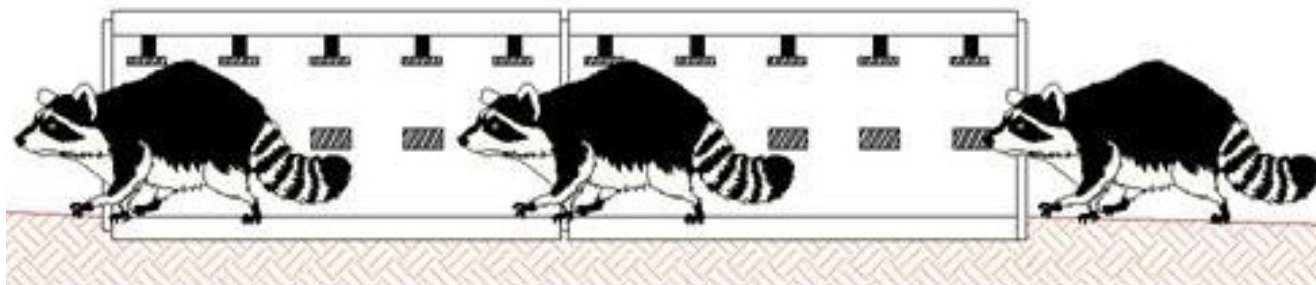
Figura 150



Ejemplos de la colecta de pelo de mamíferos a partir de la colocación de alambre de púas (imágenes tomadas de Kendall *et al.*, 2008, y Clevenger y Sawaya, 2010).

En el caso particular de mamíferos pequeños o medianos se recomienda el uso de trampas tipo cubículo, las cuales son cajas o tubos largos y delgados que contienen dispositivos para enganchar el pelo, como podrían ser cintas adhesivas. Dichos cubículos se deben colocar en sitios estratégicos donde no se obstruya la visibilidad de los animales frente a las cámaras trampa.

Figura 151



Ejemplo de la colecta de pelo para mamíferos medianos o pequeños mediante la colocación de trampas de pelo tipo cubículo.

Para el caso de los pasos aéreos para fauna arborícola, el alambre de púas debe colocarse en alguna parte estratégica a través de la plataforma o andador, siempre y cuando no obstaculice el paso seguro de los animales.

Es importante que la revisión de las trampas de pelo para estudios genéticos se realice diario con la finalidad de evitar la contaminación de las muestras con el pelo de varios ejemplares o especies. Se debe asegurar que la colocación de dichas trampas de pelo no impida el cruce de los organismos a través de los pasos para fauna.

7.5 Evaluación de la eficiencia de los pasos para fauna silvestre

Para la evaluación de la eficiencia de los pasos para fauna es necesario conocer el número de atropellos de fauna silvestre que se presentan en las inmediaciones de éste. Los datos del número de atropellos se analizan en función de su distancia al paso y su frecuencia y tipo de especies atropelladas, con el objetivo de identificar si existe alguna correlación entre estas variables y los animales registrados cruzando por los pasos.

Registro de atropellos

La fauna atropellada se registra considerando los siguientes datos: fecha, carretera, especie atropellada, etapa de madurez, número de animales muertos, tiempo y estación del año, así como las coordenadas UTM de los atropellamientos para detectar puntos críticos en cada carretera evaluada. La identificación se realiza recorriendo la carretera a una velocidad promedio de 30-40 km/h, una persona conduce el vehículo y otra se enfoca a identificar los avistamientos de animales atropellados. Únicamente se consideran a los animales que sean localizados dentro del arroyo vial.

Figura 152



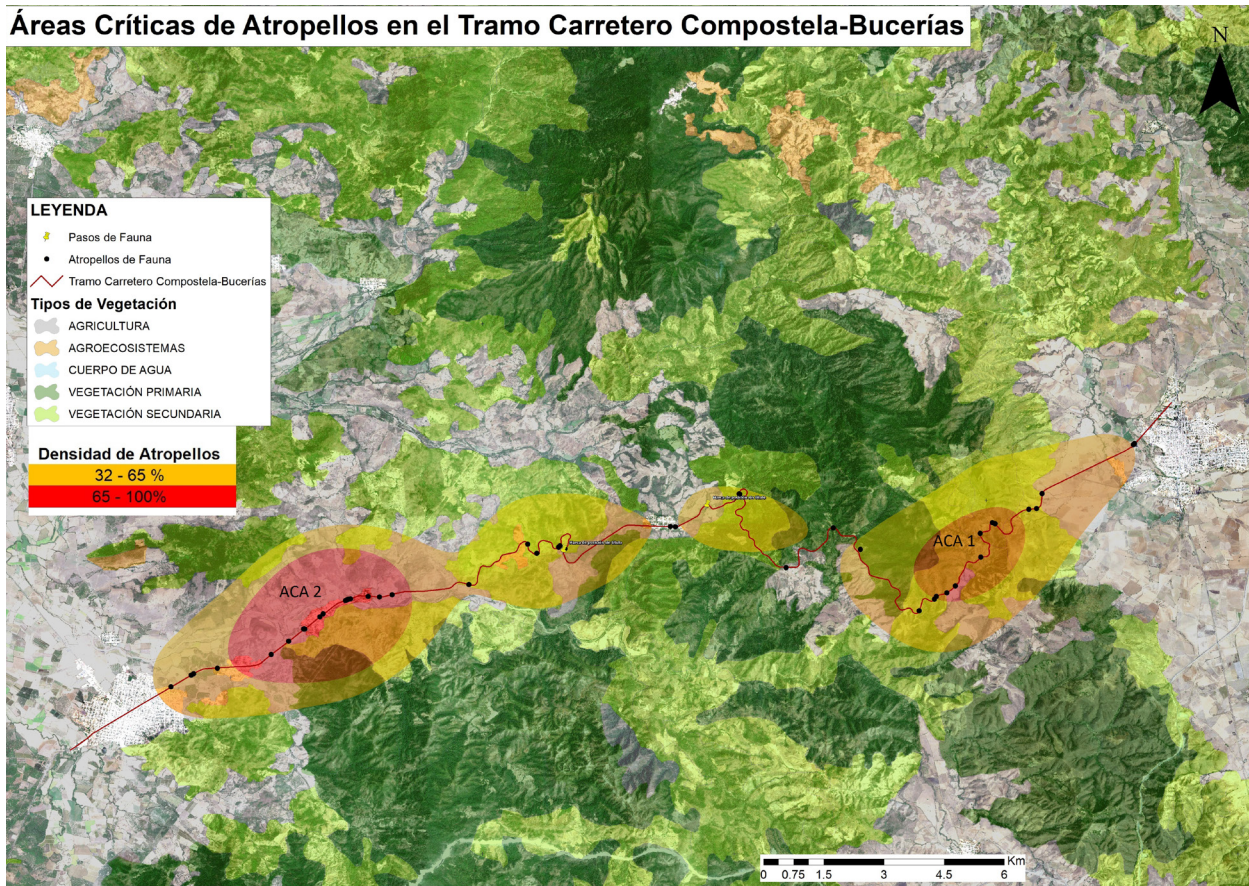
Ejemplo de algunos animales atropellados en carreteras de México. a) Perro (*Canis lupus*), b) Tamandúa norteño (*Tamandua mexicana*), c) Tlacuache norteño (*Didelphis virginiana*), d) Tortuga monjita de monte (*Rhinoclemmys areolata*), e) Murciélago frutero (*Artibeus jamaicensis*), f) Perico pecho sucio (*Eupsittula nana*), y g) Ranera perico (*Leptophis ahaetulla*) (fuente: Grupo Selome, S.A. de C.V.).

Análisis de los datos de atropellos

Si se analiza la frecuencia de atropellos de animales en función de la proximidad al paso para fauna evaluado se puede observar la proporción de los atropellos con relación a la estructura de cruce, lo que pudiera evidenciar si la proximidad del paso para fauna representa una opción de cruce seguro para los animales.

En este mismo orden de ideas es importante identificar las áreas críticas donde se concentra la mayor densidad de atropellos con relación a la ubicación del paso, para lo cual se requiere la elaboración de “mapas de calor” en donde se utiliza un software en el campo de los Sistemas de Información Geográfica.

Figura 153



Ejemplo de Mapa de las Áreas Críticas de Atropellos (ACA), tramo carretero Compostela-Bucerías, Nayarit, con relación al corredor biológico identificado (fuente: Grupo Selome, S.A. de C.V.).

Adicional a lo anterior es importante identificar aquellas especies mayormente atropelladas a lo largo de un ciclo anual, ya que dependiendo de la época puede variar el grado de afectación de las distintas especies. Por ejemplo, en un monitoreo realizado en el tramo carretero Ramal El Tintal-Playa del Carmen, Quintana Roo, entre agosto y septiembre del 2020, se encontró que la Tarántula Yucateca (*Tiiltocatl epicureanus*)¹⁰⁷ fue la especie mayormente atropellada, esto debido a que durante su época reproductiva se incrementa la migración de los machos que buscan a una hembra para aparearse, y provoca que los organismos crucen por encima de la carpeta asfáltica.

¹⁰⁷ *Tiiltocatl epicureanus* o Tarántula Yucateca es una tarántula endémica y se lista en el apéndice II de la CITES (Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres), con preocupación menor (LC) según la IUCN (Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza). No se encuentra listada como protegida en la NOM-059-SEMARNAT-2010.

Figura 154



Ejemplar de Tarántula Yucateca (*Tliltocatl epicureanus*) atropellada en el tramo carretero El Tintal-Playa del Carmen, Quintana Roo (fuente: Grupo Selome, S.A. de C.V.).

Con el listado de especies mayormente afectadas por atropello pueden identificarse áreas de oportunidad que deben atenderse con respecto a los pasos para fauna, con la finalidad de ejercer todas aquellas medidas de corrección que permitan aumentar tanto la eficiencia como la eficacia de las estructuras de cruce, como puede ser la colocación o aumento en la longitud del vallado perimetral a las obras evaluadas, colocación de banquetas o hasta la inclusión de nuevos pasos para fauna del mismo tipo o particulares a un taxa.

Es importante mencionar que además de registrar el uso por parte de los animales, también se deben considerar otras variables durante el monitoreo para mejorar la interpretación de los resultados, como son:

1. Geometría de la infraestructura lineal, sección en corte o terraplén.
2. Obras complementarias en los pasos para fauna para su adecuado funcionamiento, alumbrado, cercas en las inmediaciones de los pasos, pantallas antirruído, etcétera.
3. Tipo de paso para fauna, dimensiones y características, así como la distancia entre los pasos.

4. Tiempo transcurrido desde la construcción del paso hasta su evaluación, ya que los animales requieren de varios años para poderse adaptar a dichos pasos y comenzar a usarlos.
5. Ecosistema, altitud, topografía, usos de suelo, tipo y cantidad de vegetación.
6. Otras variables como la presencia y frecuencia de uso por especies no objetivo, tal es el caso de los humanos y animales domésticos.

CAPÍTULO 8

CONSERVACIÓN DE PASOS PARA FAUNA SILVESTRE

Todas las medidas de mitigación ambiental como son los pasos para fauna que se hayan implementado en la infraestructura lineal deben inspeccionarse y conservarse de forma rutinaria para garantizar su funcionalidad a largo plazo. Por tales motivos el costo de la conservación de cualquier obra de infraestructura debe considerarse desde la etapa de planificación de la obra y deberá ser definido el tipo y la frecuencia de los procedimientos de conservación por aplicar, así como la organización en tiempos y asignación de responsables para ello. En lo referente a los pasos para fauna, las acciones de conservación deben ser realizadas por parte de la dependencia o particular a cargo.

Dado el carácter dinámico de los ecosistemas, es importante involucrar a especialistas biólogos, ecólogos y expertos en fauna y vegetación cuando la conservación requiere o refiere a temas de carácter ambiental. Esta estrategia interdisciplinaria ha facilitado en otros países el correcto funcionamiento tanto de monitoreo de estos pasos como de su conservación.

La conservación de los pasos para fauna, así como el monitoreo de su efectividad están estrechamente vinculados. Los procedimientos de seguimiento se diseñan principalmente para comprobar si el paso implementado cumple su propósito, pero al mismo tiempo para identificar déficits y necesidades de conservación y mejora para maximizar el uso de los pasos por parte de los animales.

La planificación de las labores de conservación requiere la definición clara de los objetivos que se pretenden conseguir con las medidas de mitigación, y particularmente con los pasos para fauna y las obras complementarias que los integran, para la disminución de las colisiones vehículo-animal y el atropello de animales silvestres. En este capítulo se describirán algunas de las medidas que se recomienda aplicar para mantener en buen estado los pasos para fauna y sus obras complementarias.

Es importante mencionar que a estas recomendaciones se suman las que requiera cada tipo de paso para fauna como obra civil.

Tabla 6
Recomendaciones de conservación a realizar en los pasos para fauna silvestre en la infraestructura lineal

	TIPO DE PASOS PARA FAUNA							
	1 Paso Inferior para Fauna (PIFA)	2 Paso Superior para Fauna (PSFA)	3 Obra de drenaje adaptada para función mixta (paso de agua y paso para fauna)	4 Paso para fauna embebido en la infraestruc- tura lineal	5 Paso aéreo para fauna arborícola	6 Obras para paso y protección de fauna voladora	7 Paso temporal para invertebrados migratorios	8 Paso para fauna acuática
Recomendaciones de Conservación								
Requiere estrecha colaboración entre especialistas de carácter ambiental y responsables del mantenimiento de la carretera.	X	X	X	X	X	X	X	X
Integrar acciones de conservación de pasos para fauna y obras complementarias adecuadas para ello en los programas de conservación.	X	X	X	X	X	X	X	X
El personal de mantenimiento deberá recibir capacitación acerca de las especies a las que va destinado el paso y sobre los procedimientos establecidos en el programa de conservación.	X	X	X	X	X	X	X	X
Rehabilitación o sustitución de cualquier elemento que componga la obra o estructura (banquetas, repisas, tubos de refugios, etc.), incluyendo el desgaste de los elementos que componen el paso, los cuales deben ser reemplazados.	X	X	X	X	X	X	X	X

TIPO DE PASOS PARA FAUNA								
	1 Paso Inferior para Fauna (PIFA)	2 Paso Superior para Fauna (PSFA)	3 Obra de drenaje adaptada para función mixta (paso de agua y paso para fauna)	4 Paso para fauna embebido en la infraestructura lineal	5 Paso aéreo para fauna arborícola	6 Obras para paso y protección de fauna voladora	7 Paso temporal para invertebrados migratorios	8 Paso para fauna acuática
Recomendaciones de Conservación								
Los trabajos de conservación se realizarán anualmente.	X	X	X	X	X	X		X
Mantenimiento de la vegetación y las plantaciones. Se deberán programar riegos periódicos sobre todo en los primeros años y proceder a reposición de ejemplares que puedan resultar dañados o que no sobrevivan.	X	X		X				
Supervisar la aparición de usos inadecuados como la circulación de vehículos, ganado, maquinaria agrícola o personas por estas estructuras.	X	X	X	X				
Programar siega y desbroce periódico en la parte central del paso para evitar el crecimiento excesivo de la cobertura de vegetación herbácea, con podas anuales de los elementos arbustivos para control de copa.	X	X		X				
Controlar plagas o enfermedades en la vegetación dentro del paso y aledaña a este	X	X	X	X	X			

TIPO DE PASOS PARA FAUNA								
	1 Paso Inferior para Fauna (PIFA)	2 Paso Superior para Fauna (PSFA)	3 Obra de drenaje adaptada para función mixta (paso de agua y paso para fauna)	4 Paso para fauna embebido en la infraestruc- tura lineal	5 Paso aéreo para fauna arborícola	6 Obras para paso y protección de fauna voladora	7 Paso temporal para invertebrados migratorios	8 Paso para para fauna acuática
Recomendaciones de Conservación								
Retirar o remover obstáculos que dificulten el paso de los animales.	X	X	X	X				X
Revisión y reparación del cercado del derecho de vía y malla inductiva hacia los pasos. Detectar y corregir la aparición de desperfectos y aperturas en la malla o cercos.	X	X	X	X	X			
Limpieza para evitar residuos o elementos que obstaculicen el paso, retirar residuos, acopio de material. Estos elementos son particularmente necesarios después de periodos de avenidas en obras de drenaje.	X	X	X	X				X
Limpieza, desazolve y dragados de canales en los accesos de las obras de drenaje.			X	X				X
Revisión y reparación o sustitución de repisas dentro del paso para fauna y rampas de acceso al mismo.		X	X	X				

TIPO DE PASOS PARA FAUNA								
	1 Paso Inferior para Fauna (PIFA)	2 Paso Superior para Fauna (PSFA)	3 Obra de drenaje para función mixta (paso de agua y paso para fauna)	4 Paso para fauna embebido en la infraestruc- tura lineal	5 Paso aéreo para fauna arborícola	6 Obras para paso y protección de fauna voladora	7 Paso temporal para invertebrados migratorios	8 Paso para para fauna acuática
Recomendaciones de Conservación								
Revisión y reparación de aperturas en malla de protección para fauna voladora.						X		
Revisión, reparación y reposición permanente de líneas, cuerdas, pasarelas y demás estructuras construidas para enlazar el paso aéreo para fauna arborícola con la vegetación arbórea circundante.					X			
Conservación de rodapie o vallado de inducción utilizando malla gradual y sega de vegetación en franja de 1 m próximos a la valla para facilitar el movimiento de pequeñas especies como los anfibios y reptiles hacia el paso.	X	X	X	X				

Para la preservación y conservación del estado físico de los pasos para fauna se recomienda contemplar acciones de:

1. Conservación rutinaria de tramos de pasos para fauna inferiores y superiores (PIFA, PSFA), así como de obras de drenaje adaptadas para función mixta (paso de agua y paso para fauna).

Estos trabajos comprenden las labores de conservación y preservación de PIFA, PSFA, cercado, barreras y todos los elementos que incluyan las estructuras de pasos para fauna.

En estos trabajos se contempla la realización de limpieza de los drenes de la superestructura y la corona de la subestructura, de igual forma la reparación y sustitución del mallado o barreras de madera, poda de árboles y retiro de maleza, reparaciones menores en la superestructura y subestructura para atenuar el deterioro de los PIFA. Estos trabajos se realizan cada año ya que es el periodo mínimo que requieren para su conservación.

Para los pasos superiores para fauna, obras de drenaje adaptadas para función mixta, se realizará la limpieza, desazolve y dragado de canales tanto de entrada y salida de la estructura, retiro de maleza, reparaciones menores en las estructura, reparación y sustitución o reparación de repisa, banquetas y mallado.

2. Reconstrucción de cualquier tipo de paso para fauna y obras de drenaje adaptadas para función mixta (paso de agua y paso para fauna).

Este concepto contempla actividades más completas y costosas, ya que se tendrá que rehabilitar parcial o totalmente el paso para fauna, el reforzamiento de la superestructura y/o subestructura, protecciones contra socavación, recimentaciones, sustituciones y adecuación de repisa o plataformas a los anchos de calzada existentes o para mejorar su capacidad hidráulica en caso de obras de drenaje adaptadas para función mixta. Estos trabajos tendrán un costo diferente por las características geométricas de cada paso para fauna y la ubicación del sitio donde se encuentra.

3. Conservación periódica.

Se denomina conservación periódica a todas las obras de rehabilitación que en forma periódica o eventual son necesarias para que las estructuras se encuentren en las condiciones adecuadas.

Las actividades que constituyen este concepto son la de reparaciones de la estructura, limpieza y retiro de maleza, podas, rehabilitación de mallados o barreras, restitución, conservación de señalamiento; mismas que han sido presentadas en la tabla anterior.

En este concepto también se incluirán las acciones de restauración, de ser necesaria, de la vegetación dañada en las entradas y salidas de los pasos para fauna, sobre los pasos para fauna y áreas que se hayan designado como corredores hacia el paso.

4. Conservación, mantenimiento y reposición del señalamiento referente al cruce de fauna silvestre.

Se contemplan tanto el señalamiento vertical como el horizontal y dispositivos de seguridad, necesarios para brindar a los usuarios un sistema vial seguro.

5. Mantenimiento integral.

Los trabajos que se desarrollan son la conservación periódica y la conservación rutinaria; de igual manera, la reconstrucción de PIFA, PSFA y obras de drenaje adaptadas para función mixta. Todos ellos en un solo rubro de “Mantenimiento Integral”, programando los trabajos para tres años.



COMUNICACIONES
SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

SUBSECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA

DIRECCIÓN GENERAL DE SERVICIOS TÉCNICOS

CAPÍTULO 9

DESARROLLO DE UN PROYECTO EJECUTIVO DE PASOS PARA FAUNA SILVESTRE

El desarrollo de un proyecto de infraestructura actualmente concierne a diferentes disciplinas, las cuales aportan su conocimiento y experiencias para lograr los objetivos de éste. A continuación se presenta, a manera de resumen, una tabla en la cual, a partir de la metodología descrita en este Manual, se proporcionan las herramientas de análisis y estudios generales que cada especialista, dentro del ámbito de su competencia, debe generar para llevar a cabo un proyecto ejecutivo de pasos para fauna.

Para la utilización práctica de la tabla es importante hacer notar que a lo largo de cada una de las etapas de aplicación del presente Manual, que se ubican en la primera columna de la tabla, se señalan las particularidades del equipo multidisciplinario requerido para cada etapa como mínimo, así como los principales insumos de información que se deben revisar y analizar para lograr el entregable resultante de cada etapa.

La estrategia de la tabla y del presente Manual consiste en que una etapa previa produce el principal insumo para la etapa subsecuente, guiando las herramientas que deben utilizarse y las acciones que se tienen que realizar para la implementación adecuada de pasos para fauna en infraestructuras lineales, su monitoreo y cuidado necesarios mediante acciones de conservación de las estructuras que los componen.

La siguiente tabla es un referente para el desarrollo del proyecto, sin embargo, no limita a las técnicas, procedimientos, metodologías y tecnologías de vanguardia que contribuyan a la correcta implementación de pasos para fauna en la infraestructura lineal.

Tabla 7
Desarrollo de un proyecto ejecutivo de pasos para fauna

FASES	PARTICIPACIÓN MULTIDISCIPLINARIA RECOMENDADA	HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS/ESTUDIOS (INSUMOS)	ACCIONES EJECUTADAS POR FASE	ENTREGABLE
PLANIFICACIÓN	• Especialista en SIG. • Especialista en fauna silvestre. • Especialista en vegetación. • Ing. Civil.	1. Modelo digital de elevación. 2. Imágenes y/o fotografías satelitales. 3. Red hidrográfica. 4. Cartas de usos de suelo y vegetación. 5. Base de datos de especies y hábitats de fauna y flora. 6. Cartas de las Áreas Naturales Protegidas (ANP), federales, estatales y municipales. 7. Cartas de la red de infraestructura y transporte. 8. Planes y programas urbanísticos y ordenamientos. 9. Zonas voluntariamente destinadas a la conservación o áreas de interés ambiental.	Reconocimiento de objetivos, recopilación y análisis de información cartográfica y bibliográfica, planeación de infraestructura lineal sustentable, selección de áreas y especies focales, valor del territorio para la conservación y conectividad ecológica, así como corredores biológicos.	I. PLANO BASE cuyo contenido integra: 1) Delimitación de área de estudio. 2) Identificación de corredores biológicos. 3) Rutas de movilización de fauna. 4) Definición de tramos críticos. 5) Planeación de la ruta de la infraestructura lineal con menor repercusión en conectividad ecológica.
UBICACIÓN	• Especialista en SIG. • Especialista en fauna silvestre. • Ing. Civil.	1. (I) PLANO BASE 2. Imágenes y/o fotografías satelitales. 3. Carta de la Red hidrográfica. 4. Cartas de distribución de especies clave por afinidad de hábitats. 5. Cartas de la red de infraestructura y transporte en área de estudio. 6. Planes y programas urbanísticos y ordenamientos. 7. Zonas voluntariamente destinadas a la conservación o áreas de interés. 8. Plano de obras de drenaje mayores y menores consideradas o presentes en el proyecto.	Identificación de los tramos de interés para conectividad ecológica, ubicación tentativa y densidad de pasos, evaluación de la permeabilidad del proyecto con y sin los pasos utilizando modelos, ajuste de ubicación y densidad de pasos para obtener la mayor permeabilidad según resultados de modelos.	II. PLANO DE UBICACIÓN DE SITIOS DONDE SE IMPLEMENTARÁN PASOS PARA FAUNA cuyo contenido integra: 1) Ubicación de los pasos. 2) Densidad de pasos por tramo de interés para la conectividad.

FASES	PARTICIPACIÓN MULTIDISCIPLINARIA RECOMENDADA	HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS/ESTUDIOS (INSUMOS)	ACCIONES EJECUTADAS POR FASE	ENTREGABLE
TIPOS	• Especialistas en diversos taxa de fauna. • Especialista en SIG. • Ing. Civil.	1. (II) PLANO DE UBICACIÓN DE SITIOS DONDE SE IMPLEMENTARÁN PASOS PARA FAUNA. 2. Mapas de distribución de especies clave. 3. Mapas de red hidrográfica. 4. Plano de obras de drenaje (mayores y menores) consideradas o presentes en el proyecto. 5. Planos de planta y perfil del proyecto de infraestructura.	Revisión de opciones de tipos de pasos en función de topografía, hidrología, fauna y hábitats presentes en el proyecto de infraestructura con sus obras de drenaje mayor y menor. Definición de tipos de pasos, cantidades y ubicación precisa con respecto al proyecto u obra existente.	III. PLANO DE DISTRIBUCIÓN Y TIPOS DE PASOS PARA FAUNA PROPUESTOS A LO LARGO DE LA INFRAESTRUCTURA EXISTENTE O EN PROYECTO cuyo contenido integra: 1. Tipo y dimensiones de pasos. 2. Planta y perfil de los tramos de la infraestructura donde se construirán o habilitarán pasos para fauna.
DISEÑO	• Especialista en fauna silvestre. • Especialista en vegetación. • Ing. Civil. • Especialista en vías terrestres. • Arq. Paisajista.	1. (III) PLANO DE DISTRIBUCIÓN Y TIPOS DE PASOS PARA FAUNA PROPUESTOS A LO LARGO DE LA INFRAESTRUCTURA EXISTENTE O EN PROYECTO. 2. Estudio topográfico. 3. Estudio hidráulico. 4. Proyecto geométrico. 5. Proyecto de obras de drenaje. 6. Proyecto de señalización y dispositivos de seguridad.	Diseño estructural de cada tipo de paso para fauna propuesto y, en su caso, de las obras complementarias que lo requieran. Diseño arquitectónico para mimetización y fusión del paso con el ambiente circundante y acabados.	IV. PROYECTO EJECUTIVO DE PASOS PARA FAUNA SILVESTRE cuyo contenido integra: 1. Estudio geotécnico. 2. Proyecto de cimentaciones. 3. Proyecto arquitectónico de pasos para fauna. 4. Proyecto y análisis estructural de los pasos para fauna. 5. Procedimiento constructivo.
SEÑALIZACIÓN	• Especialista en fauna silvestre. • Ing. Civil. • Especialista en vías terrestres.	1. (IV) PROYECTO EJECUTIVO DE PASOS PARA FAUNA SILVESTRE 2. Estudio topográfico. 3. Proyecto geométrico. 4. Proyecto de señalización y dispositivos de seguridad.	Desarrollo del proyecto de señalización para prevención de incidencias con fauna silvestre.	V. PROYECTO DE SEÑALAMIENTO VIAL INCLUYENDO EL DE FAUNA SILVESTRE cuyo contenido integra: 1. Planos y especificaciones para el diseño y colocación del señalamiento y, en su caso, dispositivos de seguridad.

FASES	PARTICIPACIÓN MULTIDISCIPLINARIA RECOMENDADA	HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS/ESTUDIOS (INSUMOS)	ACCIONES EJECUTADAS POR FASE	ENTREGABLE
MONITOREO	• Biólogo especialista en fauna. • Biólogo especialista en vegetación. • Especialista en SIG.	1. (V) PROYECTO EJECUTIVO DE PASOS PARA FAUNA SILVESTRE. 2. (VI) PROYECTO DE SEÑALAMIENTO VIAL INCLUYENDO EL DE FAUNA SILVESTRE. 3. INFORME DE ACTIVIDADES DE CONSERVACIÓN DE LOS PASOS PARA FAUNA. 4. Plano de obras de drenaje mayores y menores consideradas o presentes en el proyecto. 5. Cámaras trampa para monitoreo de fauna (con reposición continua de pilas y tarjetas de memoria). 6. Trampas de sedimento para monitoreo. 7. Guías de huellas y rastros de fauna silvestre. 8. GPS.	Monitoreo de pasos para fauna silvestre considerando cámaras y trampas de sedimento. Monitoreo de atropellos de fauna sobre tramos definidos de la infraestructura. Monitoreo de variaciones atribuibles al cambio climático y a la actividad antrópica.	INFORME DE MONITOREO DE EFICACIA Y EFICIENCIA DE LOS PASOS PARA FAUNA SILVESTRE cuyo contenido integra: 1) Identificación de zonas críticas donde deban aplicarse medidas o pasos adicionales. 2) Propuesta de acciones de mejora.
CONSERVACIÓN	• Biólogo especialista en fauna. • Ing. Civil. • Especialista en vías terrestres. • Brigadas de mantenimiento rutinario.	1.(V) PROYECTO EJECUTIVO DE PASOS PARA FAUNA SILVESTRE. 2. (VI) PROYECTO DE SEÑALAMIENTO VIAL INCLUYENDO EL DE FAUNA SILVESTRE. 3. INFORME DE MONITOREO DE EFICACIA Y EFICIENCIA DE LOS PASOS PARA FAUNA SILVESTRE. 4. Plano de obras de drenaje mayores y menores consideradas o presentes en el proyecto.	Realización de labores de conservación (mantenimiento periódico y rutinario) de los pasos para fauna.	INFORME DE ACTIVIDADES DE CONSERVACIÓN DE LOS PASOS PARA FAUNA cuyo contenido integra: 1) Reporte de reparaciones, podas, desazolves, reposición de andadores, reparación de banquetas, repisas, cableados, etcétera.

NOTAS FINALES

La implementación de pasos para fauna silvestre en la infraestructura lineal es una tendencia creciente en todo el mundo, y México no es una excepción, por lo que la unificación de criterios y alternativas para ello, como las propuestas en este Manual, cobran gran importancia.

México tiene una gran responsabilidad ante el mundo en materia de protección y conservación de la fauna silvestre, dado que ha sido beneficiado con una muy alta biodiversidad. Por tal motivo, la infraestructura lineal debe ser realizada en alineación con nuestro compromiso con el medio ambiente.

Por otro lado, la protección de la vida humana dentro de un sistema vial seguro es responsabilidad de todos, y nos compromete a implementar las mejores prácticas en materia de seguridad vial para prevenir y reducir los accidentes viales por la incidencia de la fauna silvestre en la infraestructura lineal.

La planeación de infraestructura lineal debe contemplar la búsqueda de alternativas de ruta que maximicen los beneficios sociales y económicos, sin menoscabo de la protección y conservación de los recursos naturales, por lo que los pasos para fauna silvestre se ofrecen como una buena medida de mitigación de los impactos sobre la biodiversidad derivados de la construcción de obras de infraestructura. No obstante, debe ser el último recurso, pues es preferible no tener que implementarlos, lo cual significaría que el trazo del proyecto de infraestructura lineal no generaría una afectación o fragmentación de ecosistemas en su paso. Como se ha señalado en este Manual, el mejor paso para fauna es el que no requiere ser construido.

En la definición, diseño y construcción de estructuras de pasos para fauna es necesaria la participación y colaboración de especialistas de diversas disciplinas; el trabajo multidisciplinario y el acceso a herramientas informáticas poderosas y diversas, en ésta y otras actividades relacionadas con la infraestructura lineal es fundamental para obtener los mejores resultados en el mundo de hoy.

La planeación, ubicación, diseño y construcción de pasos para fauna silvestre son conceptos vivos, cambiantes y en mejora continua, en función de que se obtenga y canalice adecuadamente la información que se va generando a partir de su implementación. Hay mucha información en países desarrollados referente a la eficiencia y efectividad de los pasos, al igual que en algunos países latinoamericanos. Por tal motivo es importante en nuestro país empezar a generar información que nos permita implementar pasos para fauna silvestre de una forma cada vez más certera para la conservación específica de nuestra biodiversidad.



COMUNICACIONES
SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

SUBSECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA

DIRECCIÓN GENERAL DE SERVICIOS TÉCNICOS

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acuerdo por el que se establecen las Reglas de Operación del Programa de Conservación para el Desarrollo Sostenible (Procodes). *Diario Oficial de la Federación*, 28 de diciembre del 2019. Disponible en: https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5583023&fecha=28/12/2019.
- Acuerdo por el que se expide el Programa de Ordenamiento Ecológico General del Territorio. *Diario Oficial de la Federación*, 7 de septiembre del 2012. Disponible en: http://www.semarnat.gob.mx/archivosanteriores/temas/ordenamientoecologico/Documents/documentos_bitacora_oegt/dof_2012_09_07_poegt.pdf.
- Al-Ghamdi, A.S., S.A. AlGadhi (2004). "Warning signs as countermeasures to camel-vehicle collisions in Saudi Arabia". *Accid Anal Prevent* 36: 749-760.
- Al-Kaisy, A., A. Hardy, C. Nemfakos (2008). "Static warning signs of occasional hazards: Do they work?" *ITE Journal* 78: 38-42.
- Almenar, J. B., A. Bolowich, T. Elliot, D. Geneletti, G. Sonnemann y B. Rugani (2019). "Assessing habitat loss, fragmentation and ecological connectivity in Luxembourg to support spatial planning". *Landscape and Urban Planning* 189: 335-351.
- Alternativa verde (2020). *Ecoductos, puentes naturales para cuidar la fauna*. Disponible en: <https://alternativa-verde.com/2012/10/05/ecoductos-puentes-naturales-para-cuidar-la-fauna/>.
- Appalachian Trail Conservancy (2020). *Interactiv Map*. Disponible en: <https://appalachiantrail.org/explore/hike-the-a-t/interactive-map/>.
- Appalachian Trail Conservancy (2020). *Overseeing the management and conservation of the Appalachian National Scenic Trail since 1925*. Disponible en: <https://appalachiantrail.org/>.
- Aranda Sánchez, J. M. (2012). *Manual para el rastreo de mamíferos silvestres de México*. CONABIO (no. 599 A7).
- Arévalo de Azrak, R. (2002). "Perspectivas del medio ambiente mundial 2002" en *GEO-3: pasado, presente y futuro*.
- Arriaga, V. y V. A. Córdova (2006). *Manual del proceso de ordenamiento ecológico*. Semarnat. (primera edición).
- Assessment, M. E. (2003). *Ecosistemas y bienestar humano: marco para la evaluación. Resumen*. World Resources Institute.
- Atlas Obscura (2020). *Natuurbrug Zanderij Crailoo, Hilversum, Netherlands*. Disponible en: <https://www.atlasobscura.com/places/natuurbrug-zanderij-crailoo>.

- Audubon (2020). *Flyways of the Americas*. Disponible en: <https://www.audubon.org/birds/flyways>.
- Balvanera, P., H. Cotler, O. Aburto, A. Aguilar, M. Aguilera, M. Aluja y P. Ávila (2009). “Estado y tendencias de los servicios ecosistémicos”, *Capital natural de México*, no. 2, pp. 185-245.
- Bekker, H. G. (2005). *Fauna y tráfico: manual europeo para la identificación de conflictos y el diseño de soluciones*, Organismo Autónomo de Parques Nacionales.
- Bekker, H. y B. Iuell (2003). Habitat fragmentation due to infrastructure. Disponible en: <https://escholarship.org/content/qt9693w540/qt9693w540.pdf>
- Bennett, A. F. (2003). “Linkages in the Landscape: The Role of Corridors and Connectivity in Wildlife Conservation”. *Conserving Forest Ecosystems* (1). IUCN.
- Berlanga, H., H. Gómez de Silva, V. M. Vargas-Canales, V. Rodríguez-Contreras, L. A. Sánchez-González, R. Ortega-Álvarez y R. Calderón-Parra (2019). *Aves de México: Lista actualizada de especies y nombres comunes*. CONABIO, Ciudad de México.
- Biológica, S. L. D. (1992). *Convenio sobre la diversidad biológica. Texto y anexos*. Disponible en: <https://www.cbd.int/doc/legal/cbd-es.pdf>.
- Bocco, G., A. Velázquez y A. Torres (2000). “Ciencia, comunidades indígenas y manejo de recursos naturales. Un caso de investigación participativa en México”. *Interciencia*, 25(2), 64-70.
- Bond, A. R., y D.N. Jones (2008). “Temporal trends in use of fauna-friendly underpasses and overpasses”, *Wildlife Research*, 35 (2), 103-112.
- Bond A.R.F. y D.N. Jones (2013). “Wildlife warning signs: Public assessment of components, placement and designs to optimise driver response”. *Animals* 3: 1142-1161. Australia.
- Boyd, J., y R. B. McNab (2008). *La guacamaya roja en Guatemala y El Salvador: Estado actual en 2008 y posibilidades en el futuro. Hallazgos y recomendaciones de un taller para la recuperación de la especie*, 9-15 de marzo del 2008. Ciudad de Guatemala. Wildlife Conservation Society-Guatemala Program, 167 pp.
- Brusca, R. C. y G. J. Brusca (1990). *Invertebrates*. Sinauer Associates Editors. USA, pp. 622-624.
- Cambio 22. (2020). Empieza la Travesía del Cangrejo Azul en Tulum. Disponible en: <https://cambio22.mx/empieza-la-travesia-del-cangrejo-azul-en-tulum/>. [Consulta: 26 de noviembre de 2020].
- Carabias, J., E. Provencio y C. Toledo (1994). *Manejo de recursos naturales y pobreza rural* (no. 307.1412 C257). Universidad Nacional Autónoma de México, Fondo de Cultura Económica, México, D.F.
- Carmona, M. D. C. (2010). “Notas sobre política exterior y ambiente: México en las principales negociaciones internacionales”, en *Homenaje al doctor Emilio O. Rabasa*, 759-793. Disponible en: www.juridicas.unam.mx.

- Catchment Solutions. Environmental Service Providers (2017). *Slacks Creek Rock Ramp and Horizontal Culvert Baffle Fishway*. Disponible en: <https://catchmentsolutions.com.au/slacks-creek-rock-ramp-and-horizontal-culvert-baffle-fishway/>.
- CEIBA (2019). *Planteamientos estratégicos para la política ambiental y el desarrollo sustentable 2019-2025*. Centro Interdisciplinario de Biodiversidad y Ambiente, A. C. Disponible en: <https://ceiba.org.mx/>.
- Chávez, C., A. de la Torre, H. Bárcenas, R. A. Medellín, H. Zarza y G. Ceballos (2013). *Manual de fototrampeo para estudio de fauna silvestre. El jaguar en México como estudio de caso*. Alianza WWF-Telcel, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México.
- CITES (2020). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Disponible en: <https://www.biodiversidad.gob.mx/planeta/cites>.
- Clevenger, A. P., y N. Waltho (2000). "Factors influencing the effectiveness of wildlife underpasses in Banff National Park, Alberta, Canada", *Conservation Biology* 14 (1): 47-56.
- Clevenger, A. P., B. Chruszcz y K. E. Gunson (2001). "Highway mitigation fencing reduces wildlife-vehicle collisions". *Wildlife Society Bulletin*: 646-653.
- Clevenger, A. P., y M. A. Sawaya (2010). "Piloting a non-invasive genetic sampling method for evaluating population-level benefits of wildlife crossing structures". *Ecology and Society*, 15(1).
- Clevenger, A. P., y M. P. Huijser (2011). *Wildlife crossing structure handbook: design and evaluation in North America*, no. FHWA-CFL-TD-11-003. United States. Federal Highway Administration. Central Federal Lands Highway Division.
- Comisión Europea (2002). *El esfuerzo de la UE en materia de protección de la naturaleza*. Disponible en: https://ec.europa.eu/environment/nature/info/pubs/docs/others/focus_es.pdf.
- Comité Asesor Nacional sobre Especies Invasoras (2010). *Estrategia nacional sobre especies invasoras en México: prevención, control y erradicación*.
- CONABIO (2008). *Capital natural de México*, vol. I, *Conocimiento actual de la biodiversidad*.
- CONANP (2020). *Listado de las Áreas Naturales Protegidas de México (Listanp)*. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. Disponible en: <http://sig.conanp.gob.mx/website/pagsig/listanp/>.
- CONANP (2020). *Listado de las Áreas Destinadas Voluntariamente a la Conservación (ADVC)*. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. Disponible en: <https://advc.conanp.gob.mx/listado-de-advc/>.
- Conference of European Directors of Roads, 2013.
- Conservation Corridor (2020). *Connecting Science to Conservation*. Disponible en: <http://conservationcorridor.org>.

- Conservation Corridor (2020). *Natural Corridors. Connecting Science to Conservation*. Disponible en: <http://conservationcorridor.org/corridors-in-conservation/natural-corridors/>.
- Conservation Corridor (2020). *Large-scale Networks. Connecting Science to Conservation*. Disponible en: <http://conservationcorridor.org/corridors-in-conservation/large-scale-networks/>.
- Conservation Corridor (2020). *Human-made Linkages. Connecting Science to Conservation*. Disponible en: <http://conservationcorridor.org/corridors-in-conservation/man-made-corridors/>.
- Conservation Corridor (2020). *Corridor Experiments. Connecting Science to Conservation*. Disponible en: <http://conservationcorridor.org/corridors-in-conservation/experimental-corridors/>.
- Conservation Corridor (2020). *Basic Information, Definition and Ideas. Connecting Science to Conservation*. Disponible en: <http://conservationcorridor.org/the-science-of-corridors/>.
- Coordinación General, O. Sánchez (comp.) (2012). *Propuesta de lista de especies prioritarias para la conservación en México*. CONABIO, 22 pp.
- Cotler, H., A. Garrido, V. Bunge y M. L. Cuevas (2010). "Las cuencas hidrográficas de México: priorización y toma de decisiones". *Las Cuencas Hidrográficas de México. Diagnóstico y Priorización*. SEMARNAT, 231 pp.
- Cotler, H., y A. Priego (2004). "El análisis del paisaje como base para el manejo integrado de cuencas: caso de la cuenca Lerma-Chapala". *El manejo integral de cuencas en México*. SEMARNAT-INE.
- Cracco, M. y E. Guerrero (2004). "Aplicación del enfoque ecosistémico a la gestión de corredores en América del Sur". *Memorias del Taller Regional*, vol. 3.
- Creel, J. E. B. (2009). *El valor de los bienes y servicios que las áreas naturales protegidas proveen a los mexicanos*. Ciudad de México: The Nature Conservancy.
- Cruz A., A. (2017). *Estrategia Nacional sobre Biodiversidad de México y Plan de Acción 2016-2030*. Conabio. Disponible en: <https://www.biodiversidad.gob.mx/pais/en-biomex>.
- Cupul, F. (2002). "Víctimas de la carretera: fauna apachurrada". *Gaceta CUC*. Departamento de Ciencias. Centro Universitario de la Costa. México.
- De la Peña, E. y J. Díaz Pineda (2006). "MIMAR. Mapa de interpretación del medio ambiente a través de la red de carreteras". *Carreteras. Revista técnica de la Asociación Española de la Carretera*: 150.
- Deinet, S., C. Ieronymidou, L. McRae, I. J. Burfield, R. P. Foppen, B. Collen y M. Böhm (2013). *Wildlife comeback in Europe. The recovery of selected mammal and bird species*. Londres: Zoological Society of London.
- Dewas, M., J. Herr, L. Schley, C. Angst, B. Manet, P. Landry y M. Catusse (2012). "Recovery and status of native and introduced beavers *Castor fiber* and *Castor canadensis* in France and neighbouring countries". *Mammal Review* 42 (2): 144-165.

- Díaz-Gallegos, J. R., J. F. Mas y A. V. Montes (2008). "Monitoreo de los patrones de deforestación en el Corredor Biológico Mesoamericano, México". *Interciencia* 33 (12): 882-890.
- Díaz-Pulido, A. y E. Payán-Garrido (2012). *Manual de fototrampeo: una herramienta de investigación para la conservación de la biodiversidad en Colombia*. Instituto de Investigaciones de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt y Panthera Colombia.
- Dirzo, R., H. S. Young, M. Galetti, G. Ceballos, N. J. B. Isaac, y B. Collen (1940). "Defaunation in the Anthropocene". *Science* 345: 401-406.
- Domínguez, J. (2017). *Pasos de fauna hacia la desfragmentación de los hábitats. Ideas medioambientales*. Disponible en: <https://issuu.com/meneseshelder/docs/pasos-de-fauna-hacia-la-desfragmentacion-de-los-habitats>.
- Donaldson, B. M., Y. J. Kweon y L. N. Lloyd (2015). *An evaluation of roadside activity and behavior of deer and black bear to determine mitigation strategies for animal-vehicle collisions*. Virginia Transportation Research Council (FHWA/VTRC 16-R4). Disponible en: http://www.virginiadot.org/vtrc/main/online_reports/pdf/16-r4.pdf.
- DUMAC (2020). *Ducks Unlimited de México*. Disponible en: <http://www.dumac.org/dumac/habitat/esp/qsomos.htm>.
- Eccardi, F. (2003). "El Corredor Biológico Mesoamericano México". *Biodiversitas*. Disponible en: <https://www.biodiversidad.gob.mx/corredor/cbmm/cbmm.html>.
- Estacio, C. M. (2007). "Utilización por vertebrados terrestres de los pasos de faunas y otras estructuras transversales de dos autovías del centro-noroeste peninsular" (tesis doctoral, Universidad Autónoma de Madrid).
- European Commission (2020). *Species protected under the Habitats Directive*. Disponible en: https://ec.europa.eu/environment/nature/conservation/species/habitats_dir_en.htm.
- European Commission (2020). *Green infrastructure in policy*. Disponible en: https://ec.europa.eu/environment/nature/ecosystems/policy/index_en.htm.
- European Commission (2020). *Nature and biodiversity law*. Disponible en: https://ec.europa.eu/environment/nature/legislation/index_en.htm.
- European Commission (2020). *Natura 2000*. Disponible en: https://ec.europa.eu/environment/nature/natura2000/index_en.htm.
- European, Union (2011). *Estrategia de la UE sobre la Biodiversidad hasta 2020*. Medio Ambiente. Luxemburgo.
- European, Union (2011). *EU Biodiversity Strategy for 2030*. Disponible en: https://ec.europa.eu/environment/nature/biodiversity/strategy/index_en.htm.
- Florida Wildlife Corridor (2020). *Connecting to keep Florida Wild*. Disponible en: <http://florida-wildlifecorridor.org/>.

- Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza (2020). *Nuestra historia*. Disponible en: <https://fmcn.org/es/nosotros/historia>.
- Forman, R. T., y L. E. Alexander (1998). "Roads and their major ecological effects". *Annual Review of Ecology and Systematics* 29 (1): 207-231.
- Forman R. T., D. Sperling, J. A. Bissonette, A. P. Clevenger, C. D. Cutshall, V. H. Dale, L. Fahrig, R. L. France, C. R. Goldman, K. Heanue, J. Jones, F. Swanson, T. Turrentine, y T. C. Winter (2003). *Road Ecology: Science and Solutions*. Washington, D.C.: Island Press.
- Francis'Satyr, S. (*Neonympha mitchellii francisci*) 5-Year Review: Summary and Evaluation.
- Franklin, P., E. Gee, C. Baker, S. Bowie (2018). "New Zealand Fish Passage Guidelines". *National Institute of Water & Atmospheric Research Ltd. Hamilton*.
- Fustec, J., T. Lodé, D. Le Jacques y J. P. Cormier (2001). "Colonization, riparian habitat selection and home range size in a reintroduced population of European beavers in the Loire". *Freshwater Biology* 46 (10): 1361-1371.
- Gagnon, J. W., C. D. Loberger, S. C. Sprague, M. Priest, K. Ogren, S. Boe y R. E. Schweinsburg (2013). "Evaluation of desert bighorn sheep overpasses along US Highway 93 in Arizona, USA". En: 2013 International Conference on Ecology and Transportation (ICOET). Federal Highway Administration Arizona Department of Transportation-Arizona Game and Fish Department-USDA Forest Service. Raleigh: North Carolina State University.
- Gagnon, J. W., N. L. Dodd, K. S. Ogren y R. E. Schweinsburg (2011). "Factors associated with use of wildlife underpasses and importance of long-term monitoring". *The Journal of Wildlife Management* 75 (6), 1477-1487.
- Galindo, C. (2010). *Recuperación del lobo mexicano. Patrimonio natural de México. Cien casos de éxito* (J. Carabias, J. Sarukhán, J. de la Maza y C. Galindo, coords.), 80-81. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México, D.F.
- Gallego-García, N. y G. Forero-Medina (2014). *Plan de manejo para la tortuga de río Podocnemis lewyana en la cuenca del río Sinú*. Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y del San Jorge, empresa Urrá S. A. E.S.P., Wildlife Conservation Society, Turtle Survival Alliance y Conservación Internacional. Montería, Colombia. Disponible en: <https://colombia.wcs.org/Portals/113/Plan%20manejo%20lewyana%20para%20web.pdf>.
- Gallina, Sonia (2013). *Las cámaras trampa, una herramienta para conocer la biodiversidad*. INECOL. Disponible en: <https://www.inecol.mx/inecol/index.php/es/2013-06-05-10-34-10/17-ciencia-hoy/236-las-camaras-trampa-una-herramienta-para-conocer-la-biodiversidad>.
- Gil-Corrales, M. A. (2009). *Crónica del Instituto Nacional de Ecología. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales e Instituto Nacional de Ecología*. Disponible en: http://cambioclimatico.gob.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/publicaciones/261/614_2009_cronica_INE.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

- Goosem, M., N. Weston, y S. Bushnell, (2005). "Effectiveness of rope bridge arboreal overpasses and faunal underpasses in providing connectivity for rainforest fauna". En: 2005 International Conference on Ecology and Transportation (ICOET). Raleigh: North Carolina State University.
- Griffin, D. R. (1944). "Echolocation by blind men, bats and radar". *Science*, 100(2609), 589-590.
- Grosselet, M., B. Villa-Bonilla, y G. Ruiz Michael, (2009). "Afectaciones a vertebrados por vehículos automotores en 1.2 km de carretera en el Istmo de Tehuantepec". *Proceedings of the Fourth International Partners in Flight Conference: Tundra to Tropic* 1-5.
- Grupo Selome, S.A. de C.V. Consultoría Ambiental (2011). "Does size matter? Animal crossings in roads of tropical ecosystems in Mexico". International Conference of Ecology and Transportation. Seattle, Washington, EU.
- Guo, Q. (2015). "Island Biogeography Theory: emerging patterns and human effects". *Earth Systems and Environmental Sciences* 32 (1): 1-5.
- Guzmán-Báez, D. J. (2017). "Fototrampeo de mamíferos de la zona sujeta a conservación ecológica Finca Santa Ana, Chiapas" [Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias]. *Repositorio Institucional* – Universidad Autónoma del Estado de México.
- Haddad Lab (2020). *St. Francis satyr. Landscape science for people and for nature*. Disponible en: <http://nickhaddadlab.com/rarest-butterflies/st-francis-satyr/>.
- Haddad, N. M., L. A. Brudvig, J. Clobert, K. F. Davies, A. González, R. D. Holt y W. M. Cook (2015). "Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth's ecosystems". *Science advances* 1 (2): e1500052.
- Halley, D. J. y F. Rosell (2002). "The beaver's reconquest of Eurasia: status, population development and management of a conservation success". *Mammal Review* 32 (3): 153-178.
- Halley, D. J. y F. Rosell (2003). "Population and distribution of European beavers (*Castor fiber*)". *Mammal Review* 46 (2): 91-101.
- Halley, D., F. Rosell y A. Saveljev (2012). "Population and distribution of Eurasian beaver (*Castor fiber*)". *Baltic Forestry* 18 (1): 168-175.
- Heidecke, D. y K. J. Horig. (1986). "Bestands- und Schutzsituation des Elbebibers". *Halle and Magdeburg* 23: 1-14.
- Heilman, G. E., J. R. Strittholt, N. C. Slosser y D. A. Dellasala (2002). "Forest Fragmentation of the Conterminous United States. Assessing Forest Intactness through Road Density and Spatial Characteristics: Forest fragmentation can be measured and monitored in a powerful new way by combining remote sensing, geographic information systems, and analytical software". *BioScience* 52 (5): 411-422
- Hernández-Silva, D. A., M. T. Pulido Silva, I. Zuria, S. A. Gallina Tessaro y G. Sánchez-Rojas (2018). "El manejo como herramienta para la conservación y aprovechamiento de la fauna silvestre: acceso a la sustentabilidad en México". *Acta universitaria* 28 (4): 31-41.

- Hill, J. E., T. L. DeVault y J. L. Belant (2019). "Cause-specific mortality of the world's terrestrial vertebrates". *Global Ecology and Biogeography* 28 (5): 680-689.
- Hector, T., R. Noss, R. Hilsenbeck, J. Guthrie y C. Ward (2015). *The History of Florida Wildlife Corridor Science and Planning Efforts*. Disponible en: <http://floridawildlifecorridor.org/about/history/>.
- Holland, M. B. (2012). "Mesoamerican biological corridor". *Climate and Conservation*: 56-66 Island Press-Center for Resource Economics.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (2007). *Ordenamiento ecológico. Conceptualización*.
- Infra Eco Network Europe (2020). *IENE-Harmonizing Transportation and Nature*. Disponible en: <http://www.iene.info/>.
- Instituto Nacional de Antropología e Historia (2012). *Cumple 40 años la Convención de Patrimonio Mundial*. Ciudad de México: INAH. Disponible en: <https://www.inah.gob.mx/boletines/1609-cumple-40-anos-la-convencion-de-patrimonio-mundial>.
- Iuell, B. (2003). "Wildlife and Traffic: a European handbook for identifying conflicts and designing solutions", en The XXIIInd PIARC World Road Congress World Road Association-PIARC.
- Karmakar R. (2012). "Primates take to ropeway across killer road". *Hindustan Times*. Disponible en: <https://www.hindustantimes.com/india/primates-take-to-rope-way-across-killer-road/story-wFgOFwP5G57yA70IKaNTCN.html>.
- Kendall, K. C., et al. (2008). "Chapter 6: Hair Collection". *Washington, D. C. Island Press*. En: Noninvasive survey methods for North American carnivores.
- Köhler, G., J. R. Cedeño-Vázquez y P. M. Beutelspacher-García (2016). "The Chetumal Snake Census: generating biological data from road-killed snakes. Part 1. Introduction and identification key to the snakes of southern Quintana Roo, Mexico". *Mesoamerican Herpetology*, 3(3).
- Johnson, J. D., L. D. Wilson, V. Mata-Silva, E. García-Padilla, y D. L. De Santis (2017). "The endemic herpetofauna of Mexico: organisms of global significance in severe peril". *Mesoamerican Herpetology* 4: 544-620.
- Laurance, W. F., G. R. Clements, S. Sloan, C. S. O'Connell, N. D. Mueller, M. Goosem y R. Van Der Ree (2014). "A global strategy for road building". *Nature* 513 (7517): 229-232.
- Lee, T., A. P. Clevenger y R. J. Ament (2012). *Highway wildlife mitigation opportunities for the Trans Canada Highway in the Bow River Valley*. Report to Alberta Eco-trust Foundation, Calgary, Alberta.
- León-Vigara, R. (2020). ¡Cuidado! Batrachochytrium dendrobatidis: Un hongo mortal para los anfibios. *Moroccoherps.com.2.0*. Disponible en: <http://www.moroccoherps.com/batrachochytrium/>.
- Ley Federal de Caza. *Diario Oficial de la Federación*, 1952. Disponible en: http://www.ia-consma.com/oficina_virtual/normatividad/1952.pdf.

- Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Impacto Ambiental. *Diario Oficial de la Federación*, 28 de enero de 1988. Disponible en: <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/DO-Fsr/148.pdf>.
- Ley General de Vida Silvestre. *Diario Oficial de la Federación*, 19 de enero del 2018. Disponible en: http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/146_190118.pdf.
- Ley General de Vida Silvestre. *Diario Oficial de la Federación*, 29 de abril del 2020. Disponible en: http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/146_190118.pdf.
- Leyes vigentes en Cámara de Diputados. H. Congreso de la Unión. Disponible en: <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/index.htm>.
- Licea-Vélez, M. (2018). "Cangrejo azul, en peligro por atropellamientos en Veracruz". Televisa.NEWS. Disponible en: <https://noticieros.televisa.com/ultimas-noticias/cangrejo-azul-peligro-atropellamientos-veracruz/>.
- Lindenmayer, D., y J. Fischer (2006). *Landscape change and habitat fragmentation: an ecological and conservation synthesis*.
- Lokschin, L. X., C. P. Rodrigo, J. N. H. Cabral y G. Buss (2007). "Power lines and howler monkey conservation in Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brazil". *Neotropical Primates* 14(2), 76-80.
- López S. P. y N. A. Ferro (eds.). (2006). *Derecho ambiental*. IURE editores.
- Loss, S. R., T. Will y P. P. Marra (2014). "Estimation of bird-vehicle collision mortality on US roads". *The Journal of Wildlife Management* 78 (5): 763-771.
- Maass, J.M. (2003). "Principios generales sobre manejo de ecosistemas". En: *Conservación de Ecosistemas Templados de Montaña en México*. INE, U. S. Fish & Wildlife Service, Ford Foundation, México, D. F., pp. 117-136.
- Maass, M., y H. Cotler (2007). "Protocolo para el manejo de ecosistemas en cuencas hidrográficas". *El manejo integral de cuencas en México: estudios y reflexiones para orientar la política ambiental*: 41-58.
- Malo, J. A., y Molina, D. (2011). Ecolocación y detectores de quirópteros. *Revista Barbastella*, 1-9.
- Mamiraua (2020). *Pesquisa participativa investiga padrões de caça de jacarés e botos usados como isca na pesca da piracatinga*. Instituto de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá. Disponible en: <https://www.mamiraua.org.br/noticias/pesquisa-participativa-investiga-padroes-de-caca-de-jacares-e-botos-usados-como-isca-na-pesca-da-piracatinga>.
- McClure, C. J., H. E. Ware, J. Carlisle, G. Kaltenecker y J. R. Barber (2013). "An experimental investigation into the effects of traffic noise on distributions of birds: avoiding the phantom road". *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 280(1773), 20132290.

- Mendoza Sánchez, J. F. y O. A. Marcos Palomares (2016). *Observatorio de movilidad y mortalidad de fauna en carreteras en México*. Publicación técnica (no. 454). Disponible en: <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt454.pdf>.
- Mendoza, E., T. L. Fuller, H. A. Thomassen, W. Buermann, D. Ramírez-Mejía y T. B. Smith (2013). "A preliminary assessment of the effectiveness of the Mesoamerican Biological Corridor for protecting potential Baird's tapir (*Tapirus bairdii*) habitat in southern Mexico". *Integrative Zoology* 8 (1): 35-47.
- Metatron (2020). *What is the Metatron?* Disponible en: <https://themetatron.weebly.com/>.
- Milko, L. V., N. M. Haddad y S. L. Lance (2012). "Dispersal via stream corridors structures populations of the endangered St. Francis' satyr butterfly (*Neonympha mitchellii francisci*)". *Journal of Insect Conservation* 16 (2): 263-273.
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2015). *Prescripciones técnicas para el diseño de pasos de fauna y vallados perimetrales (segunda edición, revisada y ampliada)*. Documentos para la reducción de la fragmentación de hábitats causada por infraestructuras de transportes (1), 139 pp. Madrid.
- Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (2011). *El medio ambiente y el Medio Rural y Marino en España 2010*. Gobierno de España.
- Montes, C. y O. Sala (2007). "La Evaluación de los ecosistemas del milenio. Las relaciones entre el funcionamiento de los ecosistemas y el bienestar humano". *Ecosistemas* 16 (3).
- Moreno, C. E. (2000). *Métodos para medir la biodiversidad*, vol. 1. Manuales y tesis SEA.
- Moss, C. F., y S. R. Sinha (2003). "Neurobiology of echolocation in bats". *Current opinion in Neurobiology*, 13(6): 751-758.
- Naciones Unidas-México (2020). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Disponible en: <http://www.onu.org.mx/agenda-2030/objetivos-del-desarrollo-sostenible/>.
- Naranjo, E., M. Guerra-Roa, S. Gallina-Tessaro, S. Calmé (2010). "Uso de fauna silvestre en el norte de Mesoamérica: aspectos generales". *Uso y manejo de Fauna Silvestre en el norte de Mesoamérica*. Instituto de Ecología, A.C., ECOSUR. México.
- Ng, S. J., J. W. Dole, R. M. Sauvajot, S. P. Riley y T. J. Valone (2004). "Use of highway undercrossings by wildlife in southern California". *Biological Conservation* 115 (3): 499-507.
- NOM-012-SCT-2-2017. Norma Oficial Mexicana sobre el peso y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en las vías generales de comunicación de jurisdicción federal. *Diario Oficial de la Federación*, 26 de diciembre del 2017.
- NOM-034-SCT2-2011. Señalamiento horizontal y vertical de carreteras y vialidades urbanas. *Diario Oficial de la Federación*, 16 de noviembre del 2011.

- NOM-059-SEMARNAT-2010. Norma Oficial Mexicana de Protección Ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo (Modificación del Anexo Normativo III, publicada el 30 de diciembre de 2010. *Diario Oficial de la Federación*, 14 de noviembre del 2019).
- NOM-059-ECIL-1994. Norma Oficial Mexicana que determina las especies y subespecies de flora y fauna silvestres terrestres y acuáticas en peligro de extinción, amenazadas, raras y las sujetas a protección especial, y que establece especificaciones para su protección. *Diario Oficial de la Federación*, 16 de mayo de 1994.
- Normas Oficiales Mexicanas (2020). Disponible en: <https://www.gob.mx/salud/en/documentos/normas-oficiales-mexicanas-9705>.
- Ocampo, H. A., G., P. Cortés-Calva, L. I. Dávalos y A. Ortega-Rubio (2014). "Las áreas naturales protegidas de México". *Investigación y ciencia* 22 (60): 7-15.
- Ojasti, J. (1993). "Utilización de la fauna silvestre en América Latina. Situación y perspectivas para un manejo sostenible". *Guía FAO* no. 25. Disponible en: <http://www.fao.org/3/t0750s/t0750s00.htm>.
- Olds, A. D., K. A. Pitt, P. S. Maxwell y R. M. Connolly (2012). "Synergistic effects of reserves and connectivity on ecological resilience". *Journal of Applied Ecology* 49 (6): 1195-1203.
- Olsson, M. P., P. Widen y J. L. Larkin (2008). "Effectiveness of a highway overpass to promote landscape connectivity and movement of moose and roe deer in Sweden". *Landscape and Urban Planning* 85 (2): 133-139.
- Ortega-Argueta, A. y A. Contreras-Hernández (2013). "Propuesta de un esquema de seguimiento y evaluación para programas de recuperación de especies en riesgo". *Gestión y política pública* 22 (2): 457-496.
- Panthera (2020). *Plan Jaguar 2030: plan regional para la conservación del felino más grande del continente y sus ecosistemas*. Disponible en: https://static1.squarespace.com/static/5bf3393f5b409be1f882f5d4/t/5bf444b288251bf85f9456d3/1542735028351/Panthera_Jaguar2030Roadmap_ESP_Draft03.pdf.
- Panthera (2020). *Jaguar Corridor Initiative*. Disponible en: <https://www.panthera.org/initiative/jaguar-corridor-initiative>.
- Parks Canada (2020). *Banff National Park*. Disponible en: <https://www.pc.gc.ca/en/pnnp/ab/banff>.
- Pascual-Hortal, L., y S. Saura (2007). "Impact of spatial scale on the identification of critical habitat patches for the maintenance of landscape connectivity". *Landscape and Urban Planning* 83(2-3): 176-186.
- Perzanowski, K. y W. Olech (2007). "A future for European *Bison bonasus* in the Carpathian ecoregion?" *Wildlife Biology* 13 (1): 108-112.
- Plumb, R. E., K. M. Gordon y S. H. Anderson (2003). "Pronghorn use of a wildlife underpass". *Wildlife Society Bulletin (1973-2006)* 31 (4): 1244-1245.

- Pojar, T.M., R.A. Prosen, D.F. Reed, T.N. Woodard (1975). "Effectiveness of a lighted, animated deer crossing sign". *Wildlife Management* 39: 87-91.
- Ponce, D. (1995). "El derecho internacional sobre medio ambiente y desarrollo: la contribución mexicana". *Revista Mexicana de Política Exterior. Las Naciones Unidas en su 50 aniversario* 47: 82.
- Portela, M. B., E. I. Rodrigues, C. A. D. S. R. de Sousa Rodrigues Filho, C. F. Rezende y T. S. D. de Oliveira (2020). "Do ecological corridors increase the abundance of soil fauna?" *Ecoscience* 27 (1): 45-57.
- Pozo-Montuy, G., y J. C. Serio-Silva (2006). "Comportamiento alimentario de monos aulladores negros (*Alouatta pigra* Lawrence, Cebidae) en hábitat fragmentado en Balancán, Tabasco, México". *Acta zoológica mexicana* 22(3): 53-66.
- Pragatheesh, A. (2011). "Effect of human feeding on the road mortality of Rhesus Macaques on National Highway-7 routed along Pench Tiger Reserve, Madhya Pradesh, India". *Journal of Threatened Taxa* 3(4): 1656-1662.
- Probst, R. y A. Gaborik (2011). "Action Plan for the conservation of the White-tailed Sea Eagle (*Haliaeetus albicilla*) along the Danube", en Convention on the Conservation of European Wildlife and Natural Habitats (Bern Convention). *Nature and Environment* 163.
- Procer (2018). *Programa de Conservación de Especies en Riesgo 2012*. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. Disponible en: <https://www.gob.mx/conanp/acciones-y-programas/programa-de-recuperacion-y-repoblacion-de-especies-en-pekigo-de-extincion-u025-2012?state=published>.
- Proctor, M. F., B. N. McLellan, G. B. Stenhouse, G. Mowat, C. T. Lamb y M. S. Boyce (2020). "Effects of roads and motorized human access on grizzly bear populations in British Columbia and Alberta, Canada". *Ursus* 2019 (30e2): 16-39.
- Profepa (2020). "México, segundo lugar en diversidad de tarántulas en el mundo". Disponible en: <https://www.gob.mx/profepa/es/articulos/mexico-segundo-lugar-del-mundo-en-diversidad-de-tarantulas>. [Consulta: 26 de noviembre de 2020].
- Pucek, Z. (1987). "History of the European bison and problems of its protection and management", en *W: Global trends in wildlife management*, 18th IUGB Congress, Jagiellonian University, Kraków, Poland.
- Pulsford, I., D. Lindenmayer, C. Wyborn, B. Lausche, G. L. Worboys, M. Vasilijević y T. Le-froy (2015). "Connectivity conservation management". *Protected area governance and management*: 851-888.
- Quintana, P. (2014). "Fragmentación del ecosistema: un problema ecológico, político y social". *Diario de Xalapa*. Dirección de comunicación de la Ciencia. Disponible en: <https://cdigital.uv.mx/bitstream/handle/123456789/48465/017-CYL-060514.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

- Ramírez García, A. G., A. Cruz León, N. Morales Carrillo y A. I. Monterroso Rivas (2016). "El ordenamiento ecológico territorial: instrumento de política ambiental para la planeación del desarrollo local". *Estudios sociales* 26 (48): 69-99.
- Ramírez-Mejía, D., G. Cuevas y E. Mendoza (2011). "Escenarios de cambio de cobertura y uso de suelo en el Corredor Biológico Mesoamericano-México", en J. F. Mas, G. Cuevas, y R. García (comps.), XIX Reunión SELPER-México. México: UNAM.
- Ramos-Enríquez, M. D. (2014). *Uso de hábitat de los murciélagos (Chiroptera) en la ecoregión del desierto del Bajo Colorado, Baja California, México*. [Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias]. CICESSE, Ensenada, Baja California.
- Rea, R.V. (2012) "Road safety implications of moose inhabiting an urban-rural interface". *Urban Habitats* 7, 8 pp. Disponible en: http://www.urbanhabitats.org/v07n01/moose_full.html [Consulta: 9 de diciembre de 2013].
- Reglamento Interior de la Secretaría de Desarrollo Social, *Diario Oficial de la Federación*, 4 de junio de 1992. Disponible en: http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4669762&fecha=04/06/1992.
- Reglamentos de leyes federales vigentes en la Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión (2020). Disponible en: <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/regla.htm>.
- Reglamento de la Ley General de Vida Silvestre, *Diario Oficial de la Federación*, 9 de mayo del 2014. Disponible en: http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/regley/Reg_LGVS.pdf.
- Retana-Guiascón, O.G. (2006). *Fauna silvestre de México. Aspectos históricos y su gestión y conservación*. Universidad Autónoma de Campeche. ISBN: 968 – 168-1223. 211 pp.
- Riemann, H., R. V. Santes-Álvarez y A. Pombo (2011). "El papel de las áreas naturales protegidas en el desarrollo local: el caso de la península de Baja California". *Gestión y política pública* 20 (1): 141-172.
- Rincón, J. C. (2006). "Las áreas naturales protegidas de México; de su origen precoz a su consolidación tardía". *Scripta Nova. Revista electrónica de geografía y ciencias sociales* 10 (218): 21-98.
- Rivera, M. E. A. (2016). "Gobernanza multinivel, redes de políticas públicas y movilización de recursos: caso de estudio Corredor Biológico Mesoamericano México (CBMM), Chiapas". *Espacios públicos* 19 (47): 51-76.
- Robles de Benito, R. (2009). "Las unidades de manejo para la conservación de vida silvestre y el Corredor Biológico Mesoamericano México". Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México, 129 pp.
- San Vicente, M. G. y P.J. Lozano (2009). "Permeabilidad de dos tramos de carreteras de gran capacidad al paso de grandes y medianos mamíferos en el oeste de Álava". *Munibe Ciencias Naturales. Natur Zientziak* 57: 237-256.

- Sánchez-Colomer, M. R. G., A. V. G. García, E. J. Sanz y T. E. Pinilla (2014). "Efecto de la tipología de las estructuras transversales de paso sobre el uso por la fauna en diferentes tramos de carreteras y líneas de ferrocarril de alta velocidad en España". *Revista Digital del Cedex* 176: 49-56.
- Sarukhán, J. (2017). *Capital natural de México, síntesis (actualizada a 2017): evaluación del conocimiento y tendencias de cambio, perspectivas de sustentabilidad, capacidades humanas e institucionales*. Ciudad de México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Sarukhán, J., J. Carabias, P. Koleff y T. Urquiza-Haas (2012). *Capital natural de México: acciones estratégicas para su valoración, preservación y recuperación*. Ciudad de México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Saura, S. y L. Pascual-Hortal (2007). "A new habitat availability index to integrate connectivity in landscape conservation planning: comparison with existing indices and application to a case study". *Landscape and urban planning* 83(2-3): 91-103.
- Saura, S., y J. Torne (2009). "Conefor Sensinode 2.2: a software package for quantifying the importance of habitat patches for landscape connectivity". *Environmental modelling & software* 24(1): 135-139.
- Saura, S., y L. Rubio (2010). "A common currency for the different ways in which patches and links can contribute to habitat availability and connectivity in the landscape". *Ecography* 33(3): 523-537.
- Schnitzler, H. U. y E. K. Kalko (2001). "Echolocation by Insect-Eating Bats: We define four distinct functional groups of bats and find differences in signal structure that correlate with the typical echolocation tasks faced by each group". *Bioscience* 51(7): 557-569.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2014) *Manual de señalización vial y dispositivos de seguridad*.
- SEMARNAT (2013). *Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de estadísticas ambientales. Indicadores clave y de desempeño ambiental*.
- SEMARNAT (2009). *Programa de acción para la conservación de la especie lobo gris mexicano (Canis lupus baileyi)*. Ciudad de México: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- SEMARNAT, CONABIO, CONAFOR y CONANP. (2017). *Visión Nacional de Manejo Integrado del Paisaje y Conectividad*. Ciudad de México. Disponible en: <https://www.biodiversidad.gob.mx/corredor/cobiored/images/2016/VNMIPVersionFINAL.pdf>.
- Senado de la República, 2014 [13 de mayo de 2020]. Dictamen de las Comisiones Unidas de Medio Ambiente y Recursos Naturales y de Estudios Legislativos, primera iniciativa con proyecto de decreto por el que se reforma el artículo 76 y se adiciona el artículo 76 Bis a la Ley General de la Vida Silvestre. Disponible en: https://infosen.senado.gob.mx/sgsp/gaceta/62/3/2014-12-11-1/assets/documentos/Dic_Med_Amb_art.76_Ley_Gral_Vida_Silvestre.pdf.

- Senner, S., B. Andrés y R. Gates (2017). *Estrategia de conservación de las aves playeras de la ruta del pacífico de las Américas*.
- Seto, K. C., B. Güneralp y L. R. Hutyrá (2012). "Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools". *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109 (40): 16083-16088.
- Sexton, J. O., X. P. Song, M. Feng, P. Noojipady, A. Anand, C. Huang y J. R. Townshend, (2013). "Global, 30-m resolution continuous fields of tree cover: Landsat-based rescaling of MODIS vegetation continuous fields with lidar-based estimates of error". *International Journal of Digital Earth* 6 (5): 427-448.
- Stiebel, R. (2020). "Millstream fish ladder extension work starts Monday". *Victoria News*. Disponible en: <https://www.vicnews.com/community/millstream-fish-ladder-extension-work-starts-monday/>.
- Sparks Jr., J. L. y J. E. Gates (2012). "An investigation into the use of road drainage structures by wildlife in Maryland, USA". *Human-Wildlife Interactions* 6 (2): 311-326.
- Sonoran Joint Venture (2020). Highways, Laws and Birds. Arizona, EU. Disponible en: <https://sonoranjv.org/highways-laws-and-birds/>.
- Sullivan, T.L., A.F. Williams, T.A. Messmer, L.A. Hellings, S.Y. Kyrychenko (2004). "Effectiveness of temporary warning signs in reducing deer-vehicle collisions during mule deer migrations". *Wildlife Society Bulletin* 2004, 32 (3): 907-915.
- Taylor, B. D. y R. L. Goldingay (2003). "Cutting the carnage: wildlife usage of road culverts in north-eastern New South Wales". *Wildlife Research* 30 (5): 529-537.
- Teixeira, F. Z., R. C. Printes, J. C. G. Fagundes, A. C. Alonso y A. Kindel (2013). "Canopy bridges as road overpasses for wildlife in urban fragmented landscapes". *Biota Neotropica* 13(1): 117-123.
- The Reptile Database (2020). The Reptile Database. Disponible en: <http://www.reptile-database.org>. [Consulta: 20 de noviembre de 2020].
- Thompson, P. (2014). *Your pictures of Scotland: 6 - 13 June*. BBC News. Disponible en: <https://www.bbc.com/news/uk-scotland-27821914>.
- Trocmé, M., S. Cahill, J. G. de Vries, H. Farrell, L. Folkesson, G. Fry y J. Peymen (2003). "Habitat fragmentation due to transportation infrastructure". *The European Review*: 8-9. European Commission, Directorate-General for Research, Luxemburgo.
- UN Environment Programme World Conservation Monitoring Centre (2020). *UNEP launches global connectivity conservation project*. Disponible en: <https://www.unep-wcmc.org/news/unep-launches-global-connectivity-conservation-project>.
- U.S. Fish & Wildlife Service (2020). *Mexican Wolf. Southwest Region Ecological Services*. Disponible en: <https://www.fws.gov/southwest/es/mexicanwolf/>.
- Van der Grift, E. A., F. Ottburg, R. Snep, E. van Ingen y H. van Beusekom (2010). "Werkt natuurbrug Groene Woud ook voor amfibieën?" *De Levende Natuur* 111 (2): 87-93.

- Van der Grift, E. A., A. Seiler, C. Rosell y V. S. van der Grift-Simeonova (2017). *Safe roads for wildlife and people: final report of the SAFEROAD Project*.
- Vargas, F., S. Escobar e Y. R. del Ángel (2000). *Áreas naturales protegidas de México con decretos federales (1899-2000)*. Ciudad de México: Instituto Nacional de Ecología-SEMARNAT.
- Velásquez Durán, A. M. (2018). *Resultados de las estrategias de conservación del oso andino en Colombia y efectividad de las tecnologías de monitoreo*.
- Verbeek, T., y B. Tempels (2016). "Measuring fragmentation of open space in urbanised Flanders: an evaluation of four methods. Bélgica: *Revue belge de géographie* 2.
- Verduzco-Mendoza, A., A. Alfaro-Rodríguez y E. Arch-Tirado (2012). "Etología y bioacústica en ratas y cobayos". *Revista Mexicana de Comunicación, Audiología, Otoneurología y Foniatría* 1(1): 7-12.
- Weston, N., M. Goosem, H. Marsh, M. Cohen y R. Wilson (2011). "Using canopy bridges to link habitat for arboreal mammals: successful trials in the wet tropics of Queensland". *Australian Mammalogy* 33 (1): 93-105.
- White, S. N. (2016). "Monitoring Mammal Movement through a Wildlife Underpass and Culvert in Antigonish, Nova Scotia, Using Remote Camera Sensing" (tesis doctoral, Acadia University).
- Worboys, G. L., Ament, R., Day, J. C., Lausche, B., Locke, H., M. McClure y S. Woodley (2016). *Advanced draft, areas of connectivity conservation guidelines*. Gland, Suiza: IUCN.
- WWF (2020). *World Wide Fund for Nature*. Disponible en: https://www.wwf.org.mx/quienes_somos/wwf_mexico_2018/.
- Yanes, M., J.M. Velasco y F. Suárez (1995). "Permeability of roads and railways to vertebrates: the importance of culverts". *Biological conservation*, 71(3): 217-222.
- Yellowstone to Yukon Conservation Initiative (2020). *Publications*. Disponible en: <https://y2y.net/resources/publications/>.
- Yellowstone to Yukon Conservation Initiative (2020). *Our impact*. Disponible en: <https://y2y.net/work/impact/>.
- Zoo, T. (2010). *Ontario Road Ecology Group, A Guide to Road Ecology in Ontario. Prepared for the Environment Canada Habitat Stewardship Program for Species at Risk*, consultada en línea el 16 de septiembre de 2013.

GLOSARIO

Este glosario se elaboró a partir de las definiciones y comentarios estudiados en el marco normativo mexicano y la literatura de este campo de estudio.

Abióticos: Son los componentes químicos y físicos sin vida del medio ambiente que afectan a los organismos vivos y al funcionamiento de los ecosistemas. Todos los componentes no vivos de un ecosistema, como las condiciones atmosféricas, los recursos hídricos, gases, concentraciones de sustancias orgánicas e inorgánicas y los flujos de energía, se denominan por lo tanto factores abióticos.

Acahuales: Los acahuales son elementos de vegetación silvestre en proceso de recuperación, que surge de forma espontánea posterior a un disturbio en el que la vegetación original, generalmente selva tropical o seca, fuera removida para utilizar el espacio para cosechas o la ganadería; una vez que el espacio deja de utilizarse con dichos fines.

Ambiente: El conjunto de elementos naturales y artificiales o inducidos por el hombre que hacen posible la existencia y desarrollo de los seres humanos y demás organismos vivos que interactúan en un espacio y tiempo determinados.

Antrópico: Producido o modificado por la actividad humana.

Área Natural protegida (ANP): Son porciones terrestres o acuáticas del territorio nacional representativas de los diversos ecosistemas, donde el ambiente original no ha sido esencialmente alterado y que producen beneficios ecológicos cada vez más reconocidos y valorados, por lo que corresponden a la superficie terrestre protegida. Se crean mediante decreto presidencial o a través de la certificación de un área cuyos propietarios deciden dedicar a la conservación. La administración y salvaguarda del patrimonio biológico de las ANP federales está a cargo de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP).

Biodiversidad: La variabilidad de organismos vivos de cualquier fuente, incluidos, entre otros, los ecosistemas terrestres, marinos y otros ecosistemas acuáticos y los complejos ecológicos de los que forman parte; comprende la diversidad dentro de cada especie, entre las especies y de los ecosistemas.

Bióticos: Son los organismos vivos que influyen en la forma de un ecosistema. Pueden referirse a la flora y la fauna de un lugar y sus interacciones. Los individuos deben tener comportamiento y características fisiológicas específicas que permitan su supervivencia y su reproducción en un ambiente definido.

Camino: Vía que se construye para transitar.

Conectividad estructural y funcional de los ecosistemas: La conectividad estructural se refiere a la forma en que se construye un corredor. Un corredor o camino conectado tiene una presencia física en el paisaje, y la forma en que los elementos del corredor y el paisaje interactúan es la conectividad estructural. La conectividad funcional se refiere a la forma en que un corredor satisface las necesidades de permeabilidad de las especies. Se considera que un corredor o camino conectado tiene una alta conectividad funcional si permite una gran cantidad de dispersión y movimiento individual y es compatible con los procesos ecológicos. La conectividad estructural resalta el corredor desde una perspectiva del paisaje, y la conectividad funcional resalta el corredor desde la perspectiva de las especies.

Conservación: La protección, cuidado, manejo y mantenimiento de los ecosistemas, los hábitats, las especies y las poblaciones de la vida silvestre, dentro o fuera de sus entornos naturales, de manera que se salvaguarden las condiciones naturales para su permanencia a largo plazo.

Corredor biológico: Espacio geográfico delimitado que proporciona conectividad entre paisajes, ecosistemas y hábitat, naturales o modificados, y asegura el mantenimiento de la diversidad biológica y los procesos ecológicos y evolutivos.

Corredor biológico artificial: son estructuras ecológicas creadas por el humano, que tienen el objetivo de mantener la conectividad entre los ecosistemas; los pasos para fauna son un ejemplo de corredor biológico artificial.

Desarrollo sustentable: Entendiéndose como el desarrollo que busca incorporar en el análisis un enfoque social, político, económico y ambiental de común entendimiento entre las partes. Es el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades.

Desequilibrio ecológico: La alteración de las relaciones de interdependencia entre los elementos naturales que conforman el ambiente, que afecta negativamente la existencia, transformación y desarrollo del hombre y demás seres vivos.

Ecosistema: La unidad funcional básica de interacción de los organismos vivos entre sí y de éstos con el ambiente, en un espacio y tiempo determinados.

Ejemplares o poblaciones nativos: Aquellos pertenecientes a especies silvestres que se encuentran dentro de su ámbito de distribución natural.

Elemento natural: Los elementos físicos, químicos y biológicos que se presentan en un tiempo y espacio determinado sin la inducción del hombre.

Equilibrio ecológico: La relación de interdependencia entre los elementos que conforman el ambiente que hace posible la existencia, transformación y desarrollo del hombre y demás seres vivos.

Especie focal: Especies de fauna en alguna categoría de protección según la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010.

Especies y poblaciones en riesgo: Aquellas identificadas por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y señaladas en la Norma Oficial Mexicana 059-SE-MARNAT- 2010 como probablemente extintas en el medio silvestre, en peligro de extinción, amenazadas o sujetas a protección especial.

Especies y poblaciones migratorias: Aquellas que se desplazan latitudinal, longitudinal o altitudinalmente de manera periódica como parte de su ciclo biológico.

Especies y poblaciones prioritarias para la conservación: Aquellas determinadas por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de acuerdo con los criterios establecidos en la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente y sus reglamentos, para canalizar y optimizar esfuerzos de conservación y recuperación.

Fauna silvestre: Las especies animales que subsisten sujetas a los procesos de selección natural y que se desarrollan libremente, incluyendo sus poblaciones menores que se encuentran bajo control del hombre, así como los animales domésticos que por abandono se tornen salvajes y por ello sean susceptibles de captura y apropiación.

Gregarismo: Es un tipo de relación que establecen diversos miembros de una población cuando se asocian y trabajan juntos para conseguir un objetivo en común con beneficio para todos ellos. Un ser gregario por lo tanto se define como aquel individuo que tiene tendencia a agruparse en manadas, cardúmenes o colonias.

Hábitat: El sitio específico en un medio ambiente físico, ocupado por un organismo, por una población, por una especie o por comunidades de especies en un tiempo determinado.

Holístico: Es la valorización de los elementos partícipes de un proceso como un todo, en lugar de percibir el papel individual que le corresponde a cada uno, se figura una transformación integradora.

Impacto ambiental: Modificación del ambiente ocasionada por la acción del hombre o de la naturaleza.

Medidas de contingencia. Las acciones que se aplicarán cuando se presenten situaciones que pudieran tener efectos sobre los ejemplares, poblaciones o especies de la vida silvestre y su hábitat, afectando negativamente el logro de las metas de que se traten y que se encuentran incorporadas en el plan de manejo.

Megadiverso. Es un término que está relacionado con el concepto de biodiversidad y que se refiere a la gran variedad de formas de vida que existen en la Tierra. Un país megadiverso forma parte del selecto grupo de naciones poseedoras de la mayor cantidad y diversidad de especies.

Morfopedológico: Análisis del suelo que parte de la premisa de la existencia de unidades geomórficas diferenciables, que con frecuencia corresponden a diferencias en la estructura interna, eventos pedogenéticos anteriores o contactos entre geoformas o cuerpos de sedimentación. Estas unidades son jerárquicas y forman parte de un sistema más amplio en el cual se interrelacionan para influir fuertemente en la formación y caracterización del suelo asociado.

Parches artificiales. Espacios cubiertos por vegetación silvestre que fueron creados por el hombre mediante acciones de reforestación, revegetación o restauración ecológica.

Parches naturales. Son áreas de vegetación y/o ecosistemas naturales conservados o semiconservados que han quedado aislados debido a la fragmentación.

Paso para fauna: Estructura transversal al camino destinada a mantener la conectividad entre ecosistemas fragmentados por la construcción de carreteras o ferrocarriles que permiten el cruce de fauna silvestre, aumentando la permeabilidad de la infraestructura.

Planificación estratégica: Es una herramienta de gestión que permite establecer el quehacer y el camino que se debe recorrer para alcanzar las metas previstas, teniendo en cuenta los cambios y demandas que impone su entorno. En este sentido, es una herramienta fundamental para la toma de decisiones al interior de cualquier análisis. La planeación estratégica es un ejercicio de formulación y establecimiento de objetivos y especialmente de los planes de acción que conducirán a alcanzar estos objetivos.

Preservación: El conjunto de políticas y medidas para mantener las condiciones que propicien la evolución y continuidad de los ecosistemas y hábitat naturales, así como conservar las poblaciones viables de especies en sus entornos naturales y los componentes de la biodiversidad fuera de sus hábitats naturales.

Protección: El conjunto de políticas y medidas para mejorar el ambiente y controlar su deterioro.

Remediación. El conjunto de actividades tendentes a resolver, bajo criterios técnicos y mediante medidas de manejo o control, problemas específicos asociados a ejemplares y poblaciones que se tornen perjudiciales, o bien, a la restauración y recuperación del hábitat de las especies silvestres.

Servicios ambientales (ecosistémicos). Beneficios que los ecosistemas aportan al bienestar social, se obtienen principalmente de los procesos y funciones ecológicas propias del mismo, pero también incluyen las percepciones colectivas de los humanos acerca de los ecosistemas y sus acciones sobre ellos.

Taxa o taxón: Es un grupo de organismos emparentados que en una clasificación dada han sido agrupados, asignándole al grupo un nombre en latín, una descripción si es una especie, y un tipo. Para ordenar y clasificar a los seres vivos se emplean una serie de taxones o categorías taxonómicas ordenadas jerárquicamente de modo que cada categoría incluya a las demás o esté incluida en otra. La palabra taxón hace referencia a un objeto concreto, zoológico o botánico, que consiste en una población de organismos (o un grupo de poblaciones) clasificable.

Taxonomía: Es la ciencia que estudia los principios, métodos y fines de la clasificación. Este término se utiliza especialmente en biología para referirse a una clasificación ordenada y jerarquizada de los seres vivos. La taxonomía biológica es una subdisciplina de la biología sistemática que estudia las relaciones de parentesco entre los organismos y su historia evolutiva.

Tramo crítico o zonas negras: Se refiere a sitios de conflicto fauna silvestre-humano. Para el caso de este Manual se refiere a los sitios a lo largo de una infraestructura lineal donde se tiene mayor índice de atropellamientos de fauna y donde es necesario implementar estrategias para erradicar el problema.

Transdisciplinariedad: Connota una estrategia de investigación que atraviesa límites disciplinarios para crear un enfoque holístico. Se aplica a los esfuerzos de investigación centrados en problemas que cruzan los límites de dos o más disciplinas. Conciernen a lo que se encuentra a la vez entre las disciplinas, a través de las diferentes disciplinas y más allá de cada disciplina individual. Su objetivo es la comprensión y uno de los imperativos es la unidad general del conocimiento.

Transecto de Muestreo: Un transecto es un rectángulo situado en un lugar para medir ciertos parámetros de un determinado tipo de vegetación o de fauna. El tamaño de los transectos puede ser variable y depende del grupo a medirse y las condiciones del sitio.

Ungulado: Mamífero que tiene las patas terminadas en pezuña. Son un antiguo superorden de mamíferos placentarios que se apoyan y caminan con el extremo de los dedos, o descienden de algún animal que lo hacía. Típicamente están revestidos de una pezuña, como la cabra, los venados, los ciervos, los alces, entre otros.

Vegetación de galería, ribereña o riparia (del inglés riparian): Son denominaciones de la formación vegetal o bosque caracterizado por su vinculación a la ribera de un río o una entidad hidrológica equivalente. Los bosques de galería son franjas de vegetación ribereña más o menos estrechas, que se disponen a lo largo de los cursos de agua formando túneles de árboles a manera de pasillo.

Vía: Rail de ferrocarril. Calzada construida para la circulación rodada.

Vida silvestre: Los organismos que subsisten sujetos a los procesos de evolución natural y que se desarrollan libremente en su hábitat, incluyendo sus poblaciones menores e individuos que se encuentran bajo el control del hombre, así como los ferales.



COMUNICACIONES
SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

SUBSECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA

DIRECCIÓN GENERAL DE SERVICIOS TÉCNICOS

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Paso para fauna en Natuurbrug Zanderij Crailoo (Holanda).	17
Figura 2. Número de colisiones entre la fauna silvestre y los vehículos por año a lo largo de un tramo de tres kilómetros en la Trans-Canada Highway, en la zona conocida como Dead Man's Flats. Investigación centrada en un Paso Superior para Fauna (PSFA) cuya construcción concluyó en 2004 (Lee, T. <i>et al.</i> , 2012).	18
Figura 3. Orden de relevancia de la planificación.	36
Figura 4. Representación esquemática de a) fragmentación de un ecosistema, b) medida preventiva, c) medida correctora y d) medida compensatoria. Se representa en color verde la vegetación propia del ecosistema y en punteado gris la vegetación de borde.	37
Figura 5. Ruta crítica y alternativas metodológicas para la planificación de un proyecto de infraestructura lineal con criterios de protección ambiental.	40
Figura 6. Teoría de conjuntos.	48
Figura 7. Esquema general de un modelo de idoneidad.	50
Figura 8. Parches de hábitat (manchas verdes) en el contexto de un proceso de corredor biológico discontinuo, que es funcional a partir de áreas focales y parches de vegetación (tomado del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino de España, 2010).	52
Figura 9. Histograma comparativo de la calidad del hábitat entre dos corredores (tomado del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino de España, 2010 y elaborado con Corridor Designer).	55
Figura 10. Ruta de planificación para la construcción de pasos para fauna.	62
Figura 11. Idoneidad de diferentes tipos de pasos para fauna para distintas especies o taxones (tomado de Luell, 2003).	65
Figura 12. Interfaz de <i>Circuitscape</i> . Variables, requerimientos y/o especificaciones que utiliza.	70
Figura 13. Ilustraciones simples de ejemplo de los tipos de datos. A la izquierda está la red de nodos y a la derecha un grid ráster.	71

Figura 14. Ejemplo de interfaz de <i>Circuitscape</i> en la caja de herramientas de <i>ArcGIS</i> .	72
Figura 15. Ejemplo de mapa de flujo de movimiento usando <i>Current Map</i> .	74
Figura 16. Métodos combinados de <i>Circuitscape</i> con la ruta de menor costo para trazar puntos de atracción dentro de corredores conectando áreas protegidas para los tigres en India central. Las áreas con el flujo de corriente alto son las más importantes para los movimientos del tigre y mantienen la red conectada.	75
Figura 17. a) Teoría de circuitos usada para predecir colisiones de vehículos con el venado en Francia (imagen lado izquierdo), b) mapa de conectividad creado usando <i>Circuitscape</i> donde se ve una alta correlación con la mortalidad en carreteras de los anfibios y reptiles, y el uso del hábitat por pescadores en el este de Ontario, Canadá.	76
Figura 18. Ejemplo de mapa usando <i>Circuitscape</i> en donde se muestran cambios de rango proyectados por las condiciones climáticas en 2,903 especies, en respuesta al cambio climático. Las direcciones de las líneas (flechas) representan la dirección de los movimientos modelados de climas inadecuados a climas adecuados por medio de rutas que evitan los usos de suelo humanos.	77
Figura 19. Probabilidad de incendio en el desierto sonorense de Arizona. Se usó un modelo de conectividad utilizando <i>Circuitscape</i> . Las áreas con alto riesgo de incendio correspondieron con datos de áreas quemadas mostrando dónde ocurrieron los incendios forestales desde el año 2000 al 2012.	78
Figura 20. Mapa de corredores usando <i>Linkage Mapper</i> .	79
Figura 21. Imagen de la interfaz del modelo <i>Linkage Mapper</i> en la caja de herramientas de <i>ArcGIS</i> .	80
Figura 22. Rutas de enlace y áreas de concentración de hábitat de la liebre en Oregón, Estados Unidos.	82
Figura 23. Mapa del pino madera blanca, en la frontera entre Estados Unidos y Canadá (Washington y British Columbia).	83
Figura 24. Puntos de atracción y áreas de concentración de hábitat de la liebre en Oregón, Estados Unidos.	84

Figura 25. Áreas de concentración de hábitat para el urogallo, así como los enlaces, las barreras y las oportunidades de restauración.	85
Figura 26. Centralidad de enlaces y áreas de concentración de hábitat de la liebre en Oregón, Estados Unidos.	86
Figura 27. Síntesis de los resultados del trazado de enlaces para obtener prioridades de conservación de conectividad para el tejón americano (<i>Taxidea taxus</i>), en el Valle de Sacramento, California.	87
Figura 28. Casos de estudio y lugares donde se ha aplicado el modelo <i>Conefor</i> . http://www.conefor.org/applications.html	92
Figura 29. Mapa mostrando los valores de diferencial del Índice Integral de Conectividad (IIC) para los fragmentos de bosque y áreas de matorral como sitios potenciales a ser restaurados entre los biotopos Cerro Cahuí y San Miguel la Palotada (El Zotz).	93
Figura 30. Rutas generadas de menos coste a partir del modelo <i>Connectivity Analysis Toolkit</i> .	95
Figura 31. Vistas de pasos para ganado en carreteras. a) Paso Superior Ganadero (PSG) y b) Paso Inferior Ganadero (PIG).	100
Figura 32. a) Paso Inferior para Fauna (PIFA) en Groene Would, Holanda, para diversos tipos de fauna incluyendo anfibios y b) Paso Inferior para Fauna (PIFA) en autopista transcanadiense en su cruce por el Parque Nacional Banff, Alberta, Canadá (fuente: Van der Grift, 2010).	104
Figura 33. Puentes carreteros, ferroviarios y losas de diferente tamaño funcionando como Paso Superior para Fauna (PSFA) ya que permiten el libre paso de la fauna silvestre y la conectividad de los ecosistemas.	105
Figura 34. Obras de drenaje de diversos tipos y tamaños que con adecuaciones pertinentes pueden fungir como pasos mixtos para agua y fauna todo el año (fuente: acceso abierto de internet).	106
Figura 35. Ejemplos de pasos para fauna embebidos en la estructura de la infraestructura para el cruce de anfibios y reptiles (fuente: acceso abierto de internet).	108
Figura 36. Ejemplos de pasos aéreos contruidos principalmente para el cruce de primates (fuente: acceso abierto de internet). Figura a) una cuerda. Figura b) una plataforma de red suspendida mediante dos cables de acero. Figura c) adaptación de un panel de señalización para un paso rígido.	110

Figura 37. Ejemplo de diferentes especies de aves, resultado del impacto con vehículos que transitan en una carretera.	111
Figura 38. Colocación de malla que limita el vuelo de aves y murciélagos a ras de la corona de la infraestructura lineal (fuente: acceso abierto de internet).	112
Figura 39. Colocación de pantallas o de disuasores electrónicos para la dispersión de las aves y murciélagos.	113
Figura 40. Ejemplar de murciélago atropellado por vehículos que transitan en una carretera.	114
Figura 41. a) Esquema de la ecolocación de murciélagos para distinguir presas de obstáculos, b) colocación de malla de alambre y tramados de red que imitan las líneas de árboles (obstáculos) que los murciélagos siguen con ecolocalización para conducirlos por encima de la infraestructura, fuera del área de riesgo (fuente: acceso abierto de internet).	116
Figura 42. a) Paso de fauna desmontable para cangrejos migratorios, Isla Navidad, Australia. b) Paso embebido en la estructura de la carretera (previamente descrito) útil para el paso de fauna migratoria en zonas costeras (fuente: acceso abierto de internet).	117
Figura 43. Pasos de fauna para vertebrados acuáticos (tomado de Notas Técnicas del CIREF, n° 7, 2013).	119
Figura 44. Ejemplos de la colocación de elementos que permiten el movimiento de peces en ambos sentidos cuando el río lleva poco caudal de agua o bien para poder remontar corriente arriba.	120
Figura 45. Paso para fauna acuática en una obra de drenaje del camino a Atkins en el Parque Regional Mill Hill en Langford, Canadá, para permitir el movimiento a contracorriente de salmones. Se proyectó una rampa de la caída de la obra hasta el cuerpo de agua, asegurando que la rampa cuente con pozas pequeñas que retengan el agua y permitan a los organismos remontar la corriente como lo harían si el flujo del río no hubiera sido interrumpido.	121
Figura 46. El nivel del agua y el diseño de las salidas son elementos cruciales para permitir el paso de peces y otros organismos acuáticos como langostinos, moluscos, etcétera. a) Situación ideal. b) El nivel de agua en la tubería es demasiado bajo. c) Hay un desnivel demasiado pronunciado entre la salida del drenaje y el curso fluvial por lo que requiere una rampa como la de la figura anterior.	121

- Figura 47.** Ejemplo de la construcción de banquetas sobre el nivel de agua y repisas en una obra de drenaje adaptada como paso para fauna silvestre. 122
- Figura 48.** Vista del vallado a lo largo de todo el derecho de vía de la autopista transcanadiense en la provincia de Alberta, Canadá. Este vallado de 2.5 m de alto protege de intentos de cruce a la fauna, a la vez que induce su desplazamiento hacia los pasos construidos en esta autopista (fuente: Grupo Selome, S.A. de C.V.). 123
- Figura 49.** Reforestación de un Paso Superior para Fauna (PSFA) para dar continuidad a la vegetación aledaña utilizando especies propias de la zona de diferentes tamaños y tipos con el fin de brindar refugios para animales diversos. 124
- Figura 50.** a) Vista de una canaleta con agua y tierra húmeda para anfibios complementando a un Paso Superior para Fauna (PSFA) adecuado generalmente para mamíferos. b) Pozas retenedoras de agua y condiciones de humedal sobre un Paso Inferior para Fauna (PIFA) usualmente considerado para mamíferos (fuente: acceso abierto de internet). 125
- Figura 51.** a) Vista conceptual (render) de la propuesta de reutilización de una estructura utilizada para el señalamiento vial, que puede ser adaptada para brindar refugio a murciélagos. b) Detalle del interior (fuente: acceso abierto de internet). 130
- Figura 52.** Paso Inferior para Fauna (PIFA), ubicado en la Carretera A2 en Girona, España (fuente: acceso abierto de internet). 140
- Figura 53.** Ecoducto en las Montañas Goats en Montana, Estados Unidos. 141
- Figura 54.** Bordos en las zonas laterales del Paso Inferior para Fauna (PIFA), Parque Nacional Banff, Alberta, Canadá (fuente: Grupo Selome, S.A. de C.V.). 141
- Figura 55.** Configuraciones en los pasos inferiores para fauna. 144
- Figura 56.** Representación gráfica del Paso Inferior para Fauna (PIFA), a) vista en planta y b) perspectiva de la barrera de madera como deflector acústico y aislante visual. 144
- Figura 57.** Vista conceptual de un Paso Inferior para Fauna mediante una estructura tipo puente o losa. 147
- Figura 58.** Vista de Paso Superior para Fauna (PSFA) tipo a) viaducto y b) construido a partir de elementos prefabricados. Parque Nacional Banff, Alberta, Canadá (fuente: Grupo Selome, S.A. de C.V.). 157

Figura 59. Planta y corte transversal sobre eje del Paso Superior para Fauna (PSFA) tipo losa o cajón.	159
Figura 60. Paso Superior para Fauna (PSFA) en el que se ejemplifica el sitio de construcción de banquetas con terminación en rampa para diversas especies (fuente: acceso abierto de internet, modificada para ilustrar).	162
Figura 61. Boceto del interior del Paso Superior para Fauna (PSFA) mediante elementos prefabricados, en el que se ejemplifica la ubicación de los medios tubos de concreto para generar sitios de refugio para diversas especies.	163
Figura 62. Ejemplo de Paso Superior para Fauna (PSFA) con repisas de concreto que permiten el libre desplazamiento de diversas especies (fuente: acceso abierto de internet).	163
Figura 63. Ejemplo de Paso Superior para Fauna (PSFA) con banqueta que permite el cruce de mamíferos medianos y pequeños (fuente: acceso abierto de internet).	164
Figura 64. Vista conceptual de un Paso Superior para Fauna (PSFA) mediante una estructura tipo losa. Andadores de mampostería y refugios creados con herbáceas, arbustos y rocas para la fauna.	166
Figura 65. Vista conceptual de un Paso Superior para Fauna (PSFA) mediante una estructura tipo puente. Andadores de mampostería con protección lateral y refugios creados con herbáceas, arbustos y rocas para la fauna.	166
Figura 66. a) Implementación de repisas y b) banquetas en una obra de drenaje para función mixta.	178
Figura 67. Obra de drenaje de cajón prefabricada de una sección.	179
Figura 68. Obra de drenaje de cajón prefabricada de 2 secciones.	180
Figura 69. Obra de drenaje de cajón prefabricada de 3 secciones.	180
Figura 70. Obras de drenaje inadecuadas para funcionar como pasos mixtos (fuente: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, España, 2015).	183
Figura 71. Vista conceptual de una obra de drenaje de cajón prefabricada de una sección para función mixta mediante inclusión de banquetas y repisas conectadas con el terreno natural.	184

- Figura 72.** Vista conceptual de adaptación de una obra de drenaje de cajón prefabricada de dos secciones (sobrada) para función mixta (paso para fauna y alcantarillado hidráulico). 184
- Figura 73.** Vista conceptual de adaptación de una obra de drenaje de cajón prefabricada de tres secciones (sobrada) para función mixta (paso para fauna y alcantarillado hidráulico). 184
- Figura 74.** Paso embebido para anfibios con rejilla metálica implementada en una carretera en el Parque Nacional Doñana, España (foto de Joaquim Pedro Ferreira, tomada de internet). Canaleta abierta inmersa en la estructura ferroviaria para el paso de anfibios y pequeños reptiles instalada en Japón (imagen de Digizona.com). 197
- Figura 75.** Vista de las barreras sólidas de 0.4-0.6 m de alto, selladas con arcilla en su base y con bordes curvos invertidos para encauzar a los anfibios y reptiles hacia el paso y evitar que trepen por ellas. 200
- Figura 76.** Esquema de paso para fauna embebido en la infraestructura lineal para reptiles de mediano tamaño, anfibios e invertebrados. 200
- Figura 77.** Vista conceptual de un paso para fauna embebido en la infraestructura lineal tipo cajón con respiraderos en tapa superior, repisas y tubos de resguardo apto para herpetofauna. 202
- Figura 78.**
Vista conceptual de un paso para fauna embebido en la infraestructura lineal tipo cajón con rejilla en tapa superior y tubos de resguardo apto para herpetofauna. 202
- Figura 79.** Vista conceptual de un paso para fauna embebido en la infraestructura lineal tipo prefabricada modular de concreto polimérico con barreras curvas de plástico reciclado apto para herpetofauna. 202
- Figura 80.** Paso aéreo para fauna arborícola ubicado en la Autopista Kantunil-Cancún, Quintana Roo (fuente: Grupo Selome, S.A. de C.V.). 211
- Figura 81.** Configuración de los pasos para fauna arborícola con respecto al cuerpo de la infraestructura (N-PRY-CAR-6-01-002). 212
- Figura 82.** Esquema de paso aéreo para fauna arborícola con dos postes de concreto. 213

Figura 83. Esquema en planta del paso aéreo con respecto al eje de la carretera. En el caso de claros largos se deberán colocar postes intermedios.	213
Figura 84. Esquema tipo de los postes de concreto implementados en los pasos para fauna arborícola.	214
Figura 85. Ejemplo ilustrativo de poste de concreto empotrado al terreno natural.	215
Figura 86. Ejemplo de configuración en planta del andador.	215
Figura 87. Esquema de andadores de conexión con arbolado aledaño en paso aéreo utilizando postes de los usados por la Comisión Federal de Electricidad.	216
Figura 88. Ejemplo ilustrativo de configuración del empotramiento del cable de acero al terreno natural.	216
Figura 89. Paso aéreo para fauna arborícola mediante entramado de cuerda y tubos plásticos colocado en caminos de bajo tránsito.	219
Figura 90. Paso aéreo para fauna arborícola utilizando una canastilla tubular y un cable superior para evitar la aproximación de depredadores voladores.	220
Figura 91. Vista conceptual de paso para fauna arborícola con andador de malla ciclónica.	221
Figura 92. Vista conceptual de paso para fauna arborícola con andador de lecho inferior de madera.	222
Figura 93. Ejemplo de obra para paso y protección de fauna voladora en carretera.	227
Figura 94. Ejemplo de vallado lateral de protección en cruce de carretera sobre cuerpo de agua.	228
Figura 95. Esquema de la colocación de ahuyentadores sónicos o ultrasónicos para aves y/o murciélagos. Las dimensiones serán según el proyecto geométrico de la infraestructura lineal.	228
Figura 96. Vista conceptual de una obra para paso y protección de fauna voladora mediante una estructura metálica y malla de polipropileno.	230
Figura 97. Vista conceptual de una obra para paso y protección de fauna voladora mediante una estructura metálica y ahuyentadores (disuasores) sónicos o ultrasónicos.	230

Figura 98. Ejemplo de paso para fauna temporal desmontable para cangrejos migratorios en la Isla Navidad, Australia (fuente: acceso abierto de internet).	234
Figura 99. Esquema de un paso temporal para invertebrados migratorios.	235
Figura 100. Obras de drenaje de caída que ocasionan la fragmentación del hábitat acuático ya que las especies no pueden circular en ambos sentidos de la corriente fluvial o lagunar.	240
Figura 101. Alcantarilla de tubo y losa con caída de agua que no permiten la circulación de fauna acuática en ambos sentidos del escurrimiento. Carretera Juquila-Peñas Negras, Oaxaca.	240
Figura 102. Diferentes ejemplos de pasos para fauna acuática en obras de drenaje de caída.	241
Figura 103. Ejemplo de escalera de peces utilizada como paso para fauna acuática en lugar de alcantarillas de caída.	242
Figura 104. Esquema de dos tipos de paso para peces: a) estructura con desniveles formando represas, y b) tubería de concreto inmersa en el cuerpo de agua.	243
Figura 105. Vista conceptual de un paso de fauna para peces mediante una estructura tipo de canal con desniveles formando pozas con rocas adheridas al concreto para reducir la velocidad del agua.	244
Figura 106. Vista tendido de posteriza y alambrado de acero galvanizado de púas en derecho de vía de carretera.	248
Figura 107. Tendido de malla gradual y cerca ganadera en carreteras.	249
Figura 108. Tendido de malla ciclónica con rodapié metálico continuo y rodapié de malla metálica cerrada para protección de especies de mamíferos pequeños, anfibios y reptiles.	249
Figura 109. Ejemplos de rampas para escape del derecho de vía cercado sin posibilidad de que los animales regresen a éste.	250
Figura 110. Ejemplos de a) rampa de escape conformada con tierra compactada dentro del derecho de vía permitiendo la salida hacia el exterior (diseñada para ungulados de mediano y gran tamaño); b) trampilla metálica para permitir el escape de fauna mediana.	251
Figura 111. Ejemplos de a) guarda ganado (diseñada para mamíferos de gran tamaño); b) pacas electrificadas para evitar el cruce de fauna silvestre sin afectar el tránsito vehicular.	252

Figura 112. Esquema de colocación de malla para protección y guía de fauna cerrando completamente la obra de paso con respecto del talud del terraplén.	252
Figura 113. Tendido de malla ciclónica junto a vialidad carretera con colocación de piedra para evitar que la fauna excave y cruce por debajo de la malla.	253
Figura 114. Esquema de hincado y colocación de malla ganadera o gradual de tres nudos para protección y guiado a paso de fauna.	254
Figura 115. Esquemas de colocación e hincado de posteriza en zona de terraplén, llano y corte junto a vialidad carretera.	254
Figura 116. Ejemplo de colocación de barrera de madera en el Paso Inferior para Fauna (PIFA) tipo Ecoducto o Losa.	255
Figura 117. Pantalla de policarbonato con calcomanías o pegatinas reflejantes, así como figuras con siluetas de aves depredadoras para evitar que las aves choquen con la barrera transparente.	256
Figura 118. Señal preventiva SP-48 FAUNA SILVESTRE.	260
Figura 119. Señal preventiva SP-48 FAUNA SILVESTRE con el pictograma “jaguar”.	260
Figura 120. Señal preventiva SP-48 FAUNA SILVESTRE con el pictograma “mono”.	261
Figura 121. Señal preventiva SP-48 FAUNA SILVESTRE con el pictograma “oso”.	261
Figura 122. Señal preventiva SP-48 FAUNA SILVESTRE con el pictograma “zorra”.	262
Figura 123. Ejemplo de aplicación de la señal preventiva SP-48 FAUNA SILVESTRE con el pictograma “jaguar”.	263
Figura 124. Ejemplo de aplicación de la señal preventiva SP-48 FAUNA SILVESTRE previa a un Área Natural Protegida (ANP).	264
Figura 125. Señalización vial para indicar el motivo de la restricción y su temporalidad.	265
Figura 126. Señalización vial para incentivar a los usuarios a proteger a las mariposas.	265
Figura 127. Señalización vial para incentivar a los usuarios a proteger a las mariposas.	266

Figura 128. Señalización vial para incentivar a los usuarios a proteger a las mariposas.	266
Figura 129. Ejemplo de a) Ranera Perico (<i>Leptophis ahaetulla</i>) y b) Garrobo (<i>Ctenosaura similis</i>) reptil. Atropellados en las carreteras Tintal-Playa del Carmen, Quintana Roo, y Villahermosa-Escárcega, Tabasco, respectivamente (fuente: Grupo Selome, S.A. de C.V.).	267
Figura 130. Ejemplo de aves atropelladas a lo largo de los tramos en operación de carreteras en México: a) Chachalaca Oriental (<i>Ortalis vetula</i>) y b) Carpintero Cheje (<i>Melanerpes aurifrons</i>) (fuente: Grupo Selome, S.A. de C.V.).	268
Figura 131. a) Ejemplar de Tarántula Yucateca (<i>Tliltocatl epicureanus</i>) atropellada en el tramo carretero El Tintal-Playa del Carmen, Quintana Roo (fuente: Grupo Selome, S.A. de C.V.). b) Cangrejos Azules (<i>Cardisoma guanhumi</i>) propensos de atropello en Veracruz durante su época reproductiva (fuente: Licea-Vélez, 2020).	270
Figura 132. Propuesta de señal preventiva SP-48 FAUNA SILVESTRE con el pictograma “reptiles”.	272
Figura 133. Propuesta de señal preventiva SP-48 FAUNA SILVESTRE con el pictograma “aves”.	273
Figura 134. Propuesta de señal preventiva SP-48 FAUNA SILVESTRE con el pictograma “invertebrados”.	274
Figura 135. Fotografía panorámica en donde se ubica el paso para fauna (fuente: Grupo Selome, S.A. de C.V.).	277
Figura 136. Fotografías de los accesos del paso para fauna (fuente: Grupo Selome, S.A. de C.V.).	278
Figura 137. Representación esquemática de la superficie con un diámetro aproximado de 100 m sugerido como distancia mínima de los transectos a utilizar para realizar el muestreo de la fauna en las inmediaciones de los pasos para fauna.	280
Figura 138. Representación esquemática de las franjas de muestreo en paralelo a la infraestructura lineal (franjas achuradas) fuera del derecho de vía y a cada lado del paso para fauna.	281
Figura 139. Muestreo directo de anfibios (tomado de León-Vigara, 2020).	282

Figura 140. Ejemplo de la búsqueda y manipulación de los reptiles para su identificación y registro (fuente: Grupo Selome, S.A. de C.V.).	283
Figura 141. Ejemplo de la técnica de registro de aves mediante el recorrido a lo largo de un transecto con estaciones de observación definidas a distancias regulares e identificación de aves que se ubican a distancias establecidas a partir del tipo de vegetación y topografía de la zona (fuente: Grupo Selome, S.A. de C.V.).	284
Figura 142. Ejemplo de los métodos directos para el registro de la fauna silvestre: a) uso de trampa Tomahawk, b) colocación de cámara trampa y c) captura temporal de roedor para su clasificación taxonómica (fuente: Grupo Selome, S.A. de C.V.).	284
Figura 143. Ejemplo de identificación de especies de mamíferos por medios indirectos: a) cráneo de jabalí (<i>Pecari tajacu</i>); b) cadáver de venado cola blanca (<i>Odocoileus virginianus</i>); c) piel de tlacoyote (<i>Taxidea taxus</i>), y d) cadáver de liebre (<i>Lepus alleni</i>) (fuente: Grupo Selome, S.A. de C.V.).	285
Figura 144. Ejemplo de identificación de especies de mamíferos por medio de huellas: a) Puma (<i>Puma concolor</i>); b) Mapache (<i>Procyon lotor</i>); c) Tlacuache (<i>Didelphis virginiana</i>), y d) Cacomixtle (<i>Bassariscus astutus</i>) (fuente: Grupo Selome, S.A. de C.V.).	286
Figura 145. Procedimiento de la colocación de cámaras trampa en los accesos de los pasos para fauna. (fuente: Grupo Selome, S.A. de C.V.).	289
Figura 146. Ejemplo del procedimiento de la colocación de cámaras trampa para el monitoreo de pasos aéreos para fauna arborícola (fuente: Grupo Selome, S.A. de C.V.).	290
Figura 147. Ejemplo de la colocación de las estaciones de sedimento (capa cero finos) para el registro de huellas dentro de los pasos para fauna u obras de drenaje que funcionan como tal (fuente: Grupo Selome, S.A. de C.V.).	291
Figura 148. Ejemplo de la identificación de individuos de ocelote a partir del patrón presente en sus manchas (imágenes de Guzmán-Báez, 2017).	292
Figura 149. Ejemplo de la colocación de alambre de púas que funciona como trampa de pelo en los accesos del Paso Superior para Fauna (PSFA).	293

Figura 150. Ejemplos de la colecta de pelo de mamíferos a partir de la colocación de alambre de púas (imágenes tomadas de Kendall <i>et al.</i> , 2008, y Clevenger y Sawaya, 2010).	293
Figura 151. Ejemplo de la colecta de pelo para mamíferos medianos o pequeños mediante la colocación de trampas de pelo tipo cubículo.	294
Figura 152. Ejemplo de algunos animales atropellados en carreteras de México. a) Perro (<i>Canis lupus</i>), b) Tamandúa norteño (<i>Tamandua mexicana</i>), c) Tlacuache norteño (<i>Didelphis virginiana</i>), d) Tortuga monjita de monte (<i>Rhinoclemmys areolata</i>), e) Murciélago frutero (<i>Artibeus jamaicensis</i>), f) Perico pecho sucio (<i>Eupsittula nana</i>), y g) Ranera perico (<i>Leptophis ahaetulla</i>) (fuente: Grupo Selome, S.A. de C.V.).	295
Figura 153. Ejemplo de Mapa de las Áreas Críticas de Atropellos (ACA), tramo carretero Compostela-Bucerías, Nayarit, con relación al corredor biológico identificado (fuente: Grupo Selome, S.A. de C.V.).	296
Figura 154. Ejemplar de Tarántula Yucateca (<i>Tliltocatl epicureanus</i>) atropellada en el tramo carretero El Tintal-Playa del Carmen, Quintana Roo (fuente: Grupo Selome, S.A. de C.V.).	297

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Número de colisiones entre la fauna silvestre y los vehículos antes y después de la construcción del Paso Superior para Fauna, así como los costos derivados por las colisiones, en un tramo de tres kilómetros en la Trans Canada Highway.	19
Tabla 2. Densidades orientativas de estructuras transversales para la permeabilización de infraestructuras lineales.	67
Tabla 3. Matriz de tipos de estructuras que pueden ser utilizadas por cada grupo de fauna dependiendo de su forma de vida y tipo de vegetación en la que se realice el proyecto de infraestructura lineal.	102
Tabla 4. Recomendaciones de densidad para colocación de pasos para fauna en la infraestructura lineal integrando resultados de propuestas internacionales y considerando fauna mexicana.	137
Tabla 5. Recomendaciones de pasos para fauna en México.	139
Tabla 6. Recomendaciones de conservación a realizar en los pasos para fauna silvestre en la infraestructura lineal.	300
Tabla 7. Desarrollo de un proyecto ejecutivo de pasos para fauna	308

ÍNDICE DE PLANOS

Plano 1. Planta tipo de Paso Inferior para Fauna (PIFA) mediante bóveda.	150
Plano 2. Corte A-A', B-B' y detalles de Paso Inferior para Fauna (PIFA) mediante bóveda.	151
Plano 3. Planta tipo de Paso Inferior para Fauna (PIFA) mediante una estructura tipo losa.	152
Plano 4. Corte A-A', B-B' y detalles de Paso Inferior para Fauna (PIFA) mediante una estructura tipo losa.	153
Plano 5. Planta tipo, corte A-A' y B-B' de Paso Inferior para Fauna (PIFA), mediante una estructura tipo puente o losa.	154
Plano 5-A. Detalles de Paso Inferior para Fauna (PIFA), mediante una estructura tipo puente o losa.	155
Plano 6. Planta tipo y corte A-A' de Paso Superior para Fauna (PSFA) mediante cajón.	168
Plano 6-A. Elevación de Paso Superior para Fauna (PSFA) mediante cajón.	169
Plano 7. Elevación de Paso Superior para Fauna (PSFA) de 3x3 m mediante cajón prefabricado.	170
Plano 8. Elevación de Paso Superior para Fauna (PSFA) de 2x2 m mediante cajón prefabricado.	171
Plano 9. Elevación de Paso Superior para Fauna (PSFA) de 2x1.5 m mediante cajón prefabricado.	172
Plano 10. Elevación de Paso Superior para Fauna (PSFA) de 1.5x1.5 m mediante cajón prefabricado.	173
Plano 11. Planta tipo, corte A-A' y elevación de obra de drenaje adaptada para función mixta mediante losa.	186
Plano 11-A. Detalles de obra de drenaje adaptada para función mixta mediante losa.	187
Plano 12. Elevación de obra de drenaje adaptada para función mixta mediante cajón de mampostería.	188
Plano 12-A. Detalles de obra de drenaje adaptada para función mixta mediante cajón de mampostería.	189

Plano 13. Elevación de obra de drenaje adaptada para función mixta mediante bóveda.	190
Plano 13-A. Detalles de obra de drenaje adaptada para función mixta mediante bóveda.	191
Plano 14. Elevación de paso para fauna habilitado con estructura para obra de drenaje prefabricada de un cajón.	192
Plano 14-A. Detalles de obra de drenaje adaptada para función mixta mediante cajón prefabricado.	193
Plano 15. Elevación de paso para fauna habilitado con estructura para obra de drenaje prefabricada de doble cajón.	194
Plano 16. Elevación de paso para fauna habilitado con estructura para obra de drenaje prefabricada de triple cajón.	195
Plano 17. Planta tipo y corte A-A' de paso para fauna embebido en la infraestructura lineal mediante cajón prefabricado.	204
Plano 18. Elevación de paso para fauna embebido en la infraestructura lineal mediante cajón prefabricado con rejilla.	205
Plano 19. Elevación de paso para fauna embebido en la infraestructura lineal mediante cajón prefabricado con respiraderos.	206
Plano 20. Detalles de paso para fauna embebido en la infraestructura lineal mediante cajón prefabricado.	207
Plano 21. Planta tipo y corte A-A' de paso para fauna embebido en la infraestructura lineal mediante cajón prefabricado de concreto polimérico (ver figura 79).	208
Plano 21-A. Detalles de paso para fauna embebido en la infraestructura lineal mediante cajón prefabricado de concreto polimérico.	209
Plano 22. Planta tipo y corte A-A' de paso aéreo para fauna arborícola.	224
Plano 23. Elevación de paso aéreo para fauna arborícola.	225
Plano 23-A. Detalles de paso aéreo para fauna arborícola.	226
Plano 24. Planta tipo y corte A-A' de obra para paso y protección de fauna voladora implementando malla de protección.	232

Plano 25. Planta tipo, corte A-A' y corte B-B' de un paso temporal para invertebrados migratorios con capacidad trepadora.	238
Plano 26. Planta tipo, corte A-A' y corte B-B' de paso para fauna acuática mediante canal y obra de drenaje.	246
Plano 26-A. Elevación de paso para fauna acuática mediante adaptación de obra de drenaje.	247

MANUAL DE DISEÑO DE PASOS PARA FAUNA SILVESTRE EN CARRETERAS

Primera edición. Se terminó de imprimir en el mes de noviembre de 2020 en *Grupo Atril, excelencia editorial y digital*. Av. Real de los Reyes, núm. 207-11, Col. Los Reyes, Alcaldía Coyoacán, Ciudad de México, C.P. 04330. Tel. 55-1517-8736. Correo electrónico: atrileditorial@yahoo.com. El tiro constó de 50 ejemplares. La edición estuvo a cargo de la Dirección General de Servicios Técnicos de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.